POLYPUBLIE

Traitement des arythmies cardiaques par ablation micro-onde

Dany Bérubé

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

Date	1998
Type	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis Thèse de doctorat/Ph.D. thesis
URL de PolyPublie PolyPublie URL	https://publications.polymtl.ca/6870/
Conditions d'utilisation Terms of use	© Tous droits réservés / All rights reserved
Référence Citation	Bérubé, D. (1998). Traitement des arythmies cardiaques par ablation micro-onde [Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/6870/

Détails de la thèse
Thesis details

Directeurs de recherche Advisors	Pierre Savard, & Fadhel M. Ghannouchi
Programme Program	Non spécifié

Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal
https://publications.polymtl.ca

INFORMATION TO USERS

This manuscript has been reproduced from the microfilm master. UMI films the text directly from the original or copy submitted. Thus, some thesis and dissertation copies are in typewriter face, while others may be from any type of computer printer.

The quality of this reproduction is dependent upon the quality of the copy submitted. Broken or indistinct print, colored or poor quality illustrations and photographs, print bleedthrough, substandard margins, and improper alignment can adversely affect reproduction.

In the unlikely event that the author did not send UMI a complete manuscript and there are missing pages, these will be noted. Also, if unauthorized copyright material had to be removed, a note will indicate the deletion.

Oversize materials (e.g., maps, drawings, charts) are reproduced by sectioning the original, beginning at the upper left-hand corner and continuing from left to right in equal sections with small overlaps. Each original is also photographed in one exposure and is included in reduced form at the back of the book.

Photographs included in the original manuscript have been reproduced xerographically in this copy. Higher quality 6" x 9" black and white photographic prints are available for any photographs or illustrations appearing in this copy for an additional charge. Contact UMI directly to order.

UMI®

Bell & Howell Information and Learning
300 North Zeeb Road, Ann Arbor, MI 48106-1346 USA
800-521-0600

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

TRAITEMENT DES ARYTHMIES CARDIAQUES PAR ABLATION MICRO-ONDE

DANY BÉRUBÉ

INSTITUT DE GÉNIE BIOMÉDICAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME PHILOSOPHIAE DOCTOR (Ph.D.)

(GÉNIE BIOMÉDICAL)

JUIN 1998

© Dany Bérubé, 1998

National Library of Canada
Acquisitions and Bibliographic Services
395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale du Canada
Acquisitions et services bibliographiques
395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-38718-6

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée:

TRAITEMENT DES ARYTHMIES CARDIAQUES PAR ABLATION MICRO-ONDE

présentée par: BÉRUBÉ Dany

en vue de l'obtention du diplôme de: Philosophiae Doctor

a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de:

M. BERTRAND Michel, Ph.D., président

M. SAVARD Pierre, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. GHANNOUCHI Fadhel M., Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. AKYEL Cevdet, Ph.D., membre

M. LABONTÉ Sylvain, Ph.D., membre externe

À mes parents

REMERCIEMENTS

Je désire premièrement remercier mon directeur de recherche, M. Pierre Savard pour son professionnalisme en tant que pédagogue, pour sa qualité de superviseur et pour ses qualités humaines. Son apport a grandement contribué à rendre ce projet de recherche clair et limpide et à en faciliter la réalisation. Je désire également remercier mon codirecteur, M. Fadhel Ghannouchi pour toute l'aide et le support technique apportés durant mes études de cycle supérieur. Sa présence a contribué à faciliter la compréhension et la maîtrise de toute la partie micro-onde abordée au cours de ce projet. De plus, M. Ghannouchi a toujours fait en sorte que l'équipement informatique et l'instrumentation micro-onde soient adéquats.

Je désire remercier spécialement le technicien du laboratoire de micro-onde, M. Jules Gauthier, pour son expertise technique et ses commentaires pertinents qui ont grandement contribué à la réalisation de ce projet. D'autres personnes ont également contribué à leur façon tel M. Cevdet Akyel pour le prêt d'équipements, M. Pierre Fortier et M. Frank Molin lors des tests cliniques à l'hôpital du Sacré-Coeur, M. François Beauregard et M. René Archambault pour leurs conseils techniques ainsi que tous les étudiants du laboratoire de micro-onde et de l'Institut de génie biomédical avec qui j'ai eu le privilège d'entretenir des conversations techniquement constructives ou des relations amicales. Leur présence a fait en sorte que ce séjour fut des plus agréables.

J'aimerais remercier ma famille qui m'a toujours encouragé dans la poursuite de mes études, dans les bons comme dans les mauvais moments.

Un remerciement spécial à la compagnie Fidus Medical Technology qui m'a très bien accueilli et m'a donné les ressources nécessaires à l'avancement de mes recherches lors de mon séjour en Californie.

J'exprime ma gratitude envers les organismes subventionnaires qui m'ont appuyé financièrement. Le FCAR pour les bourses accordées lors de ma maîtrise et mon doctorat ainsi que le CRSNG pour la bourse accordée au doctorat. Sans la contribution financière de ces organismes gouvernementaux, il m'aurait été impossible de réaliser ce projet.

RÉSUMÉ

Depuis quelques années, les maladies cardiaques viennent en tête de liste en ce qui concerne les causes de décès en Amérique du Nord. Quoique très variés, ces troubles peuvent être divisés en deux grandes parties: ceux reliés à un problème mécanique, telle l'insuffisance cardiaque causée par l'infarctus du myocarde ou l'hypertension et ceux reliés à certains dérèglements des phénomènes électriques amenant des troubles de rythmes. Dans cette catégorie, on peut notamment citer le syndrome de Wolff-Parkinson-White (WPW), le flutter et la fibrillation auriculaire ainsi que la tachycardie ventriculaire. Ces arythmies sont causées par un substrat anatomique supportant et entretenant l'arythmie. Ce substrat diffère d'une arythmie à l'autre. Par exemple, le substrat responsable des rythmes ventriculaires rapides dans le syndrome de WPW est un faisceau très fin de fibres musculaires joignant les oreillettes et les ventricules. Pour la tachycardie ventriculaire post-infarctus, le substrat est composé de fibres myocardiques ischémiées situées au pourtour de la zone infarcie.

Avant les années 1980, il était difficile de traiter ces troubles de rythme, et les principaux traitements disponibles consistaient en médicaments anti-arythmiques. Cependant, il s'est avéré que certains médicaments pouvaient quelquefois favoriser l'arythmie au lieu de la prévenir. Au milieu des années 1980, une technique est venue révolutionner le traitement des arythmies: l'ablation radiofréquence (RF) par cathéter. Cette technique vise à détruire le substrat supportant les troubles de rythme à l'aide d'un cathéter que l'on insère dans le muscle cardiaque via une veine ou une artère. Le traitement consiste à positionner l'extrémité du cathéter à proximité du substrat et à faire circuler un courant RF de 500 kHz afin de provoquer une élévation de température des

fibres myocardiques. Lorsque la température atteint 48 °C, des dommages irréversibles sont provoqués au niveau du myocarde et les fibres musculaires sont remplacées par du tissu cicatriciel à base de collagène et d'élastine. Ce nouveau tissu n'ayant pas la capacité de conduire l'onde de dépolarisation, le substrat est détruit et l'arythmie ne peut plus apparaître. Ce traitement est donc curatif. L'ablation RF donne de très bons résultats pour certains types d'arythmies tel le syndrome de WPW où la zone à détruire est très petite et située à la superficie de l'endocarde. Cependant, lorsque le traitement d'une arythmie requiert une lésion dont le volume est important et situé plus profondément à l'intérieur du myocarde, l'ablation RF produit des résultats décevants. Le sujet de cette thèse porte sur l'utilisation de l'énergie micro-onde afin de traiter les arythmies cardiaques pour lesquelles l'ablation RF est peu efficace. Il est permis de croire que les micro-ondes, de par leurs propriétés et leurs interactions avec la matière, seront en mesure de provoquer des lésions de taille et de profondeur adéquates dans le traitement de quelques arythmies cardiaques bien ciblées.

Afin de comprendre les différences possibles entre les lésions produites par l'ablation RF et l'ablation micro-onde, notamment en présence d'une zone myocardique ayant subit un infarctus, des mesures de permittivité complexe (ε^*) ont été effectuées entre 915 MHz et 6.44 GHz (à 37 °C et 60 °C) sur des échantillons de myocarde sain et infarci, ainsi que sur du sang provenant de quatre sujets canins. Ces échantillons ont aussi été utilisés afin de mesurer la conductivité électrique (σ) à 500 kHz. Pour les mesures de permittivité, une méthode réflectométrique utilisant une sonde coaxiale a été choisie. Celle-ci consiste à mesurer le coefficient de réflexion généré à l'interface d'un câble coaxial semi-rigide et l'échantillon biologique avec un réflectomètre six-port. Une méthode permettant de définir le plan de référence au bout de la sonde coaxiale à l'aide de

de liquides dont la permittivité est connue a d'ailleurs été développée. Un banc de mesure automatisé a aussi été monté au laboratoire d'hyperfréquence. Lorsque le coefficient de réflexion est obtenu par le réflectomètre, on doit utiliser un modèle mathématique afin de déterminer la permittivité complexe. Plusieurs de ces méthodes sont disponibles dans la littérature. Cependant, tous ces modèles ont été développés et testés sur des milieux diélectriques présentant peu de pertes et aucune étude comparative n'était disponible lorsque l'on désirait étudier la précision de ces modèles lors de mesures sur des milieux présentant des pertes diélectriques significatives aux fréquences micro-onde. On a donc choisi d'étudier la précision de quatre différents modèles afin de sélectionner celui présentant la précision optimale lors des mesures sur les échantillons biologiques. Il s'est avéré que le modèle de la ligne virtuelle proposé par Ghannouchi et Bosisio est celui présentant une précision optimale.

Les résultats des mesures ont démontré que la permittivité complexe des échantillons de myocarde sain, infarci ainsi que du sang sont très similaires. Il a aussi été observé que la permittivité complexe ne variait pas avec la température à 2.45 GHz. Cependant, si l'on s'écarte de cette fréquence, des variations de permittivité avec la température sont présentes. En ce qui concerne les mesures de conductivité électrique, une méthode tétrapolaire a été utilisée à 500 kHz et validée sur des solutions salines. Des différences statistiquement significatives ont été obtenues lors des mesures sur les mêmes échantillons biologiques: la conductivité électrique du myocarde infarci est supérieure d'environ 65 % à celle d'un myocarde sain. Cela peut s'expliquer par la grande concentration de liquide extracellulaire présent autour des chaînes de biopolymère formant le collagène présent dans la zone infarcie. La concentration volumique de ce fluide étant plus élevée dans cette zone, il s'ensuit que la conductivité à 500 kHz est plus grande. Les valeurs obtenues ont été utilisées par la suite dans des

simulations afin de modéliser la déposition d'énergie en ablation RF et micro-onde. Pour l'ablation micro-onde, l'invariabilité de la permittivité en fonction de la température à 2.45 GHz indique que la déposition d'énergie sera constante dans le temps lors d'une procédure réelle, et la similarité des valeurs mesurées pour le myocarde sain, infarci et pour le sang indique que, pour un applicateur d'énergie micro-onde, le milieu est à toute fin pratique homogène, même en présence d'un infarctus. En ce qui concerne l'ablation RF, la grande conductivité électrique de la zone infarcie peut faire en sorte que la densité de courant électrique est plus grande dans cette partie que dans une zone saine. Ce faisant, le chauffage de la zone infarcie peut s'effectuer au détriment de la zone formée de fibres musculaires encore vivantes. Étant donné que le substrat supportant la tachycardie ventriculaire post-infarctus est constitué de ces fibres, l'ablation de ces dernières pourrait être rendue difficile. Cependant, cela n'a pas encore été clairement observé et la conduction thermique à l'intérieur du myocarde peut avoir comme conséquence de distribuer plus uniformément l'énergie thermique à travers ces deux zones.

On s'est par la suite attaqué à la conception d'un système d'ablation micro-onde. Un système fonctionnel a été conçu au laboratoire d'hyperfréquence. Ce système possède quelques caractéristiques intéressantes comme la capacité de détecter la formation de coagulum au bout de l'applicateur lorsque la température devient trop élevée et la possibilité d'enregistrer le signal électrique endocardique lorsque l'énergie micro-onde est appliquée.

Une fois la conception du générateur effectuée, on a étudié différentes configurations d'applicateurs d'énergie. Les configurations étudiées dans cette partie

sont les monopôles avec et sans capuchon, les antennes hélicoïdales et les antennes flexibles imprimées sur un substrat diélectrique. Les trois premières configurations montrent des profondeurs de pénétration intéressantes pour effectuer l'ablation de substrats arythmogènes profonds. Pour les antennes flexibles imprimées, on devra utiliser une fréquence de 915 MHz afin d'obtenir une bonne adaptation, leur adaptation à 2.45 GHz étant médiocre. Des méthodes sont présentées afin d'amener une structure d'une longueur quelconque en résonance à 915 MHz. La profondeur de pénétration obtenue à l'aide de ce type d'applicateur est cependant passablement limitée.

Des résultats obtenus sur cinq patients atteints de flutter auriculaire de type I sont aussi présentés: deux d'entre eux ont été réalisés à l'hôpital du Sacré-Coeur de Montréal et les trois autres à Lisbonne au Portugal. Les résultats obtenus en ablation micro-onde s'avèrent intéressants et encourageants. Cependant, les applicateurs doivent encore être améliorés afin d'obtenir des taux de succès plus élevés, de diminuer le temps de la procédure et de faciliter la tâche du cardiologue lors du positionnement du cathéter.

Cette thèse présente donc une continuité allant de l'obtention de données physiques utiles pour la compréhension des phénomènes en cause jusqu'à l'application clinique de cette nouvelle technique en passant par la construction d'une source et la conception assistée par ordinateur d'applicateurs micro-onde. L'originalité du travail réside dans le fait que tous les aspects du traitement d'arythmies cardiaques par micro-onde ont été abordés: les aspects théoriques, cliniques, de conception, de simulation, d'implémentation, de production et de sécurité pour le patient. Des résultats non disponibles dans la littérature avant le début de ce travail ont été présentés, des systèmes ont été conçus et des recommandations amenées afin de concevoir un système d'ablation

permettant aux cardiologues de traiter de façon efficace et curative les patients atteints de diverses formes d'arythmies difficilement traitables autrement.

ABSTRACT

Cardiac diseases are the most important cause of death in North America. These diseases can be divided into two major categories: the mechanical troubles, like the low output caused by myocardial infarction, and the electrical abnormalities causing rhythm disturbances. In this category, we can mention the Wolff-Parkinson-White (WPW) syndrome, atrial flutter, atrial fibrillation and ventricular tachycardia. These arrhythmias are caused by an anatomical substrate sustaining the rhythm abnormality. This substrate differs from an arrhythmia to another. For example, the substrate responsible for the fast ventricular rhythm in the WPW syndrome is a thin myocardial fiber bundle joining the atrium to the ventricle. Another example is the post-infarction ventricular tachycardia where the substrate sustaining the reentry loop is constituted of ischemic myocardial fibers habitually located at the periphery of the infarction.

Before the 1980's, it was difficult to treat rhythm disturbances and anti-arrhythmogenic drugs were the only available treatment. However, it has been observed that these drugs had sometimes pro-arrhythmic effects. In the middle of the 1980's, clinical electrophysiology has been revolutionized by a new technique called radiofrequency (RF) ablation. This technique consists of ablating the physiological substrate sustaining the rhythm disturbances by using a catheter inserted into the cardiac muscle via a vein or an artery. The tip of the catheter is positioned close to the physiological substrate and a 500 kHz current is applied to increase tissue temperature. When the temperature of myocardial fibers reaches 48 °C, irreversible damages are created and the tissue is replaced by conjunctive tissue. This tissue cannot sustain the depolarization wave, the arrhythmia disappears and the patient is cured. RF ablation is

very effective when the zone to ablate is small and near the endocardial surface. However, when the arrhythmia treatment requires a large and deep lesion, the results obtained with the RF ablation are disappointing. This thesis has for subject the utilization of microwave energy for the treatment of cardiac arrhythmias where the efficiency of RF ablation is poor. Indeed, one can believe that microwaves, because of their specific properties and interactions with the biological tissue, can produce larger and deeper lesions required to treat some specific cardiac arrhythmias.

In order to understand the differences between RF and microwave ablation, especially in the presence of an infarcted myocardial zone, measurements of complex permittivity (ε^*) were done between 915 MHz and 6.44 GHz (and between 37°C and 60°C) on healthy and infarcted myocardial samples, and on blood samples of four dogs. The same samples were also used to measure the electrical conductivity (σ) at 500 kHz. For the permittivity measurements, a reflectometric method using a coaxial probe has been chosen. This method is based on the reflection coefficient generated at the interface of a semi-rigid coaxial cable and the biological sample with a six-port reflectometer. A new method to define the reference plane at the end of the coaxial probe has been developed and an automated measuring bench has been constructed. When the reflection coefficient is obtained with the reflectometer, a mathematical model must be used to calculate the complex permittivity. However, all previous models have been tested on low-loss dielectric media only and no comparative studies on the accuracy of the measurements was available for high-loss dielectric media like the biological samples. A comparative study of four different mathematical models was done in order to find the most accurate one. The optimal accuracy was obtained with the virtual line model proposed by Ghannouchi and Bosisio. The measurements have shown

that the complex permittivity of healthy and infarcted myocardium samples, as well as the blood, are very similar. It has also been observed that the complex permittivity does not depend on the temperature at 2.45 GHz. However, a temperature dependency has previously been observed at lower and higher frequencies. For the electrical conductivity measurements, a tetrapolar method has been used at 500 kHz and statistically significant differences have been observed on the same biological samples: the conductivity of infarcted myocardium is about 65% higher than that of the healthy myocardium. This result can be explained by the presence of extracellular liquid around the biopolymer chains forming the collagen and the elastine in the conjunctive tissues. These measurements have been used in finite element computer models in order to study the absorption in RF and microwave ablation. For microwave ablation, the invariability of the permittivity with the temperature at 2.45 GHz indicates that energy deposition is constant in time, and the similarity of the permittivity values for the infarcted and healthy myocardium, and for the blood, indicates that the surrounding medium can be as homogenous. For RF ablation, the higher electrical conductivity of the infarcted zone can increase the current density flowing inside that zone. The treatment can thus be less effective in the healthy myocardium surrounding the infarction and arrhythmic substrate is indeed constituted of these fibers, an effective treatment can be more difficult for RF ablation. However, this has not been experimentally observed and the effects of thermal conduction can distribute more evenly the thermal energy inside the healthy and infarcted tissues.

The design and construction of a functional microwave ablation system were also performed. This system has some interesting characteristics like the ability to detect the formation of coagulum at the tip of the catheter and the possibility to record the electrical activity of the myocardium when microwave energy is delivered.

Different configurations of energy applicators were also investigated. The different configurations studied are monopoles with and without metallic cap, helical antennas and the flexible antennas printed on a dielectric substrate. The three first have shown that the penetration depth of the microwave energy is adequate to ablate arrhythmic substrates located deeply in the myocardium. For the flexible antennas, a frequency of 915 MHz will have to be used to obtain a good adaptation (the adaptation at 2.45 GHz being poor) and some methods are also presented to bring any length of applicator to resonate at 915 MHz. However, the penetration depth of the energy emitted by this kind of structure is relatively limited.

The clinical results obtained with five patients with atrial flutter (type I) are also presented. The results are interesting and encouraging. However, the applicators still have to be improved to increase the success rate, to decrease the procedure time and to facilitate the task of the cardiologist in positioning the catheter.

This thesis presents a continuum ranging from the measurement of physical data, to increase our comprehension of the basic phenomena, to the clinical application of this new ablation technique. The originality of the thesis lies in the fact that all the different aspects of microwave ablation have been investigated: conceptual, theoretical and clinical. Computer aided design, production and security aspects have also been treated. Original tissue characteristics have been presented, a microwave ablation system has been constructed and some relevant recommendations have been made in order to allow an effective treatment of arrhythmias difficult to treat with RF technology.

TABLE DES MATIÈRES

Dédicace iv
Remerciements v
Résumé vii
Abstract xiii
Liste des tableaux xxii
Liste des figures xxiii
Liste des sigles et abréviations xxvii

CHAPITRE 1. Introduction 1

CHAPITRE 2. Revue de la littérature 8

CHAPITRE 3. A comparative study of four open-ended coaxial probe models for permittivity measurements of lossy dielectric/biological materials at microwave frequencies 18
3.1 Sommaire 19
3.2 Mise en contexte 20
3.3 Abstract 21
3.4 Introduction 21
3.5 Experimental setup for dielectric measurements 22
3.6 Modeling of the open-ended coaxial probe 23
3.6.1 Capacitive model 23
3.6.2 Antenna model 27
3.6.3 Virtual line model 29
3.6.4 Rational function model 31
3.7 Experimental results on saline solutions 33

3.8 Sensitivity to the calibration media of the virtual line model and the capacitive model 38

3.9 Discussion 41

3.10 Conclusion 43

3.11 Acknowledgments 43

3.12 Conclusion du chapitre 44

CHAPITRE 4. Correction des discontinuités lors des mesures de la permittivité complexe à l'aide d'une sonde coaxiale 46

4.1 Mise en contexte 47

4.2 Introduction 48

4.3 Méthodes de correction 49

4.3.1 Technique de la boîte d'erreur 49

4.3.2 Technique "banque de données" 53

4.3.3 Méthode de Struchly 55

4.4 Conclusion 60

CHAPITRE 5. Catheter ablation: infarcted myocardium has a higher electical conductivity at rf frequencies but the same complex permittivity at microwave frequencies in comparison with normal cardiac tissue 61

5.1 Sommaire 62

5.2 Mise en situation 63

5.3 Abstract 65

5.4 Introduction 66

5.5 Methods 67

5.5.1 Experimental preparation 67

5.5.2 RF conductivity measurements 68

5.5.3 Microwave permittivity measurements 69

5.5.4 Statistical analysis 71

5.6 Discussion 74

5.7 Conclusion 77

5.8 Acknowledgments 77

5.9 Conclusion du chapitre 78

CHAPITRE 6. A microwave ablation system to treat cardiac arrhythmia 80

6.1 Sommaire 81

6.2 Mise en contexte 82

6.3 Abstract 84

6.4 Introduction 84

6.5 Technical requirements 85

6.6 Implementation 86

6.6.1 Microwave source 87

6.6.2 Directional coupler 90

6.6.3 Coagulum detection system and cardiac electrical signal measurement 95

6.6.4 Feedback system 97

6.6.5 Software interface 99

6.7 Conclusion 101

6.8 Acknowledgment 102

6.9 Conclusion du chapitre 103

CHAPITRE 7. Conception d'applicateurs micro-onde et étude de cinq cas cliniques. 105

7.1 Applicateurs micro-onde 106

7.1.1 Mise en situation 106

7.1.2 Généralités 108

7.1.3 Méthodologie 110

7.1.3.1 Méthode des éléments finis 110

7.1.3.2 Validation des résultats de simulation 117

7.1.3.3 Ressources informatiques 119

7.1.3.4 Tests *in vivo* chez le chien 120

7.1.4 Monopôles avec capuchon 121

7.1.4.1 Résultats de simulations 123

7.1.4.2 Résultats *in vivo* 130

7.1.4.2.1 Complications: coagulum 131

7.1.4.2.2 Complications: arythmies 133

7.1.5 Monopôles sans capuchon 134

7.1.6 Antennes hélicoïdales 142

7.1.7 Structures planaires flexibles 153

7.2 Résultats cliniques: étude de cas 181

7.3 Discussion 189

CHAPITRE 8. Conclusion et recommandations 200

RÉFÉRENCES: 210

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1: Liste des milieux de calibration utilisés 39

Tableau 6.1: Caractéristiques du coupleur multifonctions 93

Tableau 7.1: Caractéristiques des câbles coaxiaux de Wire Incorporated 109

Tableau 7.2: S_{11} des monopôles avec capuchon 124

Tableau 7.3: Dimension de l'antenne hélicoïdale avec monopôle 152

Tableau 7.4: Caractéristiques du coplanaire simulé 156

Tableau 7.5: Fréquences d'adaptation mesurées du coplanaire 166

Tableau 7.6: Caractéristiques de la ligne de transmission à ruban équilibrée et de l'applicateur coplanaire 180

LISTE DES FIGURES

Figure 3.1: Schema of the four models used in this study 23

Figure 3.2: Dielectric properties of deionized water, methanol and NaCl(aq) (0,5M and 1,0M) 35

Figure 3.3: Relative error of models on dielectric properties of NaCl(aq) [0,5M] 36

Figure 3.4: Relative error of models on dielectric properties of NaCl(aq) [1,0M] 36

Figure 3.5: Permittivity of NaCl(aq) [0,5M] with water and air as calibration media... 40

Figure 3.6: Permittivity of NaCl(aq) [0,5M] with methanol and air as calibration media 40

Figure 4.1: Sonde coaxiale 49

Figure 4.2: Valeurs typiques des coefficients de la boîte d'erreur 51

Figure 4.3: Application de la boîte d'erreur 52

Figure 4.4: Γ^* des standards utilisés 54

Figure 4.5: Résultats sur un salin à 0.25 mol/L 55

Figure 4.6: Erreur relative sur Γ^* obtenue avec l'eau 57

Figure 4.7: Erreur relative sur Γ^* obtenue avec le méthanol 58

Figure 4.8: Erreur relative sur Γ^* obtenue avec un salin de 0,5 mol/L 58

Figure 4.9: Résultats sur un salin de 0,25 mol/L 59

Figure 5.1: Coaxial probe 69

Figure 5.2: Virtual line model 70

Figure 5.3: Normal myocardium (37 °C) 72

Figure 5.4: Infarcted myocardium (37 °C) 72

Figure 5.5: Normal myocardium (60 °C) 73

Figure 5.6: Infarcted myocardium (60 °C) 73

Figure 5.7: Complex relative permittivity of blood 74

Figure 6.1: Block diagram of the ablation system 86

Figure 6.2: Control of the microwave source 89

Figure 6.3: Block diagram of the electronic circuit used to measure the incident and reflected powers 92

Figure 6.4: Loaded monopole antenna 95

Figure 6.5: Block diagram of the impedance measurement circuit 96

Figure 6.6: Block diagram of the feedback circuit 98

Figure 6.7: Window used to define the microwave output power versus time 100

Figure 6.8: User-interface window 101

Figure 7.1: Codes de couleurs utilisés 117

Figure 7.2: Schéma des monopôles avec capuchon 122

Figure 7.3: Lignes de champ électrique du monopôle 125

Figure 7.4: Propagation du champ électrique des monopôles avec capuchon 126

Figure 7.5: SAR/(1- S_{11}^2) des trois monopôles avec capuchon 128

Figure 7.6: Schéma des monopôles sans capuchon 135

Figure 7.7: S_{11} en fonction de la fréquence pour le monopôle sans capuchon 135

Figure 7.8: Propagation du champ électrique du monopôle sans capuchon avec électrode 138

Figure 7.9: SAR/(1- S_{11}^2) pour les monopôles sans capuchon 139

Figure 7.10: Adaptation en fonction de la longueur active L 140

Figure 7.11: Schéma des antennes hélicoïdales 142

Figure 7.12: Patron de radiation de l'antenne hélicoïdale sans électrode pour ψ=0° ... 144

Figure 7.13: Propagation du champ électrique des antennes hélicoïdales 146

Figure 7.14: Courbes de SAR de deux antennes hélicoïdales 147

Figure 7.15: Ligne de transmission coplanaire 154

Figure 7.16: Schéma des structures planaires simulées 155

Figure 7.17: Comparaison entre les résultats de simulation et les mesures 156

Figure 7.18: Influence de l'espacement G sur l'adaptation du coplanaire 159

Figure 7.19: Problème bidimensionnel utilisé lors du calcul de Z_0 159

Figure 7.20: Impédance complexe des prototypes (l = 0.825 mm, w = 0.225 mm) 161

Figure 7.21: Variation des fréquences de résonance en fonction de la longueur L 162

Figure 7.22: Fréquences de résonance et adaptation en fonction de la longueur L 164

Figure 7.23: Conditions de résonance 165

Figure 7.24: Effet de la géométrie du coplanaire sur ses fréquences de résonance 168

Figure 7.25: Coplanaires chargés de façon périodique 169

Figure 7.26: Impédance des coplanaires dans l'air 170

Figure 7.27: S_{11} du coplanaire obtenu par simulation 171

Figure 7.28: Propagation du champ électrique émis par les coplanaires à 915 MHz .. 173

Figure 7.29: SAR/(1- S_{11}^2) des structures coplanaires 174

Figure 7.30: Lignes de champ électrique dans le plan perpendiculaire au coplanaire. 174

Figure 7.31: SAR/(1- S_{11}^2) pour l'antenne à fente 177

Figure 7.32: Propagation du champ électrique émis par la ligne à fente 178

Figure 7.33: Ligne à ruban équilibrée 179

Figure 7.34: Adaptation du coplanaire (ligne de transmission à ruban équilibrée) 180

Figure 7.35: Électrocardiogramme montrant la fin du flutter auriculaire 186

Figure 7.36: Système de déflexion à rayon de courbure variable 194

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

SVP:	Stimulation ventriculaire programmée
FA:	Fibrillation auriculaire
ECG:	électrocardiogramme
PTFE:	Polytétrafluoroéthylène
CVP:	Contraction ventriculaire prématurée
WPW:	Wolff-Parkinson-White (syndrome de)
RF:	Radiofréquence
EM:	Électromagnétique

CHAPITRE I

INTRODUCTION

Depuis quelques décennies, les maladies cardiaques constituent une importante cause de décès en Amérique du Nord. Les recherches portant sur ces maladies ont nettement progressé depuis les dix dernières années et on comprend maintenant un peu mieux les causes de certains troubles cardiaques. Ces recherches ont vu naître une nouvelle technique visant à traiter certains types d'arythmies supraventriculaires: l'ablation de substrats arythmiques par cathéter [117-122]. Cette technique consiste à détruire, au moyen d'un cathéter dont l'extrémité distale est disposée à l'intérieur du muscle cardiaque, une zone responsable des troubles de rythme. Cette zone, nommée substrat arythmogène, est différente d'une arythmie à l'autre. Par exemple, le substrat responsable d'une arythmie supraventriculaire chez les patients atteints du syndrome de Wolff-Parkinson-White (WPW) est un faisceau musculaire très fin reliant les oreillettes aux ventricules [106]. Pour certaines tachycardies auriculaires ou ventriculaires, leur origine est de nature focale. Dans ces cas, un foyer de fibres myocardiques se dépolarisent spontanément de façon périodique et rapide, provoquant les épisodes de tachycardie. Le substrat arythmogène est alors considéré comme étant ce foyer spécifique. Un autre exemple provient de la tachycardie ventriculaire post-infarctus où le substrat physiologique supportant l'arythmie est constitué de cellules myocardiques ischémiées situées au pourtour de la zone infarcie. Ces substrats physiologiques, de nature variée, amènent un dérèglement de l'activité électrique du coeur et provoquent les troubles de rythme. Ces troubles, de par leur nature et leur spécificité, peuvent amener diverses conséquences qui peuvent s'étendre de la simple diminution de l'efficacité cardiaque jusqu'à la mort subite du patient. L'ablation du substrat arythmogène par cathétérisme est une méthode curative. Le patient ainsi atteint de troubles cardiaques s'en trouve alors complètement guéri et l'utilisation de drogues anti-arythmiques n'est plus nécessaire.

La technique d'ablation par cathétérisme a connu quelques modifications importantes depuis ses tout premiers essais. Les premières tentatives consistaient à

utiliser une électrode au bout du cathéter que l'on positionnait près du substrat arythmogène et à appliquer un choc DC de façon à provoquer un claquage électrique et à détruire les cellules myocardiques responsables de l'arythmie. Cette méthode, quoique efficace, présentait certains risques. Ainsi, le claquage électrique provoquait l'explosion des fibres musculaires cardiaques, ce qui pouvait déclencher d'importants phénomènes d'inflammation, de barotraumatisme, de destruction des valves, etc. De plus, il était très difficile de prévoir la dimension et la profondeur de la zone traitée, ce qui augmente les risques de destruction d'une zone dont le rôle est primordial dans la génération de battements cardiaques normaux. Cette technique a aujourd'hui été abandonnée, mais elle a tout de même contribué à fixer les bases de l'ablation par cathétérisme.

Par la suite, on a remplacé l'application d'énergie DC par un courant radiofréquence (RF) d'environ 500 kHz. Avec cette technique, on utilise encore une électrode au bout du cathéter que l'on introduit à proximité du substrat supportant l'arythmie. Une deuxième électrode est aussi placée au niveau du dos du patient afin de pouvoir faire circuler le courant radiofréquence entre les deux électrodes. Le passage d'un courant RF provoque une élévation de la température des fibres myocardiques situées près de l'électrode au bout du cathéter. La puissance électrique dissipée dans le milieu résistif est convertie en énergie thermique, d'où l'augmentation de température observée. Cette technique, maintenant utilisée partout dans le monde, donne de bons résultats lorsque le volume de la zone à traiter est faible et qu'il est situé près de la surface de l'endocarde. C'est le cas du syndrome WPW où le faisceau accessoire, situé près de la surface endocardique, possède un diamètre inférieur à un millimètre. Cependant, lorsque le volume de la zone à traiter est plus important et situé plus en profondeur, la technique donne des résultats décevants. Par exemple, le traitement de la tachycardie ventriculaire post-infarctus nécessiterait parfois une lésion transmurale dont le diamètre peut être considérable. Le traitement du flutter et de la fibrillation auriculaire nécessite la production d'une ou de lésions linéaires de quelques centimètres

de longueur à l'intérieur des oreillettes, ce qui est difficilement réalisable en ablation RF. De plus, la profondeur de pénétration de l'énergie RF est limitée par l'impédance de contact entre l'électrode et l'endocarde qui augmente de façon considérable lorsque la température du tissu atteint près de 100 °C. À cette température, le sang présent autour de l'électrode a tendance à se coaguler sur le bout du cathéter, ce qui augmente l'impédance de contact et empêche le passage du courant RF. L'augmentation du courant afin d'obtenir une profondeur de pénétration plus importante est donc limitée en pratique. La diminution rapide de la densité de courant fait en sorte qu'un contact direct entre l'électrode et l'endocarde est nécessaire afin d'effectuer une ablation efficace. Cette caractéristique est peu problématique lorsqu'on n'utilise qu'une électrode. Cependant, lorsque des lésions allongées sont nécessaires, on doit utiliser plusieurs électrodes placées l'une derrière l'autre au bout du cathéter et il est difficile en pratique d'assurer un bon contact pour toutes ces électrodes lors d'une ablation. La lésion linéaire ainsi produite peut alors présenter des discontinuités, ce qui la rend inefficace pour bloquer les circuits de réentrée.

Il est donc nécessaire d'investiguer d'autres modalités d'application d'énergie afin de traiter les arythmies réfractaires à l'ablation RF. Le présent projet de doctorat consiste à étudier l'énergie micro-onde. En effet, de par leurs propriétés physiques et leurs interactions avec la matière, il est permis de penser que la production de lésions de profondeur et de taille importantes est possible en utilisant l'énergie électromagnétique (EM) dans le spectre micro-onde. La déposition d'énergie ne s'effectue plus par pertes résistives mais par relaxation diélectrique. Dans ce cas, les molécules d'eau sont excitées par l'onde EM, ce qui provoque des vibrations et des rotations au sein de celles-ci. Les molécules ainsi excitées absorbent une partie de l'énergie EM et la convertissent en énergie thermique, ce qui provoque l'augmentation de la température. Ce phénomène est identique à celui expliquant l'échauffement des aliments à base d'eau dans les fours à micro-ondes. Les fréquences de la bande ISM doivent être utilisées en Amérique du

Nord pour les applications industrielles, médicales ou scientifiques. Les bandes de fréquence de cette bande sont: 902 - 928 MHz; 2,4 - 2,5 GHz; 5,725 - 5,875 GHz; 24 - 24.25 GHz; 122 - 123 GHz et 244 - 246 GHz. En ablation micro-onde, l'électrode est remplacée par une antenne qui irradie l'énergie dans l'espace selon un patron de radiation qui lui est propre. Il serait donc possible de développer des applicateurs spécifiquement conçus pour le traitement de certaines arythmies. Deux autres modalités d'applications d'énergie, notamment le laser [75] et les ultrasons [76], sont aussi à l'étude et quelques résultats ont été présentés dans la littérature.

La présente étude peut être divisée en deux parties bien distinctes. La première partie consiste à mesurer les propriétés physiques expliquant l'absorption d'énergie aux fréquences RF et micro-onde des tissus myocardiques et du sang. Pour l'ablation RF, ce paramètre est la conductivité électrique σ. Plus la conductivité d'un milieu est grande, plus un courant de conduction électrique est en mesure d'y circuler facilement. Pour l'ablation micro-onde, le paramètre à mesurer est la permittivité complexe ε^*. Ce paramètre comporte une partie réelle et une partie imaginaire ($\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''$). La partie réelle représente la polarisabilité d'un milieu ou, en d'autres termes, sa capacité à emmagasiner de l'énergie électrique. La partie imaginaire est une valeur caractérisant les pertes présentes dans le milieu lorsqu'une onde EM s'y propage. Pour un diélectrique sans perte, la partie imaginaire est nulle. Ces pertes peuvent être causées par la relaxation diélectrique et par le passage d'un courant de conduction dans un milieu résistif. En général, la permittivité varie avec la température. On a donc cherché à connaître ces variations afin de modéliser l'absorption d'énergie dans le temps du muscle myocardique lorsque la température s'élève au cours d'une ablation réelle.

Les mesures de conductivité ont été effectuées en utilisant une technique tétrapolaire bien connue. Les mesures de permittivité ont été effectuées à l'aide d'une sonde coaxiale et d'un réflectomètre afin de mesurer le coefficient de réflexion entre la

sonde et l'échantillon biologique étudié. Par la suite on utilise un modèle mathématique afin de déterminer la permittivité. Plusieurs de ces modèles existent dans la littérature mais aucun d'eux n'a été validé en présence d'échantillons présentant des pertes importantes. La première partie de la thèse a consisté à comparer la précision de quatre modèles afin de déterminer celui dont la précision est optimale.

La seconde partie du travail consiste à concevoir un système d'ablation micro-onde composé essentiellement du générateur et des applicateurs d'énergie. Au niveau du générateur, on doit respecter les normes d'isolation électrique et le système doit présenter certaines caractéristiques afin d'assurer en tout temps la sécurité du patient. Pour les applicateurs d'énergie, ils doivent générer un patron de radiation bien adapté aux arythmies que l'on désire traiter. Le patron de radiation peut être vu comme étant la façon dont l'applicateur distribue l'énergie dans un espace tridimensionnel. De plus, l'efficacité de radiation de l'applicateur doit être suffisamment grande afin d'éviter une surchauffe du câble coaxial situé à l'intérieur du cathéter. Lors de la conception des applicateurs on doit donc principalement se concentrer sur deux points: l'efficacité de radiation et le patron de radiation de la structure rayonnante.

Une fois la conception terminée, on doit effectuer des tests sur des animaux afin de perfectionner la technique et obtenir l'autorisation par les comités de réglementations médicales[1] afin de pouvoir appliquer la technique sur des patients. Quelques cas cliniques où l'énergie micro-onde a été utilisée pour traiter des patients atteints de flutter auriculaire de type I seront discutés à la fin du chapitre 7.

---

[1] Le comité d'éthique de l'hôpital, Santé Bien-être Canada pour le Canada et le Food and Drug Administration aux États-Unis.

Cette thèse présente donc une suite logique dans le développement d'un concept visant à traiter certaines maladies et son application en clinique. Cet aspect apportera, espérons-le, un intérêt lors de la lecture de ce document.

CHAPITRE II

REVUE DE LA LITTÉRATURE

La première partie du projet de doctorat consiste à effectuer des mesures de permittivité diélectriques de différents tissus biologiques. Pour ce faire quelques techniques existent dont celle de la ligne de transmission court-circuitée [77-79] qui consiste à déposer une épaisseur de diélectrique au bout d'une ligne de transmission terminée par un court-circuit. Des méthodes de perturbation consistant à insérer une tranche de l'échantillon à l'intérieur d'une ligne de transmission et à mesurer les paramètres S_{11} et S_{21} ont aussi été développées afin de mesurer ses propriétés diélectriques [80]. Une autre méthode utilisable est celle où l'on dépose l'échantillon dans une cavité résonante afin de mesurer la variation de la fréquence de résonance [81-84]. Les propriétés diélectriques peuvent également être déterminées à l'aide de la spectroscopie temporelle qui consiste à appliquer la transformée de Fourier sur la réflexion d'ondes carrées [85]. Cependant, toutes ces techniques requièrent la connaissance de la géométrie de l'échantillon, ce qui est difficile pour des tissus biologiques. De par la nature des mesures à prendre, la technique de la sonde coaxiale terminée par un circuit ouvert est la plus appropriée [6, 39, 86-98]. Diverses variantes de cette technique existent et la méthode de la sonde terminée par un circuit ouvert à angle droit a été utilisée lors des mesures présentées dans cette thèse. Celle-ci consiste à positionner le bout de la sonde coaxiale directement sur le tissu ou dans le liquide où l'on désire mesurer les propriétés. À l'aide d'un réflectomètre on mesure le coefficient de réflexion complexe Γ^* puis on calcule la permittivité complexe à l'aide d'un modèle mathématique.

Plusieurs de ces modèles existent dans la littérature. Le premier modèle étudié a été développé par Athley *et al.* [1] [2] [3]. C'est le modèle de la capacité où l'on représente le milieu diélectrique par une capacité placée au bout de la ligne de transmission. Le second modèle, développé par Brady *et al.*, est le modèle de l'antenne [4] [5] où l'on représente le bout de la sonde coaxiale comme étant une antenne plongée

dans le diélectrique. Un autre modèle, proposé par Ghannouchi *et al.*, consiste à représenter le milieu diélectrique par une ligne de transmission virtuelle [6]. Le plus récent modèle disponible dans la littérature provient de Stuchly *et al.* [7] [8] [9]. Dans ce modèle, la méthode des moments est utilisée afin de calculer le coefficient de réflexion complexe au bout du câble coaxial. Par la suite, on utilise un polynôme du huitième ordre afin de calculer Γ^* en fonction de ε^*. Ce modèle a comme avantage de ne nécessiter aucun standard de calibration avant d'effectuer les mesures.

Une étude visant à vérifier la précision de ces quatre modèles lors de mesures sur des solutions salines a été réalisée par Bérubé *et al.* [10]. Les propriétés diélectriques de salins ont été étudiées par Strogyn [11] et ses résultats ont servi de référence lors des travaux de Bérubé *et al.*

Quel que soit le type d'appareil utilisé pour mesurer les coefficients de réflexion complexe (Γ^*), il y a toujours des réflexions parasites au niveau des connecteurs qui faussent les résultats. Lorsque les coefficients de réflexion sont mesurés à l'aide d'un analyseur de réseau possédant l'option de fenêtrage temporel, on peut isoler dans le domaine du temps la réflexion en provenance du bout de la sonde [12] et enlever les effets des discontinuités. Cependant cette option n'est pas toujours disponible. Pour le réflectomètre à faible largeur de bande de type six-ports, Bérubé *et al.* [13] a développé une méthode afin de définir le plan de référence du réflectomètre directement au bout de la sonde coaxiale et ainsi enlever l'influence de toute réflexion parasite. Cette méthode consiste à remplacer les trois charges habituellement requises lors de la définition du plan de référence du réflectomètre (court-circuit, circuit ouvert et charge adaptée) par trois liquides de calibration dont le coefficient de réflexion est prédit par le modèle de

Stuchly [7]. Cette méthode est une variante de la technique présentée par Kraszewski *et al.* [99].

Pour ce qui est des mesures de conductivité à 500 kHz, l'article de Rush *et al.* [14] en pose les fondements. On utilise une technique tétrapolaire et des électrodes en Ag-AgCl afin d'effectuer les mesures.

Des mesures effectuées par Semenov [105-107] ont permis de comparer les propriétés diélectriques de l'eau, de salins et de tissus myocardiques infarcis. Ces mesures, publiées à la fin de 1997, viennent confirmer des résultats de mesures similaires présentés au chapitre 5 de cette thèse.

La deuxième partie du projet concerne l'ablation de foyers arythmogènes. Depuis quelques années, l'ablation RF est utilisée afin de traiter certains troubles cardiaques, en particulier le syndrome de Wolff-Parkinson-White où les taux de succès sont de l'ordre de 95 % [15] [16] [17] [18] [19]. L'article de McRury et Haines [20] offre une synthèse intéressante en ce qui concerne les phénomènes thermiques et électriques en cause lors d'ablation RF ainsi que leurs effets sur les cellules myocardiques. Les taux de succès sont par ailleurs beaucoup plus faibles (10 à 50 %) lors d'ablation RF pour le traitement de tachycardie ventriculaire en présence d'infarctus [21]. Ce sont ces faibles taux de succès qui ont amené les chercheurs à s'intéresser à d'autres modalités d'ablation, dont l'ablation micro-onde.

Des simulations menées par Kaouk *et al.* [22] ont démontré que la zone traitable par ablation micro-onde est plus importante qu'en ablation RF pour un applicateur de

même géométrie. De plus, étant donné que la zone traitable possède un volume plus important avec l'énergie micro-onde, la puissance et le temps requis pour atteindre le régime stationnaire sont plus élevés qu'avec l'ablation RF. Plusieurs équipes de recherche ont aussi travaillé sur la géométrie des applicateurs micro-onde afin de produire des lésions au niveau du myocarde [52-65]. Labonté *et al.* [23] ont, entre autres, démontré que le monopôle avec capuchon est une géométrie intéressante afin de produire des lésions larges et profondes pour le traitement de tachycardie ventriculaire post-infarctus. Pour ce qui est de la conception d'un système d'ablation micro-onde employé en cardiologie, aucun article pertinent n'a encore été trouvé dans la littérature. Cependant, certains articles présentent des systèmes d'hyperthermie micro-onde employés en oncologie [100-104].

La littérature regorge d'articles intéressants sur les tachycardies supraventriculaires, en particulier sur le flutter et la fibrillation auriculaires. Feld *et al.* [24] ainsi que Cosio *et al.* [25] ont démontré que la boucle de réentrée causant le flutter auriculaire de type I est contenue dans l'oreillette droite et que celle-ci passe par une bande de tissus située entre la veine cave inférieure et l'anneau de la valve tricuspide. Des tentatives d'ablation RF ont été effectuées afin de produire une barrière bloquant la propagation de l'onde de dépolarisation à cet endroit. Bien que ce genre d'intervention soit en mesure de stopper le flutter et d'empêcher sa réapparition par protocole de stimulation programmée suivant l'ablation RF, les taux de succès à long terme sont quelque peu décevants: Feld rapporte une récurrence du flutter chez 5 patients sur 12 (42 %) après quatre mois de suivis tandis que Cosio rapporte un taux de récurrence de 33 % (3/9) après deux semaines. Les taux de succès peuvent cependant être augmentés avec l'administration chronique de drogues anti-arythmiques comme la digoxine ou les β-bloqueurs, selon la réaction spécifique de chacun des patients (voir [24]). Dans sa discussion, Cosio mentionne qu'il existe des problèmes de stabilité avec les cathéters RF

actuels, ces problèmes étant causés par les mouvements survenant lors de la respiration du patient et lors des contractions systoliques. Lesh *et al.* [26] arrivent sensiblement aux mêmes conclusions dans leur étude sur l'efficacité de l'ablation RF lors du traitement de flutter. Quelques hypothèses sont d'ailleurs émises afin de tenter d'expliquer les taux de récurrence élevés: développement de nouveaux circuits à la suite de l'ablation, protocole de stimulation programmé trop peu agressive après l'ablation, effets réversibles ou encore lésions de tailles et de profondeurs insuffisantes. Des résultats d'ablation de flutter auriculaire par micro-onde ne sont pas encore disponibles dans la littérature.

Pour ce qui est de la fibrillation auriculaire, plusieurs articles sont aussi disponibles dans la littérature scientifique. En particulier, une série d'articles résumant un symposium sur la fibrillation auriculaire s'étant déroulé à Boston, en Mai 1995 trace le portrait des connaissances actuelles [27] [28] [29] [30]. À la suite de la lecture de ces articles, il s'avère que les deux principaux problèmes reliés à la fibrillation auriculaire sont la diminution de l'efficacité de la contraction systolique et les risques de formation de caillots sanguins qui peuvent mener à l'embolie pulmonaire ou cérébrale. Les effets de la fibrillation auriculaire peuvent varier grandement d'un patient à l'autre. Chez certains sujets, la fibrillation est asymptomatique et la personne atteinte peut fonctionner normalement pendant des années, tandis que chez d'autres, les effets peuvent être très difficilement tolérés, notamment chez les sportifs et les personnes atteintes d'insuffisance cardiaque. On réduit habituellement les risques de formation de coagulum en prescrivant un anticoagulant au patient, habituellement de la warfarine ou de l'aspirine. Pour ce qui est du traitement de la fibrillation, différentes approches peuvent être considérées. On peut faire en sorte que le rythme ventriculaire soit correctement contrôlé en administrant des drogues spécifiques, le plus souvent de la digoxine qui augmente l'influence du tonus parasympathique au niveau des oreillettes et du noeud AV [29]. Cependant, les effets de cette drogue diminuent lors d'exercices physiques intenses

où le tonus sympathique devient très important. On peut aussi effectuer l'ablation du noeud AV et procéder à l'implantation d'un stimulateur cardiaque permanent. Dans les deux cas, le rythme ventriculaire est bien contrôlé mais les risques de thrombose demeurent. Une autre approche consiste à forcer le retour au rythme sinusal par cardioversion pour ensuite prescrire une drogue anti-arythmique. Les drogues les plus utilisées sont la quinidine et la flecainide. Cependant, les études démontrent qu'un pourcentage non négligeable (20 à 50 %) des patients traités avec ces drogues retournent en fibrillation dans un délai d'un an [27]. De plus, des études démontrent que l'administration d'agents anti-arythmiques augmentent de façon importante le taux de mortalité chez les patients atteints d'insuffisance cardiaque [31] (20 % de mortalité après un an avec l'utilisation de drogues anti-arythmiques comparativement à 5 % sans drogue).

Parallèlement aux techniques pharmacologiques, d'autres techniques se développent afin de traiter la fibrillation auriculaire. Certaines équipes de recherche ont développé un prototype de défibrillateur auriculaire implantable capable de détecter l'apparition de la fibrillation et de la stopper par cardioversion [30]. Cependant, tous les patients ne sont pas aptes à recevoir ce genre de dispositif. Par exemple, les patients qui présentent fréquemment des épisodes de fibrillation demanderaient de trop fréquentes décharges électriques, ce qui provoquerait de l'inconfort et déchargerait rapidement les piles du défibrillateur. De plus, si la décharge n'est pas bien synchronisée avec le QRS, le défibrillateur peut potentiellement déclencher la fibrillation ventriculaire et provoquer la mort du patient.

Des procédures chirurgicales existent aussi pour le traitement de la fibrillation auriculaire. La première est la technique du corridor qui consiste à produire, lors d'une opération à coeur ouvert, un passage qui dirige l'onde de dépolarisation en provenance

du noeud sinusal directement vers le noeud AV [32]. Le corridor peut être produit avec une sonde de cryoablation ou bien à l'aide d'un bistouri. Cette technique assure la synchronicité entre les ventricules et les oreillettes, mais les oreillettes continuent à fibriller et les risques de thrombose sont toujours présents. Une technique plus ambitieuse est aussi à l'étude: la technique du labyrinthe [33]. Cette technique consiste à diviser les oreillettes en plusieurs parties dont les dimensions physiques ne peuvent permettre l'instauration des boucles de réentrée supportant la fibrillation. Cette technique, en plus d'assurer la synchronicité entre les oreillettes et les ventricules, rétablit la systole auriculaire ce qui, on le pense, diminue de façon marquée les risques de formation de thrombose. Les taux de succès rapportés sont de l'ordre de 90 % sans médication postopératoire et de 99 % avec médication. Haissaguerre *et al.* [34] ont imité cette procédure en utilisant l'ablation RF pour des patients où la fibrillation était localisée uniquement dans l'oreillette droite. Les lésions, au nombre de trois, étaient toutes effectuées dans l'oreillette droite. Swartz *et al.* [35] ont amélioré la technique plus loin en produisant des ablations RF dans les deux oreillettes afin de traiter les cas communs de fibrillation auriculaire. Les lésions dans l'oreillette gauche ont été exécutées par une approche trans-septale. Les résultats montrent que les 7 patients traités sont retournés en rythme sinusal et que 6 patients sur 7 (86 %) montrent des améliorations hémodynamiques.

D'un point de vue physiologique, une étude démontre que l'influence vagale est importante lors du déclenchement d'une fibrillation auriculaire [28]. En effet, la distribution des fibres parasympathiques n'est pas homogène dans le tissu myocardique auriculaire ce qui fait en sorte que l'influence vagale n'est pas la même pour toute les régions des oreillettes. Il en résulte un distribution non uniforme de la période réfractaire dans le tissu, et plus le tonus vagal est important, plus l'hétérogénéité est grande. Cet hétérogénéité peut alors servir de substrat pour le déclenchement de la

fibrillation. Cette particularité expliquerait pourquoi l'apparition de la fibrillation s'effectue préférentiellement la nuit alors que le patient est au repos, et pourquoi le taux d'incidence de la fibrillation auriculaire augmente avec l'âge (l'inhomogénéité de l'influence vagale s'accentue avec les années). L'article d'Allessie [28] montre aussi que la fibrillation engendre la fibrillation. En effet, il est reconnu chez les cardiologues que plus la fibrillation auriculaire est présente depuis longtemps, plus la cardioversion est difficile et plus le sujet a tendance à retomber rapidement en fibrillation à la suite d'une cardioversion réussie. Ce phénomène est expliqué par le fait que la période réfractaire diminue lorsque les cellules myocardiques soutiennent une fibrillation et par le fait qu'elles perdent leur capacité d'adaptation au rythme cardiaque (dans des conditions normales, plus le rythme est lent, plus la période réfractaire est grande). En conséquence, lorsque l'on réussit à retourner à un rythme sinusal par cardioversion après une épisode fibrillatoire, la période réfractaire est faible et demeure faible même si le rythme cardiaque est lent. Cela entraîne une plus grande sensibilité aux contractions auriculaires prématurées qui peuvent en tout temps redéclencher la fibrillation auriculaire. En d'autres termes, le "excitable gap" augmente et les oreillettes sont plus sensibles.

Afin d'imiter la procédure du labyrinthe par ablation micro-onde, il faudrait être en mesure de produire des lésions longues. Pour cette raison, l'idée d'utiliser une ligne de transmission de type coplanaire comme applicateur d'énergie micro-onde sur un substrat diélectrique flexible épousant la courbure des oreillettes semble intéressante. Iskander et al. [36] [37] donnent d'ailleurs des équations permettant de réaliser des lignes coplanaires dont l'impédance caractéristique est de 50 Ω dans un milieu connu. Pour la réalisation du circuit imprimé, le Kapton semble avoir des propriétés mécaniques intéressantes en plus d'avoir une bonne hémocompatibilité. Richardson *et al.* [38] ont d'ailleurs publié un article traitant de la biocompatibilité de ces polyimides. Ils y

concluent que le Kapton possède la meilleure hémocompatibilité des matériaux testés et qu'il est un bon candidat pour des applications médicales.

Plusieurs études portent sur les applicateurs micro-onde utilisés pour des traitements hyperthermiques. Les monopôles avec ou sans capuchon ont été étudiés afin d'élever la température de tumeurs cancéreuses au niveau de l'abdomen ou du cerveau [51], [66-74]. D'autres études sur des structures similaires ont aussi été réalisées afin de les utiliser dans le traitement des arythmies cardiaques [22-23], [51], [58]. Quelques articles portent aussi sur les lésions *in vivo* et *in vitro* obtenues avec des antennes hélicoïdales [51-59], [63-65].

CHAPITRE III

A COMPARATIVE STUDY OF FOUR OPEN-ENDED COAXIAL PROBE MODELS FOR PERMITTIVITY MEASUREMENTS OF LOSSY DIELECTRIC/BIOLOGICAL MATERIALS AT MICROWAVE FREQUENCIES.

Article publié dans le journal
"IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques"
(Special issue on medical application and biological effects of RF/microwaves)
Vol. 44 (part II), pp. 1928-1934
October 1996

D. Bérubé*, F.M. Ghannouchi**, P. Savard*

*Institut de génie biomédical, École Polytechnique de Montréal, Montréal, Canada, H3C 3A7.

** Département de génie électrique et de génie informatique, École Polytechnique de Montréal.

3.1 SOMMAIRE

Une étude comparative de quatre modèles mathématiques utilisant la méthode de la sonde coaxiale en circuit ouvert reliant l'impédance présentée au bout de la ligne de transmission à la permittivité complexe du matériau est présentée. La précision de ces modèles lors des mesures sur des diélectriques avec pertes ou sur des tissus biologiques ainsi que la robustesse des modèles par rapport aux milieux de calibration ont été étudiées. Les quatre modèles sont le modèle capacitif, le modèle de l'antenne, le modèle de la ligne virtuelle et le modèle utilisant des fonctions rationnelles. Des résultats expérimentaux obtenus sur des solutions salines utilisées comme milieux diélectriques à pertes ont été obtenus pour tous ces modèles.

3.2 MISE EN CONTEXTE

L'obtention des valeurs de permittivité complexe est nécessaire pour modéliser et comprendre les interactions présentes lors d'une ablation micro-onde et pour concevoir des applicateurs d'énergie efficaces. Différentes méthodes de mesure existent, mais c'est celle de la sonde coaxiale terminée par un circuit ouvert qui est la mieux adaptée car elle ne nécessite aucune géométrie particulière pour les échantillons biologiques. La première étape consiste à utiliser un réflectomètre afin de mesurer le coefficient de réflexion complexe (Γ^*) présent à l'interface entre la sonde coaxiale et l'échantillon de tissu. Dans l'étude présentée ici, un analyseur de réseau (HP-8510) muni du fenêtrage temporel a été utilisé entre 50 MHz et 20 GHz. Par la suite, il est nécessaire d'utiliser un modèle mathématique reliant les coefficients de réflexion aux valeurs de permittivité complexe. Plusieurs méthodes sont proposées dans la littérature. Cependant, ces dernières ont été développées et testées sur des milieux diélectriques présentant de faibles pertes aux fréquences micro-onde. Aucune étude n'a été effectuée afin de valider ces méthodes lorsque des mesures diélectriques sur des milieux présentant des pertes importantes sont requises. Cette étude vise à comparer la précision de quatre modèles disponibles dans la littérature afin de les valider et être en mesure de sélectionner celui qui présente une précision optimale dans le contexte de la recherche proposée.

3.3 ABSTRACT

A comparative study of four open-ended coaxial probe models which relate the coaxial line end impedance to the complex permittivity of the material under test is presented. The accuracy of the models in measuring lossy dielectric/biological material and their robustness as a function of the calibration materials are investigated. The four open-ended coaxial probe models studied are: capacitive model, antenna model, virtual line model and rational function model. Experimental results taken on saline solutions as lossy materials are obtained for the four models.

3.4 INTRODUCTION

In several biomedical applications, it is necessary to know the dielectric properties of specific human tissues at microwave frequencies, particularly for hyperthermia treatments. These biological tissues are essentially constituted of water, free ions like Na^+, K^+, Ca^{++}, Cl^-, and a great variety of proteins. This composition makes the dielectric properties of the tissues similar to those of saline solutions. These kinds of solutions are characterized by an important dielectric loss factor at low frequencies (less than 3 GHz).

The commonly used technique to obtain the complex dielectric permittivity (ε^*) consists of measuring the complex reflection coefficient (Γ^*) using a network analyzer. Afterwards, ε^* is obtained through a model that gives the complex admittance of the

probe's tip as a function of the dielectric permittivity of the surrounding medium, which is considered semi-infinite.

A certain number of these models exist in the literature [1], [2], [4], and [6]-[9]. However, no comparative experimental studies are available in the open literature to assess the precision of these models when measurements are made on high loss media such as saline solutions or biological tissues. The main goal of this article is to assess the robustness of each model when high loss materials are measured. Consequently, a judicious choice of the open-ended coaxial probe model can be made when measurements of biological tissues are required.

3.5 EXPERIMENTAL SETUP FOR DIELECTRIC MEASUREMENTS

All the measurements of the complex reflection coefficient used in this paper were obtained with a network analyzer (HP-8510) between 50 MHz and 20,05 GHz with a 50 MHz step (401 points). The calibration of the network analyzer was done using the OSL technique (open, short and matched load connected at the end of the analyzer's cable). The probe was fabricated from a semirigid 50 Ω coaxial line with outer diameter of 2,2 mm and inner diameter of 0,65 mm. The coaxial probe's end was immersed in the dielectric under test and the reflection coefficients were recorded at room temperature (25 °C). The timegating option of the network analyzer was also used to remove the effects of the discontinuities between the reference plane (defined at the probe's connector) and the end of the probe. This option calculates the inverse Fourier Transform (IFFT) of the complex reflection coefficient at the reference plane in order to

obtain the temporal response of the probe. Afterwards, one has to select an observation window, in the time domain, containing only the reflection at the probe's end to reject all of the parasitic reflections. The network analyzer calculates the Fourier Transform (FFT) of this window and convolves the result with the original measured reflection coefficient at reference plane. The obtained effect, in the frequency domain, is a smoothing of the initial curve where the effects of the discontinuities are present.

3.6 MODELING OF THE OPEN-ENDED COAXIAL PROBE

Four models have been considered for this study: the capacitive model [1] [2], the antenna model [4], the virtual line model [6] and the rational function model [7]- [9]. The following sections present a brief description of these models.

3.6.1 Capacitive model

The equivalent circuit for this model is presented in Figure 3.1(b). The model is described in references [1] and [2].

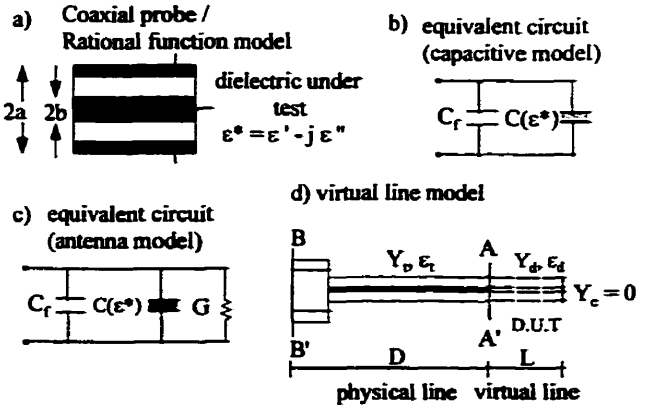


Figure 3.1: Schema of the four models used in this study

The reflection coefficient Γ^* at the tip of the open-ended probe is obtained by considering the complex admittance of the equivalent circuit:

$$\Gamma^* = \Gamma^{j\Phi} = \frac{1 - j\omega Z_0 (C(\varepsilon^*) + C_f)}{1 + j\omega Z_0 (C(\varepsilon^*) + C_f)} \tag{3.1}$$

where: $C(\varepsilon^*) = \varepsilon^* C_0$;

ω is the angular frequency;

and Z_0 is the characteristic impedance of the transmission line.

Solving for ε^*, one can obtain:

$$\varepsilon^* = \frac{1 - \Gamma^*}{j\omega Z_0 C_0 (1 + \Gamma^*)} - \frac{C_f}{C_0} \tag{3.2}$$

It is necessary to calculate the value of the two unknown variables C_f and C_0 to be able to calculate ε^*. In order to do this, the use of a calibration medium for which the dielectric properties are well known is required. A frequently used medium is deionized water. The two unknown parameters are then given by the following equations:

$$C_0 = \frac{\left(1 - \left|\Gamma^*_{diel}\right|^2\right)}{\omega Z_0 \left(1 + 2\left|\Gamma^*_{diel}\right| \cos(\Phi_{diel}) + \left|\Gamma^*_{diel}\right|^2\right) \varepsilon''} \tag{3.3a}$$

and

$$C_f = \frac{-2\left|\Gamma^*_{diel}\right| \sin(\Phi_{diel})}{\omega Z_0 (1 + 2\left|\Gamma^*_{diel}\right| \cos(\Phi_{diel}) + \left|\Gamma^*_{diel}\right|^2)} - \varepsilon'_{diel} C_0 \tag{3.3b}$$

where: Γ^*_{diel} is the complex reflection coefficient of the dielectric calibration medium referred at the end of the probe;

Φ_{diel} is the phase of Γ^*_{diel};

and ε'_{diel} is the real part of the complex permittivity of the calibration medium.

After the calculation of these parameters, we are able to measure the complex dielectric permittivity of a medium. However, if the reference plane has previously been defined at the entrance of the probe (B-B' plane), the measured Γ^* will be referred at this plane and not at the end of the probe (A-A' plane). Since this model requires a Γ^* value referred at the A-A' plane, one must find the phase difference between the B-B' and A-A' planes. The reflection coefficients relative to these two planes are related in this way:

$$\Gamma^*_{A-A'} = \Gamma^*_{B-B'} e^{j2\theta} \tag{3.4}$$

where the 2θ factor in the exponent is necessary to take account of the round-trip of the wave in the probe. This factor is calculated in this way:

$$2\theta = \Phi_{A-A'} - \Phi_{B-B'} \tag{3.5}$$

where:

and

$$\Phi_{A-A'} = \angle\Gamma^*_{A-A'}$$
$$\Phi_{B-B'} = \angle\Gamma^*_{B-B'}$$

The phase $\Phi_{B\text{-}B'}$ is easily measurable with the network analyzer but the phase of the reflection coefficient referred at AA' ($\Phi_{A\text{-}A'}$) is not directly measurable. To calculate the value of 2θ, it is necessary to use a model which gives the value of $\Phi_{A\text{-}A'}$.

The determination of the round-trip phase factor 2θ was made by measuring the complex reflection coefficient in air $\Gamma^*_{B\text{-}B'\,(air)}$ as follows: the time-gating option of the ANA was used to remove the parasitic reflections and the reflection coefficient $\Gamma_{B\text{-}B'\,(air)}$ was measured at the desired frequencies. Afterwards, the model giving the value of $\Phi_{A\text{-}A'}$ was used to calculate the 2θ factor.

The literature (see reference [3]) gives a theoretical expression for $C_f + C_0$ when the probe's end is in the air (open-circuit):

$$C_f + C_0 = 2.38\varepsilon_0(b-a) \tag{3.6}$$

where: a is the radius of internal conductor;

and b is the radius of external conductor.

Inserting equation 3.6 in equation 3.1, we can obtain the following relationship giving the value of the complex reflection coefficient Γ_0^* at the end of the probe (A-A' plane) as follows:

$$\Gamma_0^* = \frac{1 - j \cdot 2.38\omega Z_0 \varepsilon_0 (b-a)}{1 + j \cdot 2.38\omega Z_0 \varepsilon_0 (b-a)} \tag{3.7}$$

The value of $\Phi_{A\text{-}A'}$ is obtained by calculating the phase of Γ^*_0:

$$\Phi_0 = -4.76\omega Z_0 \varepsilon_0 (b-a) \tag{3.8}$$

And the value of 2θ is simply obtained by the following equation:

$$2\theta = -4.76\omega Z_0 \varepsilon_0 (b-a) - \Phi_{B-B'} \tag{3.9}$$

The reflection coefficient obtained with the network analyzer can thus be de-embedded to the end of the probe. It is important to note that all the values of Γ^* must be multiplied by the $e^{j2\theta}$ factor for the calculation of C_f, C_0 and ε^*.

3.6.2 Antenna model

This model is given in reference [4]. The probe is modeled by a capacitance C_f, while the liquid is modeled by a capacitance $\varepsilon^* C_2$ and a resistor R (inverse of the conductance G) connected in parallel to the capacitances (see Figure 3.1(c)). The admittance of this equivalent circuit is given by:

$$\frac{Y}{Y_0} = j\omega C_1 Z_0 + j\omega C_2 Z_0(\omega, \varepsilon^*) + Z_0 G(\omega, \varepsilon^*) \qquad (3.10)$$

where:

Z_0 is the characteristic impedance of the coaxial line (50 Ω);

Y_0 is the admittance of the coaxial line ($1/Z_0$);

$\omega = 2\pi f$;

and $\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''$ is the complex permittivity of the surrounding medium.

A coaxial probe immersed in a lossy medium will radiate in that medium: the probe can thus be considered like a functional antenna. When the probe is considered to be infinitesimal, the power radiated from the end of the coaxial line in free space is [39]:

$$P_r = G \cdot V^2 = \frac{16\pi^5 \omega^4}{3\eta_0 c^4} \left[\frac{b^2 - a^2}{\log(b/a)} \right]^2 \qquad (3.11)$$

where:

V is the voltage between the inner and outer conductor at the open end;

ω is the angular frequency;

b and a are the radius of the outer and inner conductor, respectively;

η_0 is the complex intrinsic impedance of the free space ($\eta_0 = (\mu_0/\varepsilon_0)^{1/2}$);

and c is the speed of the light in free space.

For an antenna in a nonmagnetic lossy medium, it has been shown that [5]:

$$Y^*(\omega,\varepsilon^*) = \sqrt{\varepsilon^*}\,Y(\sqrt{\varepsilon^*}\,\omega,\varepsilon_0) \tag{3.12}$$

where:

Y^* is the admittance of the antenna in the nonmagnetic lossy medium;

Y is the admittance of the antenna in free space;

ε^* is the complex permittivity of the nonmagnetic lossy medium;

and ε_0 is the permittivity of free space.

Inserting equation 3.11 in equation 3.12, and replacing the result in equation 3.10, it is possible to deduce:

$$\frac{Y}{Y_0} = j\omega C_1 Z_0 + j\omega\varepsilon^* C_2 Z_0 + \varepsilon^{*s/2} G Z_0 \tag{3.13}$$

Equation 3.13 has the following form:

$$\frac{Y}{Y_0} = K_1 + K_2\varepsilon^* + K_3\varepsilon^{*sin} \tag{3.14}$$

The factors K_1, K_2 and K_3 are generally complex. To determine these factors, one must use three media for which the dielectric permittivities are well known. The media that have been used for the determination of the three unknown parameters are: deionized water, methanol and air. When these parameters are determined, the calculation of ε^* of the unknown medium can be done. Since a five-order complex equation (equation 3.14) has to be solved to find the complex permittivity of the unknown medium, one must select an appropriate solution ($\varepsilon' > 1$ and $\varepsilon'' < 0$). In all cases investigated in this study, only one solution had a physical sense.

To correctly use this model, the measured complex admittance (Y) has to be referred to the end of the probe (plane A-A'). In order to do that, the procedure given at section 3.6.1 (equations 3.4 to 3.8) can be used.

3.6.3 Virtual line model

This model has been developed in the end of the 1980's [6]. It consists of modeling the dielectric medium by a virtual transmission line of length L which has the same dimensions as the physical line. The virtual transmission line is terminated by an open circuit, this is shown in Figure 3.1(d). The complex admittance at A-A' plane is given by this relation:

$$Y_L = Y_d \frac{Y_E + jY_d \tan(\beta_d L)}{Y_d + jY_E \tan(\beta_d L)} \tag{3.15}$$

where:

Y_L is the admittance at the input of the virtual transmission line;

Y_d is the characteristic admittance of the virtual transmission line;

Y_E is the terminating admittance at the end of the virtual transmission line;

β_d is the propagation constant in the test medium;

and L is the virtual transmission line length.

Since the virtual line is terminated by an open circuit, Y_E=0, equation 3.15 becomes:

$$Y_L = jY_d \tan(\beta_d L) \tag{3.16}$$

The virtual line is coaxial, therefore its characteristic admittance is:

$$Y_d = \frac{\sqrt{\varepsilon_d}}{60 \ln(b/a)} \tag{3.17}$$

where: b is the external diameter of the line;

a is the internal diameter of the line;

and ε_d is the complex permittivity of tested medium.

In addition, the characteristic admittance at the input of the probe can be referred to the input of the virtual line as follows:

$$Y_L = \frac{1-\Gamma_m e^{2j\beta_t D}}{1+\Gamma_m e^{2j\beta_t D}} Y_t \tag{3.18}$$

where: Y_t is the admittance of the coaxial probe;

β_t is the propagation constant of the coaxial probe;

and Γ_m is the complex reflection coefficient measured at plane B-B'.

Inserting equations 3.18 and 3.17 in equation 3.16 and solving for the permittivity of the tested medium, one can obtain:

$$\varepsilon_d = \frac{-jc\sqrt{\varepsilon_t}}{2\pi fL} \cdot \frac{1-\Gamma_m e^{2j\beta_t D}}{1+\Gamma_m e^{2j\beta_t D}} \cdot \cot\left(\frac{2\pi fL\sqrt{\varepsilon_d}}{c}\right) \tag{3.19}$$

In this equation, there are two unknown variables: the length of the physical line (D) and the length of the virtual line (L) which cannot be directly measured since its existence is hypothetical and constitutes the basis of this model. These two unknowns are obtained from the reflection coefficients measured with two calibration media with known permittivities (air and deionized water, or air and methanol) through an iterative procedure described in detail in reference [6]. It is interesting to note that all complex reflection coefficients used in this model are referred to the input of the probe (B-B' plane).

3.6.4 Rational function model

This model has been developed in the early 1990's (see references [7]-[9]). The complex admittance of a 50 Ω coaxial probe immersed in a dielectric medium has been computed with the moment method. The geometry of the problem is shown in Figure 3.1(a). The results obtained with this method include the radiation effects, the energy storage in the near field region and the evanescent mode of the guide. The model is described by this equation:

$$\frac{Y}{Y_0} = \frac{\sum_{n=1}^{4}\sum_{p=1}^{8}\alpha_{np}(\sqrt{\varepsilon^*})^p(j\omega a)^n}{1+\sum_{m=1}^{4}\sum_{q=0}^{8}\beta_{mq}(\sqrt{\varepsilon^*})^q(j\omega a)^m} \tag{3.20}$$

where: α_{np} and β_{mq} are the coefficients of the model (given in reference 8);

ε^* is the complex permittivity of the tested dielectric;

a is the inner conductor radius of the line;

Y is the admittance at the end of the coaxial probe;

and Y_0 is the characteristic admittance of the coaxial probe.

This model is valid if the relative permittivity of the tested medium and the frequency are in these ranges: ($1 \le \varepsilon' \le 80$), ($-80 \le \varepsilon'' \le 0$) and ($1 \le f \le 20$ GHz).

Equation 3.20 gives the value of the complex admittance at the end of the probe as a function of the complex permittivity of the tested medium and the probe's dimensions. The inverse problem, which consists of calculating the complex permittivity constant of the dielectric medium under test from the measured complex admittance, is solved as follows [8]:

$$\sum_{i=0}^{8}(b_i - Yc_i)\sqrt{\varepsilon^*}^i = 0 \qquad (3.21)$$

where:

$$b_p = \sum_{m=1}^{4}\alpha_{mp}(j\omega a)^m \qquad p = 1,2,...,8;$$

$$b_0 = 0;$$

$$c_q = \sum_{m=1}^{4}\beta_{mp}(j\omega a)^m \qquad q = 1,2,...,8$$

and

$$c_0 = 1 + \sum_{m=1}^{4}\beta_{m0}(j\omega a)^m$$

Here again, it is necessary to use complex admittance values referred to the end of the probe, so, we can use the same method as given in section 3.6.1. Since an eight-order complex equation (equation 3.21) has to be solved to find the complex permittivity of the tested medium, an appropriate solution must be selected ($\varepsilon' > 1$ and $\varepsilon'' < 0$). In all cases investigated in this study, only one solution had a physical sense.

An interesting characteristic of this model is that we do not need to find any calibration parameters and, consequently, we do not need to use any standard dielectric media. Indeed, the parameters α_{np} and β_{mq} have been established and optimized by using 56 dielectric media included in this range: $1 \leq \varepsilon' \leq 80$.

3.7 EXPERIMENTAL RESULTS ON SALINE SOLUTIONS

This part presents the measured results (between 1 GHz and 20 GHz) for two saline solutions. The concentration of these solutions was 0,5 mol/L and 1,0 mol/L. The choice of saline solutions comes from the fact that their properties are similar to those of biological tissues. However, the losses of these chosen saline solutions are habitually higher than those of normal biological tissues, especially for the 1,0 mol/L solution at low frequencies. This choice was made to test the accuracy of the four models in extreme conditions in order to know their degree of reliability with respect to the loss factor. Indeed, we can assume that a model which can offer the best accuracy under very high loss conditions can also offer a good accuracy under normal loss conditions. When permittivity is measured on an unknown lossy dielectric or biological tissue, we want to

be sure that the used model can give accurate results under a wide range of loss factor. These reasons explain the choice of the saline solutions concentration.

It has been demonstrated in the previous sections, that some models require measurements of known media to find the value of unknown calibration parameters. In the following results, we have used these liquids as calibration media:

Model	calibration media
capacitive*	deionized water
antenna*	air, deionized water, methanol
virtual line†	air, deionized water
rational function*	none

The theoretical dielectric properties of NaCl(aq) solutions [11] are shown in Figure 3.2 while the obtained results are given in Figure 3.3 and Figure 3.4.

---

* After de-embedding procedure using air (see section 3.6.1, equations 3.4 to 3.9).

† The de-embedding procedure is included in the model (parameter D).

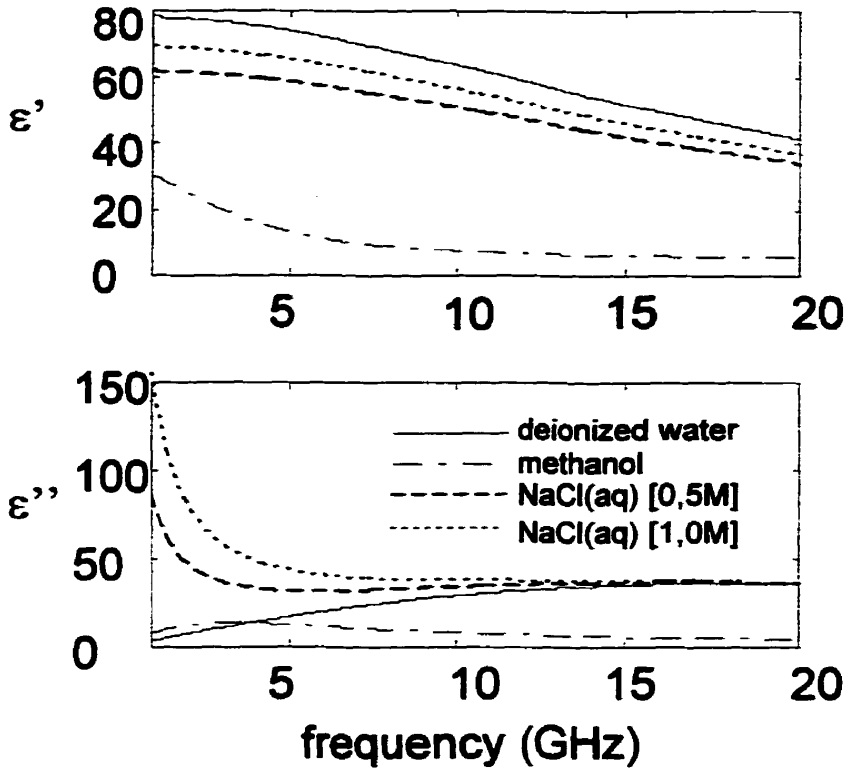


Figure 3.2: Dielectric properties of deionized water, methanol and NaCl(aq) (0,5M and 1,0M)

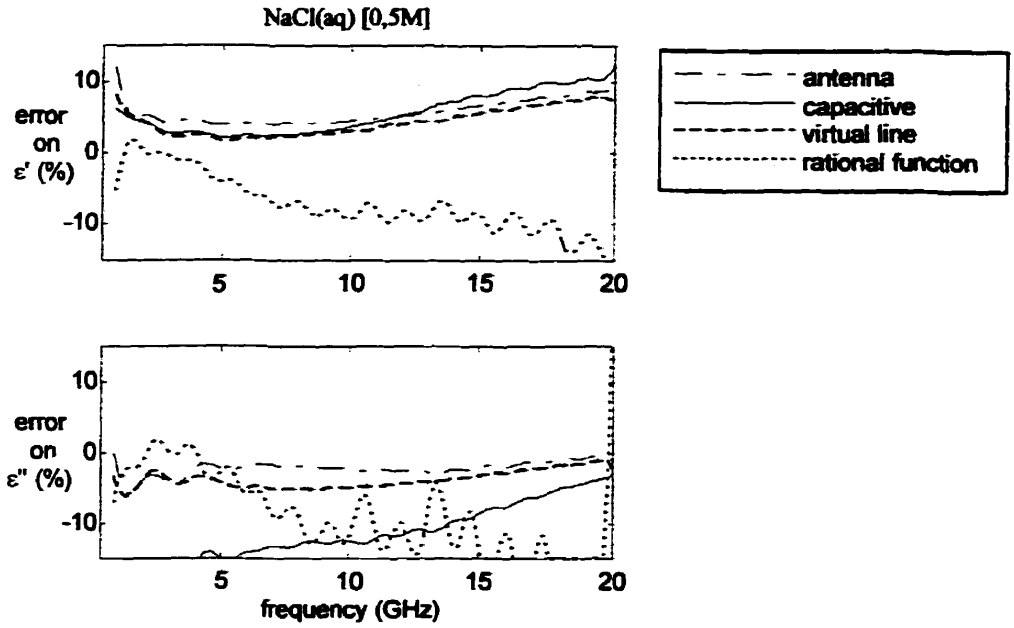


Figure 3.3: Relative error of models on dielectric properties of NaCl(aq) [0,5M]

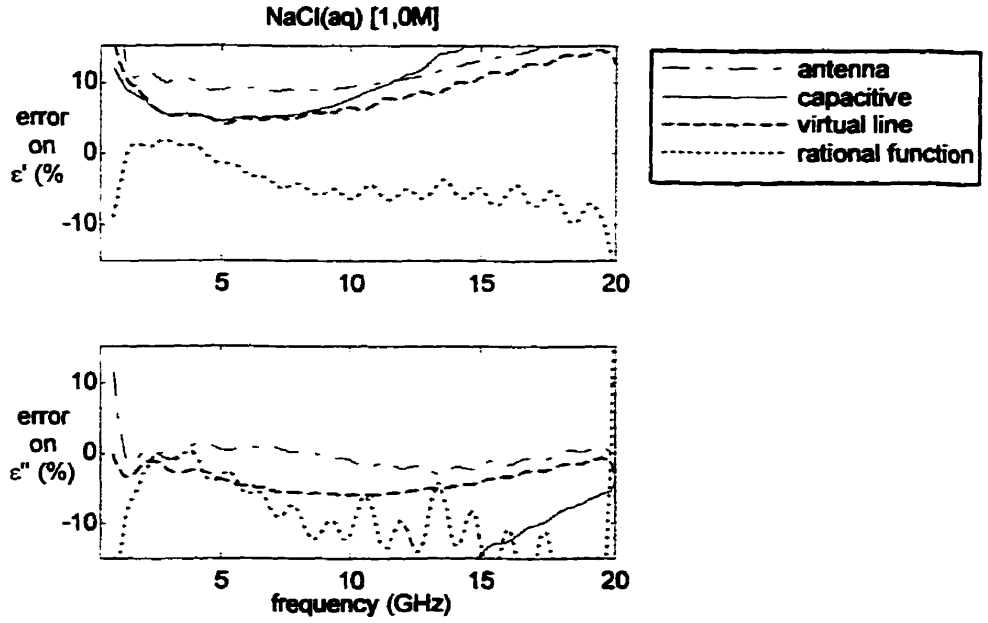


Figure 3.4: Relative error of models on dielectric properties of NaCl(aq) [1,0M]

According to these results, one can make the following statements:

For NaCl(aq) [0,5M]

1) The best results are obtained by the virtual line model and the antenna model. The obtained results for ε'' are accurate while those obtained for ε' are acceptable.

2) The results obtained by the rational function method are good when the frequency is between 2 and 5 GHz. However, discrepancies between measured and reference values increase with the frequency.

3) The capacitive model does not give accurate results for low frequencies, especially for ε''.

For NaCl(aq) [1,0M]

1) The virtual line model and the antenna model give the best results for ε''. However, the error on ε'' obtained with the antenna model is very significant at low frequencies (below 2 GHz).

2) For ε', the best results are obtained with the virtual line and the rational function models.

3) The rational function model gives excellent results between 2 and 5 GHz. However, outside this band, the error has a tendency to becomes significant, for both ε' and ε''.

4) The capacitive model does not give satisfying results: the error on ε' increases with frequency but, conversely, error on ε'' decreases with frequency.

3.8 SENSITIVITY TO THE CALIBRATION MEDIA OF THE VIRTUAL LINE MODEL AND THE CAPACITIVE MODEL

The previous section shows that results obtained with the virtual line model are accurate for high loss saline solutions. However, this model requires two calibration media to determine the two unknown parameters (L and D). One can ask the following question: what will the effects of the selection of the calibration media be on the overall accuracy of the measured complex permittivities? Or, in other words, what is the robustness of this model with respect to the selected calibration media? Indeed, one can assume that the closer the dielectric properties of the calibration media are to the medium under test, the more accurate will be the results.

To answer these questions, complex permittivity measurements have been performed on NaCl(aq) [0,5M] solutions using different calibration media. Comparisons between the virtual line model and the well known capacitive model have been made. The rational function model was not considered in this section since no calibration media are required. The antenna model was not considered since three dielectric media are required for the calibration step. Indeed, deionized water and methanol were used because their dielectric properties are well known and high chemical purity samples are easily obtainable. However, experiment has shown that the errors on measured permittivity become very significant when another calibration medium is used (such as ethanol or propanol). This can be due to the low purity of the calibration medium or to the poor accuracy of the theoretical dielectric properties given in the literature. Since only air, deionized water and methanol can be used as reliable calibration standards, we

were not able to study the effects of the selection of another calibration liquid on the permittivity measurement for the antenna model.

Firstly, for the two considered models, deionized water was chosen as calibration medium because its dielectric properties are similar to those of saline solutions. Secondly, methanol was chosen for its very different dielectric properties. The calibration media were as shown in Table 3-1.

Table 3-1

	virtual line model	capacitive model[‡]
Figure 3.5	deionized water, air	deionized water
Figure 3.6	methanol, air	methanol

The dielectric properties of deionized water, methanol and NaCl(aq) [0,5M] are given in Figure 3.2 while the obtained results are given in Figure 3.5 and Figure 3.6.

[‡] After the de-embedding procedure using air (see section 3.6.1, equations 3.4 to 3.9).

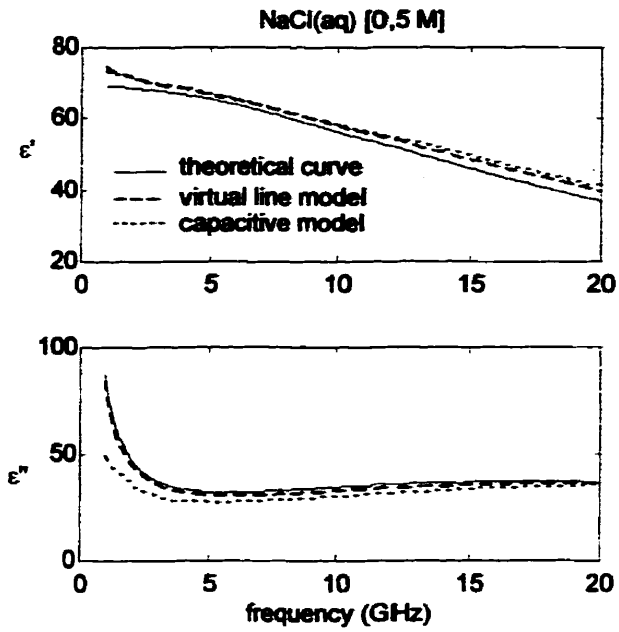


Figure 3.5: Permittivity of NaCl(aq) [0,5M] with water and air as calibration media

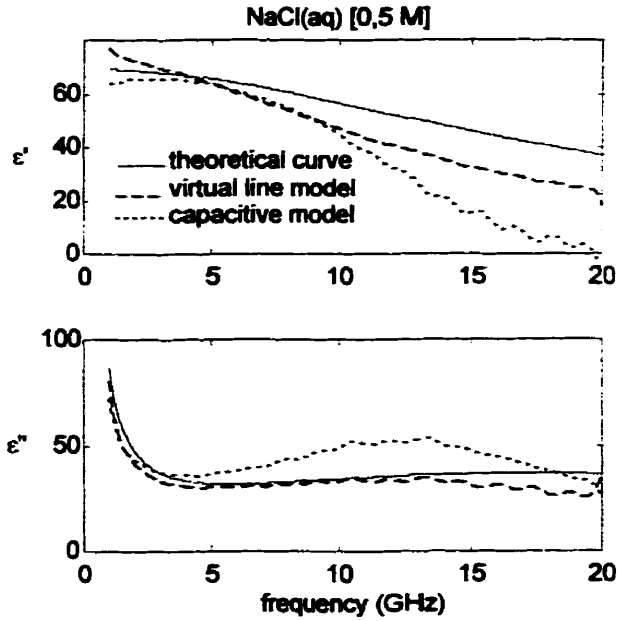


Figure 3.6: Permittivity of NaCl(aq) [0,5M] with methanol and air as calibration media

We can see that the virtual line model gives good results when deionized water is used as calibration medium while the capacitive model provides erroneous results at low frequencies for ε". However, these two models give inaccurate results when methanol is used as the calibration medium. On the other hand, one can state that the virtual line model is less sensitive to the calibration medium than the capacitive model, especially at low frequencies. The L parameter of the virtual line model (like the C_f and C_0 parameters of capacitive model) is dependent on the calibration media. Nevertheless, when the dielectric properties of the calibration medium are close to those of the dielectric under test, the results provided by the virtual line model are very accurate. It is thus recommended, when the virtual line model is to be used, that deionized water and air should be used as the calibration media.

3.9 DISCUSSION

The model which overall gives the best results for permittivity measurements of high loss solutions is the virtual line one. The results obtained with the antenna model are also accurate except at low frequencies. The rational function model can be used if its validity range is respected ($1 < f < 20$ GHz, $1 < \varepsilon' < 80$, $-80 < \varepsilon'' < 0$). However, when the NaCl concentration is higher than 0,5 mol/L, the imaginary part of ε^* can be less than -80 at low frequencies, which is out of the validity range of the model. When permittivity measurements of high concentration saline solutions are made, the model may be at the limit of its validity, especially at low frequencies. It is important to state that coefficients used in this study (given in reference [9]) are not completely suitable for high loss dielectric measurements. However, it is expected that a new set of coefficients could be obtained for high loss dielectric measurements, which is beyond of the scope of this paper. For the evaluation of the capacitive model, we can say that it does not give

good results for permittivity measurement of saline solutions. The fact that the antenna model gives better results than this one is caused by the presence of a resistor in parallel with the two capacitances which models the losses in the medium. The deterioration of the antenna model, at low frequencies, can be explained by the fact that the radiation efficiency of the probe decreases with frequency: the probe no longer behaves like an antenna. This model does not represent adequately the physical situation at low frequencies and the results obtained with it are not very accurate. Regarding the virtual line model, the precision obtained in the studied cases is acceptable. This can be explained by the fact that the physical propagation phenomenon in the medium is modeled by the virtual transmission line. Even if this model assumes a perfect TEM propagation mode and neglects all of the high order modes, the obtained results show that it offers relatively good precision. Experimental tests have shown that the precision of the results are dependent on the calibration media: accuracy is high when the dielectric properties of the calibration and tested medium are close. Nevertheless, the model is robust enough to allow some freedom in the selection of the calibration media. The use of deionized water as the calibration medium gives good results when the permittivity of a saline solution is measured. This technique seems to overestimate a little bit the real part of permittivity when the frequency is below 2 GHz. This might be caused by the fact that the dielectric properties of water and saline solution are quite different at low frequencies: the losses are high for the saline solution and low for water.

3.10 CONCLUSION

The accuracy of four open-ended coaxial probe models was investigated. It has been found that the virtual line model was well suited for complex permittivity measurements of high loss media such as biological tissues. This model is sufficiently robust to achieve precise results when deionized water and air are used as calibration media. The antenna model can give accurate values on ε'' for lossy materials. However, its accuracy for ε' is poor, especially when the losses are important. The rational function model is interesting since no calibration medium is required providing that the model parameters are obtained using a set of high loss dielectric media. Using the published parameters, its accuracy was found to be not acceptable when high losses dielectric properties are measured. Regarding the capacitive model, experiments have shown that this model is not adequate for dielectric property measurements on high loss materials. In conclusion, the results indicate that the use of the virtual line model for biological tissue characterization is adequate and it offers a relatively good confidence for measurement results.

3.11 ACKNOWLEDGMENTS

We want to thanks MM. François Beauregard and Alan Rich for their technical assistance as well as Mr. Jeremy Anderson for his help during implantation of rational function method algorithm. We also want to thank FCAR of Québec and NSERC of Canada for their financial assistance during this work.

3.12 CONCLUSION DU CHAPITRE

Ce chapitre a démontré que la méthode de la ligne virtuelle donne des résultats précis lors des mesures de permittivité complexe prises sur des solutions salines présentant des pertes significatives aux fréquences micro-onde. Ce modèle nécessite deux milieux de calibration et, lorsque l'eau déionisée et l'air sont utilisés, la précision des mesures est très bonne. La règle de l'art est d'utiliser des milieux de calibration dont les propriétés diélectriques sont similaires à celles des milieux où sont prises les mesures diélectriques. L'étude a démontré que la robustesse de ce modèle par rapport aux milieux de calibration était acceptable et ce, même si les propriétés des milieux de calibration différaient passablement du milieu testé.

Le modèle de la ligne nécessite l'utilisation de deux milieux de calibration. Il est donc impossible de l'utiliser afin de solutionner le problème inverse, c'est-à-dire de prédire le coefficient de réflexion produit au bout d'une sonde coaxiale par un diélectrique dont on connaît les propriétés. Un modèle ne nécessitant aucun milieu de calibration pourrait permettre de définir le plan de référence du réflectomètre directement au bout de la sonde et d'éliminer l'effet des réflexions parasites présentes aux connecteurs situés entre le plan de référence et le plan de mesure. De plus, lorsque le modèle de la ligne virtuelle est utilisé pour solutionner le problème direct, un seul milieu de référence est requis puisque la distance entre le plan de référence et le bout de la sonde est nulle. La méthode s'en trouve alors facilitée et le calcul récursif n'est plus nécessaire. La méthode des fonctions rationnelles possède la caractéristique de ne pas utiliser de liquide de calibration et on peut l'utiliser afin de définir le plan de référence

directement au bout de la sonde. Comme on le verra dans le chapitre suivant, cette méthode a été utilisée afin d'éliminer les oscillations causées par les réflexions parasites.

Cette étude, un peu éloignée de l'ablation de foyer arythmogène par micro-onde, était nécessaire afin de choisir un modèle mathématique optimal lorsque des mesures sont prises sur des échantillons biologiques. L'article publié est un travail de synthèse qui aidera à effectuer un choix judicieux.

CHAPITRE IV

CORRECTION DES DISCONTINUITÉS LORS DES MESURES DE LA PERMITTIVITÉ COMPLEXE À L'AIDE D'UNE SONDE COAXIALE

4.1 MISE EN CONTEXTE

Dans le chapitre précédent, on a montré que la méthode de la ligne virtuelle était bien adaptée aux mesures de permittivité complexe d'un diélectrique présentant des pertes significatives aux fréquences micro-onde. On s'est aussi familiarisé avec la technique de prise de mesure où la première étape consiste à mesurer le coefficient de réflexion entre une sonde coaxiale en circuit ouvert et l'échantillon en question. Cette étape est habituellement réalisée à l'aide d'un analyseur de réseau. Dans le cadre de ce projet, on a remplacé cet appareil coûteux par un réflectomètre six-port automatisé et peu dispendieux afin d'élargir l'utilisation de la technique et de répandre l'expertise du laboratoire d'hyperfréquence dans ce domaine.

Les mesures effectuées au chapitre précédent ont été prises à l'aide d'un analyseur de réseau muni de l'option de fenêtrage temporel. Cet option permet d'enlever l'effet des réflexions parasites présentes au niveau des connecteurs entre le plan de référence et le bout de la sonde. Ces réflexions provoquent des oscillations sur les coefficients de réflexion mesurés, ce qui diminue la précision des valeurs de permittivité complexe obtenues. Le même problème se pose lorsque l'on remplace l'analyseur de réseau par un réflectomètre six-port. Cependant, ce dernier possède une largeur de bande limitée, de sorte qu'il est impossible d'utiliser la technique de fenêtrage temporel. On a cherché à développer une technique permettant d'éliminer ces réflexions parasites afin d'obtenir des mesures dont la qualité est comparable à celle obtenue avec un analyseur de réseau. Les techniques présentées dans ce chapitre sont simples et leur application contribue à améliorer la précision des mesures de façon significative.

4.2 INTRODUCTION

Lors de la détermination des propriétés diélectriques (ε^*) d'une substance liquide ou d'un tissu biologique, il est nécessaire de mesurer le coefficient de réflexion complexe (Γ^*) entre le bout la sonde coaxiale et le milieu testé. Ces mesures peuvent être prises à l'aide d'un analyseur de réseau ou d'un réflectomètre six-port. L'avantage du six-port sur l'analyseur de réseau est qu'il est portable et peu coûteux. Une fois le coefficient de réflexion mesuré, on utilise un modèle pour en déduire la permittivité complexe. Plusieurs de ces modèles existent dans la littérature, en particulier celui de la ligne de transmission virtuelle [6]. Celui-ci s'est avéré très précis, tant pour un diélectrique avec pertes (milieux salins, tissus biologiques) que pour un diélectrique présentant peu de pertes (éthanol, propanol).

Le principal problème rencontré lors des mesures est causé par le fait que le plan de référence et le plan de mesure ne sont pas situés au même endroit physique. La Figure 4.1 illustre ce concept. Le plan de référence est habituellement défini en amont de la sonde. On le définit lors de la calibration de l'analyseur de réseau ou du six-port en utilisant trois charges connues (habituellement un court-circuit, un circuit ouvert et une charge adaptée). Dans l'exemple de la Figure 4.1, le plan de référence est le plan B-B'. Pour sa part, le plan de mesure est tout simplement défini par le bout de la sonde (plan A-A'). C'est à ce plan que s'effectue le contact entre la sonde et le diélectrique. C'est aussi à ce plan que la réflexion porte l'information concernant les propriétés diélectriques du milieu.

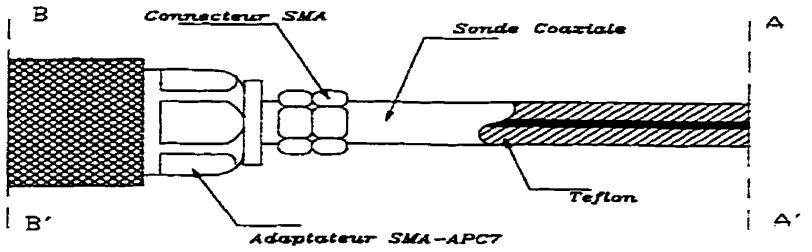


Figure 4.1: Sonde coaxiale

Le problème est celui-ci: entre le plan de référence B-B' et le plan de mesure A-A', il existe habituellement des connecteurs qui introduisent des réflexions parasites. Ces réflexions viennent fausser les mesures du coefficient de réflexion (Γ^*) et, du même coup, fausser les valeurs de permittivité (ε^*) mesurées.

Le but de ce chapitre est de présenter des techniques de correction des discontinuités lors des mesures de permittivité à l'aide d'un six-port.

4.3 MÉTHODES DE CORRECTION

4.3.1 Technique de la boîte d'erreur

Il existe une technique permettant de caractériser les discontinuités et ainsi corriger les coefficients de réflexion bruts. Les données sont corrigées à l'aide d'une boîte d'erreur ayant la forme suivante:

$$\Gamma_{corrigé} = \frac{a \cdot \Gamma_{brut} + b}{c \cdot \Gamma_{brut} + 1} \qquad (4.1)$$

Il s'agit d'identifier les coefficients complexes a, b et c, permettant de modéliser les discontinuités et les erreurs de mesure. C'est ici qu'intervient l'approche du fenêtrage temporel, ou le « time-gating ». À l'aide d'un analyseur de réseau HP-8510, on effectue la prise de mesure (au plan B-B') du coefficient de réflexion en plongeant la sonde dans un liquide quelconque. On répète ceci avec deux autres liquides. On obtient donc les trois mesures brutes suivante:

$$\Gamma_{brut\ liquide\#1}$$
$$\Gamma_{brut\ liquide\#2}$$
$$\Gamma_{brut\ liquide\#3}$$

Par la suite, on enlève les réflexions parasites présentes sur le signal de réflexion en utilisant l'option « time-gating » de l'analyseur de réseau et on reprend les mesures de coefficients de réflexions corrigés. On obtient alors les trois mesures corrigées suivantes:

$$\Gamma_{corrigé\ liquide\ \#1}$$
$$\Gamma_{corrigé\ liquide\ \#2}$$
$$\Gamma_{corrigé\ liquide\ \#3}$$

On calcule finalement les valeurs de a, b et c à l'aide de l'équation 1. Ces valeurs modélisent les discontinuités présentes entre les plans B-B' et A-A' pour la sonde utilisée. Une fois ces coefficients déterminés, on filtre toutes les mesures brutes subséquentes mesurées à l'aide du réflectomètre utilisé avec la boîte d'erreur (équation 4.1) afin d'éliminer les réflexions parasites et d'améliorer la qualité des mesures.

Notons qu'il n'est pas nécessaire de connaître parfaitement les propriétés diélectriques des trois liquides utilisés lors de la détermination des paramètres a, b et c. Il suffit simplement que les coefficients de réflexion lus par l'analyseur de réseau soient les

plus différents possible afin d'assurer une certaine robustesse à la boîte d'erreur. Notons également que le plan de référence demeure au même emplacement physique. L'amélioration des mesures provient du fait que l'on modélise les discontinuités présentes entre le plan de référence et le plan de mesure et que l'on corrige les Γ^*_{bruts} à l'aide de la boîte d'erreur.

L'application de cette technique en utilisant un réflectomètre à six-port est directe: une fois que les coefficients de la boîte d'erreur caractérisant la sonde utilisée sont déterminés, on peut utiliser un six-port afin de mesurer les Γ^*_{bruts}. On corrige ensuite les coefficients de réflexion à l'aide de la boîte d'erreur.

On doit donc utiliser un analyseur de réseau qui possède l'option «time-gating » afin de caractériser la sonde utilisée. Par la suite, on doit enregistrer les valeurs des coefficients de la boîte d'erreur (a, b et c) afin de former une banque de données qui serviront à la correction des Γ^*_{bruts} obtenus à l'aide du six-port.

La Figure 4.2 illustre les valeurs des paramètres a, b et c de la boîte d'erreur en fonction de la fréquence pour une sonde réelle:

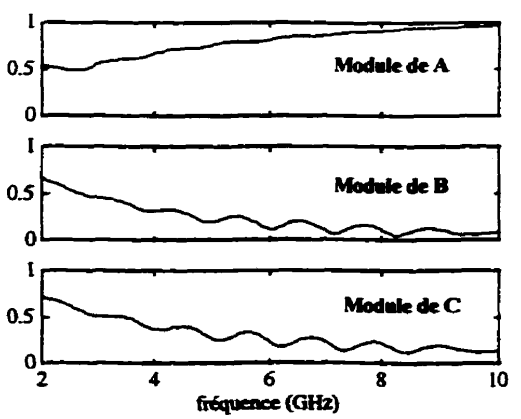


Figure 4.2: Valeurs typiques des coefficients de la boîte d'erreur

La Figure 4.3 montre un exemple d'application de la technique de la boîte d'erreur. Les trois liquides utilisés pour la détermination des paramètres a, b et c ont été les suivants:

- l'eau
- le méthanol
- l'air

Le liquide utilisé pour l'exemple est l'éthanol. On a pris des mesures du coefficient de réflexion de l'éthanol sans « time-gating » à l'aide de l'analyseur de réseau (courbe en gris du graphique du haut). Par la suite, on a utilisé la boîte d'erreur afin de corriger les Γ^*_{bruts} (courbe en noir du graphique du haut). Le graphique du bas présente l'erreur en pourcentage entre les mesures filtrées à l'aide de la boîte d'erreur et les mesures de Γ^* obtenues avec un analyseur de réseau en utilisant l'option « time-gating ». On constate que l'erreur est en deçà de 1%, ce qui prouve que la boîte d'erreur caractérise correctement la sonde utilisée.

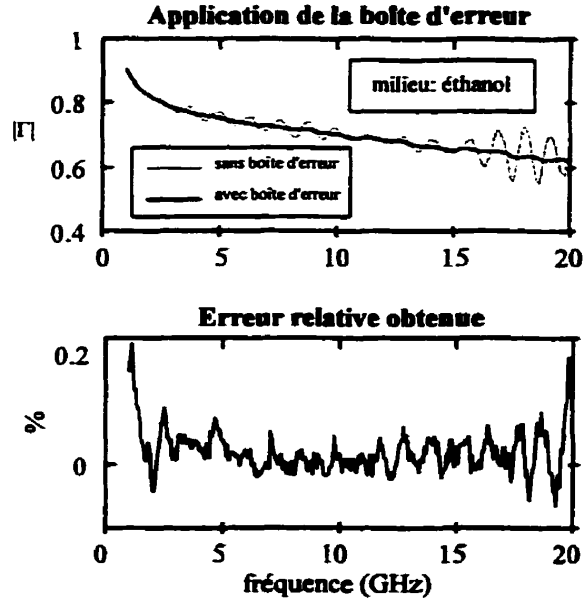


Figure 4.3: Application de la boîte d'erreur

Une fois la sonde caractérisée par ses paramètres a, b et c, on peut l'utiliser sur un six-port et obtenir des mesures de Γ corrigées. On peut ainsi obtenir, à l'aide d'un six-port, des mesures de qualités comparable à celles obtenues avec un analyseur de réseau utilisé avec le fenêtrage temporel.

4.3.2 Technique "banque de données"

La technique suivante est similaire à la technique précédente sauf que l'on emprunte un chemin différent afin de modéliser les discontinuités de la sonde coaxiale. Ces discontinuités sont corrigées directement lors de la détermination du plan de référence du six-port. La façon standard de fixer le plan de référence d'un six-port est d'utiliser quatre charges connues. Trois de ces charges servent à calculer les coefficients d'une boîte d'erreur tandis que la quatrième sert simplement à lever une ambiguïté de signe. Les charges habituellement utilisées sont les suivantes:

1) court-circuit
2) circuit ouvert
3) ligne de transmission terminée par un court-circuit (court-circuit déphasé)
4) charge adaptée

Dans la présente technique, on remplace ces quatre charges de calibration par trois liquides et un circuit ouvert. Le problème est de connaître exactement le coefficient de réflexion produit par ces milieux lorsque la sonde y est plongée.

Pour ce faire, on utilise un analyseur de réseau. On calibre d'abord l'analyseur à l'aide de ses trois charges de calibration (court-circuit, circuit ouvert, charge adaptée). Par la suite, on connecte la sonde coaxiale utilisée sur le port calibré et on corrige les discontinuités de la sonde à l'aide de l'option « time-gating ». On mesure de cette façon

le Γ^* de quatre différents milieux. On sauve ces mesures dans des fichiers qui contiennent la fréquence ainsi que le module et la phase du coefficient de réflexion. Ces données serviront de base de données pour fixer le plan de référence du six-port.

On se sert donc des données fournies par l'analyseur de réseau afin de créer une banque de données utilisée pour fixer le plan de référence du six-port. On doit ainsi conserver les liquides de calibration afin d'obtenir une bonne répétabilité. Les discontinuités de la sonde sont alors directement corrigées puisque la banque de données a été construite à l'aide de Γ^* filtrées par le fenêtrage temporel. Le plan de référence se trouve ainsi au même endroit que sur l'analyseur de réseau, soit au connecteur entre la sonde coaxiale et le câble de l'analyseur de réseau.

La seule restriction dans le choix des liquides de calibration est qu'ils doivent produire des Γ^* les plus différents possible afin que la technique soit robuste. Les liquides utilisés sont habituellement l'air, l'eau distillée, le méthanol et une solution saline de 1.0 mol/L. Les Γ^* de ces solutions sont montrés à la Figure 4.4 et ce, entre 50 MHz et 20.05 GHz.

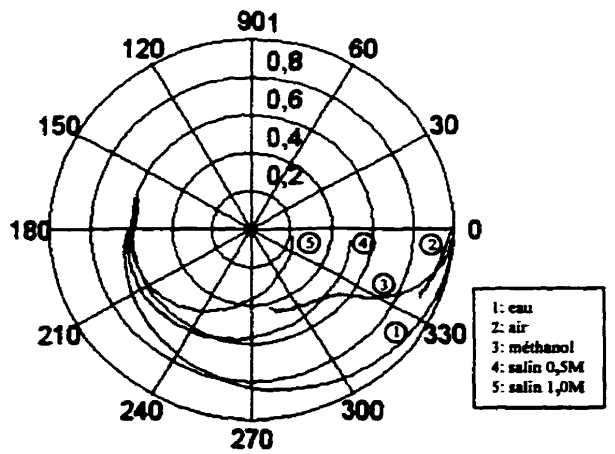


Figure 4.4: Γ^* des standards utilisés

La Figure 4.5 montre un exemple des résultats obtenus en utilisant cette technique ainsi qu'un réflectomètre six-port sur une solution saline dont la concentration est de 0,25 mol/L.

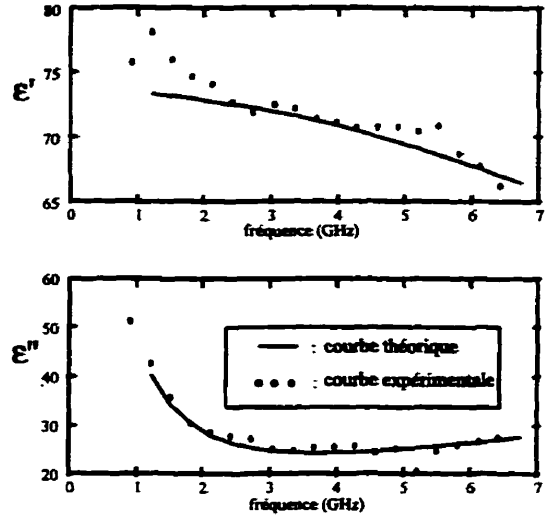


Figure 4.5: Résultats sur un salin 0,25 mol/L

Les légères oscillations sont causées par le fait que la fenêtre d'observation utilisée par le fenêtrage temporel n'était pas parfaite. Cependant, les résultats sont satisfaisants.

4.3.3 Méthode de Stuchly

Comme on l'a mentionné précédemment, le fait que des discontinuités soient présentes entre le plan de référence et le plan de mesure fait en sorte que l'on observe des oscillations dans les mesures de Γ^*. Les deux méthodes précédentes consistent à modéliser ces discontinuités tout en conservant les emplacements physiques des plans de référence et de mesure. Cependant, si on fait en sorte que ces deux plans soient situés au bout de la sonde, il n'y aura plus de discontinuités entre ceux-ci et on n'observera plus d'oscillations lors des mesures de Γ^*.

Cela est réalisé à l'aide du modèle de Stuchly [7] [8] [9] où, en utilisant la méthode des moments, on a modélisé l'admittance de bout d'une sonde coaxiale plongée dans un diélectrique semi-infini.

Le modèle est valide pour des sondes fabriquées à partir d'un câble coaxial de 50 Ω seulement. Les données obtenues à l'aide de la méthode des moments ("full-wave moment method") incluent les effets de la radiation et du stockage d'énergie dans le champ proche ainsi que les modes évanescents du guide. Le modèle est donné par l'équation suivante:

$$\frac{Y}{Y_0} = \frac{\sum_{n=1}^{4}\sum_{p=1}^{8}\alpha_{np}(\sqrt{\varepsilon_r})^p(sa)^n}{1+\sum_{m=1}^{4}\sum_{q=0}^{8}\beta_{mq}(\sqrt{\varepsilon_r})^q(sa)^m} \qquad (4.2)$$

où α, β: coefficients du modèle (donnés à la référence [8]);

ε_r: permittivité complexe du diélectrique;

s: fréquence complexe ($s = j\omega$);

a: rayon interne de la sonde coaxiale;

Y_0: admittance de la sonde (1/50 mho).

Ce modèle est valide pour des valeurs de permittivité comprises entre ($1 \leq \varepsilon' \leq 80$) et ($-80 \leq \varepsilon'' \leq 0$) et ce pour des fréquences comprises entre 1 et 20 GHz.

Ce modèle est le seul ayant la possibilité de prédire l'admittance du bout de la sonde lorsque celle-ci est plongée dans un liquide diélectrique. Cela est extrêmement intéressant car il devient alors possible de fixer le plan de référence au bout de la sonde

en utilisant quatre liquides de calibration. On a choisi l'eau distillée, le méthanol ainsi qu'une solution saline 0,5 mol/L pour fixer le plan de référence du six-port. L'air est également utilisé afin de lever une ambiguïté de signe. On a choisi la solution saline 0,5 mol/L au lieu de 1,0 mol/L car la partie imaginaire de la permittivité de cette dernière est supérieure à 80 à basses fréquences, ce qui est en dehors de la limite de validité du modèle. On peut observer les valeurs de Γ^* des liquides de calibration à la Figure 4.4.

L'avantage de cette technique est que l'on n'a pas besoin d'utiliser un analyseur de réseau afin de construire une base de données. L'expérimentation montre que l'erreur relative entre le Γ^* du modèle et le Γ^* mesuré est en deçà de 4 % pour l'eau, 5 % pour le méthanol et 10 % pour la solution saline et ce, pour des fréquences comprises dans la bande fréquentielle d'intérêt située entre 1 et 20 GHz. Ces résultats sont montrés de la Figure 4.6 à la Figure 4.8. Les erreurs les plus importantes sont à basses fréquences (autour de 1 GHz) et la précision est adéquate pour des fréquences supérieures à 4 GHz.

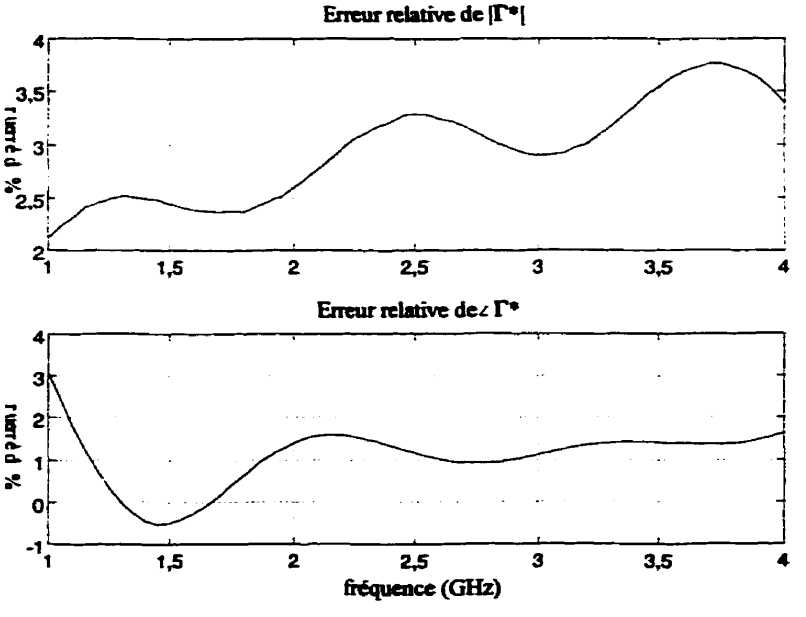


Figure 4.6: Erreur relative sur Γ^* obtenue avec l'eau

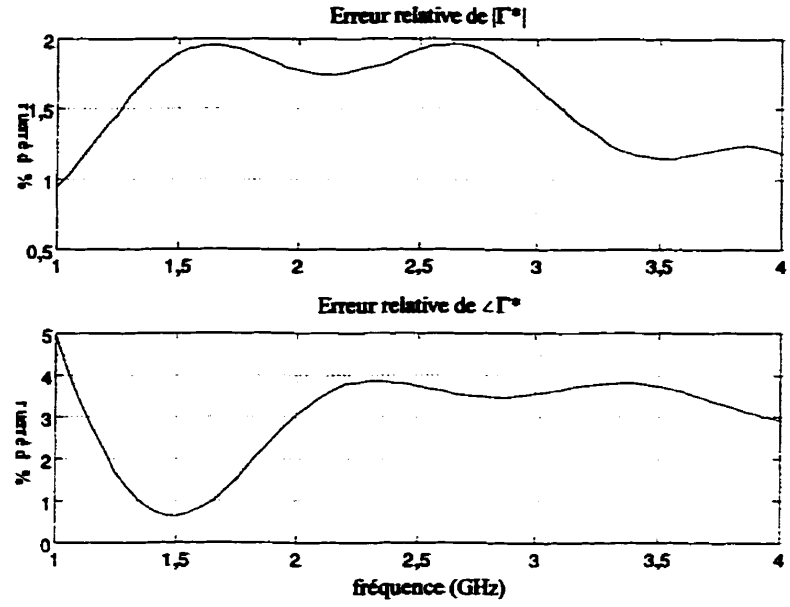


Figure 4.7: Erreur relative sur Γ* obtenue avec le méthanol

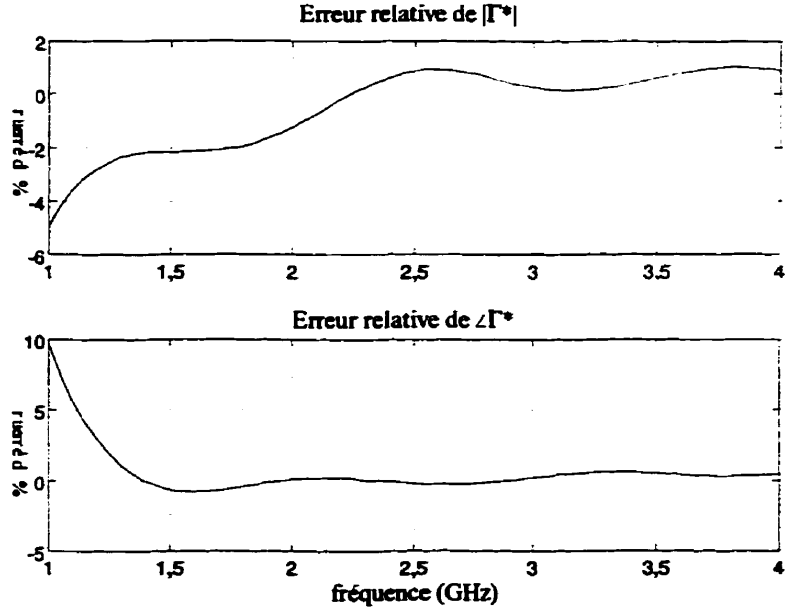


Figure 4.8: Erreur relative sur Γ* obtenue avec un salin de 0,5 mol/L

Les expériences réalisées démontrent qu'il est possible d'utiliser ce modèle dans le but de fixer le plan de référence au bout de la sonde lors de l'utilisation d'un six-port.

La Figure 4.9 montre les résultats sur les mesures de la permittivité complexe en utilisant cette technique. Les mesures ont été prises sur une solution saline de 0,25 mol/L en utilisant la méthode de la ligne virtuelle présentée au chapitre précédent de cette thèse. Cette concentration saline a été sélectionnée car ses propriétés diélectriques se rapprochent de celles des tissus musculaires. Si la méthode donne des résultats satisfaisants, on pourra l'utiliser afin de mesurer les propriétés diélectriques des échantillons myocardiques.

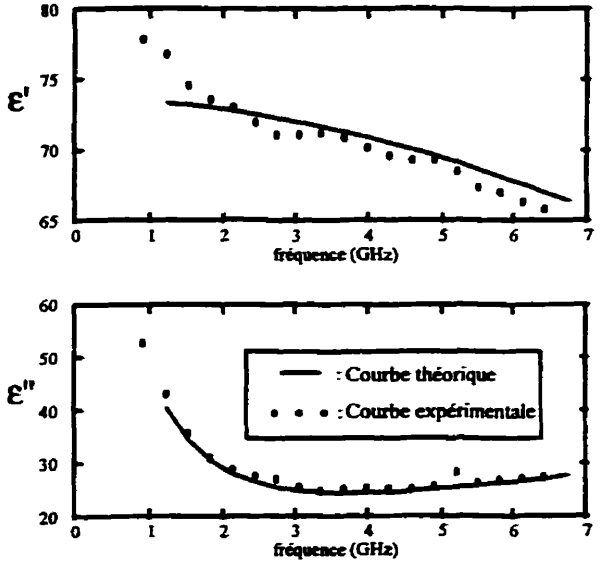


Figure 4.9: Résultats sur un salin 0,25 mol/L

On remarque que les résultats sont satisfaisants et que les oscillations autrefois présentes sont complètement disparues. Il est donc possible d'obtenir des résultats d'une grande

précision avec un réflectomètre six-port sans avoir recours de quelque manière que ce soit à un analyseur de réseau.

4.4 CONCLUSION

Les techniques présentées dans cet article montrent qu'il est possible d'éliminer les effets des discontinuités présentes entre le plan de mesure et le plan de référence afin d'obtenir des mesures de permittivité précises. Les deux premières techniques requièrent l'utilisation d'un analyseur de réseau pour l'élaboration de banques de données tandis que la troisième peut s'appliquer sans l'aide de l'analyseur, ce qui présente un avantage certain. Les résultats obtenus à l'aide d'un réflectomètre six-port en appliquant ces techniques sont très bons.

La méthode utilisant le modèle de Stuchly pour fixer le plan de référence au bout de la sonde et le modèle de la ligne virtuelle pour mesurer les propriétés diélectriques du milieu est celle qui est la plus précise lorsqu'un réflectomètre six-port est utilisé. Cette technique a été utilisée lors des mesures présentées au chapitre suivant.

CHAPITRE V

CATHETER ABLATION: INFARCTED MYOCARDIUM HAS A HIGHER ELECTRICAL CONDUCTIVITY AT RF FREQUENCIES BUT THE SAME COMPLEX PERMITTIVITY AT MICROWAVE FREQUENCIES IN COMPARISON WITH NORMAL CARDIAC TISSUE

Article soumis au journal
Bioelectromagnetics

Dany Bérubé[†], Pierre Savard[†] and Fadhel Ghannouchi[‡]

from:

[†]Biomedical Engineering Institute and [‡]Department of Electrical Engineering and Computer Sciences of the École Polytechnique de Montréal, and the Centre de recherche de l'Hôpital du Sacré-Coeur, Montréal, Québec, Canada

5.1 SOMMAIRE

L'ablation radiofréquence (RF) par cathétérisme de la tachycardie ventriculaire en présence d'un vieil infarctus du myocarde (IM) n'est pas aussi efficace que pour les patients n'ayant pas subi d'IM. Dans le but d'étudier la déposition d'énergie en ablation RF et micro-onde en présence d'infarctus, les propriétés électriques de tissus cardiaques normaux et d'un IM de deux semaines ont été mesurées *in vitro* aux fréquences RF (500 kHz) et micro-onde (915-6441 MHz) sur des échantillons myocardiques canins. L'infarctus du myocarde possède une conductivité électrique plus élevée aux fréquences RF que le myocarde sain (0,52 ± 0,08 vs 0,30 ± 0,05 S/m à 25 °C). Par contre, aucune différence significative entre les tissus myocardiques sains et infarcis n'a été observée pour les permittivités complexes aux fréquences micro-onde dans un intervalle de température compris entre 37 °C et 60 °C. En résumé: 1) la conductivité électrique supérieure du tissu infarci peut détourner le courant RF des tissus arythmogènes adjacents, ce qui diminue l'efficacité de l'ablation RF; 2) à cause de l'uniformité des propriétés diélectriques des différents tissus aux fréquences micro-onde, l'ablation micro-onde peut potentiellement être plus efficace que l'ablation RF en présence d'IM.

5.2 MISE EN SITUATION

L'ablation par micro-onde semble être intéressante afin de traiter des substrats physiologiques de grandes dimensions responsables de certains types d'arythmies cardiaques. Cependant, quelle est la profondeur de pénétration des micro-ondes ? Quel volume de lésion peut-on produire avec ce type d'énergie ? Comment peut-on comparer l'ablation RF à l'ablation micro-onde en présence d'un infarctus du myocarde ? Toutes ces questions ont une grande importance d'un point de vue clinique et le présent chapitre amène des éléments clés afin d'y répondre.

L'interaction entre l'onde électromagnétique émise par l'applicateur d'énergie et le tissu myocardique peut être exprimée par une propriété physique nommée permittivité complexe. Celle-ci est reliée à la vitesse de propagation de l'énergie dans un milieu quelconque ainsi qu'à son taux d'absorption. Cette propriété est d'une grande importance lorsque l'on désire comprendre et modéliser le comportement des micro-ondes en présence de tissus myocardiques.

L'étude présentée au deuxième chapitre démontre que la précision des mesures de permittivité complexe sur des milieux à fortes pertes est optimale lorsque la méthode de la ligne virtuelle est utilisée. De plus, on a développé au chapitre précédent une méthode permettant de remplacer l'analyseur de réseau par un dispositif peu dispendieux, le réflectomètre six-port, afin d'obtenir des mesures non influencées par les réflexions parasites présentes aux connecteurs utilisés. Ces méthodes ont été utilisées afin d'obtenir les résultats présentés dans ce chapitre. Pour ce qui est des mesures de conductivité électrique, une méthode tétrapolaire bien connue a été validée et utilisée lors des mesures.

Ce chapitre fourni donc des données pouvant être utilisées afin de modéliser et de comparer les résultats obtenus par les deux techniques d'ablation et d'effectuer la conception d'applicateurs micro-onde efficaces. Les résultats obtenus sont présentés sous la forme d'un article scientifique qui a été soumis à une revue spécialisée. Cet article est présenté dans les pages qui suivent.

5.3 ABSTRACT

Radiofrequency (RF) catheter ablation of ventricular tachycardia in patients with old myocardial infarction (MI) is not as successful as for other arrhythmias in patients without MI. To investigate RF and microwave energy delivery in the presence of MI, the electrical properties of normal and infarcted cardiac tissues were measured for both RF (500 kHz) and microwave (915-6441 MHz) frequencies in canine *in vitro* preparations with two week old MI. Infarcted myocardium had a significantly higher electrical conductivity at RF frequencies than normal myocardium (0,52 ± 0,08 vs. 0,30 ± 0,05 S/m at 25 °C). In contrast, no significant difference in the complex relative permittivities measured at microwave frequencies in a temperature range of 37 to 60 °C was observed between infarcted and normal myocardium. In conclusion: 1) because of its higher electrical conductivity, infarcted tissue may shunt RF current away from adjacent arrhythmogenic tissue, thereby lowering the efficacy of RF catheter ablation; 2) because of the uniformity of the electrical properties of the different cardiac tissues at microwave frequencies, microwave energy can potentially be more successful than RF energy for catheter ablation in MI patients.

5.4 INTRODUCTION

Tachycardia is an abnormal increase in the heart rate that can cause syncope or sudden cardiac death. The mechanism of the tachycardia often involves only a small region of the heart that has abnormal structural or electrical properties. Recently, a new technique was developed to ablate the arrhythmogenic region and cure the patient. This procedure consists of inserting under local anesthesia a thin and flexible catheter into an artery or a vein, and to bring the tip of these catheters inside the heart, near the arrhythmogenic region. A radiofrequency (RF) current is then delivered through electrodes located at the catheter tip. The high current density near the catheter tip dissipates heat and creates a small lesion that destroys the arrhythmogenic substrate. According to Scheinman [21], the clinical use of RF ablation has increased rapidly after its introduction in 1989. The success rate is superior to 95% for the treatment of patients with the Wolff-Parkinson-White (WPW) syndrome [15] and it is also very high for the ablation of the atrio-ventricular node. However, the success rates are much lower (10-50%) for the treatment of ventricular tachycardia in patients with old MI and this has hampered the application of RF ablation for these arrhythmias [21]. These low success rates can be attributed to different factors: 1) RF lesions are smaller than the arrhyhtmogenic substrate. 2) The arrhythmogenic substrate is always located near infarcted tissue in MI patients [40] and the electrical conductivity of the infarcted myocardium could be altered, thus diverting the RF currents. 3) The arrhythmogenic substrate is more difficult to localize. The first two factors could possibly be circumvented by using microwave energy instead of RF energy.

To acquire fundamental knowledge about RF and microwave energy delivery in the presence of infarcted tissue, the electrical properties of normal and infarcted cardiac tissues were measured for both RF and microwave frequencies in canine *in vitro*

preparations. Correct values of the conductivity and complex permittivity of these tissues are also important for the construction of realistic catheter-heart computer models that could improve the design of ablation catheters.

5.5 METHODS

5.5.1 Experimental preparation

In 8 anaesthetized mongrel dogs (23-26 kg), the left anterior descending coronary artery was surgically occluded at a proximal level after left thoracotomy. The animals were then allowed to recover. After two weeks, the surviving dogs (N = 4) were sacrificed, their hearts were explanted, placed in a refrigerated nutritive solution and transported to the laboratory along with a 100 cc blood sample. The left ventricle was dissected along the posterior margin and myocardial infarction was visually identified in all hearts. The infarcted regions extended from 4 to 7 cm over the left ventricular endocardium and from 1,5 to 4 cm over the left ventricular epicardium. The RF conductivity measurements were performed within 90 min. of death by applying a tetrapolar electrode array at 4 to 5 sites over normal tissue, both along and across fiber direction, and at 2 to 4 sites over infarcted tissue, over both the epicardium and the endocardium. Measurements were repeated twice at each site. Small pieces of tissue (approximately 18x18x8 mm) were then extracted from each of those sites and placed in a tissue bath to measure the complex relative permittivity. *In vitro* measurements can be justified because the electrical properties changed relatively little during the first hours following death [41].

5.5.2 RF conductivity measurements

Conductivity measurements were performed at room temperature (25 °C and at frequency of 500 kHz, which is the most commonly used frequency for RF catheter ablation, using the tetrapolar electrode technique [14]. The basic principle of this technique is to apply four aligned electrodes separated by the same distance a over the conductive medium to inject a known current I between the two outermost electrodes. Considering that the medium is semi-infinite, the conductivity σ can then be computed from:

$$\sigma = \frac{I}{2\pi a V} \tag{5.1}$$

To reduce the effects of stray capacitances between the leads, the interface impedance of the electrodes was minimized by using Ag-AgCl pellets with a diameter of 2 mm and an interface impedance of 600 Ω. The distance between the center of adjacent electrodes was 6 mm and the electrodes were flush-mounted in a plexiglass sheet with a 10 cm side. The potential differences between the center electrodes and across a resistance in series with the outer electrodes were measured in differential mode with an oscilloscope (Phillips 3094). Measurements performed in different saline solutions with known conductivities ranging between 0,1 and 0,7 S/m showed a resistive medium (phase shift of less than 15° between voltage and current waveforms) with a standard error of less than 5 % in the estimated conductivities. An analytical model with a finite thickness showed that the semi-infinite medium approximation remains valid (< 4% error) for a medium thickness of 12 mm, which is about that of the left ventricular wall.

5.5.3 Microwave permittivity measurements

The complex relative permittivity ($\varepsilon'' = \varepsilon_r - j\sigma/\omega\varepsilon_0 = \varepsilon' - j\varepsilon''$) was measured using a six-port reflectometer technique described in [6]. An open-ended coaxial line (Figure 5.1) with a diameter of 3 mm was applied over a small piece of cardiac tissue which was placed in a tissue bath containing a physiological saline solution. The saline solution did not cover the tissue sample and did not come in contact with the coaxial probe. The tissue bath was placed in a water dish which was slowly heated. Two small temperature probes were inserted into the myocardial tissue, away from the coaxial probe, and measurements were repeated as the tissue temperature increased from 37 to 60 °C, at every 5 °C.

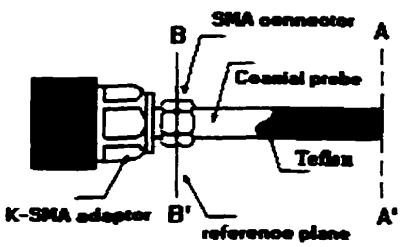


Figure 5.1: Coaxial probe

The complex reflection coefficient between the end of the coaxial line and the cardiac tissue was measured with a six-port reflectometer. Measurements were performed for frequencies ranging between 915 and 6441 MHz with a 307 MHz step using a computer controlled source (Wiltron 68147A), 19 complex values were thus obtained. The reference plane of the six-port was defined at the end of the probe by using the rational function method [7-9]. With such a reference plane, the effects of parasitic reflections occurring at the connectors or at any other discontinuities within the probe are eliminated.

The complex relative permittivity was computed from the reflection coefficient measured at each frequency by using a virtual line model [6], which has a high accuracy for estimating the permittivity of high loss media [13] [10]. In this modes, the medium under test is modeled by a virtual transmission line which has the same physical dimensions as the probe (Figure 5.2).

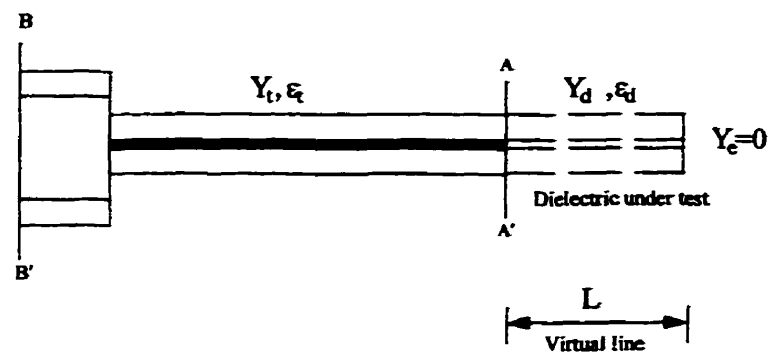


Figure 5.2: Virtual line model

The only unknown in this model is the length L of the virtual line. To find its value, the probe is applied to a calibration medium for which the dielectric properties are well known. Since the dielectric properties of the calibration medium should also be close to those of tested medium, deionized water was selected. Because the reference plane is defined at the end of the probe (A-A' plane of Figures 1 and 2), the value of the virtual line length L can be computed from the complex reflection coefficient Γ_w^* between the end of the probe and deionized water using:

$$L = \frac{c}{\omega\sqrt{\varepsilon_w^*}} \tan^{-1}\left[\frac{-j\sqrt{\varepsilon_t^*}}{\sqrt{\varepsilon_w^*}} \cdot \frac{1-\Gamma_w^*}{1+\Gamma_w^*}\right] \tag{5.2}$$

where ε_w^* is the complex relative permittivity of deionized water, ε_t^* is the complex relative permittivity of Teflon which is the dielectric of the probe, and c is the speed of

light in free space. When the value of L is obtained, the complex relative permittivity of the medium under test ε_d^* can be computed by using:

$$\varepsilon_d^* = \frac{-jc\sqrt{\varepsilon_t^*}}{2\pi fL} \cdot \frac{1-\Gamma_d^*}{1+\Gamma_d^*} \cdot \cot\left(\frac{2\pi fL\sqrt{\varepsilon_d^*}}{c}\right) \tag{5.3}$$

where Γ_d^* is the measured complex reflection coefficient of the medium. This equation cannot be solved directly, so an iterative method was used.

5.5.4 Statistical analysis

The RF conductivity measurements performed with the electrode array parallel to the fibers in healthy regions where not different from those performed perpendicular to the fibers (0,30 ± 0,03 vs. 0,32 ± 0,03 S/m). Because of the rotation of the myocardial fibers across the ventricular wall and the large interelectrode distance of the conductivity probe, the measurement domain encompasses a region in which fiber orientation is not constant and it is not possible to completely rule out the presence of anisotropy. For all probe orientations, the electrical conductivity at sites (N = 59) over normal myocardium was significantly lower ($p < 0,01$) than that at sites (N = 32) over infarcted myocardium (0,31 ± 0,03 vs. 0,51 ± 0,08 S/m, respectively). Interindividual differences in infarct size and geometry could explain that the standard deviation of the RF conductivity measured over infarcted regions is higher than that measured over the normal myocardium. The conductivity of the blood was similar to that of the infarcted myocardium (0,49 ± 0,02 S/m, N = 7). At 500 kHz, the different media were always resistive with phase shifts of less than 15° between voltage and current waveforms.

The complex relative permittivity measurements of normal and infarcted myocardium at 37 °C are shown in Figure 5.3 and Figure 5.4, respectively. The same samples as those used for conductivity measurements were used for permittivity measurements. Because of an inadequate calibration of the six-port reflectometer at some frequencies, the data for these frequencies were removed. For all frequencies, there is no significant difference between any of the mean values of complex relative permittivity of infarcted myocardium and those of healthy myocardium. For both types of tissue, the real (ε') part of the complex relative permittivity decreases from 60 to 50 while the imaginary part (ε") decreases from 25 to 13 as the frequency increases from 915 to 6441 MHz.

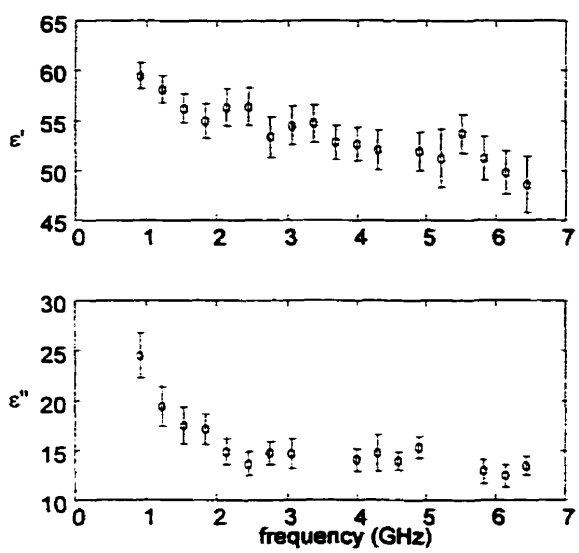


Figure 5.3: Normal myocardium (37 °C)

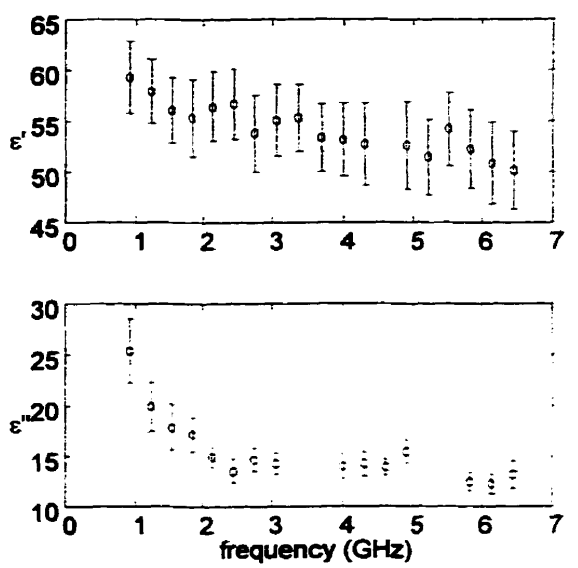


Figure 5.4: Infarcted myocardium (37 °C)

The permittivity measurements of normal and infarcted myocardium at 60 °C are shown in Figure 5.5 and Figure 5.6, respectively. Again, there is no significant difference between any of the mean values of complex relative permittivity of infarcted

myocardium and those of healthy myocardium. Compared to the mean values obtained at 37 °C, the real (ε') part of the complex relative permittivity is lower by about 5 units in all the frequency band, whereas the imaginary part (ε") remains the same in the 915 to 3000 MHz frequency band. However these changes are not statistically significant.

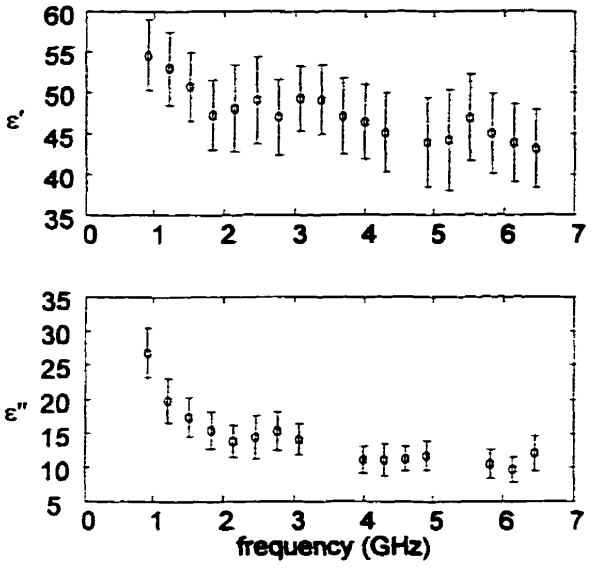


Figure 5.5: Normal myocardium (60 °C)

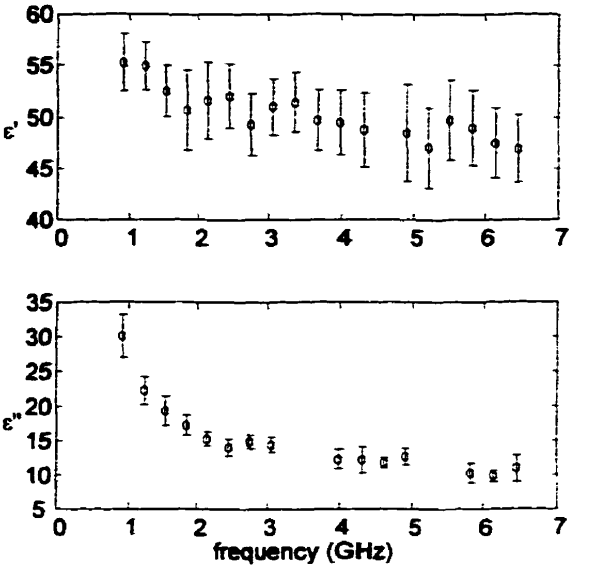


Figure 5.6: Infarcted myocardium (60 °C)

Finally, permittivity measurements of blood at 37 °C are shown in Figure 5.7. Again, there is no significant difference between any of the mean values of complex relative permittivity of blood ant those of healthy or infarcted myocardium at 37 °C.

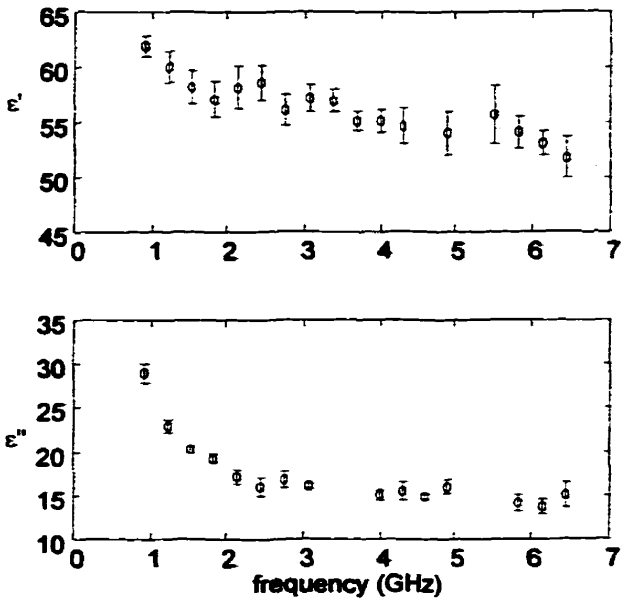


Figure 5.7: Complex relative permittivity of blood

5.6 DISCUSSION

This work provides new measurements of RF conductivity and microwave complex relative permittivity of both healthy and infarcted myocardium. The electrical properties of canine blood measured with our RF and microwave techniques are in close agreement with those reported in the literature, e.g., a conductivity of 0.55 S/m for normal human blood at 21 °C and 50 kHz [42], a relative permittivity ε' of 58 to 62 at 1 GHz and 55 to 56 at 3 GHz [43], and an imaginary (ε") part of the complex relative permittivity of 25 to 28 at 1 GHz [43]. The complex relative permittivities of the normal myocardium are also in close agreement with those reported by Xu *et al.* [44], e.g., a real part ε' of 53 at 1 GHz and 52 at 4 GHz, and imaginary part ε" of 21 at 1 GHz and 13 at 4 GHz and with Semenov *et al.* [106], ε' of 55 at 2 GHz and 51 at 6 GHz. Our main

result, also observed by Semenov at 200 kHz [106], is that the RF conductivity of infarcted myocardium was significantly higher at 500 kHz than that of the normal myocardium, whereas no difference in the microwave complex relative permittivity has been observed between the two types of tissue. This can be explained by the fact that infarcted tissue is mainly composed by two kinds of biopolymers interrelated chains, the collagen and the elastin, where the proportion of the extracellular fluid is higher than that of normal tissues. This heterogeneity of the conductivity at RF frequencies may have important clinical implications for the selection of the right type of electromagnetic energy for the catheter ablation of arrythmogenic substrates in the presence of myocardial infarction.

Detailed epicardial and endocardial activation mapping performed with 128 electrodes in MI patients undergoing arrhythmia surgery has shown that the mechanism of ventricular tachycardia involves regions that are located within or at the border of the infarcted myocardium [40]. During ventricular tachycardia, the depolarization wavefront which triggers the contraction of the heart, propagates repeatedly around a closed loop in the myocardium surviving inside or near the infarct. This phenomena is called reentry. The objective of catheter ablation is to cause irreversible tissue damage to this reentry pathway which consists essentially of normal myocardium. Since the RF conductivity of the infarcted region is higher than that of the normal myocardium, the RF current originating from the ablation catheter placed in the vicinity of the reentry circuit could be diverted toward the infarcted region and less RF current would flow in the normal myocardium constituting the reentry pathway. Less RF energy would thus be dissipated in the arrhythmogenic substrate and this could partly explain the lower success rates observed for this type of RF catheter ablation.

In contrast with RF frequencies, the electrical properties of normal myocardium, infarcted myocardium and blood are identical at microwave frequencies. This means that a uniform pattern of energy dissipation can be produced in the region of the infarction and that the healthy tissue constituting the reentry pathway can be heated with more efficacy than with RF energy. Also, the absence of changes in the dielectric properties with temperature at 2,45 GHz, and more specifically of the imaginary part ε'' of the complex relative permittivity which directly determines the losses, indicates that the pattern of microwave energy deposition will not change with time as the tissue temperature increases in the vicinity of the ablation catheter. In addition, microwave energy has other advantages over RF energy such as deeper regions of temperature rise [45] and more flexibility for the design of the antenna that could lead to lesions with geometries that are better adapted to the arrhythmogenic substrate, e.g. elongated, hemispherical, etc.

5.7 CONCLUSION

Measurements of RF conductivity and microwave complex relative permittivity of healthy and infarcted canine myocardium were performed *in vitro*. The RF conductivity of infarcted tissue was significantly higher than that of the normal tissue whereas no difference in the microwave complex relative permittivity has been observed between the two types of tissues. The implications of these findings are that: 1) because of its higher electrical conductivity, infarcted tissue may shunt RF current away from adjacent arrhythmogenic tissue, thereby lowering the efficacy of RF catheter ablation; 2) because of the uniformity of the electrical properties of the different cardiac tissues at microwave frequencies, microwave energy can be potentially more successful than RF energy for catheter ablation in MI patients by providing more a uniform energy deposition pattern.

5.8 ACKNOWLEDGMENTS

The authors wish to acknowledge the help of Mr. Pierre Fortier for the experimental preparations, Dr. Robert Guardo for the RF conductivity measurements and Mr. François Beauregard for the microwave permittivity measurements.

5.9 CONCLUSION DU CHAPITRE

Les résultats des mesures de permittivité montrent qu'aucune différence significative n'a été notée entre les tissus sains et infarcis, ainsi que du sang. Ceci fait en sorte que pour un applicateur d'énergie micro-onde, le milieu environnant est à toute fin pratique homogène. Cela est un avantage car la déposition d'énergie s'effectuera toujours de la même manière en présence ou non d'un infarctus. La constance des propriétés diélectriques avec la température à 2,45 GHz facilite aussi la modélisation du phénomène et fait en sorte qu'aucun emballement thermique n'est présent lors d'une ablation réelle. La seule différence entre les zones saine et infarcie provient de la sortie de chaleur par l'effet de convection du fluide sanguin circulant dans les tissus. L'irrigation étant très faible au niveau des tissus infarcis, on peut s'attendre à ce que l'élévation de température y soit un peu plus rapide. Cet effet sera par contre quelque peu compensé par le flux de chaleur circulant sous l'effet de la conduction thermique au niveau des tissus eux-mêmes.

Une étude publiée à la fin de 1997 par Semenov [104-105] montre que les propriétés diélectriques d'un infarctus du myocarde vieux de trois semaines ne varient pas beaucoup dans la bande micro-onde. À 2,5 GHz, la partie réelle ε' est sensiblement la même que pour le myocarde sain (55 vs 56). La même situation a été rapportée à 6 GHz (50 vs 51). Tout comme les résultats présentés dans ce chapitre, les déviations standards des mesures de Semenov sur les moyennes mesurées sont toujours plus élevées pour les tissus infarcis que pour les tissus sains. Pour la résistivité à 6 GHz, Semenov rapporte une diminution de 10 $\pm$ 10 %. Cela se traduit par une légère augmentation de ε'', comme il a été noté dans les mesures présentées aux figures 5.3 et 5.4. La seule différence significative rapportée par Semenov a été obtenue à 200 MHz

où la résistivité du muscle infarci est inférieure de 30 % ± 8 à celle du muscle sain. Cet article, non disponible durant la période de prise de mesures, appuie donc les résultats obtenus.

Les mesures de conductivité ont montré que la conductivité électrique d'une zone myocardique infarcie est plus grande que celle d'une zone saine. Ces résultats ont été utilisés par Kaouk durant ses études doctorales afin de modéliser la déposition d'énergie RF en présence d'infarctus. Les conclusions de ce dernier indiquent qu'à cause de la conduction thermique, aucune différence n'existe entre une ablation effectuée sur un myocarde sain et un myocarde ayant subi un infarctus. Cependant le modèle utilisé est axisymétrique, ce qui limite quelque peu les configurations géométriques qu'il est possible de simuler. Il serait intéressant de savoir si les résultats obtenus avec un modèle non axisymétrique aboutiraient aux mêmes conclusions.

Ces mesures ont été effectuées afin de répondre à certaines questions fondamentales que l'on se posait au début du projet. Cette partie du projet étant terminée, on peut passer à la deuxième étape qui consiste à concevoir un système d'ablation micro-onde efficace et sécuritaire. Ce système peut être divisé en deux parties: le générateur et l'applicateur d'énergie situé à l'extrémité du cathéter. Ces sujets seront traités aux deux chapitres qui suivent.

CHAPITRE VI

A MICROWAVE ABLATION SYSTEM TO TREAT CARDIAC ARRHYTHMIAS

Article soumis au journal
"IEEE Transaction on Instrumentation and Measurements"

Dany Bérubé*, F.M. Ghannouchi**, J. Gauthier**, P. Savard*.

* Institut de génie biomédical
** Département de génie électrique et informatique
École Polytechnique de Montréal
C.P. 6079, succ. centre-ville
Montréal (Québec)
H3C 3A7

6.1 SOMMAIRE

Depuis la fin des années 1980, quelques types d'arythmies cardiaques peuvent être traités de façon curative par la technique d'ablation RF par cathéter. Cette méthode est très efficace lorsque la région arythmogène est petite et située près de la surface endocardique. Cependant, lorsque cette région est grande et située plus en profondeur dans le myocarde, l'efficacité de l'ablation RF diminue considérablement. L'ablation micro-onde pourrait alors être utilisée dans le traitement de ces arythmies. Cet article porte sur la conception d'un système d'ablation micro-onde utilisé afin d'effectuer l'ablation d'arythmies cardiaques par cathétérisme. Le système d'ablation proposé possède certaines caractéristiques importantes destinées à offrir au système une bonne souplesse d'utilisation et à assurer au patient traité une sécurité optimale.

6.2 MISE EN CONTEXTE

Les résultats des mesures de permittivité, combinés aux simulations effectuées par Kaouk [123], ont démontré que l'ablation micro-onde est en mesure de produire des lésions dont le volume est important et qui s'étendent profondément à l'intérieur du myocarde. Les travaux de Luis *et al.* [60] ainsi que de Stuffer *et al.* [63] ont aussi démontré que l'ablation micro-onde peut produire des lésions dont le volume et la profondeur de pénétration sont plus grands que pour l'ablation RF. L'étape suivante du projet de doctorat consiste à concevoir un générateur d'énergie micro-onde capable de fournir une puissance de sortie en mesure de produire les lésions requises lors des traitements hyperthermiques. Une fois complété, ce générateur pourra être utilisé lors des tests *in vitro* ou en clinique lors d'ablations micro-onde.

Il est important que le système puisse satisfaire les critères de sécurité mentionnés dans l'article qui suit afin d'assurer en tout temps la sécurité du patient et des spécialistes de la santé présents au cours de la procédure. Par exemple, lors de tests *in vivo* sur des sujets animaux, le générateur micro-onde d'une compagnie américaine a été utilisé afin de valider cette nouvelle approche. À la suite de l'une des applications, un agglomérat de coagulum faisant au moins un centimètre de diamètre a été observé au bout du cathéter sans qu'il soit possible d'en détecter la formation. Cet amas de sang coagulé peut se détacher du cathéter et provoquer une embolie causant de graves dommages. Cette expérience a démontré qu'il est nécessaire d'améliorer la technique et de développer des systèmes assurant la sécurité du patient. L'article qui suit présente donc les résultats des travaux de conception du système d'ablation micro-onde réalisés au cours du projet de doctorat. Ce texte, soumis pour publication, laisse transparaître la

philosophie de conception utilisée qui consiste à assurer en tout temps la sécurité du patient et à obtenir un système pouvant s'adapter à plusieurs conditions d'application.

6.3 ABSTRACT

Since the end of the 1980's, some cardiac rhythm disorders can be cured by RF catheter ablation. This method is very efficient when the arrhythmogenic region is small and located near the endocardial surface. However, when region is large and deep in the myocardium, the efficiency of RF ablation decreases considerably. Microwave ablation could be used in these cases. This paper presents a microwave system that has been designed to treat arrhythmias by catheter ablation. Important technical characteristics have been implemented in this system to improve its versatility and to ensure the safety of the patient.

6.4 INTRODUCTION

Recently, the interest about microwave ablation of cardiac arrhythmias has increased, particularly for atrial flutter, atrial fibrillation and ventricular tachycardia. Some authors have demonstrated that this kind of energy deposition can produce larger and deeper lesions than RF energy [22] [23] and some cardiologists have already begun to use microwave in clinical trials in Canada, France, UK and the USA. The development of tools like microwave sources, catheters and microwave applicators designed for this kind of treatment is thus imperative. This paper describes the development of a microwave ablation system used to treat arrhythmias focus ablations by catheter. Special emphasis will be put on the technical requirements and the capabilities of the system.

6.5 TECHNICAL REQUIREMENTS

A microwave ablation system that can be used in the clinic must satisfy some specific requirements. First of all, the interface between the system and the hospital staff must be "user-friendly" and versatile enough to allow different patterns of energy delivery. These requirements led to the design and construction of a software controllable microwave source with inline impedance and power measurement capabilities. The control software is used to select the microwave power, the ablation time and the variation of output power as a function of time. The software must be able to display the incident and reflected power in real-time, the remaining time, and some information related to the safety of the patient like the formation of coagulum at the tip of the applicator or the temperature at the end of the catheter. Furthermore, like in all biomedical applications, the patient must be electrically isolated from the electrical main line. The output power of the microwave source has to be easily controllable within the range of 10-100 watts rms and the output impedance has to be 50 Ω to achieve an efficient power transfer to the catheter. The system must also be able to detect the presence of clots at the tip of the microwave applicator in order to stop the energy deposition when such a situation occurs. Indeed, when the temperature reaches 100°C, the blood around the tip of the catheter can coagulate and produce a clot. This event is potentially dangerous since it can produce cerebral or pulmonary embolism. Furthermore, the output power must be stable in time and precautions must be taken to ensure that no microwave power is radiated when the applicator is not in the heart of the patient. Finally, the system has to be simple to build and cost-effective.

6.6 IMPLEMENTATION

The ablation system is shown in Figure 6.1. The magnetron's output power is controlled by a computer (PC-486 100 MHz) via an acquisition card. At the output of the magnetron, a circulator is used with a 50 Ω matched load to isolate the magnetron from the reflected waves. This isolator decreases the value of the standing wave ratio and reduces the hot spots in the catheter. The directional coupler is used with two Schottky diodes to sense the incident and the reflected power. The catheter is ended by a microwave applicator for energy deposition purposes.

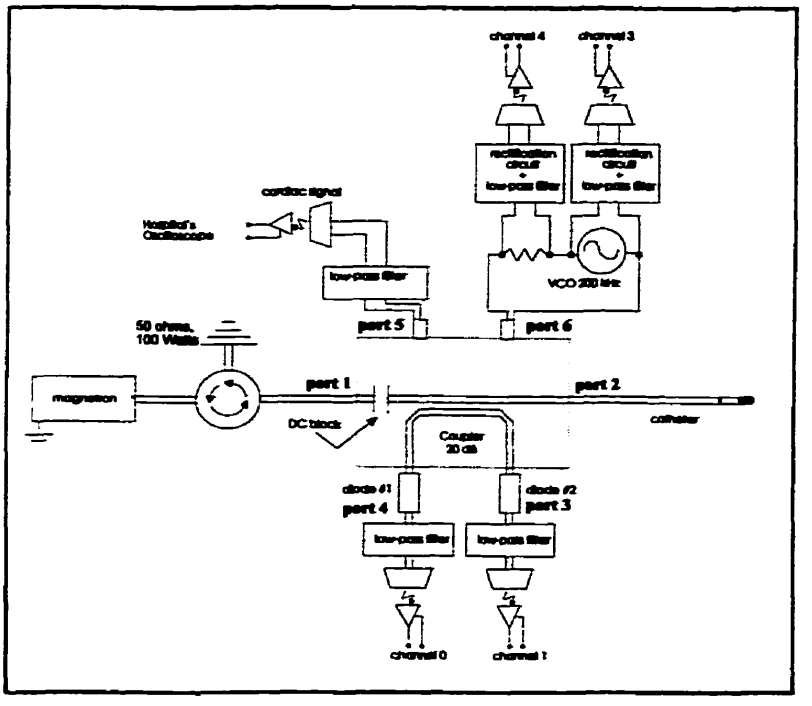


Figure 6.1: Block diagram of the ablation system

6.6.1 Microwave Source

The microwave source consists of a 2,45 GHz low power (10-310 W) magnetron supplied by an high voltage isolation transformer. The high voltage, which is the potential difference between the anode and the cathode of the magnetron, is provided by a half-wave rectifier at the secondary of the isolation transformer, generating a 60 Hz pulsed microwave power. The output power is easily controllable by a current flowing through a coil used to modify the magnetic field inside the cavity of the magnetron. This current is controlled by an output voltage from a D/A channel and a voltage to current converter (V/I) which has been designed to allow an output power of 100 W rms when 5 V is at the input. In this configuration, the output power of the magnetron can be easily set between 0 and 100 W. The high voltage has been adjusted, according to the characteristics of the magnetron, to have a microwave output power of 0 W when no current is flowing into the coil. However, when the magnetron is used for a period of one or two minutes, its temperature increases and electrons can still be emitted by the filament at the end of the microwave application period allowing a weak output power. To avoid this situation, a relay has been placed at the primary winding of the isolation transformer. When the microwave application is completed, the relay is opened by the computer and no voltage is applied between the anode and the cathode of the magnetron. In this situation, no microwave output power can be radiated from the magnetron. The relay is controlled by the computer via a digital output channel of the acquisition card. When the output is at the logic state 0, the relay is opened and, inversely, when the logic state is at 1, the relay is closed.

The entire system is integrated in two different metallic boxes. The first one contains the magnetron, the isolation transformer, the voltage-to-current converter and the relay. The second box contains the circulator, the 50 Ω high power load, the directional coupler and the microwave detectors. This box is divided in two parts by a metallic wall used to isolate the low frequency electronic components from the microwave components. This wall is also used to decrease the 60 Hz noise induced in the electronic components by the microwave components.

The calibration of the microwave output power in relation to the input voltage of the V/I converter has been realized with a rms dual microwave power monitor. This one consists of a directional coupler connected between a rectangular waveguide and a high power matched load (50 Ω, 300 W). In order to obtain the P-V curve, the variation of the rms microwave output power has been recorded while the voltage at the input of the V/I converter was swept. This relation being not linear, a fourth order polynome has been used to define the curve. When a specific microwave output power is required, the software computes the corresponding voltage at the input of the V/I converter by using the obtained P-V curve. The attenuation between the microwave source's output port and the directional coupler of the rms dual power monitor has been measured and its value used in order to have an incident power referred at the output connector of the source. This attenuation was measured with a network analyzer (HP-8753D) by replacing the high power matched load of the rms dual power monitor by a short-circuit and by measuring the S_{11} parameter ($attenuation = \frac{20 \cdot \log(|S_{11}|)}{2}$). The schematic of the system is shown in Figure 6.2.

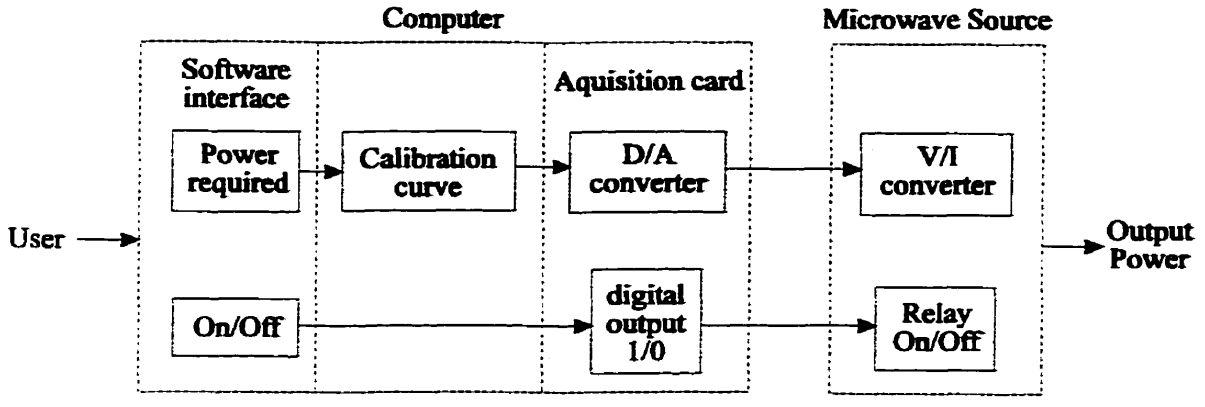


Figure 6.2: Control of the microwave source

Furthermore, in order to remove the risks of patient electrocution, the anode of the magnetron must be isolated from the ground of the main supply line. Indeed, this anode is directly connected to the external connector of the coaxial cable. For some kind of microwave applicators like the loaded monopole, this external connector is directly in contact with the endocardium (see Figure 6.1 and Figure 6.2). If the magnetron is not electrically isolated, a leakage current can flow into the heart and induce ventricular fibrillation (it is well known by electrophysiologists that a 60 Hz current flowing through the heart which has an amplitude higher than two times the diastolic excitation threshold can produce an atrial or ventricular fibrillation [46]). The safety of the patient is ensured if the magnetron is electrically floating with respect to the ground of the main supply line and if all of the electrical signals read by the computer are optically isolated. The microwave parts (circulator, 50 Ω load, directional coupler and semi-rigid coaxial cables) are mounted on plexiglass or teflon plates in order to isolate them from the grounded outer case.

6.6.2 Directional Coupler

The multi-fonction directional coupler [47] used in this ablation system must satisfy three important requirements:

1) High directivity for accurate incident and reflected microwave power reading;

2) In-line cardiac electrical activity reading capacity*;

3) In-line ability to monitor the formation of coagulum at the tip of the catheter*;

The first specification is related to the directivity of the directional coupler and has to be fixed by considering the losses in the coaxial cable and the radiation efficiency of the microwave applicator. Measurements of the reflection coefficient (S_{11} parameter) have been made with a network analyzer (HP-8510) on some microwave catheters† in a saline solution of 0,5 mol/L. The maximum measured value of S_{11} was found to be -16 dB. Thus, the directivity of the directional coupler must be at least 16 dB to allow efficient readings of the reflected wave.

The directional coupler was designed with stripline technology instead of microstrip technology in order to increase its directivity. The coupler consists simply of a quarter-wave coupling line. The width of the lines has been selected to allow a

---

* When a loaded monopole microwave applicator is used (see Figure 6.2)

† Made by Fidus Medical Technology Inc. (Fremont, CA).

characteristic impedance of 50 Ω and the spacing between the main and the coupled lines to obtain a coupling factor of 20 dB.

Two Schottky diodes are used at the end of the coupled ports (3 and 4) to measure the incident and the reflected power. Like the microwave signal, the output voltage of the diodes will be a single rectified 60 Hz signal. This signal must be rectified and isolated before any sampling by the acquisition card. The block diagram of the electronic circuit is shown in Figure 6.3. In order to stabilize the Schottky diode, a resistor has been placed at its output. The gain of the inverting amplifier has been adjusted so as to correspond to the dynamic range of the opto-isolator (200 mV) when the incident microwave power is at 100 W rms. In the same way, the gain of the non-inverting amplifier has been adjusted to give an output voltage of 5 V when the microwave power is at the maximum. In this way, the precision of the system is maximized.

The calibration of this part of the circuit has been made with the dual rms power monitor. A calibration curve was obtained by measuring the voltage read by the computer in relation to the microwave power read by the dual power monitor. For the incident power, a 23 dB attenuator is permanently inserted between the Schottky diode and the port #4 of the directional coupler in order to avoid any saturation of the diode. Again, the relation is not linear and a fourth order polynome is used to calculate the parameters of the calibration curve. The reflected power was calibrated in a different way. The physical connections of the input and the output ports of the directional coupler (ports #1 and #2) have been inverted in order to have an incident power at port #2 (which simulates a reflected power in the normal case). A 10 dB attenuator is

permanently inserted between the Schottky diode and the port #3 in order to prevent the saturation. In addition, a 12 dB attenuator was inserted at the calibration phase. This 12 dB attenuation simulates the effect of the losses in the catheter coaxial cable and the radiation loss of the microwave applicator at the tip of the catheter. Measurements with a network analyzer (HP-8753D) of the coaxial cable attenuation and the S_{11} parameter of the catheter in a 0,5 M saline solution have demonstrated that a 12 dB attenuator is a good approximation of the losses between the incident and the reflected powers. The calibration curve was calculated by measuring the voltage read by the computer in relation to the incident microwave power and by taking into account the effect of the 12 dB attenuator. When the calibration procedure is terminated, the 12 dB attenuator is removed and the physical connection are replaced to have the microwave signal incident at port #1. By sampling the output voltage of the circuit shown in Figure 6.3, the computer can thus calculate and display the incident and the reflected power in real-time.

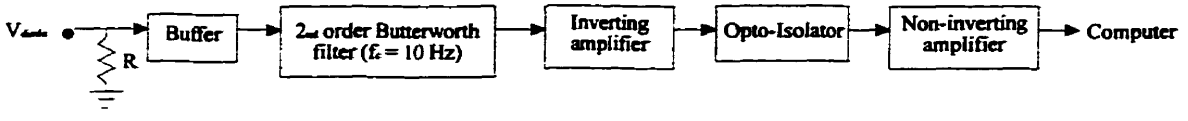


Figure 6.3: Block diagram of the electronic circuit used to measure the incident and reflected powers

The directional coupler must also be able to sample the cardiac electrical activity when the loaded monopole antenna is used as a microwave applicator. Indeed, some authors have shown that this kind of applicator can produce large and deep lesions in the myocardium to treat cardiac disorders like ventricular tachycardias [22]. This kind of applicator is illustrated in Figure 6.2 where L and D have been optimized to increase the

radiative efficiency. This requirement is essential for the positioning of the microwave applicator in the heart by the cardiologist. The main goal of the cardiac activity reading capability is to use the metallic surfaces of the loaded monopole to read the cardiac activity exactly where the energy deposition is performed. The electrical cardiac signal is thus the potential difference between the main line and the ground plane of the directional coupler. However, the 2,45 GHz microwave signal traveling on the main line must be removed by a microwave low pass filter. The electrical cardiac activity is read at port 5 of the directional coupler. The isolation between the main line and ports 5 and 6 has been measured between -73.0 dB and -78.8 dB which is very satisfying for this application (see Table 6-1).

Table 6-1

Param.	Measured value (dB)	Param.	Measured value (dB)
S_{11}	-22.1	S_{22}	-22.2
S_{13}	-35.4	S_{24}	-38.1
S_{14}	-19.4	S_{23}	-19.4
S_{15}	-74.3	S_{25}	-73.0
S_{16}	-78.8	S_{26}	-73.0
S_{33}	-30.1	S_{44}	-29.7

The final requirement for the directional coupler design is the ability to detect the formation of clots at the tip of the microwave applicator. This is actually only valid for the loaded monopole antenna. These clots are formed at the tip of the microwave

applicator when the temperature rises up to 100°C. The clot formation is relatively easy to detect in RF ablation (performed at 550 kHz) since they dramatically increase the electrical impedance of the electrode-tissue interface. However, some experimental tests have shown that no important variation of the reflected microwave power can be detected when coagulum is formed at the end of the catheter. It can thus be stated that the radiation impedance of the loaded monopole will not vary enough to see a significant variation of the reflected microwave power, so the microwave energy will flow through the clots and the size of the clots will increase dangerously. An independent coagulum detection system has thus been developed to ensure the safety of the patient. The fact that the RF impedance increases in an important way when a clot is formed at the electrode-blood interface can be used as a means of detection. This technique, discussed in more details in section III-C, consists of injecting an RF current between the inner and the outer conductors of the loaded monopole in order to measure the impedance between these two conductors. The 200 kHz signal is injected in the catheter via port 6 of the directional coupler. A microwave low pass filter has been placed between this port and the main line to isolate the 2,45 GHz microwave signal from the electronic components.

However, the RF signal cannot be injected at the tip of the catheter and the electrical cardiac activity cannot be read since the inner and the outer conductors of the coaxial cable are short-circuited by the exciting loop inside the magnetron cavity. A simple way to resolve this problem is to put a DC block on the main line of the directional coupler before the coupling structure.

By adopting the above alternative, we have obtained a directivity of only 16 dB which is the lower limit of the requirement. It seems that this relatively poor directivity

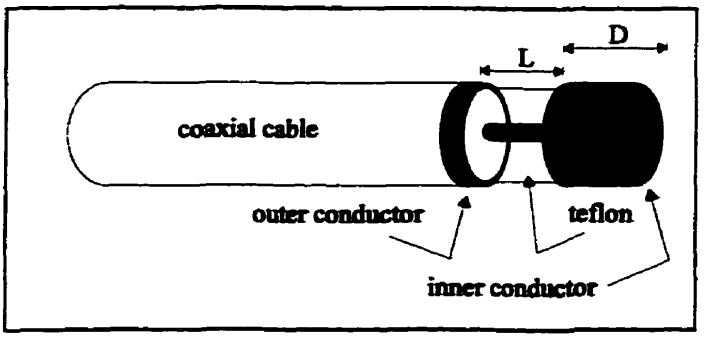


Figure 6.4: Loaded monopole antenna

is explained by the presence of the capacitance (the DC block) and by the hole in the dielectric substrate to integrate it on the main line. Indeed, the reflection coefficient in the main power line (S_{11} and S_{22} parameters) has been decreased below -30 dB (which is at the level of S_{33} and S_{44}) and directivity increased at 20 dB without the presence of the DC block inserted in the main line. The replacement of the DC block by a printed center-fed interdigital capacitor in the main line could probably increase the directivity of the directional coupler. Measurements with the network analyzer have also demonstrated that the presence of the low-pass filters (at ports 5 and 6) does not affect the directivity and the S parameters of the directional coupler.

6.6.3 Coagulum detection system and cardiac electrical signal measurement

As it was stated before, an electrical RF signal must be used in order to detect the formation of coagulum at the tip of the catheter when the loaded monopole is used. A voltage controlled oscillator (VCO) was used as a 200 kHz sinusoidal oscillator. A precision resistor of 100 Ω was also used to sense the output current. The output of the

VCO is connected to a relay which is opened or closed by a digital output channel of the computer acquisition card. The signal is then buffered and amplified before being directed to the precision resistor and the tip of the microwave applicator via port 6 of the directional coupler. The output voltage of the VCO (Va) is then measured via a buffer, a rectifying diode and a first order low-pass filter (fc = 1 kHz) to measure the DC component. In the same way, the voltage drop across the precision resistor (Vb) is measured. The block diagram of the circuit is shown in Figure 6.5.

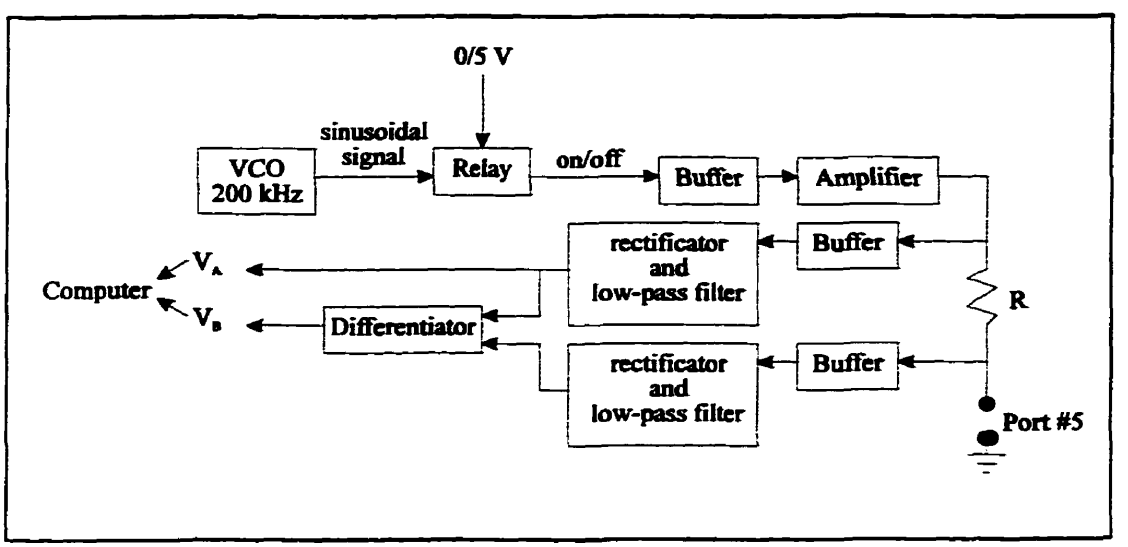


Figure 6.5: Block diagram of the impedance measurement circuit

The calibration was made by connecting a variable resistor between the inner and the outer conductor of the loaded monopole applicator (shown in Figure 6.4). The signals V_A and V_B were measured with the computer and the resistor with a digital multimeter. The calibration curve V_A/V_B was calculated in relation to the resistance with a fourth order polynome. In this way, the computer can sample V_A and V_B and calculate the RF impedance at the tip of the catheter in real-time. When the source is used to perform a

microwave ablation, the RF impedance is sampled by the computer at a frequency of 1 Hz. When the RF impedance is below a safety threshold, the ablation is performed normally. If the temperature of the tip of the catheter reaches a high level, a coagulum clot is most probably formed on the microwave applicator and the RF impedance value exceeds the safety threshold. In this situation, the software automatically stops the microwave incident power, a warning message appears at the screen of the computer and the applicator can be removed from the patient's heart by the cardiologist. This system also avoids the irradiation of microwave energy when the catheter is in the air. If the technician forgets to stop the microwave source when the cardiologist removes the catheter from the body of the patient, the system will measure a very high RF impedance when the microwave applicator is in the air and the computer will automatically stop the magnetron.

Furthermore, some microwave applicators may have a thermocouple embedded in the tip of the catheter to measure the temperature. The thermocouple electrical signal is amplified and isolated with an opto-isolator before being read and displayed by the computer. When this temperature reaches a safety threshold, the microwave output power is stopped to prevent the formation of coagulum at the tip of the catheter.

6.6.4 Feedback system

When microwave cardiac ablation is performed, the temperature of the magnetron increases, allowing a better thermoemission of electrons by the cathode and leading to a rise of the output power in time. An increase of approximately 20 % in the

output power in time has been observed. A feedback system is thus required to provide an accurate control of the microwave energy delivered into the heart. This feedback system consists of an electronic circuit which compares the DC voltage at the output of the Schottky diode used to measure the incident power to a calculated reference voltage that is supposed to be at the output of this diode when the power is exactly the one desired. The reference voltage is then applied by a D/A channel of the acquisition card. The feedback circuit adjusts the voltage applied to the magnetron until the output voltage of the Schottky diode reaches the level of the reference. This circuit is schematized in Figure 6.6.

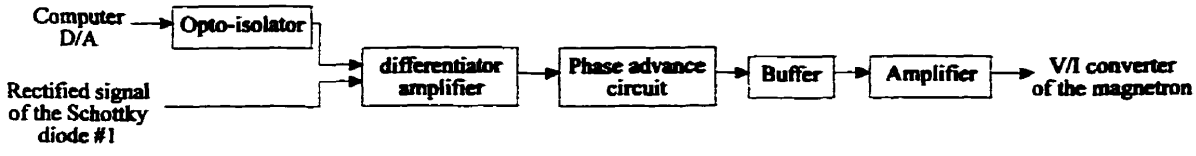


Figure 6.6: Block diagram of the feedback circuit

The microwave source can be modeled by a first order system with delay. In order to avoid the overshooting during the feedback process, a phase advance circuit has been used. With this feedback circuit, no increase in the power has been observed even after a 5 minutes high power microwave application. The feedback circuit can also be used to compensate the variation of the main power supply line.

6.6.5 Software interface

The software used to control the ablation system was designed using Microsoft Visual C++. A visual tools library (Computer Boards, Inc.) was also used to enhance the graphical user interface quality. The software is used to select the rms output power, the application time, the kind of microwave applicator (loaded monopole or helicoidal) and permits also the definition of the temporal microwave power deposition profile during ablation. The output power can be set to increase or decrease in time or to be delivered in a pulsed manner. Indeed, our clinical experiments have demonstrated that Premature Ventricular Contractions (PVC) can appear shortly after high-power (60 W, 60 sec) microwave ablation. These PVCs can degenerate into sustained or non-sustained ventricular tachycardias, or ventricular fibrillations. These PVCs could be explained by the breakdown of cellular membranes which produces a large output of intracellular potassium into the extracellular fluid. This potassium output can depolarize myocardial cells and produce PVCs. The main goal for the implementation of programmable variation of output power in time is to study some energy delivery protocoles in order to avoid these PVCs after microwave ablation. The software interface is also used to monitor in real-time the incident and reflected power as well as the RF impedance at the tip of the catheter. This user-interface window is shown in Figure 6.8. The rms output power and the time of application can be selected by the sliders at the left of the screen. The other parts of the screen are used to monitor in real-time the incident and reflected power, the mean incident power, the RF impedance, the temperature of the microwave applicator and the remaining time. The variation of the output power in time can be defined with the window shown in Figure 6.7. The application time selected using the user-interface window is divided in five intervals and the five sliders are used to define the percentage of the selected output power. The output power can also be specified to

always be at 100% of the selected power. The user has also to select the kind of applicator (loaded monopole or helicoidal). The loaded monopole is a custom-made applicator and the helicoidal antenna is produced by Fidus Medical Technology. When the loaded monopole is selected, the RF impedance measurement option is activated and, inversely, when the helicoidal applicator is chosen, the temperature measurement option is activated .

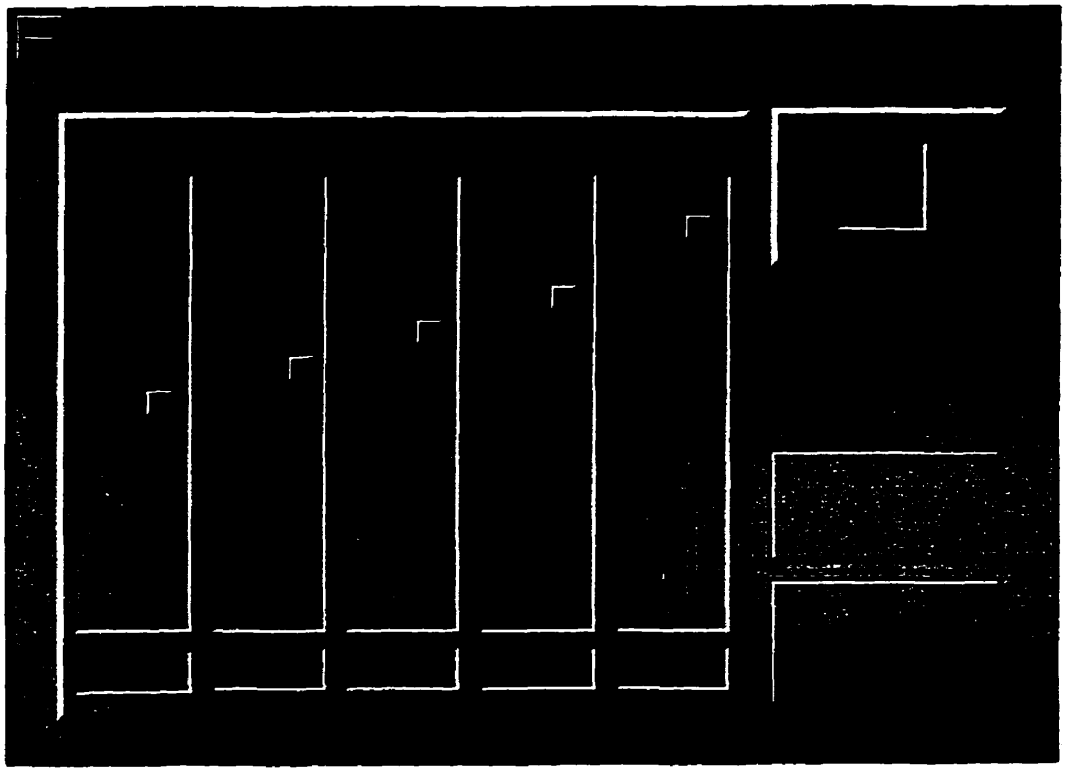


Figure 6.7: Window used to define the microwave output power versus time

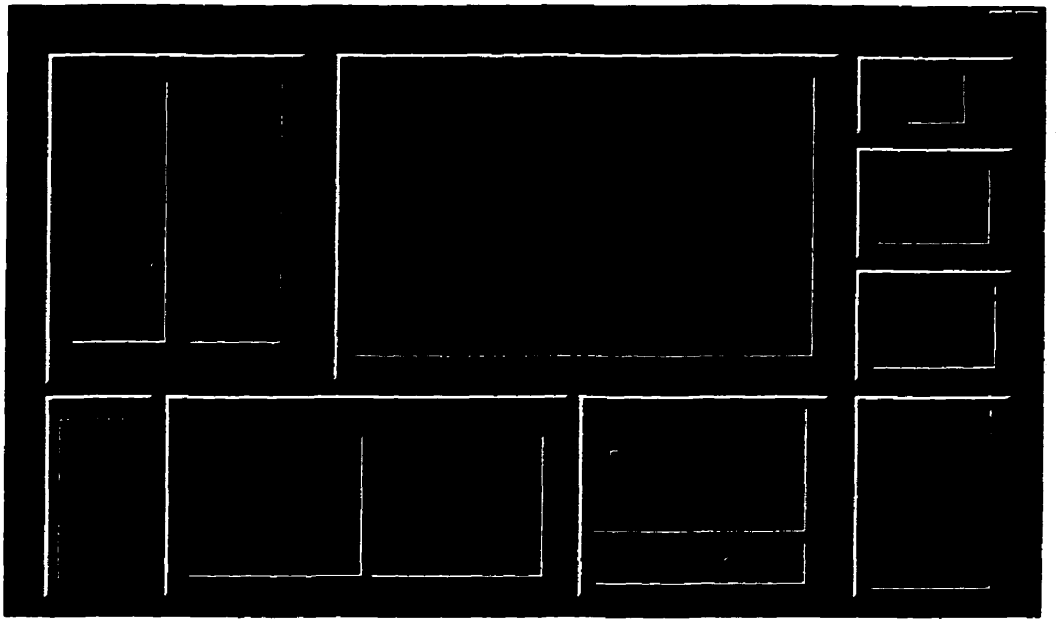


Figure 6.8: User-interface window

6.7 CONCLUSION

The microwave ablation system has been designed to satisfy the technical requirements stated in the previous sections. The system ensures the electrical isolation of the patient. The RF impedance measurement system is an important characteristic which is used to detect the formation of coagulum at the tip of the catheter in order to increase the safety of the patient. This system also avoids the absorption of microwave energy by the people working around the patient when the catheter is outside the patient's body. The system is versatile and very easy to use.

Some improvements can also be added to this system. In order to reduce the volume of the microwave source, the magnetron could be replaced by a solid-state microwave oscillator and a 2.45 GHz amplifier. The output of this kind of oscillator is continuous which is an interesting characteristic since the 60 Hz noise induced in the RF electronic circuit can be totally suppressed. Furthermore, in order to increase the directivity of the directional coupler, the DC block embedded in the substrate of the coupler could be replaced by a printed center-fed interdigital capacitor which is a smoother microwave structure.

6.8 ACKNOWLEDGMENT

Authors would like to thank NSERC and FCAR for their financial assistance and Fidus Medical Technology for their helicoidal microwave ablation catheters.

6.9 CONCLUSION DU CHAPITRE

Un système d'ablation micro-onde fonctionnel a été proposé et conçu afin de pouvoir effectuer le traitement d'arythmies cardiaques par ablation micro-onde. L'isolation électrique du patient a été obtenue en utilisant un transformateur d'isolation ainsi que des isolateurs à couplage optique. Le système possède la capacité de détecter la formation de coagulum au bout de la sonde en mesurant l'impédance RF entre deux électrodes. Un coupleur multifonctionnel a été développé afin de permettre ce genre de mesure en temps réel lorsque l'énergie micro-onde est appliquée. Ce dispositif isole également l'oscilloscope de l'hôpital du signal micro-onde afin de permettre l'enregistrement de l'électrogramme lors de l'application de l'énergie. Le système est entièrement contrôlé par ordinateur, ce qui fait en sorte qu'il possède une grande souplesse d'utilisation. De plus, l'interface usager présentée est d'apparence agréable, ce qui permet une compréhension et une utilisation rapide du système. Les courbes de puissance réfléchie et d'impédance RF sont monitorées en temps réel et le système possède des dispositifs de sécurité faisant en sorte qu'il soit possible de stopper la puissance de sortie lorsqu'un événement pouvant affecter la santé du patient ou l'intégrité de l'équipement est détecté. Ce système d'ablation a été conçu après avoir consulté quelques cardiologues sur les caractéristiques souhaitées d'un tel système. Les concepts amenés dans ce chapitre pourraient servir à aider des équipes de recherche ou des compagnies à concevoir une génération de systèmes bien adaptés à l'ablation d'arythmies cardiaques et à accroître la sécurité de la technique.

Une fois la conception du générateur micro-onde effectuée, l'étape suivante consiste à concevoir des applicateurs d'énergie dont les caractéristiques permettent le

traitement de différents types d'arythmies. On présentera donc, au prochain chapitre, quelques types d'applicateurs étudiés dans le cadre de ce projet de recherche ainsi que les résultats obtenus en clinique sur cinq patients atteints de flutter auriculaire de type I traités à l'aide de l'ablation micro-onde.

CHAPITRE VII

CONCEPTION D'APPLICATEURS MICRO-ONDE
ET
ÉTUDE DE CINQ CAS CLINIQUES

7.1 APPLICATEURS MICRO-ONDE

7.1.1 Mise en situation

Le présent chapitre vise à étudier quelques configurations d'applicateurs micro-onde afin de traiter certaines arythmies cardiaques. Afin d'aider le lecteur à comprendre la logique sous-jacente à l'étude des structures présentées, une mise en situation s'impose.

Les recherches sur les applicateurs micro-onde menées par le groupe du D^r Pierre Savard de l'École Polytechnique ont débuté par l'étude du monopôle avec capuchon. Ces études ont été réalisées par le D^r Zouheir Kaouk. On cherchait alors à produire des lésions profondes afin de traiter la tachycardie ventriculaire post-infarctus. Par la suite, des discussions avec certains cardiologues de l'hôpital du Sacré-coeur, notamment avec les D^r Nadeau et Molin, ont fait ressortir que le bassin de population atteint de ce type d'arythmie est relativement faible. Par contre, l'incidence de la fibrillation et du flutter auriculaire est beaucoup plus élevé et aucun traitement curatif n'est présentement disponible pour ces patients. Dans ces cas, des lésions allongées de quelques centimètres au niveau des oreillettes sont nécessaires. Dans les discussions menées lors des rencontres du groupe de recherche, il est ressorti que la flexibilité mécanique est une propriété souhaitable pour ce genre d'applicateur afin de pouvoir épouser la courbure endocardique. L'auteur a alors proposé l'emploi d'une antenne planaire imprimée sur un substrat diélectrique flexible. Les résultats de l'étude pour cette structure sont présentés à la section 7.1.7.

Après quelques mois de travail sur ces structures, un stage de quatre mois chez une compagnie[1] américaine a été effectué. Cette compangnie employait l'antenne hélicoïdale à l'extrémité de ses cathéters. Le stage a consisté à améliorer et modifier le design de cet applicateur et à étudier quelques autres configurations.

La collaboration avec la compagnie américaine en question a permis d'ajouter un aspect clinique intéressant et unique à la recherche: cinq patients ont été traités par ablation micro-onde et ces cas sont rapportés à la section 7.2.

Le mélange de considérations pratiques, théoriques et cliniques saura susciter chez le lecteur, espérons-le, un intérêt tout au long de ce chapitre.

---

[1]. Fidus Medical Technology (Fremont, CA).

7.1.2 Généralités

Un système d'ablation micro-onde consiste en un générateur d'onde électromagnétique, le plus souvent un magnétron, un cathéter et l'applicateur lui-même. L'impédance de l'applicateur doit être égale à celle du câble coaxial contenu à l'intérieur du cathéter (habituellement 50 Ω) afin de maximiser le transfert d'énergie vers la structure radiative et minimiser le taux d'onde stationnaire dans la ligne de transmission. Un taux d'onde stationnaire important dans le câble coaxial provoque des points chauds le long de ce dernier, ce qui peut provoquer des brûlures au niveau du point d'insertion du cathéter et des dommages irréversibles au niveau des vaisseaux. L'échauffement du câble coaxial est dû au fait que l'onde incidente est atténuée au fur et à mesure qu'elle progresse à l'intérieur de la ligne de transmission. Cette atténuation est due aux pertes présentes dans le diélectrique ainsi que dans les conducteurs métalliques. La principale façon de minimiser ces pertes, et ainsi réduire la température du cathéter, consiste à utiliser un câble dont les diamètres externes et internes sont les plus grands possible et d'utiliser un diélectrique dont la tangente de perte est faible à la fréquence utilisée. On parvient à augmenter le diamètre du conducteur interne du câble pour un diamètre externe donné et à réduire les pertes en utilisant un diélectrique à haute teneur en air. La constante diélectrique est alors voisine de l'unité. On préférera aussi utiliser un câble dont le conducteur interne est un monobrin au lieu d'un multibrin afin de minimiser les pertes. Cependant, un conducteur monobrin donne au cathéter une rigidité plus importante, ce qui fait en sorte qu'il est un peu plus difficile à manoeuvrer. Pour ce qui est du conducteur externe, il est généralement formé de plusieurs brins tissés à la surface du diélectrique. Les pertes sont minimisées lorsque le taux de recouvrement du câble coaxial est maximal. Deux câbles coaxiaux différents ont été spécialement conçus à cette fin et sont actuellement utilisés par la compagnie Fidus Medical Technology pour

leurs cathéters de 8 F[(2)] et de 8.5 F. De l'avis des cardiologues, le cathéter de 8 F est relativement facile à manipuler comparativement au cathéter de 8.5 F, mais sa température de surface est plus élevée (environ 10 °C de plus pour la partie exposée à l'air libre lorsque la puissance à la sortie du générateur est de 50 W et que l'adaptation des applicateurs est identique). Pour ce qui est de la partie en contact avec le sang, la température y est beaucoup moins importante à cause de l'effet caloporteur important du fluide en mouvement. Le Tableau 7-1 illustre les propriétés des câbles utilisés pour les cathéters de 8F et de 8,5F.

Tableau 7-1

Câble coaxial[3]	diamètre int. [mm]	diamètre ext. [mm]	ε_r du diélectrique	atténuation [dB/m]
IW58 (cathéter de 8F)	0,4	0,975	1,14	0,48
IW70 (cathéter de 8.5F)	0,45	1,225	1,44	0,33

L'adaptation de l'applicateur micro-onde à la ligne de transmission a aussi un rôle à jouer dans l'échauffement du cathéter: plus l'adaptation est faible, plus le taux d'onde stationnaire est élevé et plus la température du cathéter est grande. On doit donc concevoir la structure radiative de sorte que l'onde réfléchie soit la plus faible possible. La température de la partie du cathéter insérée dans la circulation périphérique sera toujours un peu plus élevée que la température corporelle du patient (normalement 37 °C).

---

[2]. À une unité de un French (F) correspond un diamètre de 1/3 mm.

[3]. De la compagnie Wire Incorporated, Ronkonkome (NY).

Les propriétés mécaniques du cathéter sont aussi très importantes. La résistance en torsion doit être suffisamment grande afin d'empêcher la formation de boucles lorsque le cardiologue positionne le cathéter. Le cathéter doit aussi avoir une certaine rigidité et le système de positionnement doit être bien adapté à l'intervention que l'on désire effectuer. La surface extérieure du cathéter et de l'applicateur doit être également biocompatible afin d'éviter, entre autres, la formation de caillots sanguins.

7.1.3 Méthodologie

7.1.3.1 Méthode des éléments finis

Afin d'étudier le patron de radiation et l'efficacité des structures étudiées, le logiciel de simulation « High Frequency Structure Simulator » (HFSS) de Hewlett Packard a été utilisé. La méthode des éléments finis est employée afin de résoudre les champs électromagnétiques irradiés par l'applicateur. La première étape de simulation consiste à définir la géométrie du problème en trois dimensions en incluant la ligne de transmission et le milieu diélectrique dans lequel est située la structure. Dans tous les cas, un volume rectangulaire de sang dont la dimension varie selon les applicateurs a été simulé. Par la suite, on spécifie les propriétés diélectriques des volumes préalablement définis. Les mesures obtenues et présentées au chapitre 5 ont été utilisées afin de représenter le sang ($\varepsilon^* = 57 - 31j$ à 2,45 GHz). La couche myocardique n'a pas été simulée car ses propriétés diélectriques sont pratiquement les mêmes que celles du sang à 2,45 GHz. L'étape suivante consiste à définir les conditions aux frontières du modèle ainsi que le port de référence. Dans les simulations incluant un câble coaxial, le port de référence a été défini comme étant la section droite à l'entrée du câble. Des conditions radiatives ont été appliquées aux frontières du modèle. Cela signifie que l'impédance

sur le pourtour du volume est la même que l'impédance intrinsèque du milieu formant ce volume et qu'une onde électromagnétique incidente à cette surface ne sera pas réfléchie. Finalement, le nombre de modes à solutionner au port d'entrée, la plage de fréquence ainsi que le critère de convergence ($\Delta S \leq 0.05$) sont définis. Lors des simulations utilisant un câble coaxial comme ligne de transmission, seul le mode fondamental (mode TEM) seulement a été résolu au port d'entrée.

La première étape de calcul consiste à diviser le port d'entrée en petits éléments triangulaires (c'est le processus de maillage 2D). Le logiciel considère ensuite que le port, défini dans le plan x-y, est connecté à un guide d'onde uniforme selon l'axe z possédant la même géométrie que le port d'entrée. La configuration spatiale des champs électromagnétiques contenus dans ce guide est ensuite calculée. Le champ électrique dans le domaine du temps est obtenu à partir du phaseur complexe en réalisant l'opération suivante:

$$E_{(x,y,z,t)} = \Re\left(\overline{E}_{(x,y)} \cdot e^{j\omega t - \gamma z}\right) \tag{7.1}$$

où $\Re$ est la partie réelle du phaseur complexe;

$\overline{E}_{(x,y)}$ est le phaseur complexe du champ électrique;

γ est la constante de propagation complexe $\left(\gamma = \alpha + j \cdot \beta\right)$;

ω est la fréquence angulaire ($2\pi f$).

Le champ électrique est obtenu en solutionnant l'équation d'onde suivante:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_r} \nabla \times \overline{E}_{(x,y)} \right) - k_0^2 \varepsilon_r \overline{E}_{(x,y)} = 0 \qquad (7.2)$$

où k_0 est le nombre d'onde dans le vide ($\omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$);

μ_0 est la perméabilité du vide et

ε_0 est la permittivité du vide.

Le champ magnétique est obtenu de façon identique: les équations caractéristiques sont de la même forme que les deux équations précédentes.

Pour calculer le champ d'excitation au port d'entrée, le logiciel emploie la technique suivante: il solutionne l'équation 7.2 pour le champ électrique et pour le champ magnétique. Par la suite, il utilise les équations de Maxwell qui lient ces deux champs:

$$\nabla \times \overline{H}_{(x,y)} = \sigma \overline{E}_{(x,y)} + j\omega\varepsilon \overline{E}_{(x,y)} \qquad (7.3)$$

$$\nabla \times \overline{E}_{(x,y)} = -j\omega\mu \overline{H}_{(x,y)} \qquad (7.4)$$

où σ est la conductivité électrique du milieu.

Le phaseur du champ électrique $\overline{E}_{(x,y)}$ est ensuite calculé à partir du phaseur du champ magnétique $\overline{H}_{(x,y)}$ en utilisant l'équation 7.3. On compare la valeur de $\overline{E}_{(x,y)}$ ainsi obtenue à la valeur obtenue à partir de l'équation 7.2. On fait de même pour les valeurs de $\overline{H}_{(x,y)}$. Si la différence est en deçà du critère de convergence (habituellement 2 % d'erreur), la solution est retenue. Sinon, on raffine le maillage 2D et on procède de la même manière jusqu'à ce que le critère de convergence soit satisfait. Le champ d'excitation de la structure au port de référence est le phaseur complexe $\overline{E}_{(x,y)}$. Ce processus est répété pour tous les modes considérés dans la simulation.

L'impédance caractéristique du port d'entrée peut ensuite être calculée. Pour ce faire, il est nécessaire de définir une ligne de calibration. Cette ligne est définie à l'endroit où le champ électrique est le plus intense afin d'obtenir une précision maximale. Trois méthodes sont disponibles pour le calcul d'impédance: la méthode PV, VI et PI. La méthode PV utilise la puissance au port d'entrée ainsi que la différence de potentiel le long de la ligne de calibration:

$$Z_{PV} = \frac{V \cdot V^*}{P} \tag{7.5}$$

La puissance P est calculée à l'aide du vecteur de Pointing sur les champs électromagnétiques présents au port d'entrée:

$$P = \oint_S \left(\overline{E}_{(x,y)} \times \overline{H}_{(x,y)} \right) d\overline{S} \tag{7.6}$$

où $\overline{S}$ est un vecteur normal au plan de référence et S la surface du port.

La valeur de la tension V est calculée par la relation suivante:

$$V = \int_L \overline{E} \cdot dl \tag{7.7}$$

où L est le parcours défini par la ligne de calibration.

La deuxième méthode utilise le courant I circulant sur le pourtour de la surface définie par le port. L'impédance Z_{PI} est définie comme suit:

$$Z_{PI} = \frac{P}{I \cdot I^*} \tag{7.8}$$

et le courant I est défini par la loi d'Ampère:

$$I = \oint_l \overline{H} \cdot dl \tag{7.9}$$

où l est le parcours fermé décrivant la surface S du port.

La troisième méthode de calcul utilise la moyenne géométrique des résultats des deux autres méthodes:

$$Z_{VI} = \sqrt{Z_{PI} \cdot Z_{VI}} \tag{7.10}$$

Lors des calculs de paramètres S, les résultats ont été normalisés par rapport à l'impédance intrinsèque du port d'entrée. Pour toutes les structures utilisant un câble coaxial comme ligne de transmission, l'impédance du câble est de 50 $\Omega \pm 1$. Pour cette configuration, les trois méthodes donnent des résultats similaires. Lors des calculs d'impédance caractéristique des lignes coplanaires, la méthode Z_{PV} a été utilisée avec une ligne de calibration joignant le conducteur central à l'un des plans de masse.

Une fois le champ d'excitation et l'impédance caractéristique du port d'entrée obtenus, le logiciel effectue un maillage complet du modèle 3D à l'aide de tétrahèdres et solutionne le problème en utilisant le champ électrique au port d'excitation et en considérant les conditions aux frontières définies au pourtour du modèle. Le logiciel doit solutionner l'équation d'onde suivante:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_r} \nabla \times \overline{E}_{(x,y,z)} \right) - k_0^2 \varepsilon_r \overline{E}_{(x,y,z)} = 0 \qquad (7.11)$$

La différence entre l'équation 7.11 et l'équation 7.2 tient au fait qu'ici le champ se propage dans toutes les directions et dépend de la variable z.

Les conditions radiatives aux frontières sont représentées par l'équation suivante:

$$\left(\nabla \times \overline{E}\right)_{tan} = jk_0 \overline{E}_{tan} - \frac{j}{k_0} \nabla_{tan} \times \left(\nabla_{tan} \times \overline{E}_{tan}\right) + \frac{j}{k_0} \nabla_{tan} \left(\nabla_{tan} \cdot \overline{E}_{tan}\right) \qquad (7.12)$$

où *tan* signifie la partie tangentielle du champ ou de l'opérateur ∇.

Dans toutes les simulations présentées dans ce chapitre, une approche adaptative a été utilisée: lorsque le logiciel a solutionné le problème 3D, il raffine le maillage aux endroits où le gradient du champ électrique est le plus important et il recalcule la solution complète. À la fin de la deuxième itération, le logiciel évalue un paramètre de convergence et, s'il est en deçà du critère défini par l'utilisateur, le processus se termine, sinon le logiciel effectue une autre itération jusqu'à ce que le critère de convergence soit satisfait.

Un balayage en fréquence peut être effectué afin de connaître la variation de l'adaptation de la structure en fonction de la fréquence. Pour ce faire, la méthode suivante a été utilisée. On spécifie une fréquence fixe où la solution est calculée avec la technique expliquée ci-haut. Lorsque la solution finale est obtenue, le logiciel utilise le même maillage et solutionne à nouveau le problème sur la bande de fréquence spécifiée par l'usager en n'effectuant qu'une seule itération par fréquence.

Une fois la solution obtenue, le logiciel permet entre autres de visualiser les champs électromagnétiques en fonction du temps ou encore de visualiser l'amplitude seulement. La propagation en fonction du temps peut être visualisée en incrémentant la phase des phaseurs complexes $\overline{E}_{(x,y,z)}$ et $\overline{H}_{(x,y,z)}$. L'amplitude des champs est obtenue en utilisant la formule suivante:

$$\left|\overline{E}_{(x,y,z)}\right| = \sqrt{\overline{E}_{(x,y,z)} \cdot \overline{E}^{*}_{(x,y,z)}} \tag{7.13}$$

Cette relation a été utilisée afin de représenter les courbes de SAR (Specific Absorption Rate) qui représentent la puissance absorbée par le milieu par unité de volume. Le SAR est donné par:

$$SAR = \frac{\sigma \cdot \left|\overline{E}_{(x,y,z)}\right|^2}{2} \qquad [W/m^3] \tag{7.14}$$

Le logiciel HFSS permet d'effectuer les manipulations scalaires nécessaires à l'obtentions des courbes de SAR à partir des valeurs de champ électrique. La formule 7.14 a été utilisée à cette fin où σ du myocarde est égal à 2,17 S/m [50]. Cependant, le logiciel effectue cette opération sur toute la géométrie du modèle et il est impossible de spécifier une valeur de σ nulle à l'intérieur du câble coaxial. Les images du patron de SAR obtenues par simulation ne devront donc être considérées qu'à l'extérieur du câble

coaxial. Pour toutes les simulations étudiées dans ce chapitre, une puissance de 1 W a été simulée au port d'entrée. Les résultats sont présentés sous forme d'image en couleur où le rouge signifie le maximum de l'échelle utilisée tandis que le bleu représente le minimum. Pour les images de propagation du champ électrique, l'échelle utilisée varie entre 0 et 1 kV/m. Pour les images de SAR, l'échelle varie entre 0 et 100 kW/m^3. Toutes les représentations du SAR obtenues par l'équation 7.14 ont été normalisées en puissance en divisant par $\left(1-S_{11}^2\right)$. La Figure 7.1 montre les codes de couleurs utilisés.

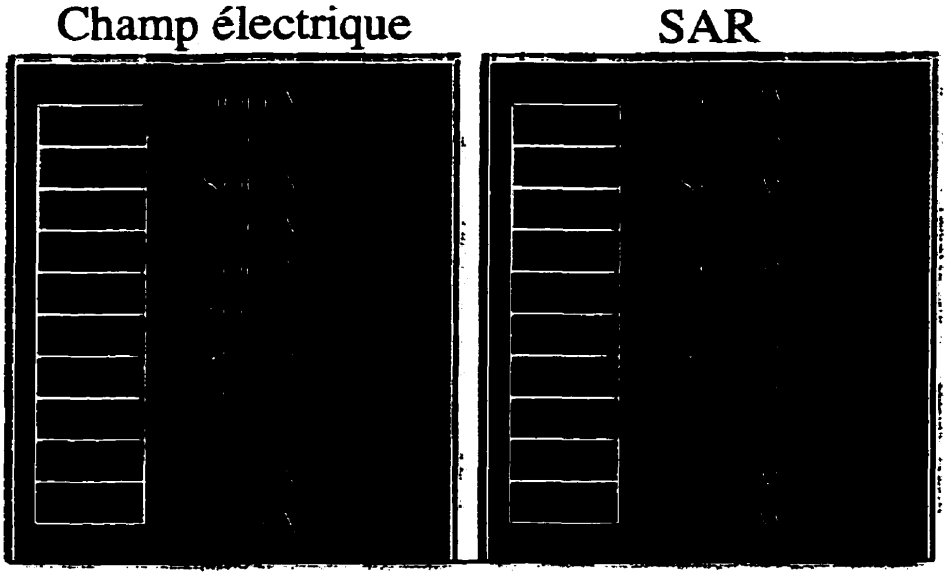


Figure 7.1: Codes de couleurs utilisés

7.1.3.2 Validation des résultats de simulation

La validation quantitative des résultats de simulation a été effectuée en comparant les valeurs de S_{11} obtenues par simulation aux mesures expérimentales sur les prototypes. Lors des mesures de S_{11} sur les structures coplanaires (présentées à la section 7.1.7), on a plongé l'applicateur dans une solution ayant approximativement les

mêmes propriétés que le sang à 2,45 GHz. Ce liquide est un mélange de 56 % de tyrode et de 44 % de méthanol (en volume). La permittivité complexe[4] à 2,45 GHz est de 56 - 20j comparativement à 57 - 15j pour le myocarde à 37 °C. Les propriétés de la solution ont été utilisées en simulation et on a comparé les résultats obtenus aux résultats expérimentaux. Les mesures ont été prises à l'aide d'un analyseur de réseau HP-8357.

Une technique de validation qualitative, présentée par Labonté *et al.* [23], utilisant un feuillet de cristaux liquides thermosensibles ainsi qu'une gelée simulant le myocarde, peut être utilisée afin d'évaluer si la configuration spatiale du champ électrique simulé représente bien la réalité. De plus, cette méthode permet d'évaluer les courbes de température obtenues avec un applicateur sans avoir à effectuer de simulations. Les travaux de Chou *et al.* [49] ont permis de développer une gelée utilisée afin de simuler les propriétés diélectriques et thermiques du myocarde. Cette gelée, composée d'eau à 75,48 %, de NaCl à 1,05 %, d'une poudre de polyéthylène à 15,01 % et d'un agent solidifiant, le TX-151, à 8,46 % a été utilisée pour la visualisation des isothermes. Pour ce qui est du feuillet de cristaux liquides utilisé, il provient de la compagnie Hallcrest et possède une couleur noire qui devient rouge à 30 °C, verte à 31 °C et bleue à 35 °C. Afin de visualiser les courbes de température obtenues en utilisant les prototypes, on a placé le feuillet de cristaux liquides au-dessus de 3 cm de gelée au fond d'un bol en plastique. On a ensuite recouvert d'une mince feuille de plastique transparente et on a rempli le bol d'eau[5] à 24 °C. On a positionné l'applicateur au fond

---

[4]. Mesurée à l'aide de la méthode de la ligne virtuelle étudiée au chapitre 3.

[5]. L'expérience a démontré que l'ajout de NaCl dans l'eau influence très peu les courbes de température obtenues.

de l'eau et on a appliqué l'énergie micro-onde. Étant donné que des dommages irréversibles sont provoqués sur les fibres myocardiques à partir d'une élévation de température de 11 °C, l'isotherme en bleu du feuillet indique la taille approximative de la lésion. Cette technique surévalue la taille de la lésion obtenue en pratique car la perte de chaleur par convection causée par le sang en mouvement n'est pas considérée. Une autre source d'erreur possible est l'effet du feuillet de cristaux liquides (diélectrique) sur la distribution du champ électrique: cet effet serait négligeable dans les cas où les lignes de flux (et de courant) sont tangentielles au feuillet (dipôles) et plus important lorsqu'elles sont perpendiculaires (antennes hélicoïdales). Bien que cette méthode ne soit que qualitative, elle permet une visualisation rapide des isothermes et donne une idée approximative du patron de rayonnement de la structure. Par exemple, les points où le champ électrique est le plus intense se décolorent en premier lors de l'application d'énergie. La comparaison entre l'emplacement physique de ces points avec ceux obtenus en simulation aide à évaluer la justesse des simulations sur le patron de rayonnement. De plus, on peut affirmer que les isothermes devraient avoir généralement les mêmes formes que le patron de SAR obtenu en simulation (les différences proviennent de la diffusion thermique présente à l'intérieur de la gelée). La comparaison du SAR simulé avec les courbes de température ont été effectuées sur quelques monopôles et antennes hélicoïdales afin d'évaluer qualitativement les résultats de simulation. Aucune validation rigoureuse ne peut cependant être effectuée à l'aide de cette technique puisque les modèles informatiques utilisés ne permettent pas d'obtenir les courbes de température.

7.1.3.3 Ressources informatiques

La méthode des éléments finis est très puissante mais elle requiert beaucoup de ressources informatiques. La majorité des simulations présentées dans ce rapport ont été effectuées lors du stage en Californie où le système informatique possède des ressources importantes (512 Mo de RAM et 4 Go de mémoire virtuelle) et la station de travail (HAL 375 de Fujitsu) possède un processeur très rapide. Lors du stage, cette station de travail était totalement réservée aux simulations d'un seul usager. Quelques simulations ont aussi été réalisées au laboratoire d'hyperfréquence de l'École Polytechnique. Cependant, les ressources informatiques sont moins importantes (156 Mo de RAM et 400 Mo de mémoire virtuelle) et la station de travail utilisée provient de la compagnie Hewlett-Packard (type J200). De plus, cette station est partagée par plusieurs étudiants et chercheurs, ce qui fait en sorte que le temps de calcul devient très grand après 3 ou 4 itérations et que la mémoire virtuelle n'est pas suffisante pour aller plus loin.

La structure étudiée demandant le plus de ressources informatiques est l'antenne hélicoïdale. Ces ressources n'ont été disponibles que quelques jours à la fin du stage et il est impossible, par manque d'espace disque et de mémoire vive, de les réaliser ou de les modifier au laboratoire de micro-onde de l'École Polytechnique. De plus, il est impossible de dessiner des hélices en trois dimensions avec la version de HFSS utilisée au laboratoire d'hyperfréquence. Pour ces raisons, on ne présentera que quelques-unes de ces structures à la section 7.1.6.

7.1.3.4 Tests *in vivo* chez le chien

Des tests *in vivo* sur 5 chiens pesant entre 25 et 35 kg ont été effectués à l'hôpital du Sacré-Coeur de Montréal afin d'évaluer les complications cliniques lors d'ablations micro-onde avec le monopôle à capuchon (section 7.1.4) et quelques configurations d'antennes hélicoïdales. Ces chiens ont été anesthésiés avant la procédure. Une stimulation ventriculaire programmée (SVP) a été effectuée avant et après la création de lésions endocardiques sur les deux ventricules. Une approche fémorale sous guidage fluoroscopique a été utilisée. La SVP a été répétée une semaine plus tard avant l'ouverture du thorax et un berceau péricardique contenant un sérum physiologique à 37 °C a été réalisé afin de permettre la formation de lésions épicardiques. L'applicateur micro-onde était suturé à l'épicarde en quelques points afin d'empêcher le déplacement du cathéter. Une puissance variant de 30 à 60 W a été utilisée pendant une période de 60 à 120 secondes durant les ablations endocardiques et épicardiques. Lors de l'utilisation du monopôle à capuchon, le câble coaxial RG-316 de la compagnie Belden a été utilisé comme ligne de transmission. La longueur du capuchon du monopôle était de 3,5 mm tandis que la longueur active L était de 6 mm (voir les schémas de la Figure 7.2). Les animaux ont par la suite été sacrifiés afin de procéder aux études histopathologiques et aux mesures du volume des lésions. Le myocarde a été tranché en couches de 2 mm d'épaisseur qui ont ensuite été placées à 37 °C pendant 45 minutes dans un liquide nutritif contenant l'enzyme TTC. Cet enzyme possède la caractéristique de se fixer seulement aux cellules vivantes et de les colorer en rouge (semblable à la couleur d'une betterave). La démarcation de couleur permet de distinguer les cellules vivantes des zones ayant subit l'ablation. Les échantillons ont par la suite été placés dans une solution de formol afin d'augmenter le contraste entre les deux zones. Pour l'un des 5 chiens, des échantillons sanguins ont été prélevés au niveau du sinus coronaire durant les ablations afin de mesurer la variation de la concentration de potassium.

7.1.4.1 Monopôles avec capuchon

Les premières tentatives d'utilisation des monopôles comme applicateur d'énergie micro-onde ont été réalisées dans le but de traiter des tumeurs cancéreuses au niveau de l'abdomen et du cerveau [66-74]. Certains chercheurs ont aussi étudié cette structure afin d'effectuer des ablations cardiaques. C'est le cas de Lin *et al.* [58], Shetty *et al.* [51], Labonté *et al.* [23] ainsi que Kaouk *et al.* [22]. La première antenne étudiée dans ce chapitre, illustrée à la partie supérieure gauche de la Figure 7.2, consiste en une extension du conducteur central du câble coaxial vers un capuchon métallique. La gaine du cathéter, faite de polyéthylène (PE), a été laissée transparente afin de pouvoir distinguer les structures internes.

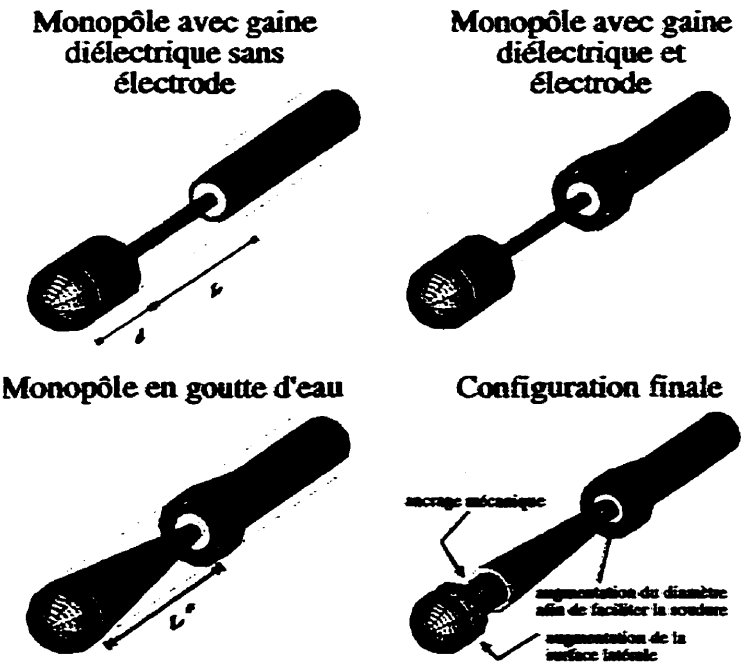


Figure 7.2: Schéma des monopôles avec capuchon

La distance L entre le début du capuchon et la fin du conducteur externe du câble coaxial est ajustée de façon à minimiser l'amplitude de l'onde réfléchie à la fréquence d'opération. Les travaux de Labonté *et al.* [23] ont démontré que la longueur d du capuchon n'influençait guère le niveau d'adaptation de l'applicateur. Ce patron de radiation, de forme quasi sphérique, est bien adapté pour le traitement de la tachycardie ventriculaire post-infarctus dans la mesure où l'on désire effectuer une ablation profonde et étendue aux environs de la zone infarcie (tel que discuté au chapitre d'introduction). Le courant circulant sur la partie externe du câble coaxial est minime lorsque ce dernier est directement en contact avec le fluide environnant. On dit alors que cette antenne est bien balancée, ce qui est une caractéristique désirée afin de ne pas endommager les vaisseaux d'accès. Cette configuration est aussi intéressante car il est possible d'utiliser les deux surfaces métalliques comme électrodes d'enregistrement de l'activité électrique du myocarde.

7.1.4.1 Résultats de simulations

Les études visant à utiliser le monopôle comme applicateur d'énergie se limitent actuellement dans la littérature à des modèles simples: un câble coaxial semi-rigide, sans gaine isolante autour du conducteur externe, au bout duquel on connecte un capuchon métallique (Labonté *et al.* [23], Kaouk *et al.* [22]). L'implantation de ce prototype afin d'en faire un applicateur utilisable, sécuritaire et efficace présente toutefois certaines difficultés. Il faut notamment considérer que, lors de l'implantation du monopôle au bout d'un cathéter réel, le conducteur externe est isolé du milieu sanguin par une couche diélectrique. Comme on le verra plus loin, cette couche diélectrique influence de façon marquée l'adaptation et le patron de radiation de l'applicateur. Il faut donc considérer tous ces facteurs afin de modéliser adéquatement l'applicateur.

Les premières simulations ont été effectuées en utilisant le monopôle avec gaine diélectrique sans électrode qui est présenté à la Figure 7.2. Le câble coaxial IW70 est simulé sur une longueur de 7,5 mm. La gaine protectrice est constituée de PE dont la constante diélectrique est de 2,2. Le diamètre total du cathéter est de 2,4 mm, ce qui correspond à un cathéter de 8 F. La longueur *d* du capuchon est de 3 mm. La puissance au port d'entrée du câble coaxial est de 1 watt. Il est à noter que le conducteur externe est complètement isolé par la gaine de PE. Le Tableau 7-2 montre le taux d'onde réfléchie (S_{11}) lorsqu'on a fait varier la longueur effective *L* afin d'optimiser l'adaptation du monopôle.

Tableau 7-2

	S_{11} des monopôles (dB) (*** = non simulé)		
L (mm)[6]	sans électrode	avec électrode	en goutte d'eau
4	-17,45	-5,05	***
6	-9,6	-5,13	-6,40
7	***	***	-7,35
8	-9,8	-5,07	***
10	-7,16	-7,16	-9,19
11	***	***	-9,90
12	***	***	-9,58

On constate que l'adaptation augmente au fur et à mesure que diminue la longueur effective et que l'adaptation est très bonne pour une longueur *L* de 4 mm. Cependant, le prix à payer pour ce raccourcissement est une augmentation du courant circulant sur la partie extérieure du conducteur externe du câble coaxial, ce qui provoque l'émission

---

[6]. Les valeurs de *L* montrées correspondent à *L** pour le monopôle en goutte d'eau.

d'énergie le long du câble. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Labonté *et al* [23]. La Figure 7.3 illustre les lignes de champ électrique du monopôle. Celles-ci sont symétriques et vont du bout de l'applicateur vers le conducteur externe du câble coaxial.

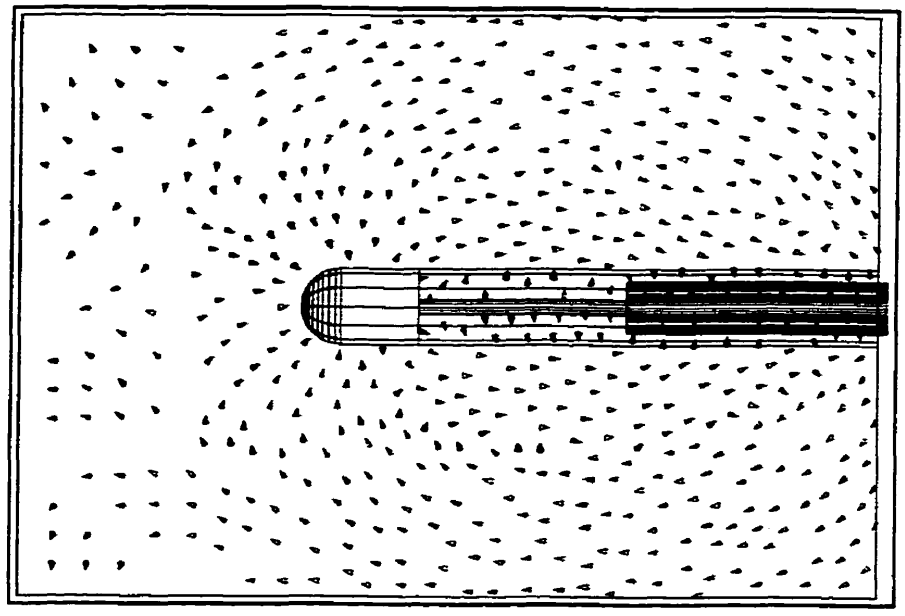


Figure 7.3: Lignes de champ électrique du monopôle

La propagation du champ électrique est illustrée à la Figure 7.4 à la colonne de gauche. La longueur effective du monopôle présenté est de 6 mm. Les flèches obliques montrent la propagation du champ électrique dans le myocarde: plus la phase ψ du champ d'excitation au port d'entrée augmente, plus le front d'onde progresse et plus l'amplitude diminue. La diminution de l'amplitude avec la distance radiale est causée par l'absorption de l'énergie par le myocarde et par la diminution de la densité de puissance par unité de surface au fur et à mesure que l'onde progresse. On peut observer que le champ électrique s'étend loin le long du cathéter derrière le monopôle et que la gaine de PE entourant le câble agit comme guide d'onde diélectrique. Cet effet est montré par la flèche verticale à $\psi = 0°$ où l'on peut voir un noeud sur l'onde rétrograde présente à

l'intérieur de la gaine diélectrique. L'amplitude de cette onde plus grande que 1 kV/m car celle-ci est représentée en rouge sur presque toute la longueur du cathéter. L'amplitude maximale du champ irradié est situé à l'entrée du capuchon tel que l'indique la flèche verticale à $\psi = 45°$. L'utilisation du feuillet à cristaux liquide a confirmé ce résultat. On remarque également la présence d'un point à l'entrée du cathéter où le champ électrique est très intense (à l'extrême droite sur les figures à $\psi = 90°$ et $\psi = 135°$). D'autres simulations, réalisées en allongeant la longueur du câble coaxial à 15 mm, ont démontré que ce point est un artefact: ce dernier est toujours présent à l'extrémité droite du modèle quelle que soit la longueur du câble lorsque le patron de radiation s'étend jusqu'à la limite droite de la géométrie.

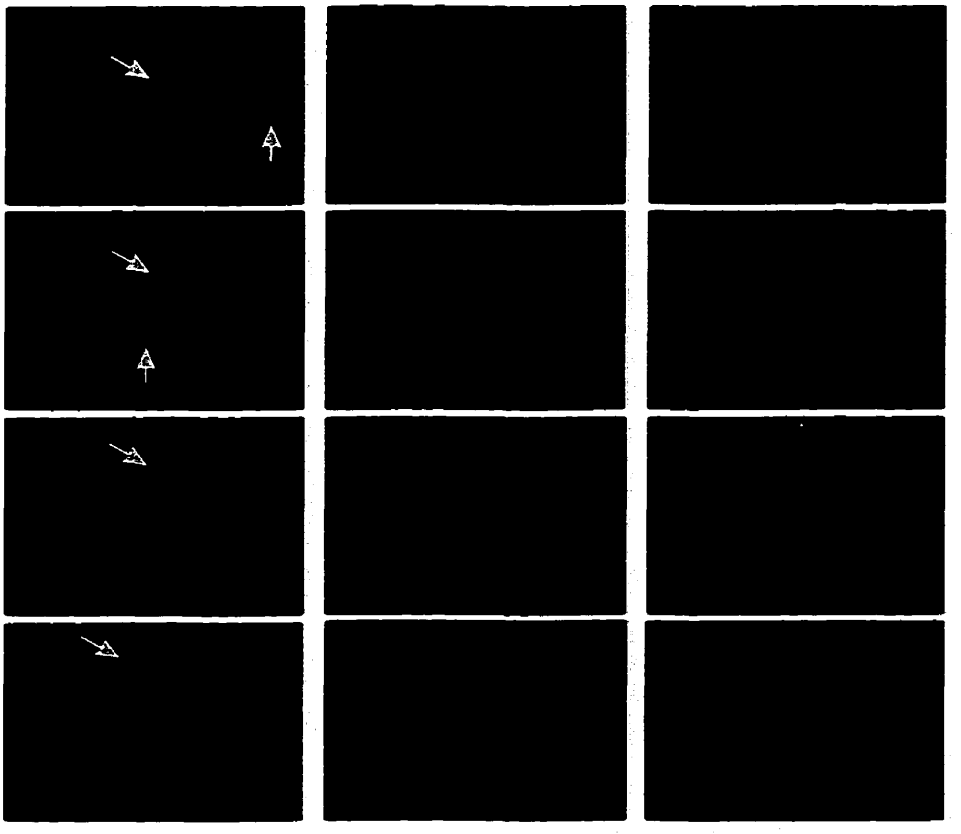


Figure 7.4: Propagation du champ électrique des monopôles avec capuchon

Le patron de SAR obtenu avec le monopôle sans électrode est présenté à la Figure 7.5. Ici encore, on constate qu'une déposition d'énergie est présente le long du câble coaxial. L'asymétrie présente au bout du capuchon est un artefact de simulation causé par le maillage non uniforme dans le volume. Dans le but de minimiser la radiation le long du câble, on a ajouté une bague métallique de 1 mm de largeur connectée au conducteur externe du câble coaxial. Cette bague est alignée avec la fin du conducteur externe. Le schéma de la partie supérieure droite de la Figure 7.2 illustre cette géométrie. Encore ici, on a étudié l'effet de la longueur sur l'adaptation de l'applicateur. Les résultats sont montrés au Tableau 7-2. On remarque que l'adaptation est beaucoup moins bonne que pour la configuration sans électrode pour des valeurs de L identiques (sauf pour L = 10 mm où les valeurs sont les mêmes). L'amplitude du champ électrique est présentée à la partie centrale de la Figure 7.4. On remarque que le champ électrique s'étend beaucoup moins le long du cathéter et que ce dernier est concentré autour de l'applicateur. On constate aussi que le champ est intense à proximité de l'électrode ainsi que du capuchon métallique. L'utilisation du feuillet de cristaux liquides et de quelques prototypes de monopôles avec électrode a d'ailleurs confirmé l'existence de ces points à haute intensité de champ électrique. Cette concentration de champ peut créer des points chauds lors d'une application réelle et provoquer la formation de coagulum. L'amplitude de l'onde rétrograde dans la gaine diélectrique est aussi moins importante que dans la configuration sans électrode: la couleur verte correspondant à un champ de 500 V/m a remplacé le rouge. Le patron de radiation possède finalement une caractéristique très intéressante: la capacité de transmettre l'énergie micro-onde vers l'avant du cathéter. Cette caractéristique est fortement désirée lors de l'ablation au niveau de l'isthme dans le traitement du flutter auriculaire de type I. Cette région anatomique, située entre la veine cave supérieure et la valve tricuspide, est généralement en forme de vallée creuse où la création d'une lésion peut être facilitée

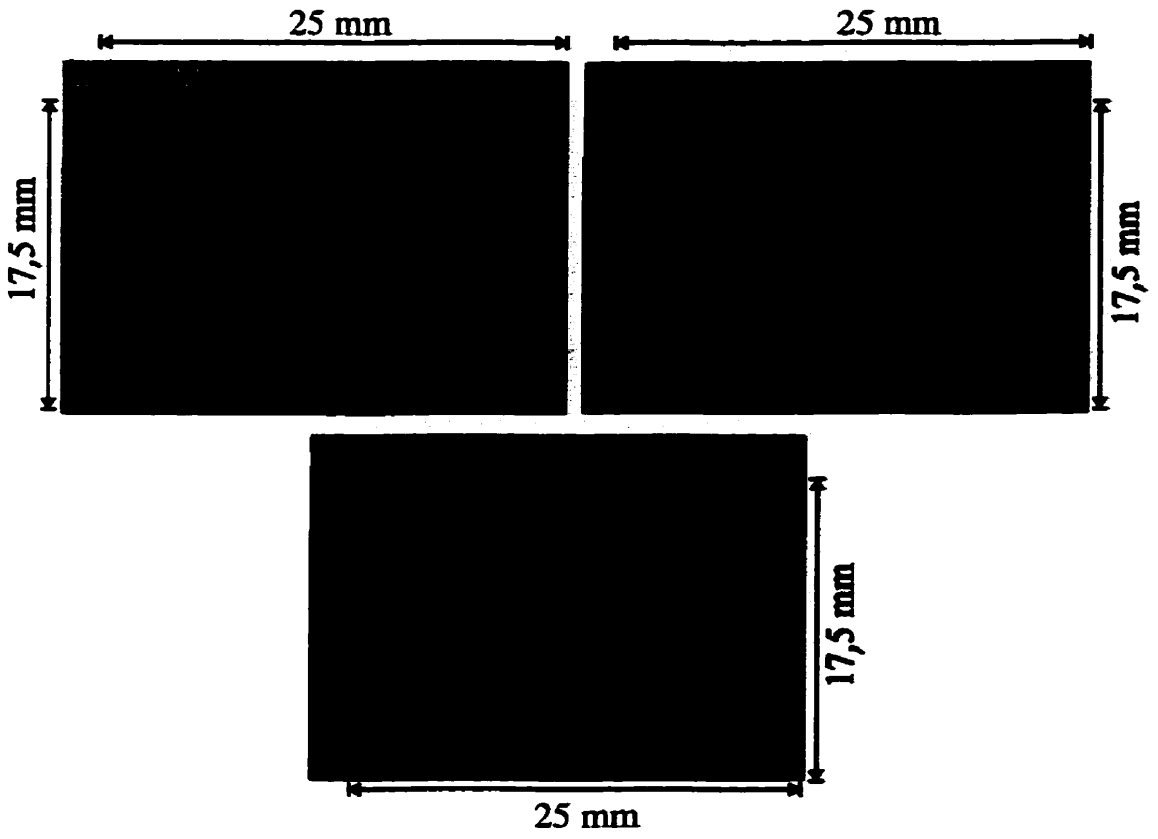


Figure 7.5: SAR/(1-S_{11}^2) des trois monopôles avec capuchon

par la déposition d'énergie vers l'avant du cathéter. Le patron de radiation ainsi obtenu est intéressant mais cela se fait au détriment de l'adaptation de l'applicateur qui s'est beaucoup détériorée par rapport à celle de l'applicateur sans bague. Les résultats de simulation ont été vérifiés expérimentalement et correspondent approximativement à ceux obtenus en pratique (-8 dB $\leq S_{11} \leq$ -5 dB). En visualisant le champ avec l'option « graphique animé » du simulateur, on constate que la réflexion est importante au début du capuchon métallique. L'idée est alors venue d'utiliser une transition douce entre le conducteur interne du câble coaxial et le capuchon métallique de façon à améliorer l'adaptation du monopôle tout en dirigeant l'énergie vers l'avant. Ce concept est illustré à

la Figure 7.4. Le Tableau 7-2 montre la variation du paramètre S_{11} en fonction de la longueur effective L^*. On constate que la transition douce améliore l'adaptation du monopôle de quelques dB. L'adaptation optimale de −9,90 dB est obtenue pour une longueur effective L^* de 11 mm. La propagation du champ électrique est montrée à la Figure 7.4 tandis que le patron de SAR est montré à la Figure 7.5 pour une longueur L^* de 11 mm. On observe que le patron de SAR s'est allongé quelque peu et que la capacité d'appliquer l'énergie vers l'avant s'est accrue. Cette configuration est le meilleur compromis obtenu entre l'adaptation et le patron de radiation. Cependant, la construction de cet applicateur est difficile pour deux raisons: l'épaisseur de la couche diélectrique est très faible près du capuchon métallique et la soudure sur le conducteur interne du câble coaxial est difficile à réaliser. De plus, le capuchon métallique n'est retenu que par la soudure effectuée sur le conducteur interne du câble coaxial. Si cette soudure venait qu'à se rompre durant une application d'énergie, le capuchon pourrait se retrouver dans la circulation périphérique, ce qui amènerait de sérieuses complications. On doit donc redéfinir la géométrie afin d'y ajouter un système d'ancrage mécanique et de faciliter la production. Pour ce faire, on a ajouté une entaille de 0,25 mm de profondeur près du capuchon métallique afin d'obtenir le système d'ancrage mécanique désiré en plus de fixer l'épaisseur minimale de PE à 0,25 mm. Le rayon de la partie proximale du capuchon a été augmenté de 0,125 mm afin d'en faciliter le soudage sur le conducteur interne. De plus, la surface latérale du capuchon métallique en contact avec le myocarde a été étendue à 2,14 mm de façon à favoriser un bon contact lors de la lecture de l'électrogramme. Le schéma en bas à droite de la Figure 7.2 illustre la géométrie obtenue. Cette géométrie a été simulée afin de connaître les effets de ces modifications sur le patron de radiation ainsi que sur l'adaptation du monopôle. Pour ce qui est du patron de radiation, aucune différence majeure n'a été identifiée. Par contre, l'adaptation est passée à -10,58 dB, ce qui est le meilleur résultat obtenu pour toutes les configurations étudiées.

Pour ce qui est de l'enregistrement de l'électrogramme, une distance inter-électrode de 11 mm ne procurera pas une très bonne résolution. Une façon d'améliorer cette dernière consiste à ajouter une autre bague près du capuchon métallique. Cette bague doit par contre être flottante par rapport au câble coaxial, c'est-à-dire qu'elle ne doit pas être connectée à aucun des conducteurs métalliques du câble. Une deuxième électrode supplémentaire pourrait aussi être ajoutée derrière l'électrode connectée au conducteur externe du câble afin d'obtenir une autre paire bipolaire aux endroits où le chauffage est important. Les simulations, ainsi que l'application réelle de ce concept ont démontré que le patron de radiation ainsi que l'adaptation du monopôle sont passablement insensibles à l'ajout de ces électrodes électriquement flottantes.

À la lumière de ces faits, on peut affirmer que lorsque le patron de radiation est adéquat, une adaptation d'environ -10 dB est le maximum que l'on peut espérer atteindre pour un monopôle monté au bout d'un cathéter réaliste.

7.1.4.2 **Résultats *in vivo*.**

Dans le but d'étudier l'efficacité du monopôle mais surtout d'identifier les complications cliniques possibles, des tests *in vivo* ont été réalisés sur 5 chiens anesthésiés au laboratoire de biomédecine de l'hôpital du Sacré-Coeur de Montréal. D'autres expériences chez un chien ont été réalisées par la suite à Berkeley (CA). Le monopôle étudié est illustré à la Figure 7.2. La technique expliquée à la section 7.1.3.4 a été utilisée. Les tests ont démontré que le monopôle à capuchon pouvait produire des lésions très importantes au niveau des ventricules. Le volume moyen des lésions

obtenus avec le monopôle a été de 642 mm^3 dans le ventricule droit (comparativement à 35 mm^3 pour une antenne bi-hélicoïdale[7]). Une lésion transmurale de 2154 mm^3 a aussi été produite à l'apex du ventricule gauche en utilisant une puissance de 65 watts à la sortie du générateur pendant 2 minutes. Ces lésions montrent la capacité de l'applicateur à produire des lésions de volume important.

7.1.4.2.1 Complication: coagulum

Ces tests ont aussi démontré que cette modalité d'application d'énergie peut présenter certains risques. Des coagulums ont été observés à la suite d'applications d'énergie de 50 watts pendant 60 secondes. Ces coagulums, s'ils sont produits dans la partie droite du coeur, peuvent entraîner une embolie pulmonaire ou, pire encore, une embolie cérébrale s'ils se forment dans la partie gauche (une embolie cérébrale peut avoir des conséquences extrêmement graves pouvant aller jusqu'à la mort). Les tests de formation de coagulum ont été repris quelques mois plus tard à Berkeley en utilisant la même configuration de monopôle. L'extrémité du cathéter a été placée au niveau de la veine cave inférieure et l'énergie a été déposée pour une période de 60 secondes. À la fin de chacune des applications, le cathéter a été retiré de l'animal afin de procéder à une inspection visuelle. Les tests ont été effectués en utilisant une puissance de sortie variant entre 35 et 75 watts. Aucune trace de coagulum n'a été détectée dans aucun de ces cas. Par la suite, des ablations ont été effectuées au niveau des oreillettes et des ventricules en utilisant une puissance de 60 watts durant 60 secondes. L'inspection visuelle du monopôle a alors démontré une légère présence de thrombus à l'extrémité du cathéter. Ceci peut être expliqué par le fait que, lorsque le cathéter est situé dans la veine cave, le

---

[7]. Cathéter de 7,5 F de Fidus Medical Technology (Fremont, CA)

débit sanguin est suffisamment important pour refroidir l'applicateur et ainsi empêcher la formation de coagulum. Cependant, lorsque le cathéter est en contact avec la paroi endocardique, le flot sanguin peut être moins important à cet endroit, ce qui peut provoquer une importante augmentation de la température de l'applicateur et la formation de coagulum. Cet effet est plus marqué dans les oreillettes, lorsque la partie distale du monopôle est coincée entre deux muscles pectinés et à l'apex du ventricule droit où le monopôle est en contact à la fois avec les parois septale et latérale du ventricule.

Tous ces tests ont été réalisés en mesurant la puissance réfléchie lors de l'ablation micro-onde. Il a été observé que ce paramètre ne variait pas lors de l'apparition du coagulum sur le monopôle. Cet indicateur ne peut donc pas être utilisé afin de vérifier la formation de coagulum et ainsi assurer la sécurité du patient. Il est donc nécessaire d'étudier d'autres façons de détecter ce phénomène. En ablation RF lorsque la température au niveau de l'électrode distale atteint près de 100 °C, l'apparition du coagulum fait en sorte que l'impédance de contact entre cette électrode et la paroi endocardique augmente de façon marquée. Cette augmentation d'impédance provoque une chute de courant et limite la dimension de la lésion. Il est donc possible d'utiliser ce même phénomène, en ablation micro-onde, afin de détecter la formation de ce coagulum. La technique consiste à injecter un courant RF, dont la fréquence est de l'ordre de quelques centaines de kHz, entre les conducteurs internes et externes de la ligne de transmission coaxiale afin de mesurer l'impédance du cathéter. L'implantation de cette technique est illustrée plus en détail à la section 6 de la présente thèse.

7.1.4.2.2 Complication: arythmies

Durant certaines ablations produisant des lésions ayant un volume important (>300 mm^3), on a remarqué la présence de contractions ventriculaires prématurées (CVP) survenant entre 10 et 30 secondes après la fin de l'ablation. La puissance utilisée était alors de 65 Watts et la durée d'application variait entre 1 et 2 minutes. Quelques-une de ces CVP ont déclenché des tachycardies ventriculaires non soutenues et l'une d'elles a dégénéré en fibrillation ventriculaire. Le largage du potassium intracellulaire à la suite de la rupture des membranes cellulaires causée par le traitement hyperthermique dans un volume myocardique est une hypothèse pouvant expliquer la présence des CVPs. Ce phénomène provoquerait un flot de potassium dans le liquide extracellulaire, ce qui dépolariserait localement les cellules myocardiques saines et diminuerait leur seuil d'excitation. Ces cellules se dépolariseraient alors de façon spontanée causant ainsi les CVPs. Une augmentation de la concentration de potassium extracellulaire dans des échantillons sanguins prélevés dans le sinus veineux supportent cette hypothèse. Lors de l'utilisation de l'antenne bi-hélicoïdale où les lésions sont de plus faible volume en moyenne, une chien a présenté une épisode de flutter ventriculaire dégénérant en fibrillation ventriculaire. Une solution possible pour la production de lésions ayant un volume important serait d'effectuer l'ablation en utilisant un protocole de déposition d'énergie par paliers successifs. L'ablation débuterait à faible puissance. Par la suite, l'ablation est interrompue, ce qui laisserait au potassium le temps de diffuser dans le milieu extracellulaire (phénomène de « wash-out »). Par la suite, la puissance micro-onde est augmentée afin de traiter un volume additionnel et ainsi de suite. L'ablation s'effectuerait ainsi par couches successives de tissu myocardique. Les puissances de sortie, les temps d'application ainsi que les temps de repos restent encore à être déterminés.

7.1.5 Monopôle sans capuchon

Le monopôle sans capuchon a été étudié par Labonté *et al.* [23], Shetty *et al.* [51] ainsi que Taylor *et al.* [69]. Ce dernier consiste simplement en une extension du conducteur interne du câble coaxial. Ce type d'antenne peut se diviser en deux familles: celle dont le conducteur interne est en contact direct avec le milieu environnant et celle dont le conducteur interne est électriquement isolé de ce milieu. Les travaux effectués par Labonté *et al.* [23] indiquent que l'adaptation de ce monopôle sans capuchon est très bonne comparativement à celle du monopôle avec capuchon (-23 dB vs -9 dB). Le patron de radiation de cet applicateur est de forme elliptique allongée, ce qui en fait un applicateur intéressant pour le traitement du flutter auriculaire où une lésion linéaire d'environ 2 cm doit être produite au niveau de l'isthme. Lors des simulations, on a utilisé les dimensions d'un câble coaxial de la compagnie Cooner (CW 2040-3050F). Ce câble possède des dimensions très fines, ce qui lui confère une excellente souplesse. Les études de Labonté *et al.* ont été réalisées en utilisant un câble coaxial semi-rigide immergé dans de l'eau salée. Il sera intéressant de vérifier comment l'utilisation d'un câble coaxial de plus faible diamètre ainsi que la présence d'une couche diélectrique recouvrant le conducteur externe du coaxial peuvent causer des changements sur le patron de radiation et sur l'adaptation de cet applicateur.

Dans l'article de Labonté *et al.*, l'antenne est constituée d'une longueur L de 13 mm située à l'extrémité d'un câble semi-rigide de 2,159 mm de diamètre externe. La première simulation comporte la même longueur L située à l'extrémité d'une longueur de 4,5 cm de câble coaxial. Il est important de noter que ces simulations ont été effectuées avec le conducteur externe du coaxial en contact direct avec le sang (sans gaine protectrice isolante). Le schéma de l'applicateur est montré à la Figure 7.6 tandis que les résultats obtenus sur le paramètre S_{11} en fonction de la fréquence sont présentés à la

Figure 7.7. Ces résultats concordent bien avec ceux présentés par Labonté *et al.* pour cette structure (voir [23]).

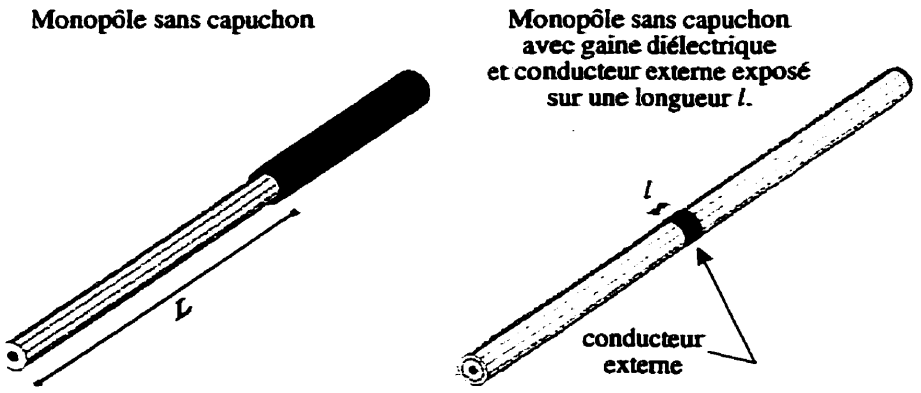


Figure 7.6: Schéma des monopôles sans capuchon

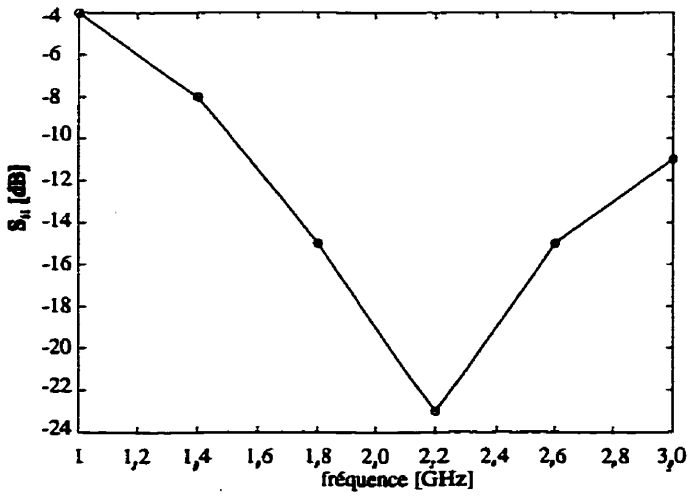


Figure 7.7: S_{11} en fonction de la fréquence pour le monopôle sans capuchon

L'adaptation à 2.45 GHz est de -18 dB, ce qui est excellent (comme l'antenne résonne à 2,2 GHz, la longueur active pourrait être diminuée afin que celle-ci résonne à 2,45 GHz). Le patron de SAR, montré à la partie supérieure de la Figure 7.9, est de

forme elliptique et s'étend sur environ 10 mm dernière la transition entre le câble et le début de l'antenne longitudinale. Le long du câble coaxial, la radiation est négligeable: toute l'énergie est émise par la partie distale du cathéter. De plus, le champ électrique maximal est situé à la partie la plus distale de l'applicateur, à l'endroit où le conducteur interne fait contact avec le sang. Cette configuration permet donc d'appliquer l'énergie au-delà de l'extrémité de l'applicateur. On a ensuite simulé la même antenne mais cette fois, en ajoutant une gaine protectrice de polyéthylène ($\varepsilon_r = 2.2$) de 50 μm d'épaisseur tout au long de l'antenne et du câble coaxial, le conducteur interne étant toujours en contact avec le fluide sanguin à son extrémité seulement. L'adaptation est alors passée de -18 dB à -14,7 dB à 2,45 GHz. Pour ce qui est du patron de radiation, une émission d'énergie significative est présente le long du câble coaxial. Cela est observé sur le patron de SAR montré à la Figure 7.9 (deuxième schéma à partir du haut). Le patron de SAR s'est étiré vers la droite comparativement à celui produit la configuration sans gaine. Un tel patron peut produire une lésion superficielle le long du câble, ce qui n'est pas souhaitable d'un point de vue clinique. En observant la propagation du champ électrique, il est clair que tout comme le monopôle, la couche de diélectrique entourant le câble agit comme guide d'onde diélectrique et que le champ est important à cet endroit. Cet effet de guide d'onde diélectrique est illustré par les flèches obliques pour une structure similaire à la Figure 7.8.

Afin de tenter de diminuer le champ le long du câble, la même technique utilisée avec le monopôle à capuchon a été employée: une bague métallique de 1 mm de longueur connectée au conducteur externe a été ajoutée de façon à diriger le champ vers cette bague à la base de l'antenne. La partie droite de la Figure 7.6 illustre la géométrie de cet applicateur, incluant la gaine de PE recouvrant le câble coaxial. Le paramètre S_{11} de l'antenne est passé à -21,1 dB et la radiation le long de l'antenne a diminué quelque peu. Cela est montré par le patron de SAR de la Figure 7.9. La bague métallique a pour

effet d'améliorer l'adaptation de la structure et de diminuer quelque peu la radiation le long de la ligne de transmission. La propagation du champ électrique est illustrée à la Figure 7.8 où les flèches verticales montrent que les maxima sont situés au bout de l'applicateur et à proximité de l'électrode. L'utilisation du feuillet de cristaux liquide avec un prototype a d'ailleurs confirmé ce résultat. Il est possible que, tout comme le monopôle avec capuchon, ces points provoquent des points chauds et causent la formation de coagulum. Il serait possible d'éliminer le point chaud situé au bout du monopôle en isolant le conducteur interne du milieu physiologique. Cependant, on perdrait la propriété d'appliquer l'énergie au-delà du bout du cathéter et le patron de radiation serait moins uniforme. Celui-ci aurait la forme d'une ellipsoïde très allongée tel que décrit dans l'article de Labonté *et al.*.

Les travaux de Mendecki *et al.* [74] montrent que lorsque le conducteur externe est en contact avec le milieu externe sur une même longueur que la longueur L du monopôle, le patron de radiation demeure confiné au bout de l'antenne et la radiation le long de câble est inexistante, un peu comme avec le monopôle sans gaine diélectrique. Cependant, l'ajout d'une gaine métallique de 13 mm de longueur ferait en sorte que le bout du cathéter serait non flexible, ce qui n'est pas souhaitable si on veut suivre la courbure de l'endocarde avec l'applicateur. On a tenté d'augmenter la surface de l'électrode en contact avec le sang afin de confiner encore plus le patron de SAR vers le bout de l'applicateur et de diminuer la radiation le long du câble. Le schéma du bas de la Figure 7.9 montre le patron de SAR obtenu en utilisant une électrode de 3 mm de longueur (S_{11} = -28,4 dB). On constate que le SAR est légèrement plus faible le long du cathéter. Cependant, le SAR est mieux défini que dans les autres configurations: la partie en rouge forme une ellipse et ne s'étend pas le long du câble comme dans les autres cas.

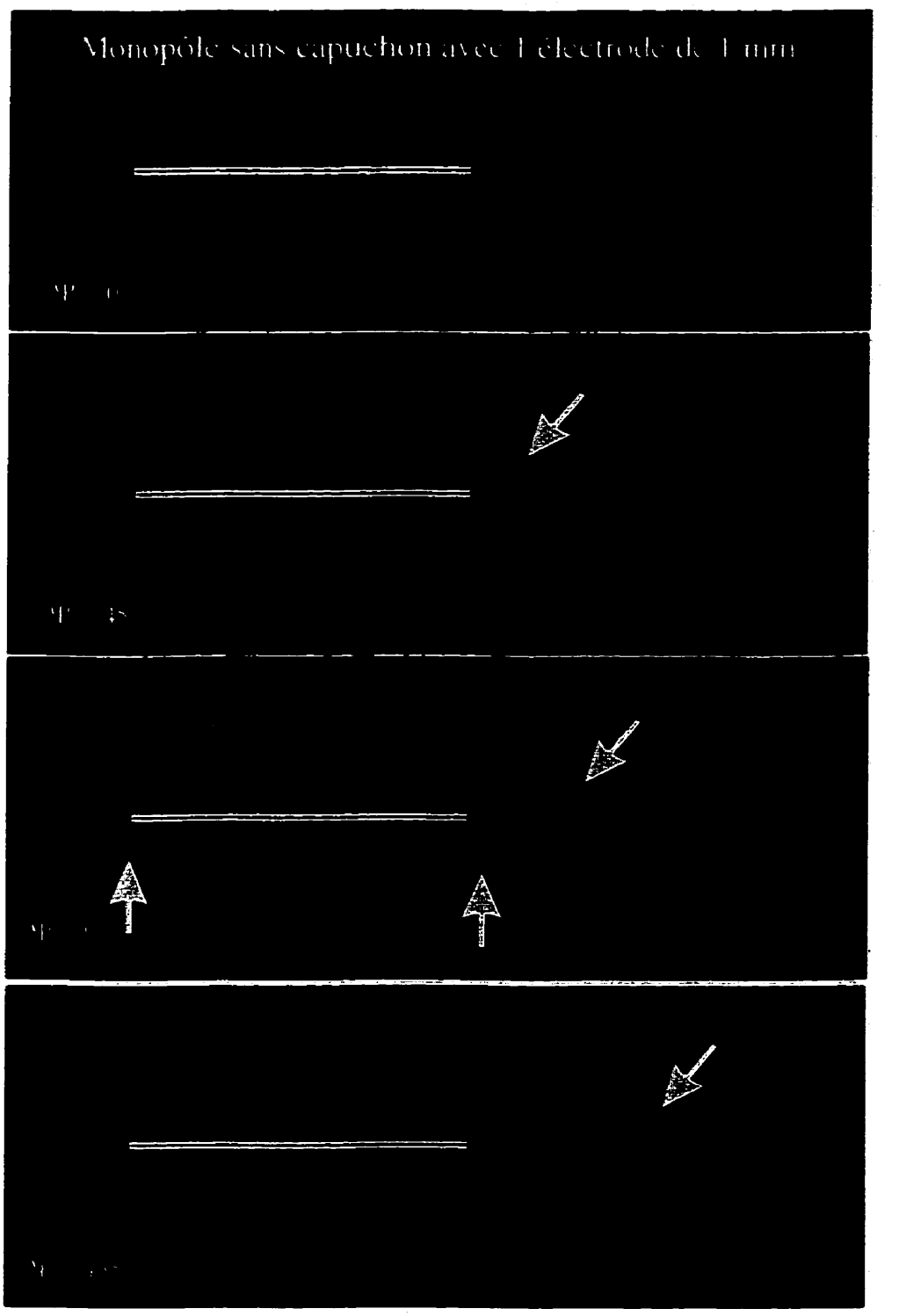


Figure 7.8: Propagation du champ électrique du monopôle sans capuchon avec électrode

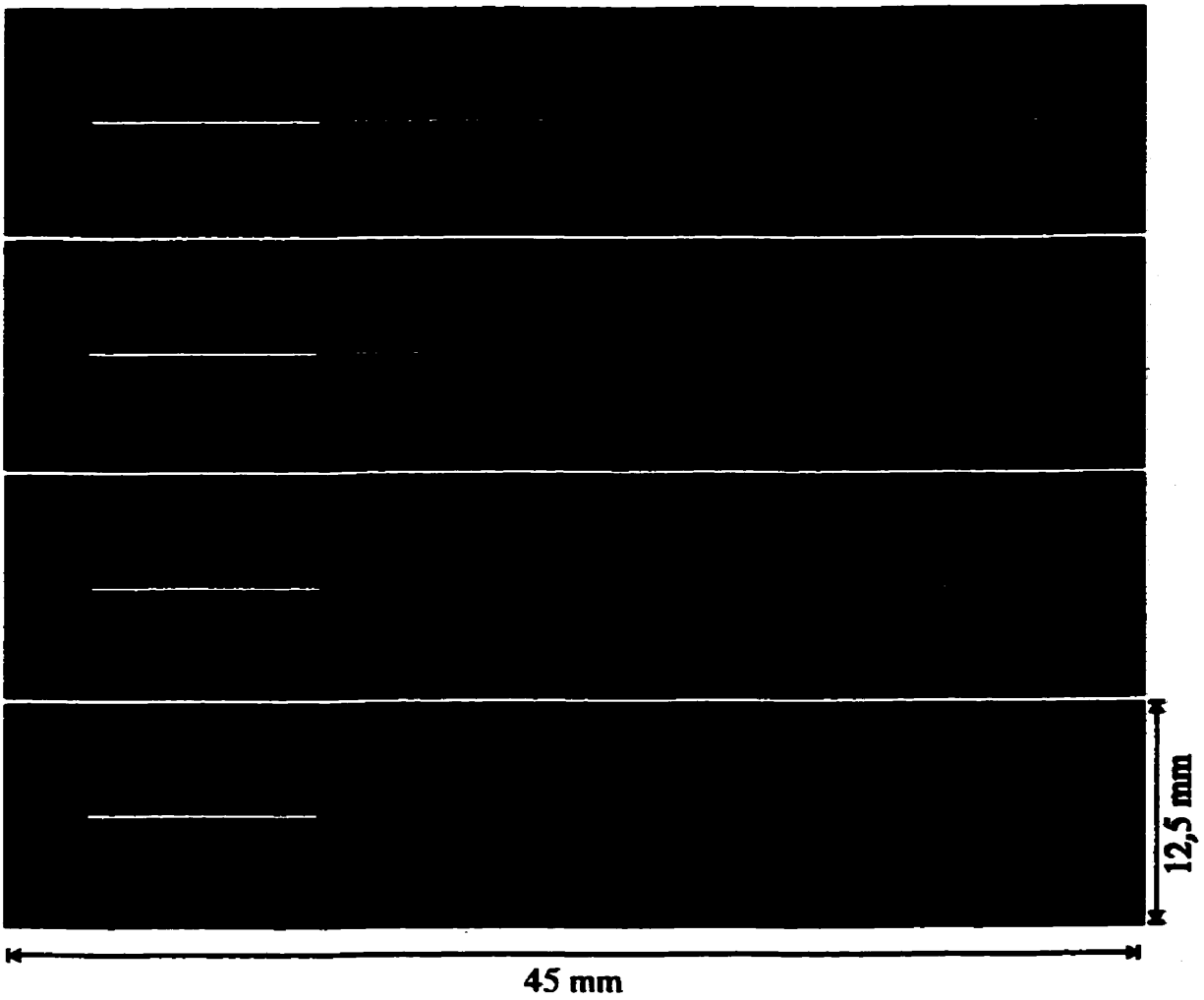


Figure 7.9: SAR/(1-S_{11}^2) pour les monopôles sans capuchons

Le patron de radiation, l'adaptation ainsi que les propriétés mécaniques de cet applicateur sont intéressants en vue du traitement du flutter et de la fibrillation auriculaire où des lésions de forme allongées sont requises. Le seul point négatif est que le patron de SAR s'étend de façon superficielle le long du cathéter. Des tests *in vitro* seront nécessaires afin d'observer si cette partie peut causer des lésions indésirables au niveau du myocarde ou des vaisseaux d'accès et s'il est possible d'éliminer cette

coaxial. La meilleure configuration obtenue est celle avec l'électrode de 3 mm de longueur car le patron de SAR est mieux défini.

Avec une longueur L de 13 mm, le patron de SAR produit par ce type de monopôle s'étend sur environ 2 à 2,5 cm de longueur. Dans le but de produire des lésions plus allongées (pour le flutter ou la fibrillation auriculaire), on a étudié l'effet d'une augmentation de la longueur L sur l'adaptation à 2,45 GHz. Les résultats sont présentés à la Figure 7.10.

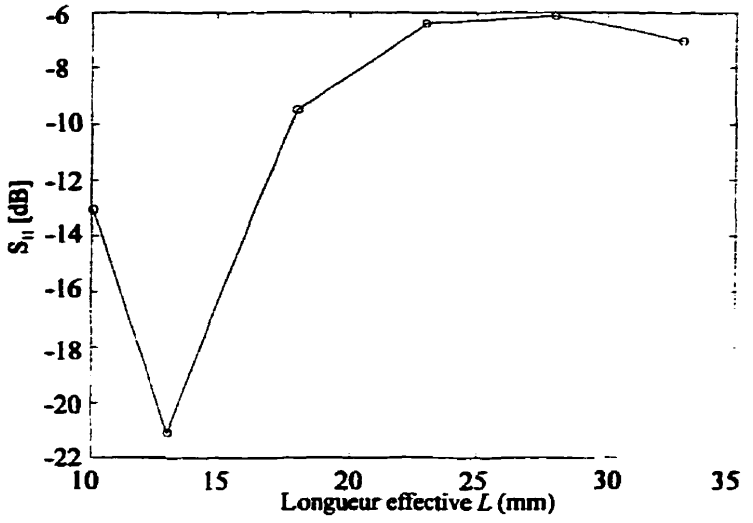


Figure 7.10: Adaptation en fonction de la longueur active L

Comme on peut le constater, l'adaptation de l'antenne décroît au fur et à mesure que la longueur active s'écarte de 13 mm. On n'a donc pas beaucoup de flexibilité par rapport à la longueur de l'antenne pour ce genre d'applicateur. L'adaptation de cette antenne est optimale pour une longueur active de 13 mm.

Les simulations ont été effectuées sans électrode d'enregistrement d'électrogramme à la partie la plus distale de l'applicateur. Quelques prototypes ont été produits afin d'évaluer les caractéristiques de ce genre d'antenne lorsque deux bagues métalliques sont ajoutées au bout de l'antenne (la méthode utilisant le feuillet de cristaux liquide a été utilisée afin de visualiser le patron de chauffage). Ces électrodes, toutes deux connectées par un fil métallique fin, étaient flottantes par rapport au câble coaxial. Le diamètre des bagues utilisées était de 2,25 mm: il a donc fallu ajouter un tube de téflon de même diamètre afin de supporter ces dernières. Ces prototypes d'antennes ont démontré que l'ajout d'un tube de téflon dont le diamètre est important par rapport aux dimensions du conducteur interne du coaxial fait en sorte que le patron de radiation n'atteint pas le bout de l'antenne et revient le long du conducteur externe. Ce patron de radiation se rapproche de celui obtenu par Labonté *et al.* avec les applicateurs dont le conducteur central est électriquement isolé du milieu environnant. Le simple fait que le bout du conducteur interne soit en contact avec le fluide sanguin n'assure donc pas l'obtention d'un patron de radiation s'étendant jusqu'au bout de l'antenne. Ces tests ont aussi démontré que la présence d'électrodes flottantes n'influençait guère l'adaptation et le patron de radiation de l'applicateur.

7.1.6 Antennes hélicoïdales

Quelques groupes de recherche ont étudié les caractéristiques de l'antenne hélicoïdale, notamment Shetty *et al.* [51], Langberg *et al.* [52-53], Wonnell *et al.* [54], Liem *et al.* [55], Baron *et al.* [56], Rho *et al.* [57], Ruder et al. [59], Stauffer *et al.* [63], Satoh *et al.* [64] ainsi que Wu *et al.* [65]. Cette antenne est présentement développée et utilisée à une fréquence de 2,45 GHz par la compagne Fidus Medical Technology. La compagnie E.P. Technology (Sunnyvale, Ca.) a aussi développé ce genre d'applicateur utilisant une fréquence de 915 MHz. La Figure 7.11 illustre les configurations d'antennes étudiées dans ce chapitre.

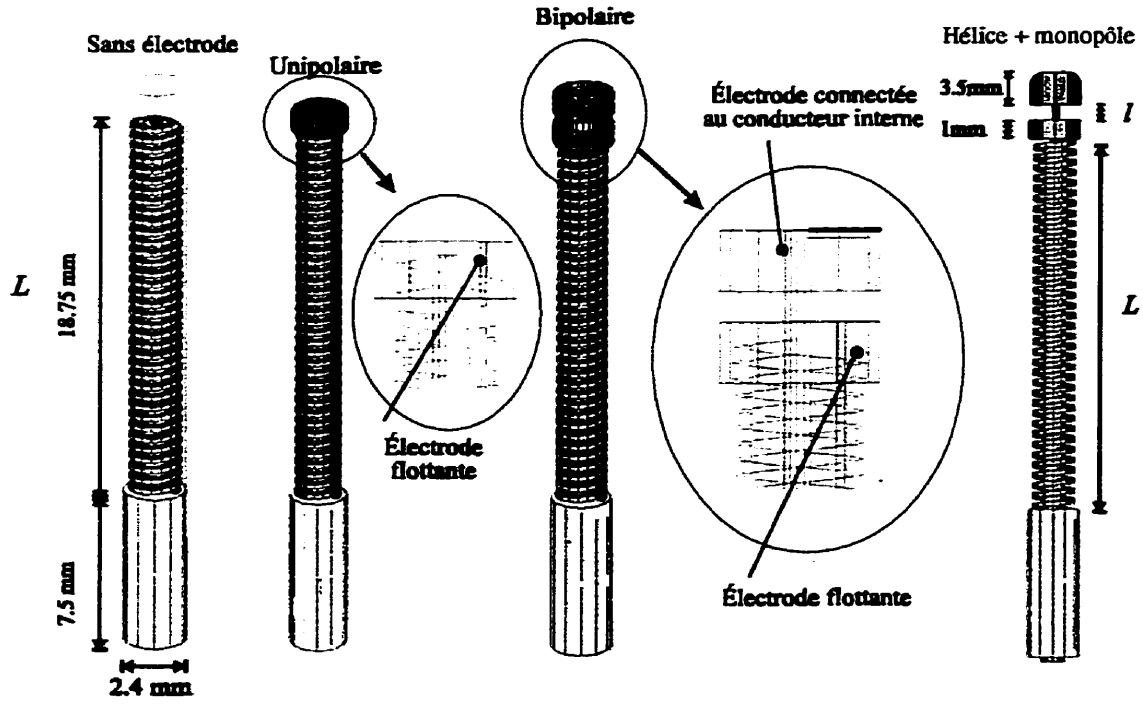


Figure 7.11: Schéma des antennes hélicoïdales

L'antenne consiste en un enroulement hélicoïdal dont l'extrémité distale est soudée au conducteur interne du câble coaxial tandis que l'extrémité proximale est connectée au conducteur externe. La longueur L, ainsi que le nombre de tours de l'hélice sont ajustés de façon à ce que la fréquence de résonance soit située à environ 2,45 GHz. La structure radiante est recouverte d'une couche de polytétrafluoroéthylène (PTFE) afin d'assurer l'isolation électrique ainsi que l'hémocompatibilité de la structure. Contrairement aux monopôles, les simulations ont été effectuées après avoir fabriqué plusieurs prototypes d'antennes hélicoïdales. Ces simulations ont été effectuées afin d'augmenter la compréhension de cette structure et d'améliorer ses performances. Tout d'abord, on a simulé la structure sans électrode montrée à la Figure 7.11. La construction de quelques prototypes de ce type a montré que cette antenne est bien adaptée à 2,45 dB (S_{11} = -21 dB) lorsque l'hélice possède 39 tours et que la longueur L est de 20 mm. Les caractéristiques du câble coaxial IW70 ont été utilisées pour la ligne de transmission lors des simulations afin de correspondre aux prototypes. On montre le champ électrique résultant de la simulation à la Figure 7.12[8]. Le paramètre S_{11} obtenu par simulation est de -19,35 dB (ΔS = 0,09 après 3 itérations). Comme on peut le constater, les paramètres S_{11} simulés et mesurés sont semblables. Pour ce qui est du patron de radiation, on remarque que le champ électrique est plus intense à la base de l'antenne qu'à son extrémité. Cette caractéristique a été observée avec le prototype et le feuillet de cristaux liquides: la décoloration des ces derniers était plus large en partie proximale qu'en partie distale. De plus, cette décoloration débutait à la base où, comme l'indique la simulation, le champ électrique est le plus important. Le champ électrique est également montré sous forme vectorielle. On constate que ces lignes se retrouvent préférentiellement dans

---

[8]. Les résultats de simulation de cette structure étant demeurés en Californie, on ne peut montrer la propagation du champ électrique ni le patron de SAR sous forme d'image couleur comme dans les autres configurations.

le plan longitudinal au lieu du plan transverse à l'axe de l'applicateur. Dans la coupe transverse, on peut remarquer que les tétraèdres représentant le champ électrique possèdent une importante composante perpendiculaire au plan. On peut aussi constater un léger mouvement rotationnel caractéristique aux antennes hélicoïdales autour de l'applicateur.

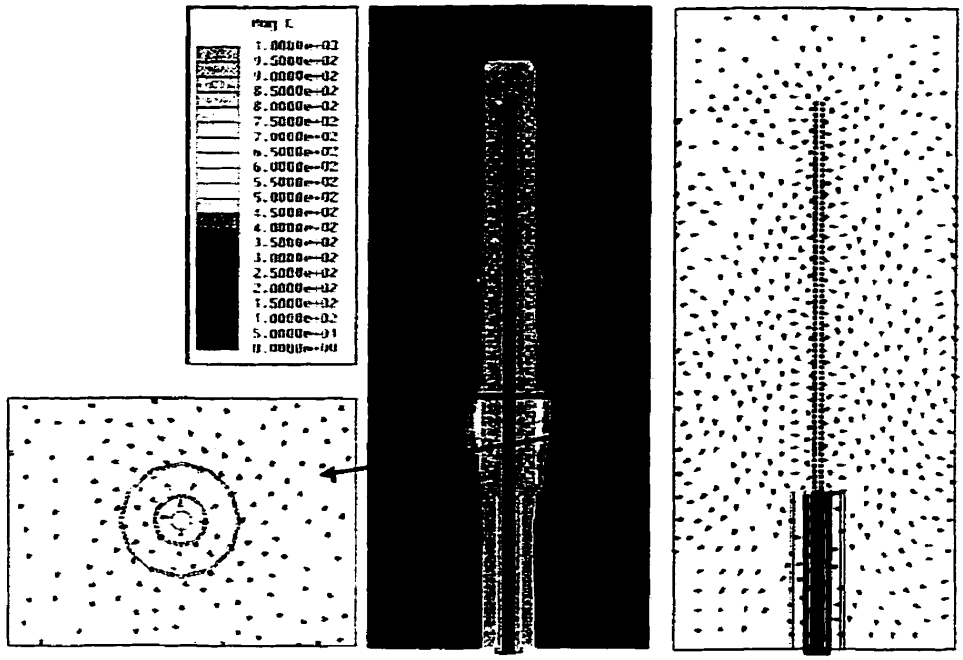


Figure 7.12: Patron de radiation de l'antenne hélicoïdale sans électrode pour $\Psi = 0°$

Les premiers cathéters de ce genre possédaient deux bagues métalliques sur le bout de téflon de la partie distale de l'applicateur (voir la Figure 7.11). Ces dernières étaient électriquement flottantes par rapport à la ligne de transmission. Chacune de ces électrodes étaient connectées à un fil métallique qui passait à l'intérieur de l'hélice et qui

se rendait au générateur. Le problème, avec cette configuration, provenait du fait qu'à l'endroit où l'on enregistre l'électrogramme, le champ électrique et le chauffage sont faibles. Afin de bien guider l'ablation, il est préférable d'appliquer le traitement hyperthermique à l'endroit où l'on enregistre l'activité électrique du myocarde. Pour ce faire, on a modifié la position de la paire d'électrodes pour qu'elle recouvre la partie distale de l'hélice. Cependant, la présence de ces électrodes augmente le couplage entre les tours adjacents du bout de l'hélice, ce qui les « court-circuite ». On observe, à l'aide des cristaux thermosensibles, que l'énergie ne se rend pas au bout de l'applicateur et qu'on ne produit pas de chauffage à proximité de la paire d'électrodes. Il est donc très difficile d'obtenir, à l'aide de ce type de configuration, un patron de chauffage qui s'étend au-delà du bout du cathéter et, par le fait même, aux environs immédiats des électrodes d'enregistrement. Pour contourner ce problème, on a utilisé la configuration unipolaire montrée à la Figure 7.11. On a simplement positionné l'électrode de façon à ce qu'elle recouvre le dernier tour de l'hélice et on a sacrifié la seconde. L'enregistrement de l'électrogramme s'effectue donc en mode unipolaire. Si l'électrode est positionnée de façon plus proximale, on observe l'effet de court-circuit et, à l'inverse, si son emplacement est plus distal, les lignes de champ électrique ne se rendent pas à l'électrode et on ne peut appliquer l'énergie à l'emplacement où la lecture unipolaire est effectuée. Des simulations ont été effectuées avec cette configuration et on montre les résultats au bas de la Figure 7.13. Le patron de SAR obtenu est montré à droite de la Figure 7.14.

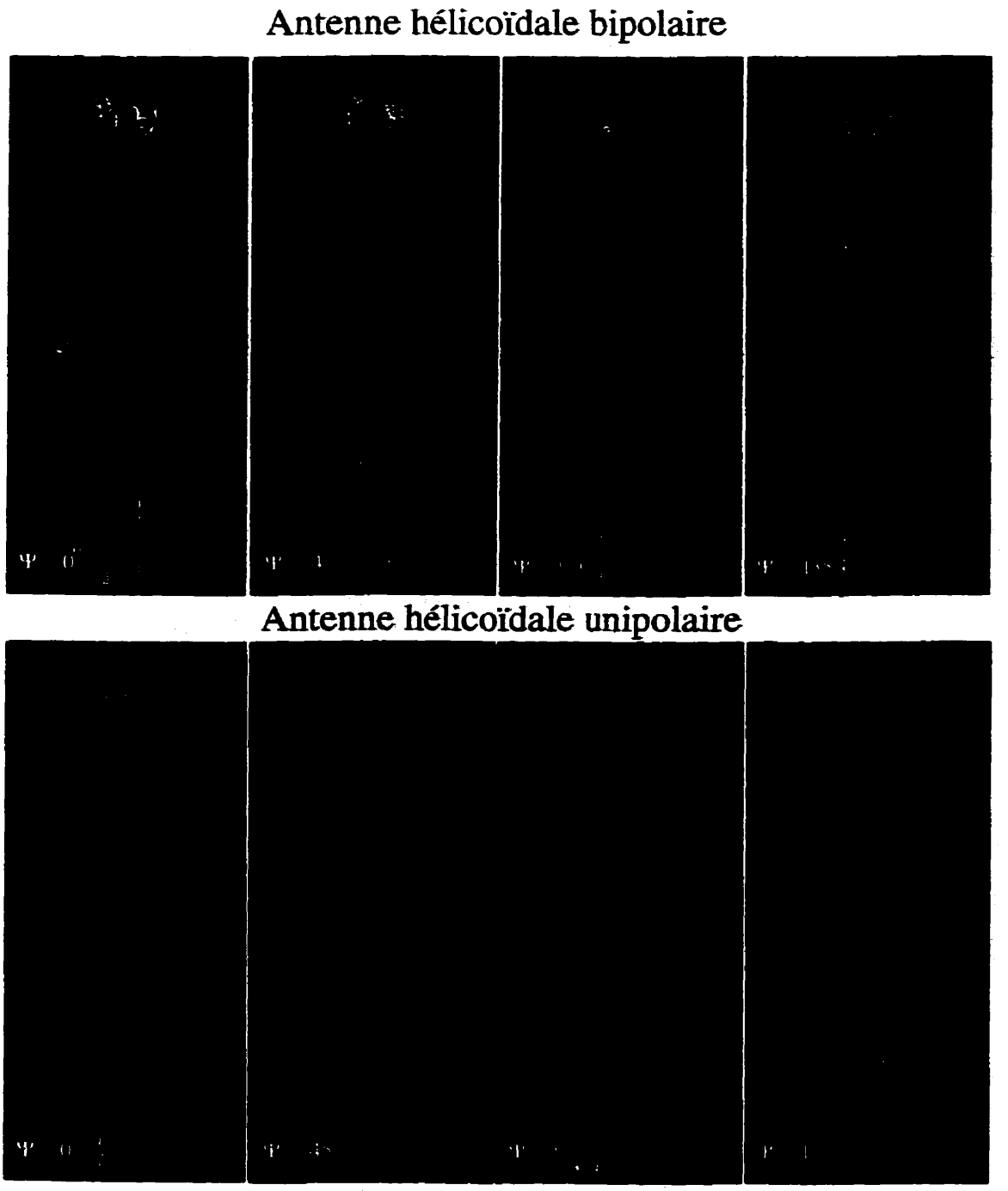


Figure 7.13: Propagation du champ électrique des antennes hélicoïdales

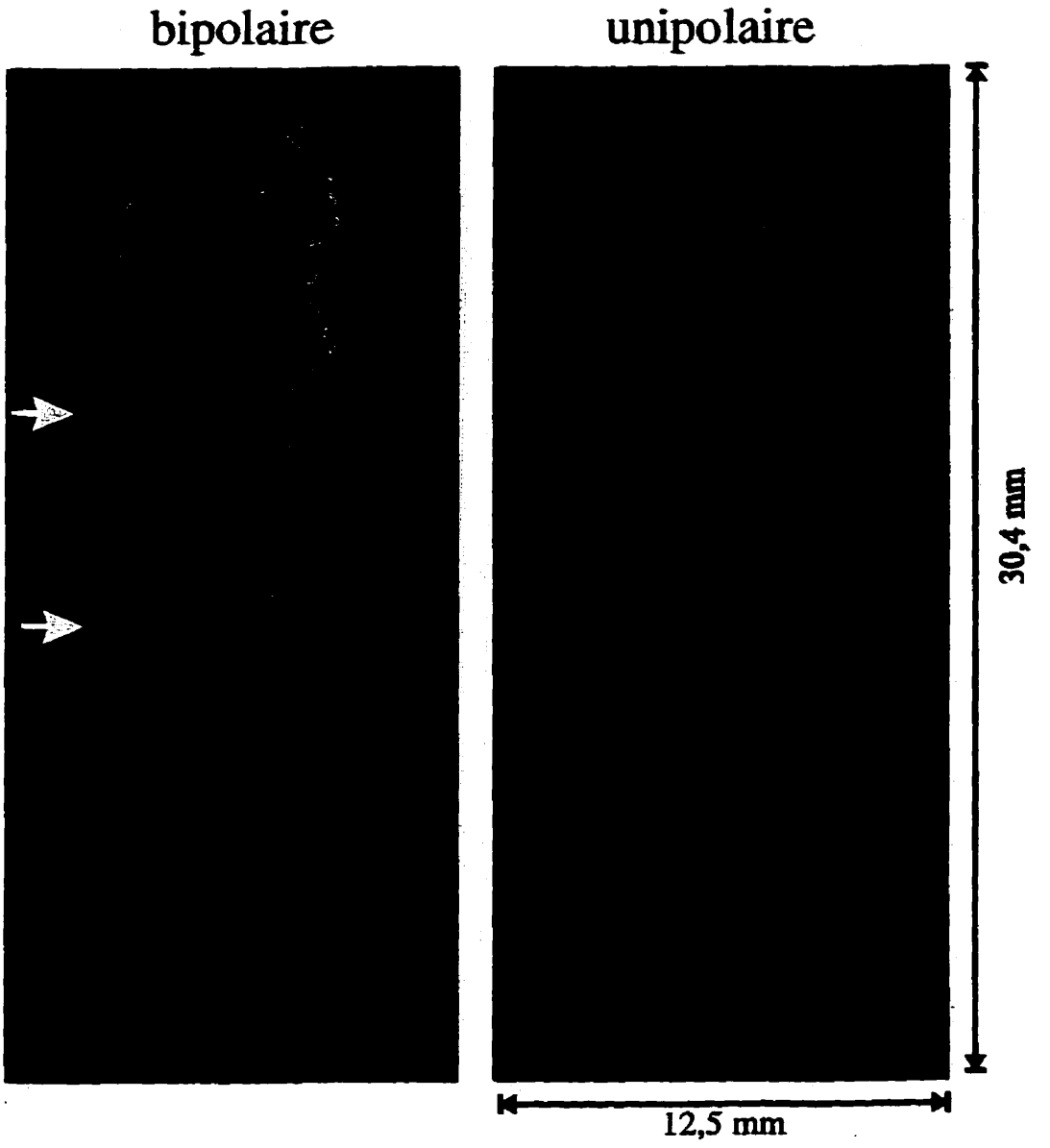


Figure 7.14: Courbes de SAR de deux antennes hélicoïdales

Encore ici, les résultats illustrent bien la réalité observée à l'aide des cristaux liquides: lors de l'application d'énergie micro-onde, les premiers points à se décolorer sont situés au même endroit que les pics de la Figure 7.13. Si on compare cette figure à la Figure

7.12, on voit que le patron est plus uniforme avec l'électrode unipolaire: le champ électrique irradié au bout de l'applicateur est à peu près de la même amplitude qu'à la base. L'antenne hélicoïdale unipolaire se comporte comme une structure en résonance dont la longueur physique est égale à deux fois la longueur d'onde dans la structure. Cependant, les prototypes ont démontré que l'adaptation de l'applicateur diminuait de façon marquée lorsqu'on ajoute l'électrode et le fil métallique. Les paramètres S_{11} mesurés à 2.45 GHz sont situés entre -7 dB et de -15 dB pour la configuration unipolaire selon l'emplacement du fil comparativement à -21 dB pour l'antenne sans électrode et sans fil. Cette détérioration de l'adaptation est causée par la présence du fil métallique à l'intérieur de l'hélice. Cet effet est clairement visible lorsqu'on mesure le paramètre S_{11} à l'analyseur de réseau. Avec l'antenne hélicoïdale sans électrode, les pics de résonance sont très bien définis et clairement visibles. Lorsquon ajoute l'électrode seule, la courbe ne change guère. Toutefois, lorsqu'on ajoute le fil métallique, il devient très difficile d'observer ces pics, surtout en deçà de 3 GHz. Les pics de résonance sont alors remplacés par de larges vallées diffuses. De plus, la présence de ce fil fait en sorte qu'il est difficile d'obtenir une bonne répétabilité lors de la production des cathéters. On a obtenu une adaptation de -4 dB en simulation pour cet applicateur, ce qui est un peu loin des mesures. Cependant, le fil simulé possède une section rectangulaire de 0,125 x 0,125 mm qui est beaucoup plus grande que celle du fil réel. Ce fil est difficile à simuler car, si on entre les dimensions exactes, le maillage sera encore plus dense dans cette région et le temps de calcul sera encore augmenté[9]. Dans ce cas, les résultats d'adaptation doivent être considérés comme étant biaisés lorsqu'on inclut le fil dans la géométrie simulée.

---

[9]. Il faut de 8 à 10 heures de temps de CPU afin de solutionner le problème sur la station de travail de la compagnie californienne.

Le patron de SAR montre que la profondeur de pénétration est bonne pour la configuration unipolaire où le patron est assez uniforme le long de la structure. Cependant on observe que, pour cette configuration, l'énergie est présente au niveau de l'électrode mais quelle n'est pas appliquée vers l'avant du cathéter comme dans le cas des monopôles avec capuchon (voir les flèches en noir sur la figure).

L'antenne hélicoïdale unipolaire est présentement utilisée par Fidus Medical Technology et quelques tests cliniques ont eu lieu sur des patients (on y reviendra à la section 7.2 de ce chapitre). Bien que des résultats intéressants aient été observés lors du traitement de flutter auriculaire de type I, ce genre d'applicateur pose quelques problèmes. En particulier, le positionnement précis du cathéter est difficile en raison, entre autres, de l'électrode distale unipolaire. Lors de la lecture du signal électrique cardiaque, on observe toujours un signal ventriculaire important en plus du signal auriculaire et ce, même si le cathéter se situe entièrement au niveau de l'oreillette. Lorsque l'on enregistre ce signal en mode bipolaire, le positionnement est grandement facilité car le signal enregistré possède une meilleure résolution spatiale. Un applicateur idéal devrait donc avoir la capacité de chauffer au-delà de l'extrémité distale du cathéter, à l'endroit où l'on enregistre l'électrogramme en mode bipolaire.

On a étudié d'autres configurations afin d'obtenir les caractéristiques désirées. La première est de conserver la paire d'électrodes en connectant l'électrode distale au conducteur interne du câble coaxial, l'électrode proximale étant toujours électriquement flottante par rapport à la ligne de transmission. La configuration bipolaire de la Figure 7.11 illustre ce concept. La propagation du champ électrique est présentée au haut de la Figure 7.13 tandis que le patron de SAR est montré à la partie gauche de la Figure 7.14. Comme on peut le constater, le patron de radiation s'étend jusqu'au niveau des électrodes et est plus intense sur la partie distale de l'applicateur. De plus, l'énergie est appliquée

sur une faible distance au bout du cathéter. Comme l'indique les flèches en jaune, le patron de SAR n'est pas uniforme le long du cathéter et il présente deux creux le long de l'hélice. L'adaptation obtenue est médiocre pour cette configuration: $S_{11} = -2{,}17$ dB ($\Delta S = 0{,}010$ après 3 itérations mais l'adaptation à 2,45 GHz est réalisable en variant la longueur de l'hélice jusqu'à obtenir la résonance. Une difficulté est de sceller hermétiquement la connexion entre le câble coaxial et l'électrode distale afin d'éviter la présence de fluide dans l'applicateur. De plus, on doit ajouter un filtre passe-bas au niveau du générateur de façon à protéger l'oscilloscope utilisé pour la lecture de l'électrogramme des micro-ondes émis par le magnétron. Ce système de filtrage est discuté au chapitre 6.

Bien que cette configuration soit intéressante, la capacité de chauffer vers l'avant de l'applicateur n'a pas été obtenue de façon satisfaisante. Une autre structure a été étudiée: l'antenne hélicoïdale à laquelle on a ajouté un monopôle à capuchon à l'extrémité distale. En effet, comme on l'a vu à la section 7.1.4, ce type d'applicateur irradie très bien vers l'avant. Cette modification pourrait donc produire des lésions allongées tout en permettant d'obtenir une lecture bipolaire en partie distale et un patron de radiation qui s'étend vers l'avant de l'applicateur. Cet applicateur est illustré à la droite de la Figure 7.11. Le capuchon métallique est mis en contact avec le conducteur interne du câble coaxial tandis que la bague métallique, flottante par rapport à la ligne de transmission, est connectée à un fil passant entre le câble coaxial et l'hélice. La partie distale de l'hélice est connectée au conducteur interne du coaxial tandis que la partie proximale est connectée au conducteur externe. Aucune simulation n'a été effectuée sur cette structure mais quelques prototypes ont été fabriqués. Les tests réalisés avec ces derniers ont démontré que, tout comme l'antenne hélicoïdale en configuration bipolaire, le patron de radiation est plus large au bout du cathéter. De plus, la capacité d'irradier l'énergie micro-onde vers l'avant est très bonne. Les tests réalisés avec la gelée et les

cristaux liquides ont démontré qu'il est possible d'appliquer l'énergie de 3 à 4 mm vers l'avant et une décoloration des cristaux est observée lorsque l'applicateur est positionné de façon perpendiculaire par rapport au feuillet, ce qui n'est pas le cas pour les autres types d'antennes hélicoïdales. De plus, cet applicateur peut enregistrer l'activité électrique endocardique de façon bipolaire, ce qui facilite grandement son positionnement à l'intérieur des chambres cardiaques.

La longueur L de l'hélice des prototypes était de 18 mm et on a étudié la variation des fréquences de résonance et de l'adaptation aux fréquences de résonance (f_r) entre 2 et 3 GHz en fonction de la longueur l du monopôle. Le Tableau 7-3 montre les résultats obtenus. On constate qu'il est possible d'obtenir une bonne adaptation en variant le paramètre l pour une valeur de L donnée. L'élargissement du SAR au bout du cathéter peut être un avantage lors du traitement du flutter auriculaire lorsque la région de l'isthme est profonde. En effet, il est quelquefois difficile d'obtenir un bon contact tout au long de l'applicateur dans cette région et le fait que la radiation y soit plus intense aiderait peut-être à effectuer une ablation adéquate. Cependant, cette affirmation n'a pas été encore été vérifiée en clinique et des tests seront requis afin de confirmer sa véracité. Les prototypes ont démontré une capacité de radiation assez faible près de la partie proximale de l'hélice, un peu comme ce que l'on a présenté à la Figure 7.14 pour la configuration bipolaire. Il faudra effectuer quelques simulations afin de s'assurer que l'intensité du champ électrique ainsi que la profondeur de pénétration sont adéquates dans cette région de l'applicateur. De plus, tout comme dans le cas du monopôle avec capuchon, un deuxième système d'ancrage du capuchon métallique est nécessaire afin d'assurer la sécurité du patient et il serait possible d'utiliser la configuration finale montrée à Figure 7.2.

Tableau 7-3

l (mm)	S_{11} à 2,45 GHz (dB)	f_r (GHz)	S_{11} à f_r (dB)
4	-6	2,335	-16
		2,538	-22
3	-8	2,353	-26
		2,529	-28
2	-8	2,362	-18
		2,527	-40
1	-9.5	2,385	-20
		2,529	-18

L'antenne hélicoïdale semble posséder plusieurs des caractéristiques désirées pour le traitement du flutter auriculaire de type I. Les propriétés mécaniques des antennes utilisées à l'heure actuelle laissent toutefois à désirer. L'antenne est trop rigide et peut difficilement suivre les contours de l'isthme de façon adéquate. De plus, le système de déflexion du cathéter n'est pas très facile à manoeuvrer et n'offre pas assez de degrés de liberté à l'utilisateur. Le développement devra donc se poursuivre afin d'améliorer les propriétés électriques et mécaniques de l'applicateur hélicoïdal si on veut atteindre des taux de succès intéressants. On y reviendra dans la discussion à la fin de ce chapitre.

7.1.7 Structures planaires flexibles

L'idée d'utiliser les applicateurs planaires est venue afin d'exploiter la flexibilité mécanique du substrat sur lequel l'antenne est imprimée. Cet applicateur, combiné à un système de positionnement adéquat, pourrait suivre adéquatement n'importe quel contour quelle que soit la morphologie de l'endocarde du sujet traité. Kasevich [61] a d'ailleurs effectué certains travaux visant à utiliser une antenne imprimée sur le ballon d'un cathéter d'angioplastie afin de chauffer et d'éliminer la plaque d'athérosclérose. Les travaux de Mazzola *et al.* [62] ont aussi démontré que la taille d'une lésion produite par ablation micro-onde dépend de la pression de contact entre l'applicateur et l'endocarde. Un bon contact est donc nécessaire afin d'augmenter l'efficacité de l'intervention chirurgicale. En plus d'assurer un bon contact tout au long de l'applicateur, ce concept présente plusieurs avantages dont celui de pouvoir imprimer des électrodes de lecture tout au long de la structure radiative afin d'enregistrer l'électrogramme, d'évaluer la qualité du contact entre l'applicateur et le myocarde et de monitorer la formation de coagulum. En effet, l'une des difficultés lors de la production d'une lésion de forme allongée en utilisant l'ablation micro-onde est de savoir si le contact entre l'applicateur et le tissu est adéquat tout au long de l'applicateur.

Un substrat intéressant pour cette application est le Kapton, un polyimide biocompatible utilisé dans l'industrie électronique notamment pour isoler des circuits imprimés. Sa biocompatibilité a été étudiée par Richardson *et al.* [38] et son étude conclut que le Kapton possède la meilleure hémocompatibilité des polyimides testés et qu'il est un bon candidat pour des applications médicales.

L'applicateur étudié est une ligne de transmission coplanaire. Cette ligne consiste en trois conducteurs métalliques parallèles imprimés sur un substrat diélectrique. Cette configuration est montrée à la Figure 7.15. Les premières études portant sur l'utilisation de ce type de structure en sciences de la santé ont été effectuées par Iskander *et al.* [36-37]. Cette structure était alors utilisée pour évaluer l'évolution d'une embolie pulmonaire en mesurant la variation du paramètre S_{11} dans le temps. L'avantage de ce type d'applicateur est que le champ électrique est dans un plan transverse à la direction de propagation pour les modes guidés. Si, à l'aide d'un câble coaxial, on excite le mode impair du coplanaire, les lignes de champ électrique passeront de la ligne principale vers les plans de masse. Ce faisant, la longueur électrique de la ligne dépend très peu de sa courbure: sa fréquence de résonance demeure inchangée lorsque la ligne se courbe afin de suivre la surface endocardique. Cette propriété a été vérifiée avec quelques prototypes et un analyseur de réseau. On a fabriqué quelques prototypes et utilisé la simulation afin d'étudier l'adaptation de la structure ainsi que son patron de rayonnement.

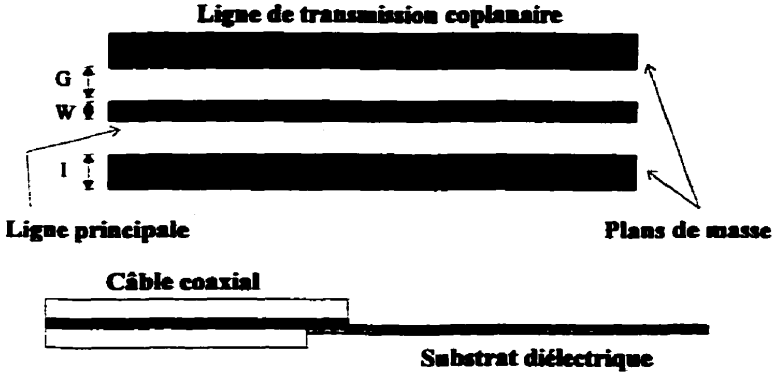


Figure 7.15: Ligne de transmission coplanaire

La première étape consiste à valider les résultats de simulation en les comparant aux mesures expérimentales. Des structures coplanaires plongées dans la solution

tyrode -méthanol, discutée à la section 7.1.3.2, ont été simulées à l'aide du logiciel. Le schéma de gauche de la Figure 7.16 montre le demi-modèle simulé: le coplanaire est couplé à un câble coaxial par une entaille produite au bout du câble sur une longueur de 2 mm.

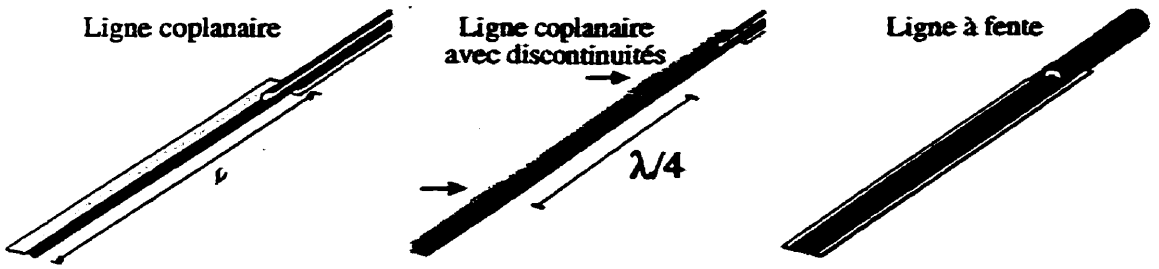


Figure 7.16: Schéma des structures planaires simulées

Les dimensions physiques du modèle sont présentées au Tableau 7-4. Afin de diminuer le temps de calcul ainsi que la taille des matrices générées, les simulations ont été réalisées à l'aide d'un demi-modèle. Le plan avant a en effet été défini comme un conducteur magnétique parfait, tant pour le câble coaxial que pour la ligne coplanaire. Cette situation représente le mode de propagation impair dans le coplanaire. Physiquement, le conducteur interne du câble coaxial est soudé au conducteur central de la ligne coplanaire tandis que les plans de masse sont connectés au conducteur externe. Les simulations ont été effectuées à 2,45 GHz et un balayage fréquentiel a par la suite été effectué entre 500 MHz et 6 GHz tandis que les mesures ont été prises entre 30 kHz et 6 GHz à l'aide d'un analyseur de réseau (HP-8753D). Les résultats obtenus en simulation au-delà d'une octave (par rapport à 2,45 GHz) doivent cependant être considérés avec précaution car il est possible que le maillage ne soit pas assez dense à haute fréquence. De plus, il faut ajouter que la variation fréquentielle des propriétés

Tableau 7-4

Permittivité du substrat:	2,01
épaisseur du substrat:	0,125 mm
longueur du coplanaire (L):	4,4 cm
largeur de la ligne principale (W):	0,225 mm
espacement (G):	0,825 mm
largeur des plans de masse (l):	1,25 mm
diamètre externe du câble coax.	3,525 mm

diélectriques du myocarde ne peuvent être considérées à l'aide du simulateur. Les résultats en bout de bande peuvent donc être légèrement biaisés. La Figure 7.17 présente les résultats obtenus en simulation et sur les prototypes correspondants.

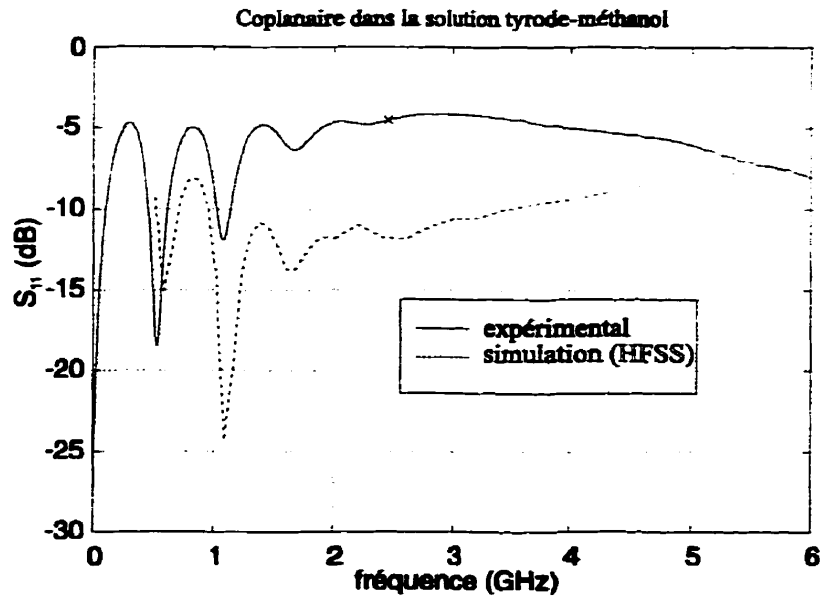


Figure 7.17: Comparaison entre les résultats de simulation et les mesures

On constate que des différences importantes existent entre les valeurs simulées et mesurées. Cependant, on observe que les maxima et les minima sont aux mêmes fréquences, ce qui est très utile lors de la conception. La première fréquence de résonance obtenue en simulation semble toutefois légèrement plus élevée que celle mesurée. Cela est simplement causé par le pas d'échantillonnage fréquentiel qui n'est pas suffisamment fin dans cette région ($\Delta f = 575$ kHz), le minimum local réel étant entre deux fréquences simulées.

Les résultats obtenus par simulation doivent être utilisés avec précaution mais l'allure générale de la courbe est bonne. Les différences présentes au-delà de 4 GHz peuvent en partie être expliquées par la connexion entre le câble coaxial et le câble de l'analyseur de réseau: les mesures sont très sensibles aux variations de pression au niveau des connecteurs à hautes fréquences. Ces résultats ont été obtenus après quatre itérations et le ΔS était inférieur à 0,05. Après quatre itérations, le temps de calcul devient très important (de l'ordre de quelques heures) et les matrices générées sont de tailles trop importantes pour les ressources disponibles au laboratoire d'hyperfréquence de l'École Polytechnique. La solution a peut-être convergé vers un minimum local, ce qui expliquerait les différences en amplitude. Ce phénomène est en partie confirmé par l'expérience obtenue avec le même simulateur utilisé lors du stage en Californie où le système informatique possède des ressources plus importantes. Avec ce système, il était possible de simuler des structures semblables (qui seront montrées plus loin dans ce rapport) sur plusieurs itérations (jusqu'à dix). On a alors constaté que le système peut converger rapidement entre trois et cinq itérations vers un minimum local mais que, si l'on poursuit le processus itératif, on converge vers une autre solution en huit ou neuf itérations. On observe alors une diminution des niveaux d'adaptation aux fréquences de résonance. Les fichiers temporaires peuvent alors atteindre 2 Go. En aucun temps, en utilisant ce système lors des simulations sur des structures similaires, les niveaux

d'adaptation n'ont atteint les résultats de simulation présentés à la Figure 7.17. En fait, les meilleurs résultats était de l'ordre de -10 à -13 dB, tout comme les mesures présentées. Il est donc raisonnable de penser que les erreurs de simulations sont dues à la convergence vers un minimum local et non vers la solution réelle. Cependant, tel qu'indiqué, ces résultats peuvent être utilisés en ne considérant que les fréquences de résonance obtenues.

Comme on peut le constater à la Figure 7.17, l'adaptation à 2,45 GHz se situe aux environs de -5 dB, ce qui n'est pas très efficace du point de vue énergétique. L'adaptation semble être bonne à basse fréquence mais, au-delà de 2 GHz, aucune résonance n'est présente dans la structure. Cette caractéristique est problématique si l'on désire utiliser la fréquence de 2,45 GHz.

On a utilisé les prototypes du même genre que celui montré à la Figure 7.15 afin d'étudier l'effet de la variation des dimensions physiques du coplanaire sur l'adaptation à 2,45 GHz et sur les fréquences de résonance. Les tests effectués consistent à faire varier l'espacement entre la ligne principale et les plans de masse (paramètre G de la Figure 7.15) tout en maintenant les autres dimensions constantes. En effet, c'est ce paramètre qui a le plus d'influence sur l'impédance intrinsèque de la ligne coplanaire. On a donc fabriqué des prototypes dont l'espacement G varie de 1 mm à 1,875 mm par saut de 0,125 mm. Les résultats des mesures sont montrés à la Figure 7.18.

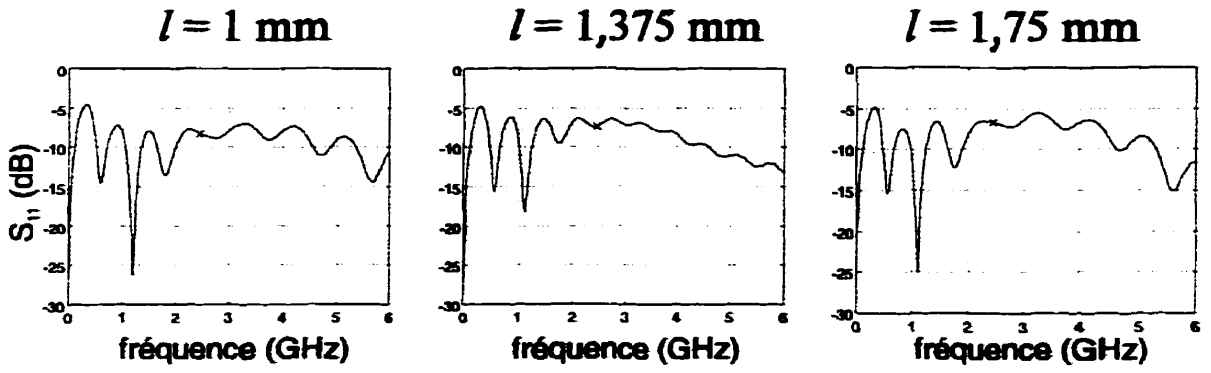


Figure 7.18: Influence de l'espacement G sur l'adaptation du coplanaire

Ces résultats révèlent que le paramètre G n'a pas d'influence sur l'adaptation de l'antenne car les fréquences de résonance sont identiques. La seule différence notable est que l'adaptation aux fréquences de résonance varie d'un prototype à l'autre. On en fournira l'explication un peu plus loin.

On a utilisé la simulation afin de calculer les impédances intrinsèques Z_0 de ces lignes coplanaires. Ces calculs ont été réalisés comme suit: on a défini la géométrie du problème au port d'entrée dans un plan perpendiculaire à l'axe de l'applicateur. La Figure 7.19 montre la géométrie utilisée.

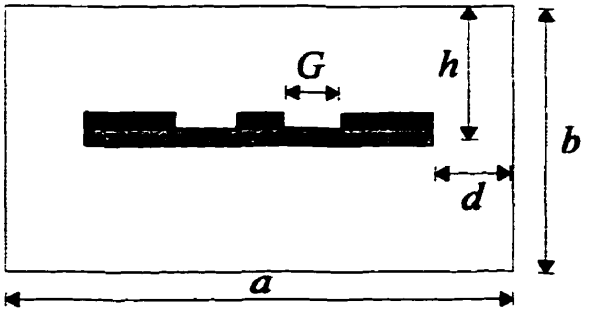


Figure 7.19: Problème bidimensionnel utilisé lors du calcul de Z_0

Le rectangle entourant la section droite du coplanaire est défini comme possédant les propriétés diélectriques du sang. Pour le problème 2D seulement, le programme définit par défaut les conditions aux frontières comme étant une condition de Dirichlet. Cela signifie que le pourtour externe du modèle est défini comme un conducteur métallique. On a donc la situation où une ligne coplanaire est située au centre d'un guide d'onde rectangulaire rempli de sang. On doit alors résoudre les équations de Maxwell pour le mode impair du coplanaire et non pas pour les modes du guide d'onde rectangulaire. La technique consiste à résoudre le problème pour différents modes et à visualiser les lignes de champ électrique afin de sélectionner celui qui nous intéresse. Une technique assez simple consiste à utiliser des valeurs de a et de b, de façon à ce que la fréquence de coupure des premiers modes du guide d'onde rectangulaire soit au-dessus de la fréquence de la simulation, habituellement 2,45 GHz, et de visualiser la constante d'atténuation de la structure. Ainsi, les modes où la partie réelle du coefficient de propagation complexe ($\gamma = \alpha + j\beta$) est très élevée correspondent aux mode du guide d'onde rectangulaire, tandis que ceux ayant une valeur de α faible correspondent aux modes coplanaires.

Lorsque le mode coplanaire qui nous intéresse est sélectionné, on doit s'assurer que la présence du mur métallique au pourtour du problème n'influence pas le résultat du calcul d'impédance. Plus ceux-ci sont éloignés du coplanaire, moins leur influence est importante. Cependant, si ce rectangle est trop grand par rapport aux dimensions du coplanaire, le temps de calcul augmente et sa précision diminue. Il est donc nécessaire de trouver un bon compromis afin d'obtenir des résultats cohérents. Une étude de convergence a été effectuée en étudiant les effet des dimensions du rectangle sur l'impédance caractéristique calculée. On a fait varier successivement les paramètres d et h de la Figure 7.19 en maintenant tous les autres constants. On a normalisé les résultats par rapport à l'espacement G car la profondeur de pénétration des lignes de champ électrique peut être approximée par ce paramètre. Lors de ces simulations, la largeur

totale du coplanaire a été maintenue à 5,275 mm et la largeur des plans de masse à 0,825 mm. Les résultats de simulation ont démontré que la convergence débutait lorsque $d = G$ et $h = G$. Pour les calculs d'impédance qui suivent, on a utilisé $h = 1{,}5 G$ et $d = G$.

L'impédance des prototypes utilisés a été calculée à l'aide de la technique que l'on vient d'illustrer. Les résultats sont montrés à la Figure 7.20.

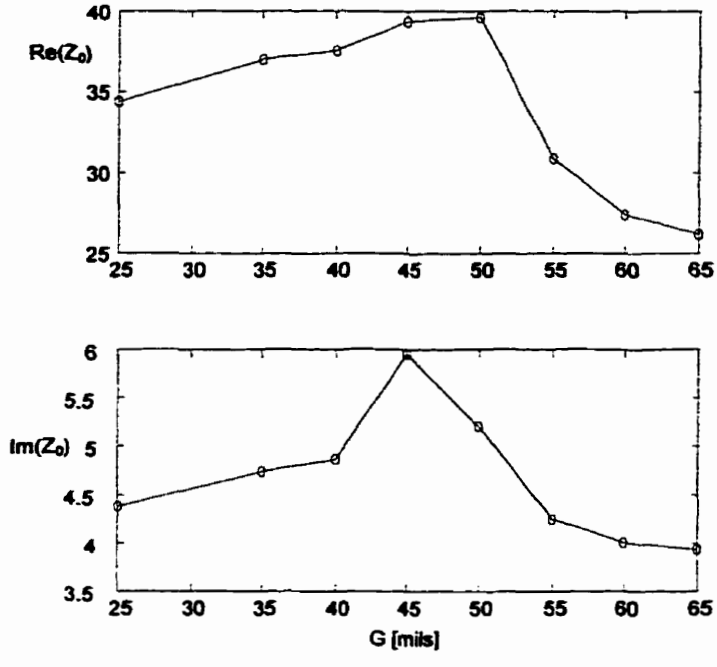


Figure 7.20: Impédance complexe des prototypes (l = 0,825 mm, w = 0,225 mm)

La partie résistive de l'impédance est toujours inférieure à 50 Ω. Après l'étude des figures 7.20 et 7.18, on constate que, pour une longueur L donnée, peu importe l'impédance de la ligne coplanaire, celle-ci résonne toujours à la même fréquence.

Par la suite, on a fait varier la longueur physique de la ligne (paramètre L) tout en conservant les autres dimensions constantes (G = 1.25 mm). Les résultats de ces mesures sont présentés à la Figure 7.21.

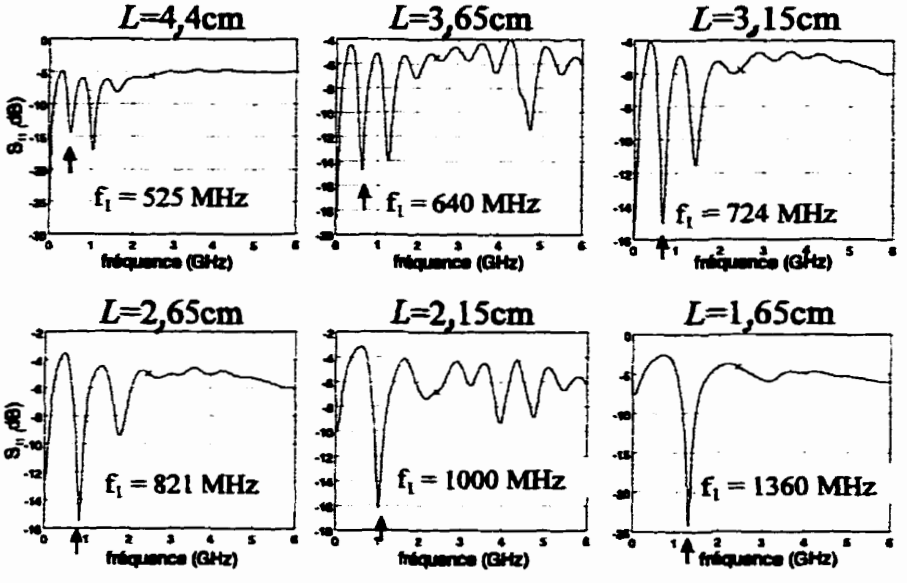


Figure 7.21: Variation des fréquences de résonance en fonction de la longueur L

Les fréquences de résonance augmentent au fur et à mesure que le paramètre L diminue. Ces résultats sont très intéressants car ils indiquent qu'il n'est pas nécessaire d'ajuster l'espacement G afin que la structure ait une impédance intrinsèque de 50 Ω pour que l'efficacité de radiation soit bonne: il suffit d'ajuster la longueur physique L de façon à ce que la ligne ait une longueur égale aux multiples pairs du quart de la longueur d'onde[10] $L = n \cdot \lambda/4$ où n est un entier positif pair. De cette façon, la réflexion provenant du bout de l'applicateur entre en interférence destructive avec celle produite au niveau de

[10]. Ou aux multiples entiers de la demi-longueur d'onde.

la transition, ce qui diminue l'amplitude de l'onde réfléchie et augmente du même coup l'efficacité de radiation de l'antenne.

La Figure 7.21 démontre encore qu'au-delà de 2 GHz l'adaptation est médiocre. En effet, on devrait être en mesure d'observer d'autres pics de résonance entre 2 et 6 GHz correspondant aux autres multiples pairs de $\lambda/4$ mais ceux-ci sont absents. L'une des hypothèses expliquant ce phénomène est que la transition entre le câble coaxial et la ligne coplanaire ne permet pas le passage de ces fréquences (on y reviendra plus loin).

La Figure 7.22 montre la variation de la fréquence des deux premières harmoniques ainsi que l'adaptation de ces fréquences en fonction de la longueur de l'applicateur. On y constate que la relation n'est pas linéaire et que la seconde harmonique disparaît lorsque la fréquence augmente. En fait, l'adaptation de la seconde harmonique est inférieure à -10 dB lorsque la fréquence est supérieure à 1,6 GHz. L'adaptation de la première harmonique a tendance à s'accroître au fur et à mesure que la longueur de l'applicateur diminue et inversement pour l'adaptation de la seconde harmonique. Cette caractéristique fait en sorte qu'à 2,45 GHz, l'adaptation de la seconde harmonique n'est que de -7,5 dB, ce qui correspond à une longueur physique de 2 cm.

Afin de comprendre le comportement du coplanaire en résonance et d'en effectuer un design adéquat, il est nécessaire de relier la longueur physique à la longueur d'onde. Il existe deux conditions de résonance pour cette structure. Pour qu'il y ait résonance, il faut que l'onde réfléchie au niveau de la transition entre le câble coaxial et le coplanaire entre en interférence destructive avec la réflexion provenant du bout du coplanaire. L'onde réfléchie est alors très faible et une partie importante de l'énergie

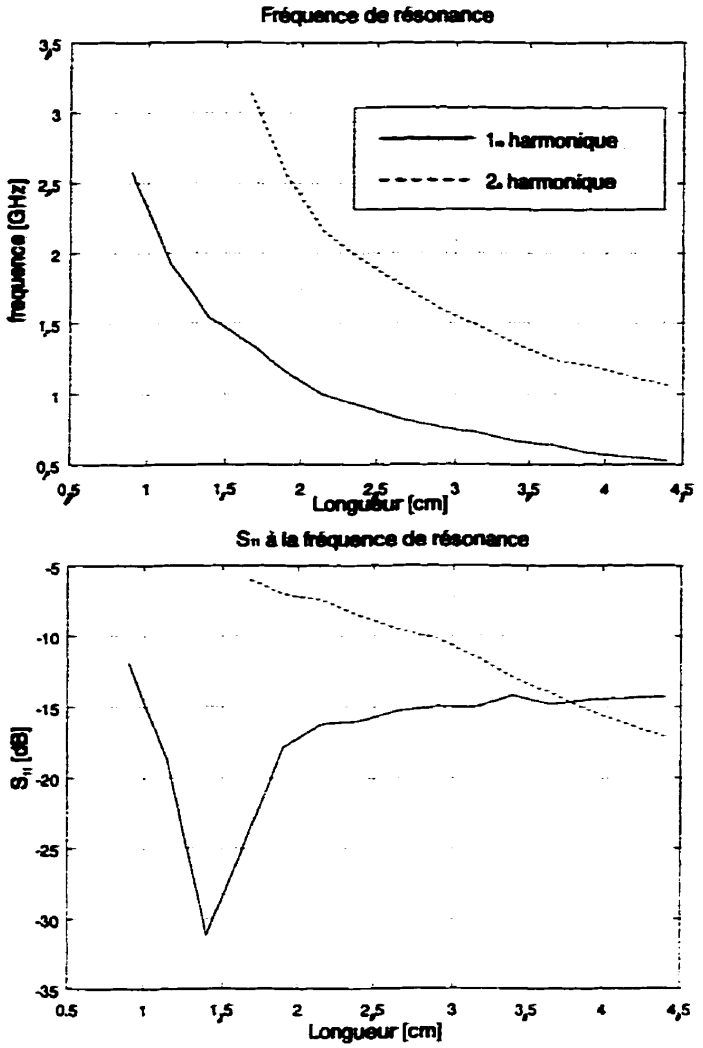


Figure 7.22: Fréquences de résonance et adaptation en fonction de la longueur L

incidente est irradiée. Ce concept est schématisé à la Figure 7.23 où Z_1 est l'impédance du câble et Z_2 est l'impédance de la ligne. La différence entre les deux conditions est amenée par la phase du coefficient de réflexion au niveau de la transition qui peut être 0° ou 180° selon l'impédance du coplanaire (en négligeant la partie imaginaire de

l'impédance du coplanaire). Le déphasage amené par la réflexion au bout du coplanaire est nul car les coplanaires sont terminés par un circuit ouvert.

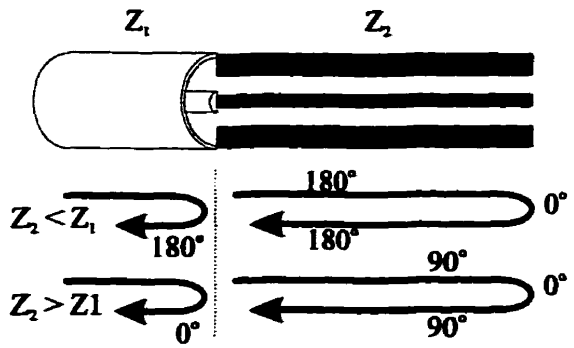


Figure 7.23: Conditions de résonance

Lorsque l'impédance de la ligne coplanaire est plus faible que celle du câble coaxial, la ligne résonne aux multiples pairs de λ/4 (ou aux multiples entiers de λ/2) tandis que lorsque qu'elle est plus élevée, la structure résonne aux multiples impairs de λ/4. Les mesures d'impédance intrinsèque montrées à la Figure 7.20 pour les prototypes de coplanaire indiquent que leur impédance est inférieure à 50 Ω: ces lignes résonnent donc aux multiples pairs de λ/4 et la valeur de la première fréquence de résonance correspond à $L=\lambda/2$.

Il est possible de passer d'une condition de résonance à l'autre en modifiant l'impédance caractéristique des coplanaires utilisés. Aussi, les harmoniques impaires de λ/4 remplaceront les harmoniques paires lors des mesures du paramètre S_{11}. Il en résulte que les fréquences de résonance seront toutes déplacées vers la gauche et que la première harmonique se retrouvera à une fréquence beaucoup plus basse. Ce décalage vers les

fréquences moins élevées peut être approximé par $\Delta f/2$ où Δf est la différence entre les fréquences de deux harmoniques consécutives. Cependant, étant donné que les propriétés diélectriques varient en fonction de la fréquence, la linéarité n'est pas respectée, surtout en deçà de 1 GHz. Une autre façon de faire est de conserver la même impédance pour le coplanaire et de remplacer le circuit ouvert par un court-circuit. Cela est réalisé en imprimant une ligne joignant les plans de masse à la ligne principale à l'extrémité du coplanaire. Cette technique a été vérifiée à l'aide du prototype de 4,4 cm. Le Tableau 7-5 illustre les résultats obtenus.

Tableau 7-5

Court-circuit		**Circuit ouvert**	
fréquence (MHz)	**harmonique**	**fréquence (MHz)**	**harmonique**
321	$\lambda/4$	500	$\lambda/2$
821	$3\lambda/4$	1040	λ
1410	$5\lambda/4$	1660	$3\lambda/2$

On peut expliquer la disparition des harmoniques à haute fréquence en considérant que pour obtenir une bonne résonance, deux conditions doivent être obtenues. Comme on l'indique à la Figure 7.24, le déphasage entre les ondes réfléchies doit être un multiple impair de 180°. De plus, il faut que leurs amplitudes soient le plus près possible afin que l'onde réfléchie résultante soit faible. La disparition des harmoniques à fréquences élevées peut s'expliquer par le fait que la réflexion à la transition est assez importante pour les prototypes utilisés. À plus haute fréquence, le coefficient d'atténuation dans le sang augmente de façon significative. Une partie plus

importante de l'onde transmise au coplanaire est absorbée par le milieu, ce qui fait en sorte qu'il n'y a pratiquement plus d'énergie disponible pour entrer en interférence destructive avec la première onde réfléchie. À ce moment, aucune résonance n'est présente au niveau du coplanaire et le paramètre S_{11} mesuré n'est qu'une mesure de la qualité de la discontinuité. Cette propriété explique pourquoi, à la Figure 7.18, les niveaux d'adaptation aux fréquences de résonance varient d'un prototype à l'autre. Pour certaines valeurs d'impédance de ligne, les niveaux d'amplitude des ondes réfléchies sont très semblables au niveau de la transition, ce qui fait en sorte que l'adaptation est très bonne à la fréquence de résonance. Pour d'autres cependant, une différence plus marquée au niveau de l'amplitude existe et détériore l'adaptation.

En résumé, la longueur physique du coplanaire fixe les fréquences de résonance et l'impédance intrinsèque du coplanaire influence l'adaptation à la fréquence d'adaptation.

D'après les résultats obtenus jusqu'ici, à une fréquence de résonance donnée correspond une longueur physique fixe. Par exemple, en considérant les résultats présentés à la Figure 7.22, il faut utiliser une longueur de 2,4 cm afin que la première harmonique résonne à 915 MHz[11] (S_{11} = -16 dB). Cependant, si la lésion à produire est plus longue, il est possible d'amener la seconde harmonique à 915 MHz en courbant la ligne principale. Ce concept est montré à la Figure 7.24. Les schémas du haut montrent la géométrie de la ligne coplanaire utilisée, tandis que les graphiques du bas présentent

---

[11]. Les fréquences de 27 MHz, 915 MHz, 2,45 GHz et 5,8 GHz sont celles allouées pour les applications industrielles, scientifiques et médicales en Amérique du Nord (bande ISM).

l'amplitude du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence. La courbure de la ligne a pour effet d'augmenter sa longueur électrique et, ce faisant, de diminuer sa fréquence de résonance. Cette technique permet donc d'obtenir plusieurs longueurs d'applicateur tous adaptés à 915 GHz.

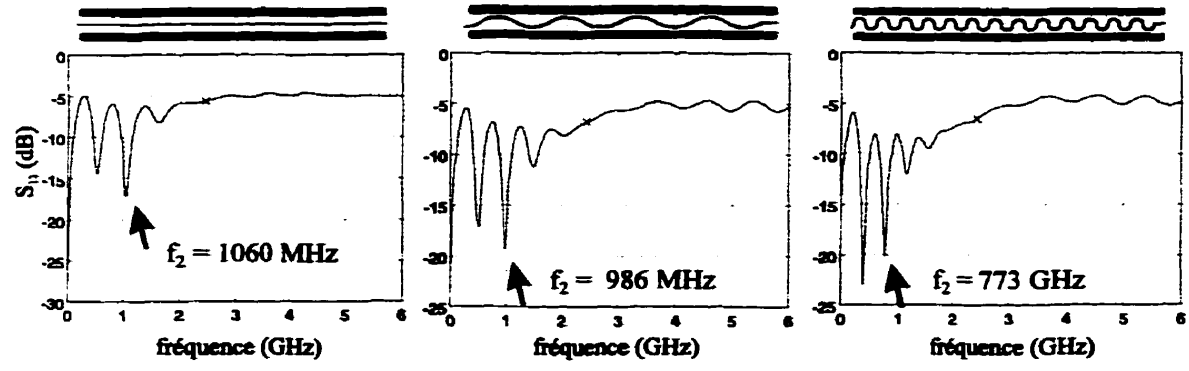


Figure 7.24: Effet de la géométrie du coplanaire sur ses fréquences de résonance

On a également tenté de faire varier la fréquence de résonance en chargeant de façon capacitive la ligne principale à l'aide de structures périodiques. En effet, le théorème de Flocket indique que la vitesse de phase diminue lorsque la capacité par unité de longueur augmente (et que l'inductance par unité de longueur demeure la même). Cette variation de la vitesse de phase dans le guide aura pour effet de modifier les fréquences de résonance pour une même longueur d'applicateur. Ce concept est illustré à la Figure 7.25.

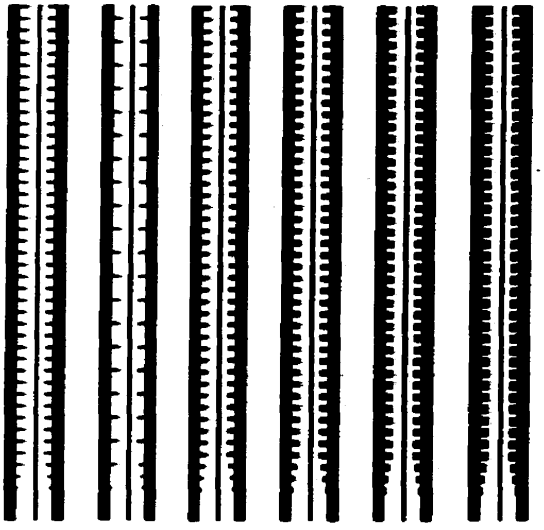


Figure 7.25: Coplanaires chargés de façon périodique

Les dimensions de la ligne non chargée sont les suivantes: $G = 1{,}25$ mm, $w = 0{,}225$ mm et $l = 0{,}825$ mm. Au niveau des bras capacitifs ajoutés, l'espacement a été réduit à 0,625 mm.

Les mesures du paramètre S_{11} ont démontré que les fréquences de résonance demeurent les mêmes avec ou sans charge capacitive périodique. On ne peut donc pas utiliser cette technique afin d'ajuster la fréquence de résonance au point désiré. Cela peut être expliqué en considérant les résultats d'impédances caractéristiques montrés à la Figure 7.20. On observe que, lorsque l'espacement G est de 1,125 mm, l'impédance est de 40 Ω tandis qu'elle est de 35 Ω lorsque G est égal à 0,625 mm. Une telle variation d'impédance signifie que la charge capacitive ajoutée est minime lorsque cette structure est située dans le sang. Cette technique est utilisée et fonctionne bien lorsque la ligne est dans l'air. Dans cette situation, l'ajout des charges capacitives est significative. Des simulations a été réalisées afin de calculer l'impédance caractéristique de ces lignes lorsqu'elles sont situées dans l'air. La Figure 7.26 montre les résultats obtenus.

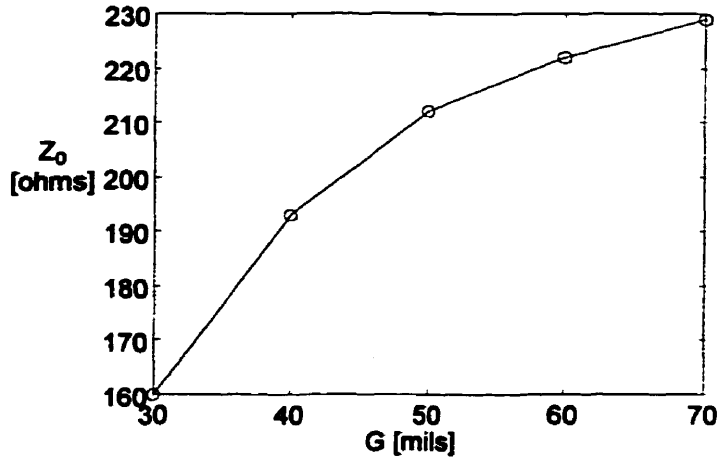


Figure 7.26: Impédance des coplanaires dans l'air

La variation relative d'impédance est beaucoup plus importante. Cette variation montre que, pour une même géométrie, la charge capacitive ajoutée est plus importante lorsque la ligne coplanaire est située dans l'air que lorsqu'elle est dans le sang. Cela explique pourquoi la technique peut fonctionner dans une situation normale lorsque la ligne est dans l'air mais donne des résultats médiocre lorsque cette dernière est dans le sang.

Bien que très utiles afin de connaître les caractéristiques de structures coplanaires utilisées comme applicateur d'énergie, les prototypes fabriqués possédaient une largeur totale de 4,35 mm et étaient excités par un câble coaxial semi-rigide de 3,525 mm de diamètre externe. La largeur maximale de l'applicateur coplanaire utilisable en clinique est d'environ 3 mm (pour permettre son passage dans un cathéter d'insertion de 9F). De plus, les dimensions du câble coaxial utilisé en réalité seront beaucoup plus faibles que celui utilisé sur les prototypes. Dans le but d'éviter la fabrication de nombreux applicateurs, de visualiser le patron de radiation de ces structures et d'étudier l'effet de certaines modifications sur la géométrie de la ligne et de la transition, on a utilisé le

logiciel de simulation mentionné plus haut. On a débuté en simulant une ligne coplanaire de 2,65 mm de largeur excitée par un câble coaxial IW70. Le schéma du modèle est illustré à la Figure 7.16. Tout comme les autres types d'applicateurs, la simulation inclut un volume de sang entourant la structure (12,5 mm x 12,5 mm x 5 cm). Les dimensions physiques du coplanaire ont été fixées afin d'en faciliter la fabrication éventuelle. La largeur de la ligne centrale du coplanaire possède la même valeur que le diamètre du conducteur interne du câble coaxial (0,4 mm). L'espacement *G* a été fixé à 0,2875 mm et la largeur des plans de masse *l* à 0,8375 mm. La largeur des plans de masse a été fixée au double de la largeur de la ligne centrale et l'espace restant a été attribué à l'espacement *G*. Tout comme il a été démontré à la Figure 7.18, l'influence du paramètre *G* sur la fréquence de résonance de la ligne est très faible. Tout d'abord, on a étudié la réponse en fréquence de cette structure afin de comparer les résultats à ceux obtenus avec les prototypes plus larges. Ces résultats de simulation sont montrés à la Figure 7.27 pour une longueur de coplanaire de 4 cm.

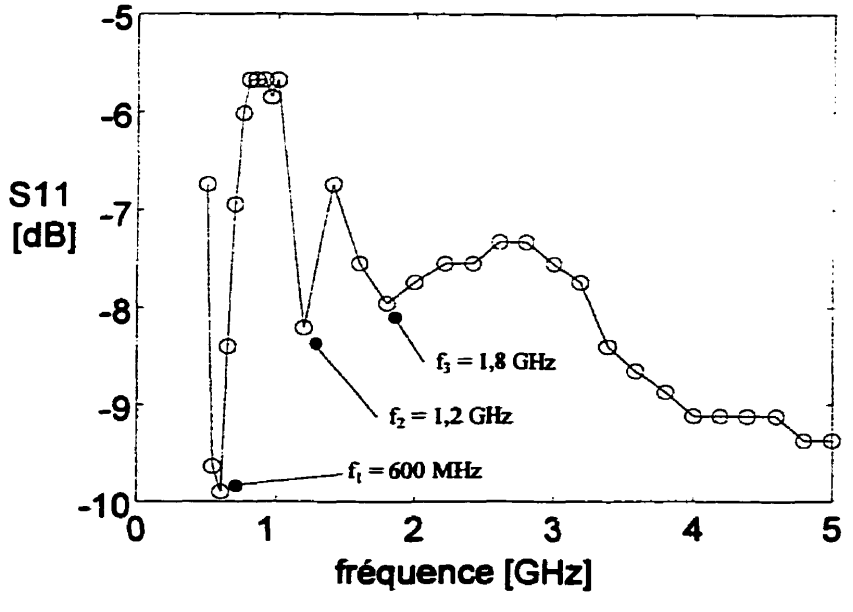


Figure 7.27: S_{11} du coplanaire obtenu par simulation

La première harmonique est à 600 MHz, ce qui correspond assez bien aux mesures montrées à la Figure 7.22 avec les prototypes plus larges. Les autres harmoniques sont aux multiples de 600 MHz. On constate encore une fois qu'au-delà de 2 GHz, les harmoniques sont absentes. De plus, l'adaptation des harmoniques diminue lorsque la fréquence augmente. L'adaptation de ce coplanaire en fonction de la fréquence est similaire à celle des prototypes de même longueur (voir la Figure 7.21): les simulations ont démontré que leurs impédances intrinsèques sont respectivement de 21 Ω et 39 Ω. La structure simulée résonne donc aux multiples pairs de $\lambda/4$. Toute structure coplanaire plongée dans le sang sera donc adaptée à la même fréquence de résonance, pour une même longueur physique, quelle que soit son impédance intrinsèque (en autant que les impédances des structures comparées se situent toutes au-dessus ou au-dessous de celle de la ligne de transmission). Ce paramètre n'est donc d'aucune utilité lorsque'on utilise cette structure comme élément radiatif. Une ligne coplanaire adaptée à 50 Ω serait utile si la constante d'atténuation α au niveau du coplanaire était plus élevée ou encore si l'applicateur était plus long. L'onde incidente serait alors fortement atténuée avant d'atteindre le bout de l'applicateur et de revenir vers la transition, ce qui ferait en sorte que l'influence de l'onde réfléchie sur l'adaptation de la structure serait négligeable. On aurait alors un applicateur à onde progressive. Dans une telle situation, il est clair qu'il est nécessaire d'obtenir une adaptation d'impédance au point de transition afin de maximiser l'efficacité de radiation.

On a enfin réalisé des simulations afin de connaître le patron de radiation de la structure coplanaire mince. Les simulations ont montré que la résonance à la première harmonique est obtenue à 915 MHz lorsque la longueur physique L est de 3 cm. À cette fréquence, la longueur de la structure est égale à la demi-longueur d'onde ($L = \lambda/2$). La longueur du câble coaxiale simulé est de 7,5 mm et la puissance au port d'entrée est de

1 watt. Une adaptation de -10 dB a été obtenue à la première harmonique (à 915 MHz) lors de la simulation. La propagation du champ électrique est montrée à la gauche de la Figure 7.28.

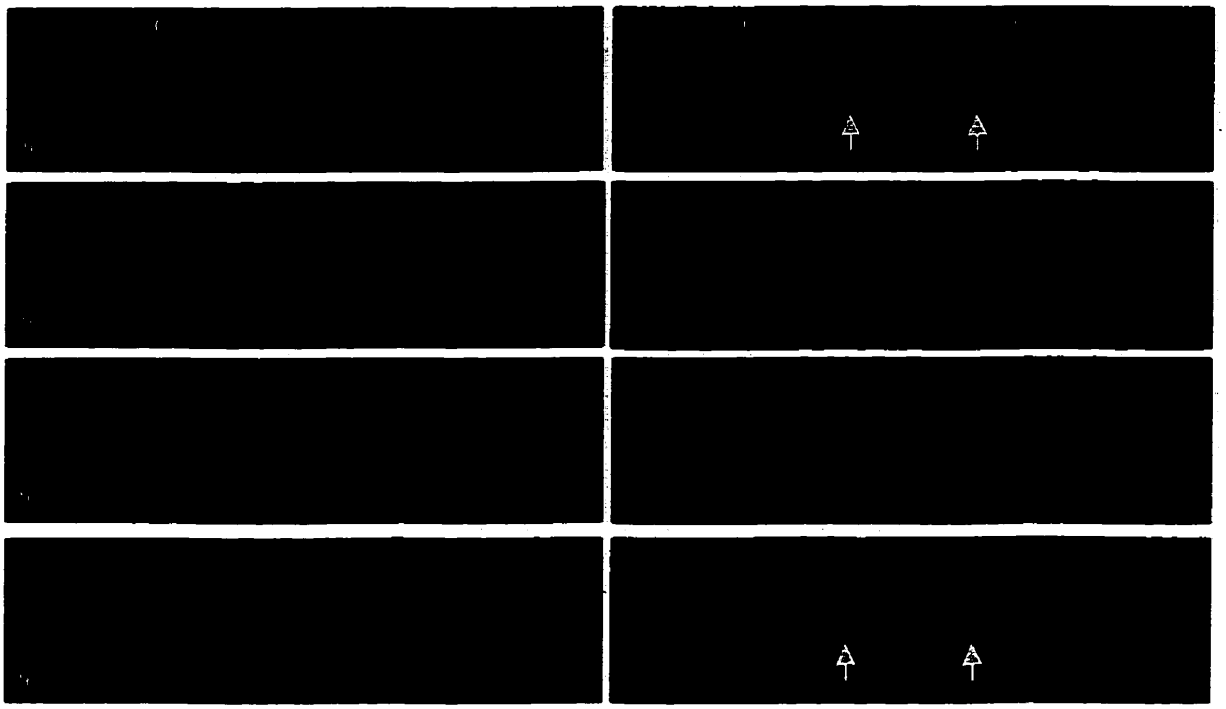


Figure 7.28: Propagation du champ électrique émis par les coplanaires à 915 GHz

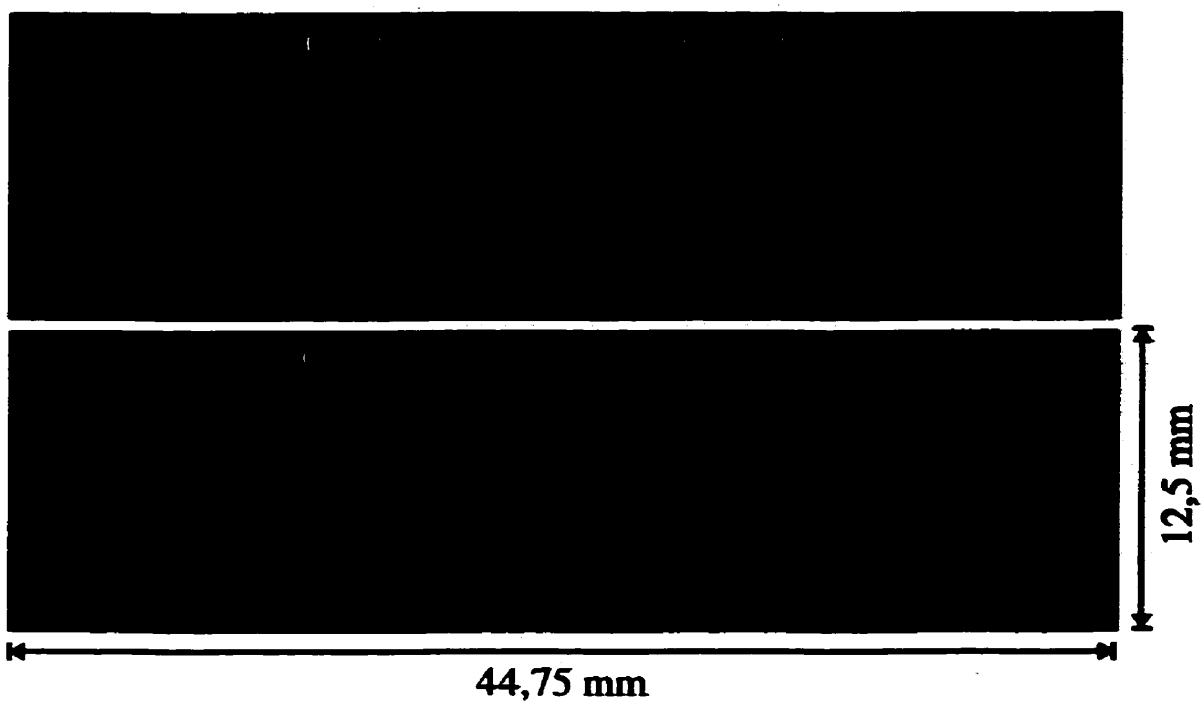


Figure 7.29: SAR/(1-S_{11}^2) des structures coplanaires

Le patron de SAR, pour sa part, est illustré à la Figure 7.29[1]. Finalement, la direction des lignes de champ électrique est montrée à la Figure 7.30.

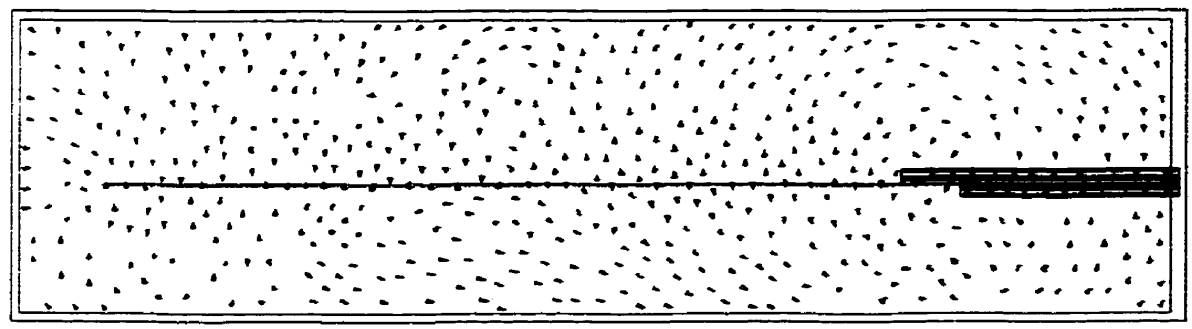


Figure 7.30: Lignes de champ électrique dans le plan perpendiculaire au coplanaire

---

[1]. Le logiciel a généré des images de mauvaise qualité pour ce qui est des patrons de SAR. On a tenté en vain d'en améliorer la qualité en refaisant une simulation complète.

On constate à la Figure 7.28 que le champ électrique est plus intense du côté où les lignes métalliques sont imprimées. De plus, ce champ est maximal aux extrémités de l'applicateur et moins intense au centre. Cela est en accord avec ce que l'on connaît de la radiation des lignes de transmission planaires: les modes non guidés sont excités au voisinage des discontinuités [48]. L'amplitude maximale du champ électrique est aux environs de 10 kV/m pour une puissance d'entrée de 1 watt seulement, ce qui est très supérieur aux valeurs maximales de champ montrées jusqu'ici pour les autres types d'applicateurs. En considérant que la tension de claquage d'un fluide est de l'ordre de 10^7 ou 10^8 V/m, une puissance d'entrée d'environ 100 W serait nécessaire à l'entrée de l'applicateur afin de provoquer un arc électrique. Comme les niveaux de puissance à l'entrée sont plus faibles, le claquage est peu probable. Cette forte concentration de ligne de champ près des conducteurs du coplanaire peut néanmoins provoquer des points chauds et ainsi produire du coagulum sur le substrat. Des tests cliniques devront être effectués afin de confirmer ou d'infirmer ces affirmations.

La Figure 7.30 montre que les lignes de champ électrique ne sont pas symétriques. Cela est causé par les conducteurs métalliques du coplanaire qui ne sont imprimés que sur la face supérieure du substrat.

La Figure 7.29 indique que le patron de SAR pénètre dans le myocarde sur environ 3 à 4 mm aux extrémités et sur environ 1 à 2 mm au centre. Cette profondeur de pénétration est plus faible que pour les autres applicateurs. On constate également que le SAR est très intense près de l'applicateur (> 100 kW/m^3) et qu'il décroît de façon rapide lorsqu'on s'éloigne de ce dernier (la largeur de la bande verte est faible). L'emploi de ce genre d'applicateur afin de produire des lésions transmurales au niveau des ventricules est donc tout à fait inapproprié. Toutefois, considérant la faible épaisseur du myocarde

auriculaire, son emploi dans le traitement de la fibrillation ou du flutter auriculaire pourrait être adéquat.

Afin d'obtenir un patron de radiation plus uniforme le long de cette structure, on a tenté de placer des discontinuités le long du coplanaire de façon à générer les modes non guidés. Étant donné que la longueur physique de la ligne correspond à $\lambda/2$, on a utilisé deux discontinuités identiques espacées de $\lambda/4$ afin que les réflexions générées entrent en interférence destructive. De cette façon, la partie contenue entre les deux discontinuités entre en résonance et l'adaptation de la structure est conservée car les réflexions provenant de l'entrée et de l'extrémité du coplanaire demeurent en condition d'interférence destructive. La structure utilisée est montrée à la droite de la Figure 7.16.

Les discontinuités consistent à ajouter une couche de diélectrique de 0,125 mm d'épaisseur et de 2,5 mm de longueur sur le coplanaire de façon à recouvrir les trois lignes métalliques. L'impédance caractéristique de cette ligne de transmission, calculée par simulation, est de 55,5 Ω, tandis qu'elle est de 21 Ω pour le reste du coplanaire.

L'adaptation obtenue a été de -22 dB à 915 MHz, ce qui est excellent. Le patron de radiation est montré à la droite de la Figure 7.28 et le patron de SAR au bas de la Figure 7.29. Le champ émis est un peu plus uniforme le long de la ligne car les discontinuités génèrent des modes non guidés. L'effet désiré est donc atteint avec cette technique. Cependant, la profondeur de pénétration, de l'ordre de 2 à 3 mm, est toujours passablement faible et l'amplitude maximale du champ est élevée.

De façon à diminuer l'amplitude maximale du champ électrique, on a modifié la géométrie de l'applicateur d'énergie afin d'éloigner les conducteurs métalliques imprimés sur le substrat diélectrique. La configuration de ligne de transmission planaire qui permet une distance maximale entre ces lignes est la ligne à fente. Celle-ci consiste simplement en deux conducteurs métalliques imprimés sur un diélectrique. La première ligne est connectée au conducteur interne du câble coaxial, tandis que l'autre est mise en contact avec le conducteur externe. Cette structure est schématisée à la gauche de la Figure 7.16. La longueur du substrat a été conservée à 3 cm, ce qui devrait être très près de la fréquence de résonance.

L'adaptation de la structure est de -9 dB à 915 MHz. Le patron de SAR est montré à la Figure 7.32, tandis que la propagation du champ électrique est montrée à la Figure 7.31.

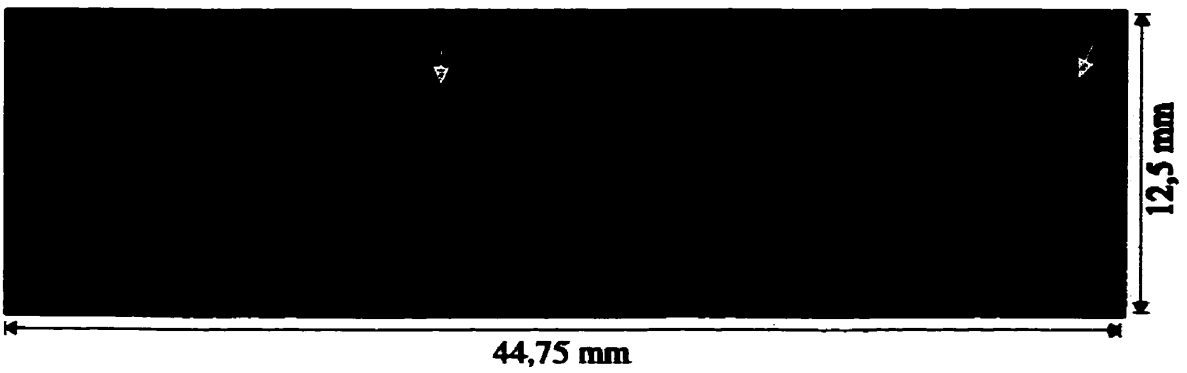


Figure 7.31: SAR/(1-S_{11}^2) pour l'antenne à fente

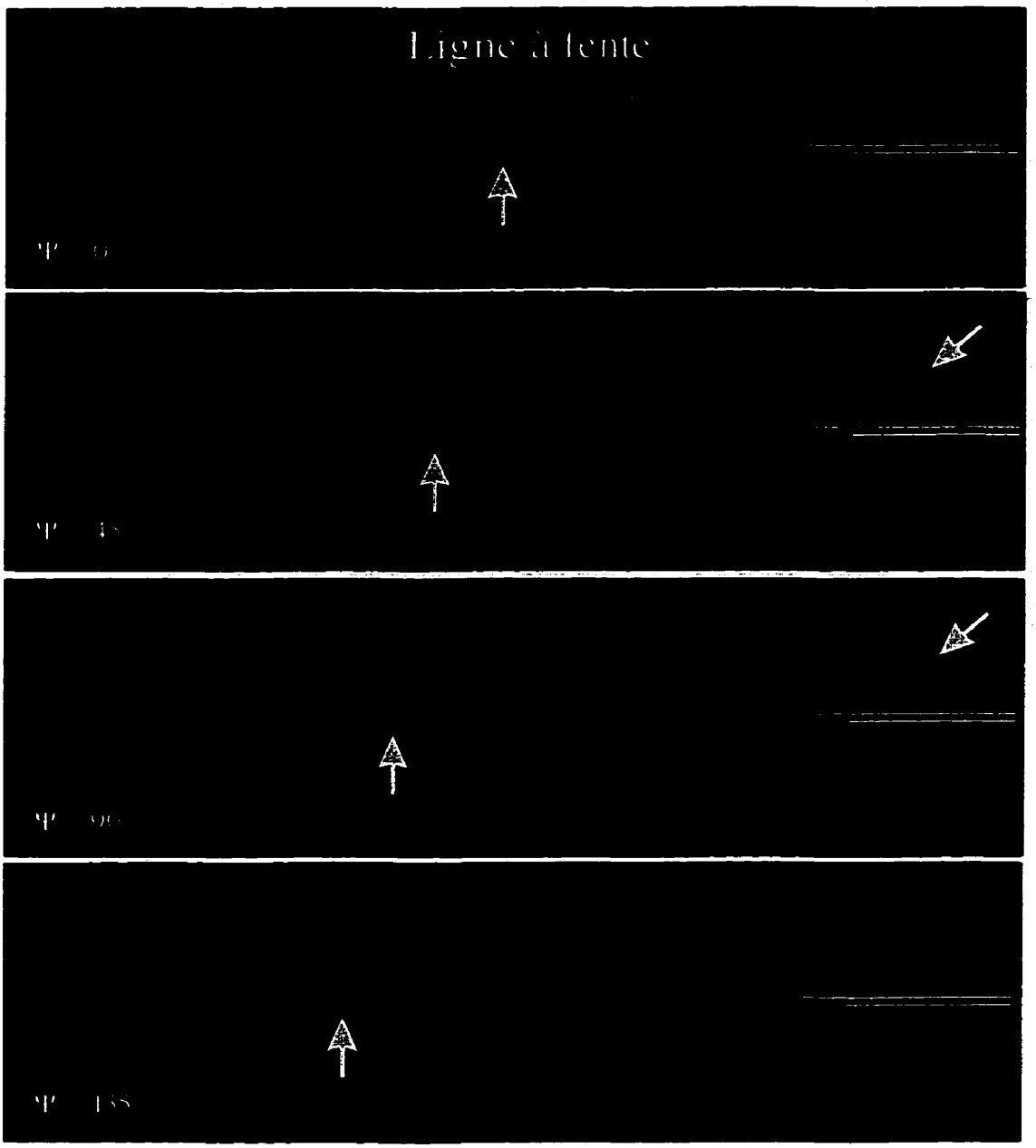


Figure 7.32: Propagation du champ électrique émis par la ligne à fente

Bien que l'amplitude maximale du champ soit passée de 10 kV/m pour le coplanaire à 5 kV/m pour la ligne à fente, celle-ci est encore très élevée. De plus, on constate que cette antenne n'est pas balancée et que le câble coaxial irradie de façon importante. Cela est surtout visible à $\Psi = 90°$ à la Figure 7.32 (montré par les flèches obliques). On devrait utiliser un suppresseur de mode commun afin d'éliminer le courant présent sur la partie extérieure du conducteur externe du câble coaxial. Toutefois, étant donné l'espace physique très limitée pour cette application, cela s'avère très difficile en pratique. Le patron de SAR montre que la profondeur de pénétration s'étend jusqu'à environ 6 mm dans le myocarde, ce qui est une amélioration par rapport à la ligne coplanaire. Toutefois, le SAR n'est pas uniforme et présente un noeud près de l'extrémité distale. À cause de la radiation le long du câble coaxial et de la non-uniformité du patron de SAR, l'emploi de la ligne à fente n'est pas conseillé, la structure coplanaire étant plus appropriée.

Tout comme on l'a mentionné, l'adaptation des deuxième et troisième harmoniques diminue de façon marquée lorsque la fréquence augmente pour la structure coplanaire. On s'est demandé si cette caractéristique n'était pas causée par la transition entre le câble coaxial et le coplanaire. On a donc modifié la transition par simulation en utilisant une ligne de transmission à ruban équilibré (*stripline*) au lieu du câble coaxial afin de modifier le champ d'excitation au niveau de la transition. Cette ligne est schématisée à la Figure 7.33 où l'on montre une coupe transverse.

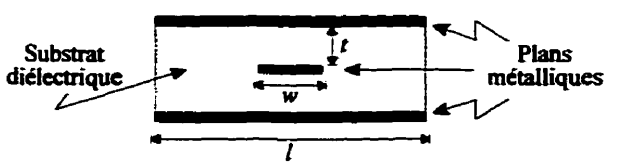


Figure 7.33: Ligne à ruban équilibrée

Les dimensions de cette ligne, présentées au Tableau 7-6, ont été sélectionnées afin d'obtenir une impédance caractéristique de 50 Ω tout en permettant son insertion dans un cathéter de 9F.

Tableau 7-6

Ligne à ruban équilibrée (Z_0 = 50 Ω)		**Applicateur coplanaire (Z_0 = 19 Ω)**	
w	0,17 mm	*w*	0,4 mm
t	0,125 mm	*G*	0,175 mm
l	2,65 mm	*l*	0,95 mm
ε' (diél.)	2,2	*L*	4 cm

L'impédance intrinsèque du coplanaire est inférieure à 50 Ω et la largeur totale de la ligne de transmission ainsi que de l'applicateur coplanaire a été fixée à 2,65 mm. L'adaptation de cette structure est montrée à la Figure 7.34.

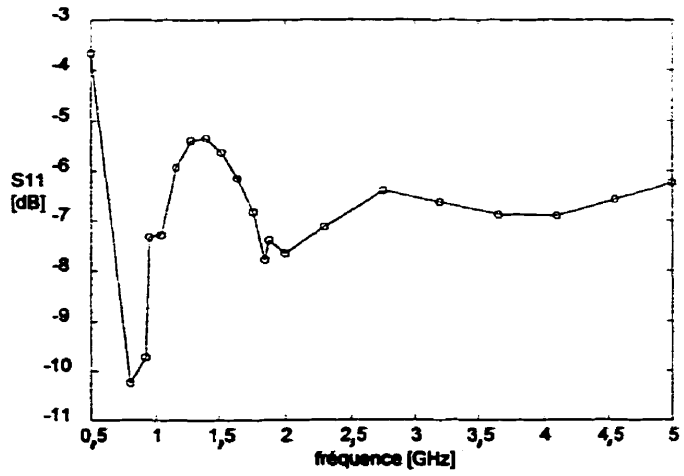


Figure 7.34: Adaptation du coplanaire (ligne de transmission à ruban équilibrée)

On observe que l'adaptation de la première harmonique est inférieure à la seconde et qu'à plus haute fréquence, aucune harmonique n'est présente. Le comportement en fréquence est donc similaire lorsqu'on utilise le câble coaxial ou la ligne à ruban équilibrée comme ligne de transmission. On peut en conclure que la mauvaise adaptation à 2,45 GHz est causée par la réponse en fréquence de l'applicateur lui-même et non pas par la transition. Pour ce qui est du patron de radiation, ce dernier est similaire en tout point à celui montré à la Figure 7.28. Cette simulation augmente la crédibilité de l'hypothèse que la disparition des harmoniques d'ordres supérieurs est causée par l'absorption rapide de l'onde transmise au coplanaire.

L'applicateur d'énergie imprimé sur un substrat diélectrique possède des propriétés mécaniques intéressantes pour son utilisation lors du traitement du flutter ou de la fibrillation auriculaire. Ses propriétés de radiation présentent toutefois deux inconvénients: on ne peut utiliser la fréquence de 2,45 GHz, le patron de radiation n'est pas uniforme et le champ électrique est très intense près des conducteurs métalliques. On reviendra sur ces points lors de la discussion des résultats.

7.2 RÉSULTATS CLINIQUES: ÉTUDE DE CAS

Tel que montré à la section 7.1.6, quelques groupes de recherche ont testé l'ablation micro-onde sur des animaux. Cependant, aucun de ces groupes n'a encore utilisé cette technique sur des humains atteints d'arythmies cardiaques. La collaboration avec la compagnie californienne a permis d'effectuer les tout premiers essais cliniques à l'échelle mondiale visant à évaluer l'efficacité de l'ablation micro-onde lors du traitement du flutter auriculaire de type I en utilisant les antennes hélicoïdales. L'auteur de ce rapport a assisté le cardiologue à 5 de ces tentatives qui sont rapportées ici: 2 d'entre

elles ont été une réussite, 2 échecs ont été enregistrés et l'autre cas peut être qualifié de demi-succès. Ces essais ont été réalisés en collaboration avec les docteurs Molin à Montréal et Adragao à Lisbonne. D'autres patients ont aussi été traités par micro-onde par les docteurs Downar à Toronto et Liem à Stanford.

La première tentative a été réalisée à l'hôpital du Sacré-Coeur à la fin du mois de mai 1997. Le cardiologue traitant était le D^{r} Frank Molin. Le patient présentait un flutter de type I de forme paroxystique. Lors de l'ablation, ce dernier était en rythme sinusal. Un total de 10 ablations micro-onde ont été effectuées sur le patient, au niveau de l'isthme, sans qu'il soit possible d'observer une modification significative au niveau du patron d'excitation de l'oreillette droite. Par la suite, une seule ablation radiofréquence a été nécessaire afin de provoquer un changement significatif dans le patron d'activation auriculaire droit. L'expérience des cardiologues démontre qu'il est presque impossible de provoquer un tel changement dans le patron d'activation après une seule application RF. Il faut donc conclure que l'ablation au niveau de l'isthme a presque été réalisée avec les micro-ondes et que l'ablation RF a effectué le restant du travail. C'est le cas qualifié de demi-succès: le patient a été traité de façon efficace, le flutter étant impossible à induire par stimulation programmée à la suite du traitement. Le temps de la procédure a été d'environ 75 minutes, ce qui est quand même une réduction appréciable sur le temps moyen rencontré en ablation RF[13].

Le cathéter utilisé était de type hélicoïdal de 8F avec une paire d'électrodes à l'extrémité distale du cathéter. Comme il a été mentionné, le patron ne s'étend pas au niveau des électrodes, pas plus qu'à l'extrémité du cathéter. Cette caractéristique, ajoutée

---

[13]. En ablation RF, cette procédure dure habituellement entre 2 et 3 heures.

au fait que la maniabilité du cathéter est limitée et que l'applicateur lui-même est très rigide, fait en sorte qu'il est difficile d'effectuer l'ablation sur toute la longueur de l'isthme. Le cathéter RF a donc été probablement positionné à un endroit difficilement accessible par l'applicateur micro-onde, probablement au creux de l'isthme près de la valve tricuspide. Le fait que l'angle de contact entre l'électrode distale du cathéter RF et l'endocarde n'est pas important afin d'obtenir une déposition d'énergie efficace ainsi que la plus grande maniabilité des cathéters RF fait en sorte que cette zone est assez facilement accessible avec ce type de cathéter. Il a été conclu, à la suite de ce cas clinique, que l'obtention d'un patron de radiation s'étendant à l'extrémité de l'applicateur était souhaitable afin d'améliorer la performance des cathéters micro-onde. Une plus grande flexibilité de l'applicateur ainsi qu'une meilleure maniabilité du cathéter sont aussi des caractéristiques désirées.

Le deuxième cas, datant du 26 août 1997, a aussi été réalisé par le D^{r} Frank Molin à l'hôpital du Sacré-Coeur de Montréal. Le patient traité, un homme septuagénaire, était atteint d'un flutter paroxystique de type I. Ce dernier était en rythme sinusal lors de la procédure d'ablation. Le cathéter utilisé était de type hélicoïdal unipolaire de 8 F. Sa longueur active a été fixée de façon à ce que la fréquence de résonance soit située à 2,45 GHz. Les mesures effectuées sur ce cathéter lorsque l'applicateur est totalement immergé dans l'eau ont montré que son adaptation était de $-15\,\mathrm{dB}$ à 2,45 GHz. Tout comme il a été mentionné, le patron de radiation s'étend quelque peu sous l'électrode d'enregistrement unipolaire. Cette différence est la seule à avoir été apportée au niveau de la partie radiative. La procédure d'ablation s'est bien déroulée et, après la huitième application d'énergie micro-onde, une modification significative a été observée au niveau du patron d'activation de l'oreillette droite. L'induction du flutter par stimulation programmée a été tentée à la suite de la procédure

et s'est montrée infructueuse. Ce cas, réussi en l'espace de 45 minutes, est qualifié de succès complet.

Bien qu'ayant été une réussite, cette procédure a démontré que le positionnement d'un cathéter unipolaire est difficile à évaluer. En effet, bien que ce dernier soit entièrement situé dans l'oreillette, un important signal ventriculaire est toujours visible à l'oscilloscope, ce qui complique son positionnement. Le cardiologue est contraint à évaluer la forme des signaux auriculaires et ventriculaires et à les comparer aux formes obtenues lors des applications précédantes afin de savoir si le cathéter est à un endroit différent ou au même endroit qu'aux applications antérieures. De plus, les propriétés mécaniques du cathéter font en sorte que lorsque le cardiologue tire sur le cathéter après en avoir courbé l'extrémité par le système de déflexion, l'applicateur a tendance à s'élever et le contact entre ce dernier et l'endocarde est perdu, rendant ainsi l'application d'énergie peu efficace. Le rayon de courbure du système de déflexion du cathéter était aussi probablement trop grand, le cardiologue traitant a d'ailleurs mentionné qu'il avait l'impression que l'extrémité du cathéter était toujours située un peu trop profondément dans le ventricule et qu'il était difficile de le ramener vers l'oreillette.

Ce cas a clairement démontré que le flutter auriculaire de type I est traitable en utilisant les micro-ondes et que l'on peut espérer réduire de façon significative le temps de la procédure. Les propriétés mécaniques des cathéters utilisés ne sont pas optimales, pas plus que les propriétés radiatives qui empêchent l'utilisation d'une paire d'électrodes distales afin d'en faciliter le positionnement.

Les trois autres cas ont été effectués au Portugal par le D^{r} Pedro Adragao. Le premier patient portugais était un homme dans la cinquantaine atteint d'un flutter

auriculaire persistant de type I. Lors de la procédure, le flutter était clairement visible et présentait un bloc 2:1.

Le cathéter utilisé était une antenne hélicoïdale unipolaire de 8,5 F utilisant le câble coaxial IW70 comme ligne de transmission. Les pertes par unité de longueur de ce câble étant plus faibles, l'efficacité du cathéter s'en trouve augmentée et sa température demeure à un niveau acceptable.

Dans ce cas, une seule application d'énergie micro-onde au niveau de l'isthme a été nécessaire afin de mettre fin au flutter. Entre l'insertion du cathéter et la fin du flutter, il s'est écoulé seulement 7 minutes, ce qui est exceptionnellement rapide. L'électrogramme, monitoré en temps réel, est montré à la Figure 7.35 lors de la disparition du flutter. On y voit très clairement que le flutter avec bloc 2:1 passe en rythme sinusal normal. La puissance utilisée était de 65 watts et le flutter s'est terminé après 80 secondes d'application micro-onde. À la suite du traitement, il a été impossible d'induire à nouveau le flutter par stimulation programmée.

Ce cas confirme que cette technique est valable pour le traitement du flutter de type I. Lorsque le cathéter est bien positionné et que le contact entre l'applicateur et l'endocarde est adéquat tout au long de ce dernier, le traitement peut s'avérer très rapide. Ce cas a démontré que le cathéter de 8,5 F est efficace mais qu'il est difficile à manipuler. Le câble coaxial IW70 possédant un diamètre externe plus élevé que le IW58 utilisé dans le cathéter de 8 F, il s'ensuit que la rigidité du cathéter de 8,5 F est augmentée, ce qui rend sa manipulation et son positionnement difficile. De plus, les cardiologues trouvent difficile l'utilisation d'un enregistrement unipolaire lors du

positionnement du cathéter. En évaluant le résultat obtenu, ce cas peut être qualifié de réussite totale.

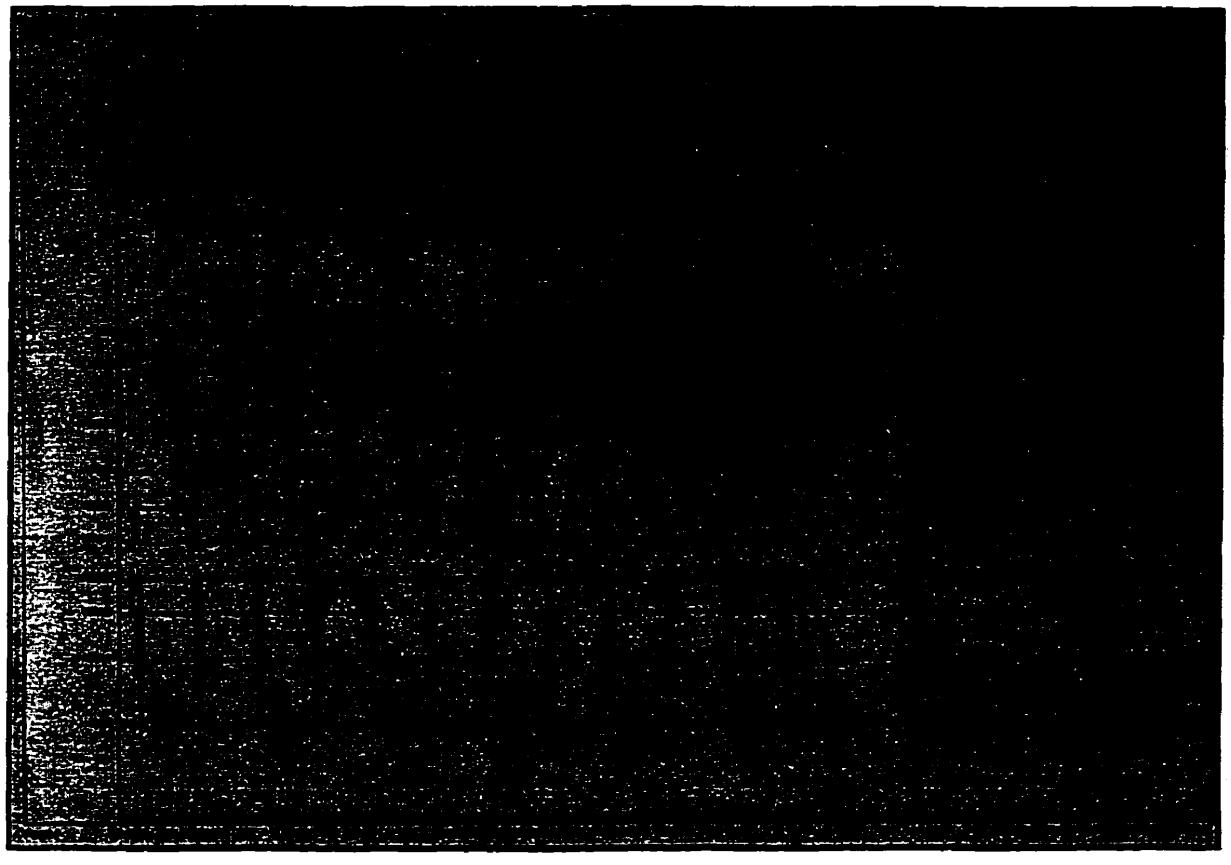


Figure 7.35: Électrocardiogramme montrant la fin du flutter auriculaire

Le second cas portugais était aussi un homme dans la cinquantaine atteint de flutter paroxystique de type anormal cette fois-ci. Le patient était en rythme sinusal au début de l'opération. Il s'est avéré impossible d'obtenir un bon résultat pour ce patient: après quinze ablations micro-onde dans la région de l'isthme, aucune variation significative du patron d'activation de l'oreillette droite n'a été enregistrée. Par la suite, une vingtaine d'applications RF ont été effectuées sans plus de succès. Le traitement du

flutter de ce patient a donc été un échec, tant pour la technique d'ablation par micro-onde que pour l'ablation RF. La journée suivant la procédure, un échocardiogramme thoracique a démontré une anomalie congénitale dans l'oreillette droite de ce patient: ce dernier possédait deux veines caves supérieures. Cette anomalie explique peut-être pourquoi les ablations effectuées au niveau de l'isthme n'ont pas donné les effets escomptés: il est possible que l'embouchure de ces deux veines caves supérieures soit assez grande pour offrir la masse critique de tissu pouvant supporter la boucle de réentrée causant le flutter atypique observé. Dans ce cas, l'ablation au niveau de l'isthme ne sert strictement à rien car ce n'est pas un chemin emprunté par la boucle de réentrée. À cause de cette anomalie physiologique, il est difficile d'utiliser ce cas afin d'évaluer la technique d'ablation par micro-onde.

Le dernier cas portugais était une dame de 72 ans avec un flutter typique dont les épisodes étaient très espacés dans le temps. Lors de l'ablation, la patiente était en rythme sinusal. La procédure a débuté avec un cathéter de 8 F, mais le mécanisme de déflexion de ce dernier s'étant brisé, l'opération a dû se poursuivre avec le dernier cathéter disponible, un cathéter de 7,5 F. Ce cathéter utilisait un câble coaxial très fin dont les pertes par unité de longueur étaient importantes (1,5 dB/m). La température du câble coaxial était donc beaucoup plus élevée qu'avec les cathéters de 8 F et de 8,5 F. Une douzaine d'applications ont été effectuées et, dans la plupart de celles-ci, la patiente a ressenti une vive douleur. Cette douleur était vraisemblablement causée par le cathéter en contact avec les parois de la veine cave inférieure. En effet, cette zone possède une innervation importante et, lorsqu'un point chaud y est présent, le patient ressent une douleur aiguë qui s'étend du cou jusqu'à la hanche. À la suite d'une douzaine d'applications d'énergie micro-onde, la patiente s'est retrouvée en flutter auriculaire d'une forme atypique qui a dégénéré en fibrillation auriculaire. Par la suite, une épisode de tachycardie ventriculaire s'est présentée et il a fallu utiliser le défibrillateur afin de le

stopper. À la fin de la procédure, un flutter auriculaire atypique était présent. La patiente est demeurée sous observation toute la nuit et, le lendemain, elle est revenue en rythme sinusal de façon spontanée. Elle a par la suite obtenu son congé du centre hospitalier.

Ce cas montre que des complications sont possibles lors de l'utilisation de l'énergie micro-onde. Un concours de circonstance a fait en sorte que, pour ce dernier patient (tous traités le même jour), seul un ancien cathéter de 7,5 F utilisant le câble coaxial avec pertes importantes était disponible. Il est difficile de dire si les lésions produites ont eu un effet pro-arythmogène ou non car c'est le seul cas où de telles complications se sont présentées. De plus, la patiente est retournée spontanément en rythme sinusal quelques heures après la fin du traitement. Cependant, le fait d'avoir ressenti de fortes douleurs durant la procédure a rendu la patiente nerveuse et anxieuse. Il est permis de penser que cet énervement a augmenté son taux de catécholamines et que cette augmentation a rendu les fibres myocardiques plus sensibles en diminuant le seuil de dépolarisation, aidant ainsi à provoquer la cascade d'événements mentionnés ci-haut. Si la nouvelle génération de cathéters de 8 F et de 8,5 F avait été utilisée, il est possible que ces événements n'auraient pas eu lieu.

Cet échec à démontré que l'adaptation de l'applicateur à 2,45 GHz ainsi que l'utilisation d'un câble coaxial présentant un faible coefficient d'atténuation sont absolument nécessaires lors d'une application clinique. Si le patient ressent de vives douleurs à toutes les applications, il ne faut pas hésiter à utiliser un autre cathéter ou à interrompre la procédure.

En résumé, deux cas sur cinq ont été des succès entièrement réalisés avec la technique d'ablation par micro-onde. Dans un autre cas, une seule ablation RF réalisée à la suite de quelques ablations micro-ondes a permis d'obtenir les résultats désirés. Dans les deux échecs, des situations particulières ont été rencontrées. Dans le premier cas, le patient présentait une anomalie congénitale et, dans le second, le seul cathéter disponible était un vieux modèle utilisant un câble coaxial présentant des pertes importantes. Dans le premier cas, il était impossible de détecter cette anomalie à l'aide des électrocardiogrammes disponibles avant la procédure. Dans le second cas, par contre, on aurait dû mettre fin à la procédure après les premières tentatives, après avoir constaté que la patiente ressentait de la douleur au cours de chacune des applications.

Cette technique nouvelle en est à ses premiers balbutiements et il est tout à fait normal de rencontrer des difficultés au départ. Cependant, les succès obtenus confirment la faisabilité de l'ablation du flutter auriculaire par micro-onde. Les échecs et les difficultés rencontrés lors de ces premiers cas cliniques devront servir à améliorer les cathéters et la technique en général afin d'en augmenter le taux de succès et d'en réduire la durée.

7.3 DISCUSSION

Différents types d'applicateurs micro-onde ont été étudiés dans ce chapitre. Ces cathéters serviront d'outil aux cardiologues lors du traitement de différents types d'arythmies. Une bonne connaissance des caractéristiques de radiation de chacune des structures radiatives est donc primordiale afin d'effectuer un choix judicieux de cathéter. Ce chapitre a démontré les caractéristiques principales de chacune des structures étudiées.

Pour ce qui est du monopôle avec capuchon, le patron de radiation est profond et de forme semi-sphérique. La profondeur de pénétration est la plus importante de toutes les structures étudiées. Cet applicateur serait bien adapté au traitement de la tachycardie ventriculaire post-infarctus où l'on doit traiter un volume important de tissus au pourtour de la zone infarcie parfois située en profondeur dans le myocarde. Les simulations ainsi que les prototypes fabriqués ont permis d'amener le concept presqu'à la phase de production. Un monopôle avec capuchon, disposé au bout d'un cathéter d'ablation, possédant de bonnes propriétés mécaniques, un patron de radiation adéquat et une bonne adaptation a été proposé. Le monopôle est la structure radiative dont l'utilisation pratique en clinique ressemble le plus aux cathéters d'ablation RF. En effet, les patrons de SAR obtenus avec ces derniers s'étendent au-delà de l'extrémité du cathéter. Bien que la déposition d'énergie dans le muscle cardiaque soit maximisée lorsque l'applicateur est parfaitement étendu le long de la paroi endocardique, l'efficacité de l'applicateur est bonne même si ce dernier entre en contact avec un certain angle. Cette caractéristique, s'approchant de celle des applicateurs RF, donne une certaine flexibilité aux cardiologues en ce qui concerne le positionnement de l'applicateur. De plus, son utilisation est similaire à celle des cathéters RF, ce qui diminue la période d'acclimatation à cette nouvelle technologie.

Comme il a été mentionné, le monopôle peut produire un coagulum au niveau des surfaces métalliques exposées au fluide sanguin. Un système de détection de ce coagulum, utilisant une mesure d'impédance à quelques centaines de kHz, a d'ailleurs été proposé dans un chapitre précédent. Les tests *in vivo* ont aussi démontré qu'il est possible de générer des contractions ventriculaires prématurées pouvant dégénérer en tachycardie ventriculaire lorsque la puissance de sortie utilisée est importante. Une hypothèse pouvant expliquer ce phénomène est que l'augmentation de température ainsi que le champ électrique de forte amplitude peuvent briser la membrane cellulaire,

laissant ainsi le potassium intracellulaire se diriger vers le liquide extracellulaire. Pour éviter ce genre de complications, un protocole de déposition d'énergie devra être étudié afin de produire des lésions de grand volume par couches successives, laissant ainsi le temps au potassium intracellulaire de diffuser afin que sa concentration soit suffisamment faible pour ne plus avoir d'effets sur les cellules myocardiques. L'applicateur monopolaire possède donc des caractéristiques intéressantes et les tests *in vivo* sur des sujets canins ont démontré que les lésions produites avec cet applicateur pouvaient être transmurales et de volume important (jusqu'à 2,15 cm^3). Cet applicateur n'a toutefois pas été utilisé cliniquement sur des humains atteints de tachycardie ventriculaire post-infarctus. Cependant, avant d'effectuer quelque évaluation que ce soit, il est primordial que la technique soit reconnue comme étant tout à fait sécuritaire.

Pour sa part, le monopôle sans capuchon produit un patron de radiation intéressant, en plus d'offrir une très bonne adaptation. Cependant, cet applicateur résonne à 2,45 GHz à une longueur de 13 mm seulement, ce qui est un facteur limitant lors de la conception. Lorsqu'on désire utiliser un applicateur plus long, son efficacité de radiation diminue rapidement. Le patron de radiation s'étend profondément dans le myocarde et le champ électrique est assez uniforme le long de l'applicateur. Cependant, ce champ est plus intense aux extrémités distales et proximales de l'applicateur, aux endroits où les conducteurs métalliques sont en contact direct avec le milieu sanguin. Ces endroits spécifiques peuvent provoquer la formation de coagulum lors d'une application réelle. Le système de détection de coagulum devrait être utilisé lors d'une application réelle. Les propriétés mécaniques de ce genre d'antenne sont excellentes si on utilise un câble coaxial dont le conducteur interne est tressé. Il est alors facile de courber l'antenne de sorte que cette dernière épouse les contours de l'endocarde. Les mesures à l'analyseur de réseau ont d'ailleurs démontré que, contrairement à ce que l'on pourrait s'attendre, l'adaptation de l'antenne ne varie pas beaucoup avec la courbure.

Cela est causé par l'effet de guide d'onde diélectrique à perte qui est formé par le conducteur interne, le diélectrique et le milieu sanguin entourant la structure. Dans un guide d'onde diélectrique sans perte (par exemple une fibre optique), l'impédance du coeur est inférieure à l'impédance du milieu environnant. Dans le cas présent, on a le cas contraire: la permittivité du coeur (le diélectrique) est inférieure à la permittivité du sang[14]. Cette condition fait en sorte qu'il est impossible d'obtenir une réflexion totale à l'interface diélectrique-sang: c'est pourquoi on parle d'effet diélectrique avec pertes. Cet effet guide d'onde est observable à l'aide de la simulation montrée à la Figure 7.12. L'amplitude du champ électrique est supérieure à 1 kV/m sur toute la longueur du diélectrique, tandis qu'elle décroît à environ 600 V/m dans le sang juste à la surface de l'applicateur. Cette propriété ne serait pas présente si on enlevait la couche de diélectrique de sorte que le conducteur interne soit en contact direct avec le sang sur toute sa longueur.

L'utilisation d'une paire d'électrodes sur la partie distale de l'applicateur n'a pas été simulée. Ces électrodes sont tout à fait nécessaires lors d'une application clinique afin d'être en mesure de positionner le cathéter sur la paroi endocardique de façon efficace. On devrait donc étudier l'effet de ces bagues métalliques, ainsi que des fils de connexion, sur le patron de radiation et sur l'adaptation de l'antenne. Il est fortement probable que le couplage entre les fils métalliques et l'antenne soit considérable et que les fils agissent eux-mêmes comme éléments radiants.

---

[14]. Rappelons que l'impédance intrinsèque d'un milieu (η) est inversement proportionnelle à la permittivité (ε_r).

Toutefois, l'ajout des électrodes de mesure sur l'applicateur lui-même n'est pas absolument nécessaire si on modifie quelque peu l'approche de positionnement du cathéter. En effet, on pourrait utiliser une structure guidante sur laquelle on fixe les électrodes d'enregistrement ou un tube de guidage dans lequel l'antenne peut librement glisser. On positionnerait des électrodes sur le tube de guidage afin de le positionner à l'endroit désiré. Il serait alors possible d'ouvrir une fenêtre longitudinale dans le tube de façon à mettre l'applicateur en contact direct avec l'endocarde et le fluide sanguin et ainsi obtenir un transfert d'énergie adéquat.

Le système de positionnement de l'applicateur lui-même peut prendre différentes formes, selon l'application. Pour le traitement du flutter de type I, un système de déflexion similaire à celui utilisé sur les cathéters d'ablation RF peut être adéquat. Ce système, schématisé à la Figure 7.36, permet de courber le bout du cathéter pour différents rayons de courbure. Ce système offre suffisamment de degrés de liberté afin de permettre au cardiologue de s'adapter à différentes morphologies cardiaques. De plus, la flexibilité de l'antenne permettrait de suivre de façon efficace les contours du myocarde lorsqu'une pression est appliquée par le système de déflexion. Cependant, lorsque des lésions plus longues que la longueur active de l'antenne sont nécessaires, ce système de positionnement n'est pas très efficace. Dans ce cas, on doit déplacer le cathéter afin d'effectuer une lésion joignant celle effectuée précédemment. Ce procédé est très difficile à réaliser et il n'existe aucun moyen de savoir si les deux lésions se recouvrent ou non. Des tests *in vivo* effectués à l'université Stanford par le D^{r} L. Bing Liem sur des sujets canins ont démontré qu'il était très difficile de produire une lésion linéaire continue entre la veine cave supérieure et la veine cave inférieure sur la paroi latérale de l'oreillette droite. Le cathéter a souvent tendance à glisser le long de l'endocarde lorsqu'on le déplace ce qui fait en sorte que les lésions produites sont discontinues. Afin d'effectuer des lésions continues, il est nécessaire de concevoir un

système qui permette de contrôler parfaitement la position du cathéter de façon à pouvoir retourner au même endroit autant de fois qu'on le désire.

De tels systèmes de positionnement n'ont pas été développés au cours du présent projet de doctorat. Cependant, l'expérience clinique acquise par l'auteur montre que le développement de ces systèmes est important si on veut un jour prétendre traiter la fibrillation auriculaire et si on veut améliorer les taux de succès obtenus lors du traitement du flutter auriculaire. Dans ces cas, l'utilisation de l'antenne longitudinale est intéressante car son efficacité de radiation est excellente, son patron de radiation adéquat et sa fabrication aisée.

L'emploi de l'antenne hélicoïdale pour le traitement du flutter auriculaire a été grandement étudié par la compagnie Fidus. Les résultats cliniques montrés dans ce rapport montrent hors de tout doute sa capacité à traiter de façon curative le flutter de type I. Cependant, des améliorations devront être apportées à sa conception car, dans près de la moitié des cas, les tentatives d'ablation ont été un échec. Le système de déflexion du cathéter devrait premièrement être modifié afin d'être en mesure de faire varier le rayon de courbure de l'extrémité en plus de faire varier la courbure elle-même (illustré à la Figure 7.36). En ayant ces deux degrés de liberté, le positionnement du cathéter peut s'adapter à plusieurs morphologies cardiaques.

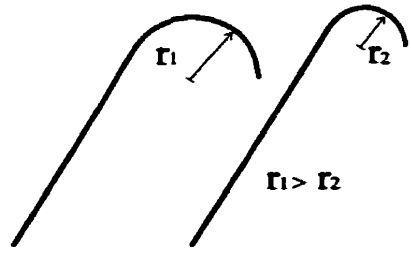


Figure 7.36: Système de déflexion à rayon de courbure variable

Pour sa part, l'applicateur devrait être flexible afin de pouvoir suivre la surface de l'endocarde. L'applicateur utilisé est présentement enrobé d'une gaine de téflon, ce qui lui confère une certaine rigidité. Il est possible de remplacer cette gaine par du polyéthylène et de réduire le diamètre de l'hélice afin d'en augmenter la flexibilité. Des tests préliminaires ont été effectués chez Fidus et il semble que l'efficacité de radiation ne soit pas trop affectée par ce changement, les pics de résonance étant en autour de $-15\,\mathrm{dB}$. Afin de traiter le flutter avec les cathéters actuels, il faut que le rayon de courbure de la partie distale du cathéter ait exactement la bonne dimension pour que l'applicateur entre en contact avec l'isthme. De plus, les cathéters actuels sont unipolaires, ce qui complique grandement leur positionnement. Un cathéter idéal possède une bonne adaptation, un patron de radiation adéquat, une paire d'électrodes à l'extrémité distale de l'applicateur et la capacité de d'irradier l'énergie au-delà de l'extrémité du cathéter. La configuration qui s'approche le plus de ces caractéristiques est l'antenne hélicoïdale avec un capuchon à l'extrémité. Le patron de radiation obtenu n'est pas uniforme mais présente un maximum à l'extrémité, un peu comme le patron de SAR de l'antenne hélicoïdale bipolaire montré à la Figure 7.14. Cette configuration n'a pas été testée en clinique mais l'auteur croit que ce patron est bien adapté au traitement du flutter auriculaire de forme typique. En effet, le maximum d'énergie à l'extrémité de l'applicateur fait en sorte qu'il est possible d'échauffer les fibres myocardiques situées sur le mur de l'isthme près de la valve tricuspide et de déposer de façon efficace l'énergie micro-onde au creux de cette région même si le contact entre l'applicateur et le tissu n'est pas parfait. Des simulations seront nécessaires afin d'optimiser la forme du patron de radiation ainsi que l'adaptation de la structure à 2,45 GHz. On devra aussi ajouter le système de détection de coagulum car le monopôle augmente les risques de formation. À la suite des tentatives infructueuses d'implémentation d'un système d'enregistrement bipolaire, l'emploi du capuchon au bout de l'antenne hélicoïdale est une solution

intéressante si l'on désire conserver l'emploi de l'antenne hélicoïdale tout en ayant la capacité d'enregistrer l'activité myocardique de façon bipolaire.

Le patron de SAR de l'antenne hélicoïdale actuellement utilisée par la compagnie Fidus n'est pas totalement uniforme sur toute sa longueur, comme on peut le constater à la Figure 7.14. Cependant, celle-ci produit une lésion presque uniforme car la conduction thermique du tissu rend la température plus uniforme. L'emploi d'un modèle capable de calculer la température, similaire à ceux développés par Labonté ou Kaouk, serait nécessaire afin de visualiser cet effet thermique.

La visualisation des lignes de champ électrique, présentées à la Figure 7.12, montre que ces lignes possèdent une composante longitudinale importante et que cette antenne se comporte beaucoup comme un monopôle sans capuchon du point de vue de son adaptation. En effet, le nombre de tours de l'hélice ainsi que l'espacement entre les spires sont des paramètres dont l'influence sur la fréquence de résonance est moindre que la longueur de l'hélice. Une différence de seulement quelques dixièmes de millimètre sur la longueur active se traduit par un déplacement important de la fréquence de résonance. Étant donné que les pics de résonance sont très étroits, une très grande précision est de rigueur lors du montage si l'on désire obtenir une adaptation adéquate. D'autres paramètres influencent la fréquence de résonance, notamment l'épaisseur de la gaine de téflon dans laquelle l'applicateur est inséré et la présence de très petites poches d'air dans cette gaine. De plus, la présence du fil métallique qui relie l'électrode distale au connecteur du cathéter détériore grandement la courbe d'adaptation de l'applicateur en fonction de la fréquence. Ce fil passe entre le diélectrique du câble coaxial et l'hélice formant l'antenne. Le couplage entre le fil et l'applicateur est très important, ce qui fait en sorte que ce fil modifie le paramètre S_{11} du cathéter. Il serait donc souhaitable de retirer ce fil afin d'améliorer les caractéristiques de l'antenne. Ces caractéristiques font

en sorte que l'adaptation est difficilement reproductible d'un cathéter à l'autre et qu'une variabilité importante a été observée lors de la fabrication de ces dernières.

La construction de l'antenne hélicoïdale est aussi complexe: les pièces à assembler sont très petites et les techniciens doivent travailler sous microscope afin d'en effectuer le montage. Il est permis de se demander si l'emploi de telles antennes est optimal d'un point de vue conceptuel et fonctionnel. Il serait sûrement possible de concevoir des structures plus simples qui seraient aussi efficaces et dont on pourrait aisément contrôler la qualité.

Pour le traitement de la fibrillation auriculaire, un système de positionnement similaire à ceux discutés aux paragraphes précédents doit aussi être conçu afin de produire les lésions imitant la procédure par labyrinthe. Si l'antenne hélicoïdale est utilisée, elle devra être flexible afin d'être en mesure de suivre la forme de l'endocarde.

L'utilisation d'applicateurs imprimés sur un substrat flexible est intéressante car elle permet d'obtenir un applicateur de faible volume pouvant s'adapter aux différentes morphologies cardiaques. Les recherches effectuées et présentées dans cette thèse montrent que la fréquence de 915 MHz doit être utilisée si l'on désire obtenir une bonne adaptation. Les patrons de radiation obtenus ne sont cependant pas très uniformes: les maxima du champ électrique sont situés au niveau des discontinuités présentes à la transition entre le câble coaxial et le coplanaire et au bout de l'applicateur. L'amplitude du champ irradié au centre de ce dernier y est beaucoup plus faible. L'ajout de discontinuités le long de la ligne permet toutefois de générer des modes non guidés près de ces dernières de façon à uniformiser un peu plus les niveaux de radiation le long de l'applicateur. Ces discontinuités doivent être positionnées de façon stratégique afin que

les réflexions générées entrent en interférence destructive. Ce faisant, l'adaptation de la ligne est maximale. L'effet de conduction thermique du myocarde fera en sorte que la profondeur de pénétration sur la longueur de l'applicateur sera plus uniforme, mais on peut d'ores et déjà prédire que celle-ci sera plus importante au niveau des discontinuités.

L'intensité du champ électrique est très forte près du plan de l'applicateur. Il est possible de diminuer cette intensité en remplaçant l'applicateur coplanaire par une ligne à fente dont l'espacement entre les deux conducteurs est significatif. Les simulations effectuées ont effectivement démontré que l'amplitude du champ électrique diminuait quelque peu et que la profondeur de pénétration augmentait pour cette structure, ce qui est un avantage certain. Cependant, de par la nature asymétrique de la ligne, la structure n'est pas bien balancée. Cette caractéristique fait en sorte que le câble coaxial devient lui-même une partie active de l'antenne en irradiant l'énergie micro-onde. Cette irradiation est provoquée par l'apparition d'un important courant au niveau de la partie externe du câble coaxial. De par cette particularité, l'emploi d'un tel applicateur d'énergie est déconseillé car des lésions indésirables peuvent être produites sur la partie distale du cathéter. L'emploi d'un suppresseur de mode commun ou d'un absorbant micro-onde serait donc requis afin d'éliminer le courant sur la partie externe du câble coaxial. Cependant, les contraintes physiques en ce qui concerne l'espacement disponible sont grandes et il serait très difficile d'implémenter de telles structures au bout du cathéter.

En résumé, la structure coplanaire est bien balancée et adaptée à une fréquence de 915 MHz. Il est de plus possible de générer des modes non guidés sur la ligne coplanaire en ajoutant des discontinuités le long de celle-ci. Cependant, le champ électrique est très intense près du plan du coplanaire et l'onde ne pénètre pas tellement bien. Pour obtenir une bonne adaptation à 2,45 GHz avec cette structure, il faudrait que

les niveaux d'amplitude des ondes réfléchies au niveau de la transition et de l'extrémité de l'applicateur soient similaires. Étant donné que l'absorption dans le myocarde est importante à cette fréquence, l'amplitude de l'onde réfléchie en provenance du bout de l'applicateur est très faible lorsqu'elle repasse par la transition. Cela signifie que l'on doit concevoir une ligne coplanaire dont l'impédance intrinsèque est très près de 50 Ω et que la transition elle-même doit présenter une perte d'insertion très faible, ce qui en complique le design. De plus, il est fort probable que la déposition d'énergie soit plus importante à l'entrée du coplanaire qu'à son extrémité distale. Du point de vue de l'application, il est donc préférable d'utiliser la fréquence de 915 MHz lors de l'emploi de telles structures.

Un aspect très intéressant de cette configuration provient du fait qu'il est possible d'imprimer des électrodes entre les deux conducteurs ou encore sur les plans de masse afin d'enregistrer l'activité électrique cardiaque. Ces électrodes, en plus de faciliter le positionnement du cathéter, peuvent fournir de l'information pertinente sur la qualité du contact entre l'applicateur et l'endocarde. En effet, l'enregistrement d'un signal électrique de bonne qualité dont l'amplitude est suffisante indique que le contact est adéquat. On peut aussi utiliser ces électrodes afin de stimuler l'endocarde et de provoquer une contraction myocardique. Cette caractéristique aiderait grandement le positionnement de l'applicateur par le cardiologue.

L'emploi d'applicateur micro-onde pour le traitement d'arythmies cardiaques offre donc plusieurs possibilités intéressantes. Dans le but de développer des outils thérapeutiques efficaces, la compréhension de l'arythmie traitée, de l'anatomie cardiaque, des techniques opératoires et du matériel utilisé est primordiale. Une collaboration serrée entre les équipes de développement et le personnel médical est absolument nécessaire afin de développer un produit de qualité. Les concepts, remarques et

recommandations apportés dans ce chapitre seront, espérons-le, éclairer le développement futur de ces différents types d'applicateurs.

CHAPITRE VIII

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Ce projet de recherche a débuté par le développement de techniques de mesure afin de caractériser les propriétés diélectriques de milieux biologiques. Les travaux effectués ont permis d'améliorer une technique de mesure de permittivité complexe utilisant un réflectomètre six-port. La méthode développée et présentée au chapitre III de la thèse permet de définir le plan de référence du réflectomètre au bout d'une sonde coaxiale, ce qui était difficilement réalisable auparavant. Cette technique est simple et donne d'excellents résultats en pratique. Elle permet, en effectuant des mesures à faible largeur de bande, d'éliminer les effets néfastes des réflexions parasites et d'obtenir des mesures de précision comparables à celles prises à l'aide d'un analyseur de réseau possédant une très grande largeur de bande. Si une application industrielle à grande échelle est développée un jour, cette technique pourrait contribuer à réduire considérablement le coût des équipements requis.

Un autre aspect intéressant du projet est l'étude comparative de modèles mathématiques utilisés lors des mesures de permittivité complexe sur des milieux présentant de fortes pertes aux fréquences micro-onde. En effet, la littérature était pauvre en ce qui concerne ce domaine et aucune étude n'avait été réalisée afin de valider les modèles dans de telles situations. L'étude et les conclusions amenées au chapitre II de la thèse aideront à clarifier le problème et à guider les expérimentateurs dans le choix d'un modèle approprié. Le projet de recherche, initialement catégorisé en génie biomédical, aura donc eu des répercutions dans le domaine du génie électrique en améliorant et en validant certaines techniques utilisées en réflectométrie.

On a également fait avancer l'état des connaissances en mesurant les propriétés diélectriques aux fréquences micro-onde ainsi que la conductivité électrique à 500 kHz des tissus myocardiques sains et infarcis. Ces mesures d'ailleurs ont permis à un autre étudiant membre de l'équipe de recherche de réaliser des simulations visant à étudier la

faisabilité de la technique d'ablation par micro-onde et à comprendre les phénomènes de déposition d'énergie en cause dans les deux modalités d'ablation avec ou sans la présence d'une zone infarcie. Ces données n'étaient pas disponibles dans la littérature et les travaux de recherche ont contribué à enrichir cette dernière ainsi qu'à jeter les bases nécessaires au développement de la technique d'ablation par micro-onde.

La conception d'un générateur spécifiquement conçu afin de réaliser des ablations micro-onde a contribué au développement de la nouvelle technologie. Certaines spécifications innovatrices ont d'ailleurs été implémentées afin d'assurer la sécurité du patient. L'emploi du système de détection de coagulum au bout de l'applicateur devrait toujours être utilisé lorsque des applicateurs de type monopolaire sont utilisés. Ces applicateurs entraînent une grande concentration de ligne de champ électrique autour des surfaces métalliques en contact avec le myocarde et le sang, ce qui crée des points chauds et cause la formation du coagulum. Si ce coagulum venait à se former sans être détecté et à se détacher du cathéter, les conséquences pourraient être graves pour le patient. Le système proposé est simple, efficace et peu dispendieux. De plus, son intégration dans un système existant ne demande pas beaucoup d'efforts. L'utilisation de ce système est justifié d'un point de vue sécuritaire, car il permet la visualisation en temps réel de l'évolution d'un phénomène pouvant être potentiellement dangereux.

La compagnie Fidus Medical Technology ne rapporte aucune formation de coagulum lors de l'utilisation de leurs antennes hélicoïdales unipolaires. Cependant, si on ajoute un monopôle au bout de cet applicateur afin d'obtenir la capacité d'enregistrer l'électrocardiogramme de façon bipolaire et d'être en mesure d'appliquer l'énergie au-delà de l'extrémité distale du cathéter, il est possible que la formation de coagulum soit observée. Sans un système de détection adéquat, un événement malheureux pourrait survenir sans que le cardiologue n'est la possibilité de le détecter avant qu'il soit trop

tard. De plus, si on vise à utiliser la technique d'ablation micro-onde dans l'oreillette gauche pour le traitement de la fibrillation auriculaire, il devrait être impératif d'employer un tel système. En effet, le sang contenu dans la partie gauche du coeur est pompé vers la circulation périphérique et le détachement d'un caillot sanguin dans cette partie peut provoquer une embolie cérébrale dont les conséquences peuvent être fatales pour le patient. Du point de vue éthique, scientifique et commercial, l'emploi du système de détection de coagulum est donc justifié.

On a aussi proposé une structure simple visant à utiliser les conducteurs métalliques du câble coaxial qui, en plus de transmettre l'énergie micro-onde, peuvent être utilisés afin d'enregistrer le signal électrique en provenance des fibres myocardiques. Ce système, utilisé lors du positionnement du cathéter, est simple et évite l'emploi de fils métalliques positionnés à l'intérieur du cathéter afin de connecter les électrodes à l'oscilloscope de l'hôpital. Ces fils, habituellement difficiles à positionner, affectent de façon négative le patron de radiation ainsi que l'adaptation de la structure. La technique proposée simplifie grandement la production de cathéters.

Comme il a été mentionné dans la thèse, des contractions ventriculaires prématurées (CVP) menant quelquefois à des épisodes de tachycardie ventriculaire dégénérant en fibrillation ont été observées sur quelques chiens lors de l'étude visant à caractériser l'efficacité du monopôle avec capuchon. Ce type d'applicateur produit, rappelons-le, des lésions de très grand volume qui sont bien adaptées au traitement de la tachycardie ventriculaire post-infarctus. L'hypothèse la plus plausible expliquant ce phénomène provient de la sortie du fluide intracellulaire vers l'espace extracellulaire, ce qui dépolarise les cellules myocardiques et augmente leur excitabilité. Il serait

nécessaire d'étudier des protocoles d'application d'énergie afin d'effectuer l'ablation par couches successives. Ce patron de déposition d'énergie par palier pourrait permettre au fluide intracellulaire de diffuser par un phénomène de « wash-out » et ainsi éviter la production de CVP. La source micro-onde développée dans ce projet de recherche permet ce genre de traitement.

L'étude sur les applicateurs micro-onde démontre que le monopôle avec capuchon est une structure capable de produire des lésions pénétrant profondément dans le myocarde et dont le volume est important. L'apport de cette thèse a été de mettre en relief les effets sur l'adaptation et sur le patron de radiation amenés par la production d'un cathéter réel. Des solutions ont été proposées et une structure utilisable cliniquement a été présentée. Cette structure est potentiellement bien adaptée pour le traitement de tachycardies ventriculaires post-infarctus, pour l'ablation du noeud AV ou pour une arythmie d'origine focale.

Les travaux ont aussi permis d'exposer le même type de problème lors de l'utilisation du monopôle sans capuchon. Lorsqu'on ajoute la gaine de polymère du cathéter autour du câble coaxial, l'énergie micro-onde à tendance à s'y écouler ce qui provoque la radiation le long du cathéter. Certaines méthodes ont été proposées afin de diminuer cet effet. Outre ce point, ce type d'applicateur pourrait être utilisé dans le traitement du flutter auriculaire de type I afin de produire une lésion au niveau de l'isthme compris entre la veine cave inférieure et l'anneau de la valve tricuspide. D'un point de vue industriel, sa structure simple peut permettre une production de masse dont le coût de revient est très faible comparativement à l'antenne hélicoïdale qui est composée de plusieurs structures de faibles dimensions difficilement assemblables.

La partie de cette thèse portant sur les antennes a permis de comprendre et de caractériser leur fonctionnement. On a proposé l'utilisation du monopôle au bout de l'antenne hélicoïdale afin de permettre l'enregistrement de l'électrogramme de façon bipolaire et d'étendre le patron de rayonnement au-delà de l'extrémité distale du cathéter. Ces caractéristiques sont fortement désirées par les cardiologues afin de faciliter le traitement du flutter auriculaire de type I. Les travaux de recherche devraient se poursuivre afin d'étendre davantage l'uniformité du patron de radiation obtenu avec cette structure. De plus, des ablations *in vitro* et *in vivo* devraient être réalisées dans le but de visualiser la forme des lésion obtenues afin de savoir si la profondeur de pénétration à l'entrée de l'antenne est suffisante pour produire une ablation cliniquement efficace.

Les antennes hélicoïdales actuellement utilisées en clinique possèdent de mauvaises caractéristiques mécaniques et elles n'offrent pas la capacité de s'adapter à différentes morphologies cardiaques. On devra continuer leur développement de façon à concevoir un cathéter permettant à la partie distale de présenter un rayon de courbure variable afin de positionner efficacement l'extrémité. De plus, l'obtention d'un applicateur flexible permettrait à ce dernier de se conformer à la courbure concave de l'endocarde, aidant ainsi à obtenir un meilleur contact entre l'applicateur et le tissu et à améliorer la profondeur de pénétration de la lésion produite. Pour ce faire, le remplacement de la capsule de téflon par du polyéthylène (PE) ainsi que l'utilisation d'une hélice de plus faible diamètre sont requis. Le PE possède une flexibilité adéquate mais présente également un point de fusion beaucoup plus faible que le téflon. On devra s'assurer que la température de l'applicateur demeurera en tout temps en deçà de ce point lors d'applications *in vivo* afin d'éviter toute modification de la structure. Avec le type de cathéters actuellement utilisés, il faut que la morphologie cardiaque leur soit bien adaptée à ces derniers afin d'obtenir une ablation micro-onde efficace. Il faut modifier la conception des cathéters afin qu'ils soient en mesure de se conformer à différents types

de physiologie cardiaque si l'on veut augmenter le taux de succès et de diminuer le temps moyen d'une procédure.

De plus, le développement de systèmes de positionnement adaptés à différents types d'arythmies est absolument nécessaire afin que cette technique soit utilisée en clinique à grande échelle. Des travaux de recherche devraient se pencher sérieusement sur cette question. Il a d'ailleurs été démontré par le D^r Liem à Stanford qu'il est extrêmement difficile d'aligner trois ou quatre lésions avec les cathéters actuels. Un système de positionnement sur rails, semblable au système « constellation » de la compagnie EP Technology pourrait être développé afin de faciliter la production de lésion longue à l'endocarde. De plus, il serait intéressant de développer en parallèle un système de cartographie endocavitaire afin d'étudier l'activité électrique myocardique présente lors d'arythmies et d'aider au positionnement du cathéter. À l'heure actuelle, ce positionnement est difficile, surtout en lecture unipolaire, et l'utilisation de cette technique innovatrice permettrait de réduire de façon marquée le temps de la procédure. De plus, le cardiologue n'aurait plus à effectuer des ablations sur un site autre que le substrat physiologique supportant l'arythmie lorsque celle-ci possède une forme peu souvent rencontrée. Ces systèmes, en plus de faciliter le positionnement du cathéter au bon endroit, seraient en mesure d'étudier et d'apporter des éléments nouveaux qui aideraient à comprendre les phénomènes en cause lors de l'instauration et du maintien de différents types d'arythmies cardiaques.

Plusieurs groupes de recherche et quelques compagnies cherchent actuellement à traiter la fibrillation auriculaire par ablation endocardique. Toutefois, on connaît assez mal ce genre d'arythmie et il n'est pas facile de savoir où et comment il faut effectuer les ablations. Quelques chercheurs ont proposé des patrons d'ablation imitant la procédure du labyrinthe, décrite par Cox *et al.* [33], qui consiste à isoler les quatre veines

pulmonaires et les deux appendices auriculaires ainsi qu'à effectuer quelques autres ablations linéaires dans les oreillettes, mais cela est difficilement réalisable par cathétérisme. Il semble aussi que dans certains cas, la fibrillation auriculaire soit causée par un foyer arythmogène d'origine focale. Ce concept avait déjà été avancé par Sano *et al.* [112] mais cette théorie avait été supplantée par celle de la réentrée. Récemment ravivé par Morillo *et al.* [113], Spach *et al.* [114-115] et Haissaguerre [34], ce concept avance qu'une zone auriculaire focale dépolarise et entraîne un grand nombre de circuits de réentrée dans d'autres parties de l'oreillette. L'ablation de ce foyer pourrait être appropriée pour traiter l'arythmie. Des travaux de recherche devraient être menés afin d'étudier ce problème et de proposer un protocole d'ablation efficace et réalisable par cathétérisme. Une collaboration serrée entre les chercheurs, cardiologues et ingénieurs est donc de mise afin de mener à bien cette recherche fondamentale.

Les applicateurs micro-onde pourraient être utilisés comme applicateur épicardique en laparoscopie afin de produire les lésions nécessaires au traitement de la fibrillation auriculaire ou afin d'empêcher l'apparition de cette arythmie à la suite d'une opération à coeur ouvert. En effet, Pagé *et al.* [108] mentionnent que:

> « La fibrillation auriculaire (FA) est fréquente chez les patients ayant subit une intervention chirurgicale majeure, quelle qu'en soit la nature [109], surtout après une opération à coeur ouvert chez les adultes; en effet, la fréquence de survenue des arythmies supraventriculaires est de 20 à 50 %, indépendamment du fait qu'il y ait présence ou non d'arythmie préopératoire [110]. »

Dans son article, Pagé mentionne que:

> "Creswell *et al.* [111] ont relevé, à l'aide de moniteurs individuels, une incidence globale d'arythmie auriculaire de 34,6 %, celle-ci variant de 9 à 92 % selon le genre d'intervention pratiqué. La répartition des arythmies auriculaires dans leurs séries se lit comme suit: 9 % après l'excision d'une tumeur cardiaque, 11 % après une transplantation cardiaque, 15 % après la fermeture d'une communication interauriculaire, 32 % après un pontage coronarien seul, 42 % après un remplacement valvulaire mitral, 49 % après un remplacement valvulaire aortique, 62 % après un pontage coronarien suivi d'un remplacement valvulaire simple et 92 % après un pontage coronarien suivi d'un remplacement valvulaire double."

Cette technique minimalement invasive offrirait une autre modalité d'intervention qui serait probablement plus adéquate dans les cas cités ci-haut que l'ablation endocardique par cathéter. Quelques prototypes d'applicateurs épicardiques ont été produits par l'auteur lors du stage en Californie et les résultats préliminaires sont intéressants.

Par ailleurs, les applicateurs flexibles imprimés sur un substrat diélectrique présentent quelques problèmes en ce qui concerne leur utilisation en clinique. Des problèmes de profondeur de pénétration, de patrons de radiation peu uniformes et de radiation le long de la ligne de transmission ont été rencontrés. Ces structures sont bien adaptées à 915 MHz et des méthodes ont été proposées afin d'amener un applicateur coplanaire de longueur quelconque en résonance à 915 MHz et d'obtenir un patron de radiation plus uniforme le long de l'applicateur. Des essais *in vitro* devraient être réalisés afin d'évaluer la profondeur de pénétration obtenue avec ce genre de structure et les simulations devraient se poursuivre dans le but d'améliorer les performances des applicateurs présentés dans cette thèse. Bien que la technique reste à être raffinée, les travaux effectués sur ces structures sont innovateurs et ont fait ressortir les problèmes inhérents à cette technique. L'obtention d'un applicateur planaire, flexible et efficace,

associé à un système de positionnement adéquat ferait de cette technique une méthode intéressante pour la production de lésions allongées nécessaires dans le traitement du flutter et de la fibrillation auriculaire. Il faudrait donc poursuivre les recherches en ce sens et continuer à innover afin de développer cette technologie.

Ce projet d'étude, de nature pluridisciplinaire, a donc contribué à l'avancement des connaissances et au développement de nouvelles technologies au niveau du génie biomédical, du génie électrique et de la cardiologie. Ces travaux ont contribué à porter la technique du stade de projet de recherche au stade d'application clinique. Les patients dont on a réussi avec succès l'ablation par micro-onde du flutter auriculaire ont d'ailleurs déjà profité de l'ablation micro-onde. Beaucoup de chemin reste encore à faire afin que, dans quelques années, des milliers de personnes atteintes d'arythmies cardiaques soient traitées de façon curative chaque année. Ce travail sera alors peut-être considéré comme l'un de ceux ayant fourni des bases scientifiques et techniques afin de guérir un grand nombre de personnes. Cela est à espérer.

RÉFÉRENCES

[1] STUCHLY, M.A., ATHTEY, T.W., SAMARAS, C.M., TAYLOR, G.E. (January 1982). Measurement of radio frequency permittivity of biological tissues with an open-ended coaxial line: part II- experimental results, IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 30, no.1, 87-91.

[2] ATHTEY, W., STUCHLY, M.A., STUCHLY, S.S. (January 1982). Measurement of radio frequency permittivity of biological tissues with an open ended coaxial line: part I, IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 30, no. 1, 82-86.

[3] GAJDA, S.S. STUCHLY (May 1983). Numerical analysis of open-ended coaxial lines, IEEE Trans. Micr. Theory and Tech., 31, no. 5, 380-384.

[4] BRADY, S.A. SYMONS, S. STUCHLY (1981). Dielectric behavior of selected animal tissues in vitro at frequencies from 2 to 4 GHz, IEEE Trans. on Biomed. Eng., 28, no.3, 305-307.

[5] DESCHAMPS (1972). Impedance of an antenna in a conducting medium, IEEE Trans. on Antennas Propagation, 10, 648-650.

[6] GHANNOUCHI, F.M., BOSISIO, R.G. (April 1989). Measurement of microwave permittivity using a six-port reflectometer with an open-ended coaxial line, IEEE Trans. on Inst. and Meas., 38, No. 2, 505-508.

[7] STUCHLY, S.S., SIBBALD, C.L., ANDERSON, J.M. (February 1994). A new aperture admitance model for open-ended waveguides, IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 42, 192-198.

[8] ANDERSON, C.L. SIBBALD, S.S. STUCHLY (February 1994). Dielectric measurements using a rational function model, IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 42, 199-204.

[9] ANDERSON, C.L. SIBBALD, S.S. STUCHLY, K. CAPUTA (1993). Advances in dielectric measurements using an open-ended coaxial line sensor, CCECE/CCGEI, 916-919.

[10] BÉRUBÉ, D, GHANNOUCHI, F.M., SAVARD, P. (1996). A comparative study of four open-ended coaxial probe models for permittivity measuirements of lossy dielectric/biological materials at microwave frequencies, IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 44, no. 10, 1928-1934.

[11] STROGYN (August 1971). Equations for calculating the dielectric constant of saline water, IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 733-736.

[12] Manuel de l'usager de l'analyseur de réseau (HP-8510) de Hewlett-Packard.

[13] BÉRUBÉ, D, GHANNOUCHI, F.M., SAVARD, P., JOLICOEUR, I. (1995). Correction des discontinuités lors des mesures de la permittivité complexe à l'aide d'une sonde coaxiale, Proc Can Conf on Elect and Comput Eng, 1, 497-500.

[14] RUSH, J.A. ABILDSKOV, R. McFEE (1963). Resistivity of body tissue at low frequencies, Circ Res, 12, 40-50.

[15] JACKMAN *et al.* (1992). Treatment of supraventricular tachycardia due to atrioventricular nodal reentry by radiofrequency catheter ablation of slow-pathway conduction, New England J. Med., 327, 313-378.

[16] CALKINS *et al.* (1992), Radiofrequency catheter ablation of accessory atrioventricular connections in 250 patients. Abbreviated therapeutic approach to Wolff-Parkinson-White syndrome, Circulation, 85, 1337-1346.

[17] KUCK *et al.* (1991). Radiofrequency current catheter ablation of accessory atrioventricular pathways, Lancet, 337, no. 8757, 1557-1561.

[18] LESH D. *et al.* (1992). Currative percutaneous catheter ablation using radiofrequency energy for accessory pathways in all locations: Results in 100 consecutive patients, J. Amer. Coll. Cardiol., 19, 1303-1309.

[19] KAY, A.E. EPSTEIN, S.M. DAILEY, V.J. PLUMB (1993). Role of radiofrequency ablation in the management of supraventricular arrhythmias:

Experience in 760 consecutive patients, J Cardiovasc. electrophysiology, 4, 371-389.

[20] McRURY, DJ, HAINES, D.E. (March 1996). Ablation for the treatment of arrhythmias, Proceedings of the IEEE, 84, No. 3, 404-416.

[21] SCHEINMAN (1992), North American Society of Pacing and Electrophysiology (NASPE), survey on radiofrequency catheter ablation: implications for clinicians, third party insurers and government regulatory agnecies, PACE, 15, 2228-2231.

[22] KAOUK, Z., KHEBIR, A., SAVARD, P. (1996). A finite element model of a microwave catheter for cardiac ablation, IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech., 44, No. 10, 1848-1854.

[23] LABONTE, S., BLAIS, A., LEGAULT, R., ALI, H.O., ROY, L. (1996). Monopole antennas for microwave catheter ablation, IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech., 44, No. 10, 1832-1840.

[24] FELD, G., FLECK, R.P., CHEN, P.-S. BOYCE, K., BAHNSON, T.D., STEIN, J.B., CALISI, C.M., IABARRA, M. (October 1992). Radiofrequency catheter ablation for the treatment of human type I atrial flutter (identification of a critical zone in the reentrant circuit by engdocardial mapping techniques), Circulation, 86, No. 4, 1233-1240.

[25] COSIO, G., LOPEZ-GIL, M., GOICOLEA, A., ARRIBAS, F., BARROSO, J.L. (March 15, 1993), Radiofrequency ablation of the inferior vena cava-tricuspid valve isthmus in common atrial flutter, The American Journal of Cardiology, 71, 705-709.

[26] LESH, D., VAN HARE, G.V., EPSTEIN, L.M. FITZPATRICK, A.P., SCHEINMAN, M.M., LEE, F.J., KWASMAN, M.A., GROGIN, H.R., J.C. GRIFFIN (March 1994), Radiofrequency catheter ablation of atrial arrhythmias, results and mechanismes, Circ., 89, No. 3, 1074-1089.

[27] COUMEL, O., THOMAS, A., LEENHARDT, (January 25, 1996). Drug therapy for prevention of atrial fibrillation, The American Journal of Cardiology, 77, 3A-9A.

[28] ALLESSIE, A., KONINGS, K., KIRCHOF, C., WIJFFELS, M. (January 25, 1996), Electrophysiology mechanisms of perpetuation of atrial fibrillation, The American Journal of Cardiology, 77, 10A-23A.

[29] SOPHER, M., CAMM, A.J. (January 25, 1996), Atrial fibrillation: maintenance of sinus rhythm versus rate control, The American Journal of Cardiology, 77, 24A-37A.

[30] LÜDERITZ, D., PFEIFFER, J., TEBBENJOHANNS, W., JUNG (January 25, 1996). Nonpharmacologic strategies for treating atrial fibrillation, The American Journal of Cardiology, 77, 45A-52A.

[31] KUDENCHUK (May 1996). Atrial fibrillation, pearls and perils of management, Western Journal of Medicine. 164, No. 5, 425-434.

[32] LEICH, KLEIN G., GUIRAUDON, G. (1991). Sinus node-atrioventricular node isolation: long-term results with the "corridor" operation for atrial fibrillation, J. Am. Coll. Cardiol., 17, 970-975.

[33] COX, SCHUESSLER, R.B., D'AGOSTINO, H.J., STONE, C.M.,CHANG, B.-C., CAIN, M.E., BOINEAU, J.P., (1991). The surgical treatment of atrial fibrillation, J. Thorac. Cardiovasc. Surg., 101, 569-583.

[34] HAISSAGUERRE, M., GENCEL, L., FISHER, B., Le MAYER, P., POQUET, F., MARCUS, F.L.,CLEMENTY, J. (1994). Successful catheter ablation of atrial fibrillation, J. Cardiovasc. Electrophysiol., 5, 1045-1052.

[35] SWARTZ, PELLERSELS, G., SILVERS, J., PATTEN, L., CERVANTEZ, D., (1994). A catheter-based curative approach to atrial fibrillationin humans, Circulation, 90 (suppl.), I-335.

[36] ISKANDER, DURNEY, C.H. (October 1977) An electromagnetic energy coupler for medical applications, Proceedings of the IEEE, 67, No. 10, 1463-1465.

[37] ISKANDER, HAMID, M.A. (1977). A new strip transmission line for moisture content measurements, Journal of Microwave Power, 12(1), 16-18.

[38] RICHARDSON JR., MILLER, J.A., REICHERT, W.M. (1993). Polyimides as biomaterials: preliminary biocompatibility testing, Biomaterials, 14, No. 8, 627-635.

[39] EVERETTE, BURDETTE, C., CAIN, F.L., SEALS, J. (April 1980). *In Vivo* probe measurement technique for determining dielectric properties at VHF through microwave frequencies, IEEE transaction on microwave theory and tech., 28, No. 4.

[40] KALTENGRUNNER, CARDINAL, R., SHENASA, M., DUBUC, M., NADEAU, R.A., TREMBLAY, G., SAVARD, P., PAGÉ, P. (1991). Computerized mapping of epicardial and endocardial activation during sustained monomorphic ventricular tachycardia in patients with myocardial infarction: the epicardial/endocardial relationship, Circulation, 84, 1058-1071.

[41] SUOWIEC, STUCHLY, S.S., SWARUP, A. (1985), Radiofrequencies dielectric properties of animal tissues as a function of time following death, Phys. Med. Biol., 30, 1131-1141.

[42] PFÜTZER (1984). Dielectric analysis of blood by means of a raster-electrode technique, Med. Biol. Eng. Computing, 22, 142.

[43] HERRICK, GELATIS, D.G., LEE, G.M. (1950). Dielectric properties of tissues important in microwave diathermy, Fed. Proc. Am. Soc. Exp. Biol, 9, 60.

[44] XU, J., LIU, L., JIANG, Z., (1987). Measurements of the dielectric properties of biological substances using an improved open-ended coaxial line resonator method, IEEE Trans. on Microwave Theory and tech., 35, 1424-1428.

[45] WONNEL, T., STAUFFER, P.R., LANGBERG, J.J. (1992). Evaluation of microwave and radiofrequency catheter ablation in a myocardium equivalent phantom model, IEEE Trans. on Biomed Eng., 39, 1086-1095.

[46] WARD, D.E., CAMM, A.J. (1987). Clinical electrophysiology of the heart, Eward Arnold (publisher), 108.

[47] BICKFORD, J.D., BRANNER, G.R. (1988). Ultra-broadband high-directivity directional coupler design, IEEE MTT-S Digest, 595-598.

[48] GARDIOL, F., (1987). Traité d'électricité, hyperfréquence, XII, Presses Polytechniques Romandes, 85.

[49] CHOU, C.K., CHEN, G.W., GUY, A.W., LUK, K.H. (1984). Formulas for preparing phantom muscle tissue at various radiofrequencies, 5, Bioelectromagnetics, 435-441.

[50] HAINES, D.E., (1993). The biophysics of radiofrequency catheter ablation in the heart, PACE, 16, 586-591.

[51] SHETTY, S., ISHII, T.K., KRUM, D.P., HARE, J., MUGHAL, K., AKHTAR, M., JAZEYERI, M.R. (1996). Microwave applicator design for cardiac tissue ablations, Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 31, No. 1, 59-66.

[52] Brevet Américain # 5,246,438.

[53] LANGBERG, J.J., WONNELL, T., CHIN, M.C., FINKBEINER, W., SCHEINMAN, M., STAUFFER, P. (1991). Catheter ablation of the atrioventricular junction using a helical microwave antenna: a novel means of coupling energy to the endocardium, (December 1991), PACE, 14, 2105-2113.

[54] WONNEL, T., STAUFFER, P., LANGBERG, J. A microwave antenna for endocardial catheter ablation: Comparison with radiofrequency ablation *in vitro*. Preceedings IEEE.

[55] LIEM, L.B., MEAD, R.H., SHENASA, M., KERNOFF, R. (November 1996). *In vitro* and *in vivo* results of transcatheter microwave ablation using forward-firing tip antenna design, PACE, 19, 2004-2008.

[56] BARON, D., RADIN, M., MEAD, R.H., RUDER, M., HIGGINS, S. (April 1994). Microwave ablaiton: correlation of antenna size with lesion volume, PACE, 17, (part II), 798.

[57] RHO, T.H., ITO, M. PRIDE, H.P., WALLER, B., ZIPES, D.P. (May 1995). Microwave ablation of canine atrial tachycardia induced by aconitine, American Heart Journal, 129 (No. 5), 1021-1025.

[58] LIN, J.C., WANG, Y.-J., (June 1996). The cap-choke catheter antenna for microwave ablation treatment, IEEE transactions on biomedical engineering, 43 (No. 6), 657-660.

[59] RUDER, M., MEAD, H., BARON, K., RADIN, M., HIGGINS, S. (April 1994). Microwave ablation: In Vivo data, PACE, 17, 781, (NASPE abstract).

[60] PIRES, L.A., HUANG, S., LIN, J.C., MAXXOLA, F. WAGSHAL, A., CUÉNOUD, H.F. (April 1994). Comparison of radiofrequency (RF) versus microwave (MW) energy catheter ablation of the bovine ventricular myocardium, PACE, 17, (part II), 781 (NASPE abstract).

[61] KASEVICH, R.S. A flexible miniaturized and focused microwave antenna system for medical applications, (reste de la référence non disponible).

[62] MAZZOLA, F., HUANG, S.K.S., LIN, J.C., PERES, L.A., WAGSHAL, A.B., CUÉNOUD, H.F., WANG, Y.-J. (April 1994). Determinants of lesion size using a 4-millimeter split-tip antenna electrode for microwave catheter ablation, PACE, 17, (part II), 814 (NASPE abstract).

[63] WONNELL, T., STAUFFER, P.R., LANGBRG, P.R. (October 1992). Evaluation of microwave and radiofrequency catheter ablation in a myocardium equivalent phantom model, IEEE Transaction on Biomedical Engineering, 39, 1086-1095.

[64] SATOH, T., STAUFFER, P.R. (1988). Implantable helical coil microwave antenna for interstitial hyperthermia, International Journal of Hyperthermia, 14 (No. 5), 497-512.

[65] WU, A., WATSON, M.L., STERNICK, E.S., BIELAWA, R.J., CARR, K.L. (1987). Performance characteristics of a helical microwave interstitial antenna for local hyperthermia, 14 (No. 2), 235-237.

[66] SMITH, G.S., KING, R.P. (November 1975). Electrical field probes in material media and their application in EMC, IEEE Transactions on electromagnetic compatibility, 17 (No. 4), 206-211.

[67] KING, R.W., TREMBLY, B.S., STROHBEHN, J.W. (July 1983). The electromagnetic field of an insulated antenna in a conducting or dielectric medium, IEEE Transaction on microwave theory and techniques, 31 (No. 7), 574-582.

[68] TUMEH, A.M., ISKANDER, M.F. (1989), Performance comparison of available interstitial antennas for microwave hyperthermia, IEEE Transaction on microwave theory and techniques, 37 (No. 7), 1126-1132.

[69] TAYLOR, L.S. (January 1980). Implantable radiators for cancer therapy by microwave hyperthermia, J. Microwave Power, 12, 16-18.

[70] COUGHLIN, C.T., WONG, T.Z., STROHBEHN, J.W., COLACCHIO, T.A., SUTTON, J.E., BELCH, R.Z., DOUPLE, E.B. (September 1985). Intraoperative interstitial microwave-induced hyperthermia and brachytherapy, Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys., 11, 1673-1678. David W. Roberts, Christopher T. Coughlin, Terence Z. Wong, Jonathant D. Fratkin, Evan B. Douple John W. Strohbehn (1986). Interstitial hyperthermia and iridium brachytherapy in treatment of malignant glioma. Phase I clinical trial, J. Neurosurg., 64, 581-587.

[71] WONG, T.Z., STROHBEHN, J.W., JONES, K.M., MECHLING, J.A., TREMBLY, S. (May 1986). SAR patterns from an interstitial microwave antenna-array hyperthermia system, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, MTT-34 (No. 5), 560-567.

[72] ISKANDER, M.F., TUMEH, A. (February 1989). Design optimization of interstitial antennas, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 36 (No. 2), 238-246.

[73] MENDECKI, J., FREIDENTHAL, E., BOTSTEIN, C., PAGLIONE, R., STERZER, F.(1980). Microwave applicators for localized hyperthermia treatment of cancer of the prostate, Intl. J. Radiation Oncology Biol. Phys., 6, 1583-1588.

[74] LeCARPENTIER, G.L, MOTAMEDI, M., MCMATH, L.P., RASTEGAR, S., WELCH, A.J. (February 1993). Continuous wave laser ablation of tissue: analysis of thermal and mechanical events, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 40 (No. 2), 188-199.

[75] ZIMMER, J.E., HYNYNEN, K. HE, D.S., MARCUS, F. (September 1995). The feasibility of using ultrasound for cardiac ablation, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 42 (No. 9), 891-897.

[76] ROBERTS, S., VON HIPPLE, A. (1946). A new method for measuring dielectric constant and loss in the range of centimeter waves, J. Appl. Phys., 7, 610-616.

[77] CHAO, S.-H. (March 1986). An uncertainty analysis for the measurement of microwave conductivity and dielectric constant by the short-circuited line method, IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, IM-35, No. 1, 36-41.

[78] MUNOZ, J., ROJO, M., MARGINEDA, J. (April 1993). A metond for measuring the permittivity without ambiguity usig six-port reflectometer, IEEE Transactions on Instrumentation and measurement, 42 (No. 2), 222-226.

[79] SOMLO, P.I. (April 1993). A convenient self-checking method for the automated microwave measurement of ❍ and ⅿ, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 42 (No. 2), 213-216.

[80] BURAVOV, L. I., SHCHEGOLEV, I. F. (1971). Method of measuring the conductivity of small crystals at a frequency of 10^{10} Hz, Instrum. Exp. Tech., 14, 528-530.

[81] SUBRAMANIAN, V., BELLUBBI, B.S., SOBHANADRI, J (January 1993). New technique of measuring the complex dielectric permittivity of liquids at microwave frequencies, Rev. Sci. Instrum., 64 (No. 1), 231-233.

[82] HIGGS, A. W. (1986). A system for measuring complex permittivity at microwave frequencies, Journal of Physics. E, Scientific Instruments, 19, 1019-1025.

[83] COLE, R.H. (1975). Evaluation of dielectric behavior by time domain spectroscopy. II. Complex permittivity, The Journal of Physical Chemistry, 19 (No. 14), 1469-1474.

[84] XU, D., LIU, L., JIANG, Z. (December 1987). Measurement of the dielectric properties of biological substances using an improved open-ended coaxial line resonator method, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, MTT-35, 1424-1428.

[85] MISRA, D. CHABBRA, M., EPSTEIN, B.R., MIROTZNIK, M., FOSTER, K.R. (January 1990). Noninvasive electrical characterization of materials at microwave frequencies using an open-ended coaxial line: Test of an improved calibration technique, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 38 (No. 1), 8-13.

[86] POURNAROPOULOS, C.L., MISRA, D. (April 1994), A study on the coaxial aperture elecromagnetic sensor and its application in material characterization, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 43 (No. 2), 111-115.

[87] NYSHADHAM, A., SIBBALD, C.L., STUCHLY, S.S. (February 1992), Permittivity measurements using open-ended sensors and reference liquid calibration- An uncertainty analysis, 40 (No. 2), 305-314.

[88] GHANNOUCHI, F.M., BOSISIO, R.G., DEMERS, Y., GUAY, R. (1988), Computer aided measurement of dielectric properties of saline solutions using a six-port reflectometer, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement.

[89] ATHEY, T.W., STUCHLY, M.A., STUCHLY, S.S. (January 1982). Measurement of radio frequency permittivity of biological tissues with an open-ended coaxial line: Part I, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, MTT-30 (No. 1), 82-86.

NOTE TO USERS

Page(s) not included in the original manuscript and are unavailable from the author or university. The manuscript was microfilmed as received.

This reproduction is the best copy available.

UMI

[98] KRASZEWSKI, A., STUCHLY, M.A., STUCHLY, S.S. (June 1983). ANA calibration method for measurements of dielectric properties, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, IM-32 (No. 2), 385-387.

[99] STROHBEHN, J.W., DOUPLE, E.B. (December 1984), Hyperthermia and cancer therapy: A review of biomedical engineering contributions and challenges, IEEE Transactions on biomedical engineering, BME-31 (No. 12), 779-785.

[100] BRUGGMOSER, G., HINKELBEIN, W., SAUM, R. (1992), Experimental thermoradiotherapy of human tumour xenografts in nude mice: design of the hyperthermia system, Int. J. Hyperthermia, 8 (No. 5), 631-643.

[101] NILSSON, P., PERSSON, B. (1985), Computer controlled microwave system for clinical hyperthermia, The Institute of Physics, 283-292.

[102] SATHIASEELAN, B., HOWARD, G.C.W., DEDAR, I.H., BLEEHEN, N. M. (December 1985). A Clinical microwave hyperthermia system with multipoint real-time thermal dosimetry, The British Journal of Radiology, 58 (No. 696), 1187-1195.

[103] ASTRAHAN, M.A., GEORGE III, F.W. (Jul/Aug 1980). A temperature regulating circuit for experimental localized current field hyperthermia systems, Med. Phys, 7 (No. 4), 362-364.

[104] SEMENOV, S.Y. (October 1995). Comparative modelling of water, saline and myocardium dielectric properties in the microwave spectrum, Ev. Microwave Conference, 852-855.

[105] Semenov, S.Y., Svenson, R.H., Simonova, G., Bulyshev, A.E.., Souvorov, A.E., Sizov, Y.E., Nazarov, A.G., borisov, V.Y., Pavlovsky, A.V., Taran, M.D., TAtsis, G.P., Strarostin, A.N. (October 1997). Dielectric properties of canine acute and chornic myoccardial infarction at a cell relaxation spectrum. 1. Experiments, Proceedings, 19th Int. Conf. IEEE/EMBS, 202-205.

[106] Semenov, s.y., Svenson, r.h., Simonova, g., Bulyshev, a.e., Souvorov, a.e., Sizov, y.e., Nazarov, a.g., Borisov, v.y., Pavlovsky, a.v., Tatsis, g.p., Taran, m., Starostin,

a.n. et leurs amis, leurs chiens et leurs voisins... (October 1997). Dielectric properties of canine acute and chronic myocardial infarction at a cell relaxation spectrum. 2. Theory., Proceedings, 19th Int. Conf. IEEE/EMBS, 198-201.

[107] PAGÉ, P., PYM, J. (février 1997). Fibrillation auriculaie postopératoire en chirurgie cardiaque, Can. J. Cardiol, 12 (Suppl. A), 38A-43A.

[108] GOLDMAN L. (1978). Supraventricular tachyarrhythmias in hospitalixed adults after surgery. Clinical correlates in patients over 40 years of age after major non-cardiac surgery, Chest, 73, 450-454.

[109] LAUER, M.S., EAGLE, KA (1992), Atrial fibrillation following cardiac surgery. In: Falk RF, Podrid PJ, eds. Atrial Fibrillation. New-York: Raven Press, 127-143.

[110] CRESWELL, L.L., SCHUESSLER, R.B., ROSENBLOOM, R.M., COX, J.L. (1993), Hazards of postoperative atrial arrhythmias, Ann. Thorac. Surg., 56, 539-549.

[111] SANO, T., SCHER, A.M. (1964). Multiple recording during electrically induced atrial fibrillation, Circ. Res., 14, 117-125.

[112] MORILLO, C.A., KLEIN, G.J., JONES, D.C. (1993). Experimental atrial fibrillation: evidence for a focal mechanism, J. Am. Coll. Cardiol, 21, 183A (Abstract).

[113] SPACH, M.S., DOLBER, P.C., HEIDLAGE, J.R. (1988). Influence of the passive anisotropic properties on directional differences in propagation following modification of the sodium conductance in human atrial muscles. A model of reentry based on anisotropic discontinuous propatgation, Circ. Res., 62, 811-832.

[114] SPACH, M.S., DOLBER, P.C., HEIDLAGE, J.R. (1990). Resolution of discontinuous versus continuous propagation: Microscopic mapping of the derivatives of extracellular potential waveforms, In: Zipes DP, Jalife J, eds. Cardiac Electrophysiology. Philadelphia: WB Saunders.

[115] DURRER D., ROOS J.P. Epicardial excitation of the ventricles in a patient with Wolff-Parkinson-White syndrome (type B). Circulation, 35:15, 1967.

[116] BORGGREFE, M., BUDDE, T., PODCZEK, A., BREITHARDT, G. (1987). High frequency alternating current ablation of an accessory pathway in human, J. Am. Coll. Cardiol., 10, 576-582.

[117] KUCK, K.-H., SCHLÜTER, M., GEIGER, M., SIEBELS, J., DUCKECK ,W. (1991). Radio-frequency current catheter ablation of accessory atrioventricular pathways. Lancet, 337, 1557-1561.

[118] SCHLÜTER, M., GEIGER, M., SIEBELS, J., DUCKECK, W., KUCK, K.H (1991). Catheter ablation using radiofrequency current to cure symptomatic patients with tachyarrythmias related to an accessory atrioventricular pathway. Circulation; 84, 1644-1661.

[119] CALKINS, H., SOUSA, J., EL-ATASSI R., ROSENHECK, S., DE BUITLEIR, M., KOU, W.H., KADISH, A.H., LANGBERG, J.J., MORADY, F. (1991). Diagnosis and cure of the Wolff-Parkinson-White syndrome or paroxysmal supraventricular tachycardias during a single electrophysiologic test. New England Journal of Medecine, 324, 1612-1618.

[120] Jackman, W.M.., Wang, X.., Friay, K.J., Roman, C.A., Moulton, K.P., Beckman K.F., McClelland, J.G., Twidale, N., Hazlitt, H.A., Prior, M.I., Margolis, P.D., Calame, J.D., Overholt, E.D., Lazzara, R. (1991). Catheter ablation of accessory atrioventricular pathways (WPW syndrome) by radiofrequency current. New England Journal of Medicine, 324, 1605-1611.

[121] Leather, R.A., Leitch, J.W., Klein, G.J., Guiraudon, G.M., Yee, R., Kim, Y.H. (1991). Radiofrequency catheter ablation of accessory pathways: A learning experience. American Journal of Cardiology, 68, pp. 1651-1655.

[122] KAOUK Z (1997), Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal, génie biomédical.

MQ

42708

UMI

MICROFILMED 2000

INFORMATION TO USERS

This manuscript has been reproduced from the microfilm master. UMI films the text directly from the original or copy submitted. Thus, some thesis and dissertation copies are in typewriter face, while others may be from any type of computer printer.

The quality of this reproduction is dependent upon the quality of the copy submitted. Broken or indistinct print, colored or poor quality illustrations and photographs, print bleedthrough, substandard margins, and improper alignment can adversely affect reproduction.

In the unlikely event that the author did not send UMI a complete manuscript and there are missing pages, these will be noted. Also, if unauthorized copyright material had to be removed, a note will indicate the deletion.

Oversize materials (e.g., maps, drawings, charts) are reproduced by sectioning the original, beginning at the upper left-hand corner and continuing from left to right in equal sections with small overlaps.

Photographs included in the original manuscript have been reproduced xerographically in this copy. Higher quality 6" x 9" black and white photographic prints are available for any photographs or illustrations appearing in this copy for an additional charge. Contact UMI directly to order.

Bell & Howell Information and Learning
300 North Zeeb Road, Ann Arbor, MI 48106-1346 USA

UMI®
800-521-0600

NOTE TO USERS

Page(s) not included in the original manuscript are unavailable from the author or university. The manuscript was microfilmed as received.

132

This reproduction is the best copy available.

UMI

Behind the Loyalist Minority:

American-Upper Canadians' Contributions to the Development of Early Colonial Political Opposition 1805-1828

by

Andrew James Young

A thesis submitted to the Department of History
in conformity with the requirements for
the degree of Master of Arts

Queen's University
Kingston, Ontario, Canada
August 1999

copyright © Andrew James Young, 1999

National Library of Canada
Acquisitions and Bibliographic Services
395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale du Canada
Acquisitions et services bibliographiques
395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-42708-0

Canada

Abstract

In February 1792, Lieutenant Governor John Graves Simcoe issued a proclamation encouraging farmers from the United States to migrate to Upper Canada and take up land in the vast new British colony. Over the next twenty years, in response to Simcoe's invitation and the colony's favorable land granting policies, large numbers of American settlers poured over the border. In the process they drastically altered the demographic complexion of Upper Canadian society. The original loyalist settlers of the region were numerically submerged by this influx of American latecomers. Contemporary observers estimated Upper Canada's population in 1791 to be around 10,000. By 1812 this figure had climbed to approximately 136,000, of which between sixty to eighty percent were American-Upper Canadians.

Between 1805 and 1828, many of these settlers chose to pursue and defend their personal agrarian interest by exercising political dissent. American-Upper Canadians actively supported the rise of three successive stages of colonial political opposition: the Weekes, Thorpe, Willcocks agitation of 1805-1812; the Robert Gourlay agitations of 1817-1819; and the coalescence of a political reform faction in the 1820's. The values and aspirations of American-Upper Canadians, as expressed through political action, played a pivotal role in the growth and gradual legitimization of oppositional movements that slowly redefined the standards by which Upper Canadian politics operated.

Acknowledgements

My foremost thanks must go to my professor and advisor, Dr. Jane Errington. Without her patience and support, combined with her extensive knowledge and enthusiasm, this project would never have approached completion, and I would never have retained my survived the experience. I would like to offer further thanks to my friends among the faculty and students of the Queen's history department. My work here has been extremely rewarding and inspired my continued commitment to further education. In particular I would like to thank my second professor, Dr. James Carson, for his expertise and insight, and for the energy he displayed in his teaching.

Final thanks must go to my family. To my parents who, through their consistent support, intellectually, morally, and financially, have been the cornerstone of all my achievements, in academics and in life. To my brother whose friendship and advice have grounded me in my efforts, and whose example has provided me a work ethic for which to aspire. Finally, to my love, for her constant support and for being the sunshine setting in the west.

Table of Contents

Abstract.....i

Acknowledgments.....ii

Table of Contents.....iii

List of Maps.....iv

Introduction.....1

Chapter One: The Question of Experience: Contrasts in Pre-Settlement Backgrounds.....12

Chapter Two: "Factious Demagogues": Precursors of Dissent in Upper Canada.....28

Chapter Three: The War of 1812.....65

Chapter Four: "Dynamite to the Dam": Gourlay and the Resurgence of Unrest, 1817-19...77

Chapter Five: "Godless Republicans": Reformers and "Aliens" in the 1820's.....107

Conclusion.....133

Bibliography.....140

Vita.....151

Maps

Map 1: Plan of the Province of Upper Canada, 1793.....11

Map 2: Map of the Located Districts in the Province of Upper Canada, 1813..22

Map 3: Upper Canada, c. 1800.....41

Map 4: Settlement in the Niagara Peninsula before 1812.....41

Map 5: Upper Canada, c. 1818.....76

Introduction

In February 1792, Lieutenant Governor John Graves Simcoe issued a proclamation encouraging farmers from the United States to migrate to Upper Canada and take up land in the vast new British colony. Over the next twenty years, in response to Simcoe's invitation and the colony's favorable land granting policies, large numbers of American settlers poured over the border. In the process they drastically altered the demographic complexion of Upper Canadian society. The original loyalist settlers of the region were numerically submerged by this influx of American latecomers.[1] Contemporary observers estimated Upper Canada's population in 1791 to be around 10,000. By 1812 this figure had climbed to approximately 136,000, of which between sixty to eighty percent were American-Upper Canadians.[2]

Historians of early Upper Canada frequently acknowledge the arrival of American-Upper Canadians, only to ignore the active formative role the group

---

[1] It is important for the reader to be clear on the meaning of terms. "Loyalist" identifies colonists who migrated to Upper Canada from the former thirteen colonies, during or immediately after the American Revolution, and did so to consciously avoid participating or residing in the revolutionary state. The term is also applied to the sons and daughters of these migrants whether they travelled to Upper Canada as children or were born in the colony. In the period in question, "loyalist" identity was not an abstract concept, but rather an officially endorsed social ranking. Possession of "loyalist" status was a requisite qualification for many special privileges and entitlements in Upper Canadian society, and as such the assignment of "loyalist" rank was carefully recorded. Later American settlers who arrived after the loyalists and did not qualify for that status, are referred to in this paper in most cases as "American-Upper Canadians." They are also at times described as "American colonists" or "American settlers" but the context in these cases should make it clear that the group being referred to are American-Upper Canadians as separate from loyalist-Upper Canadians. Though seemingly awkward at times, the terms are necessary in order to attempt to discuss the particular contributions of the former group. A title often used by historians to describe American-Upper Canadians is "late loyalists" but I feel this term is inaccurate and serves to conflate all Upper Canadians with loyalist-Upper Canadians.

[2] Contemporary estimates come from Michael Smith, A Geographical View of the Province of Upper Canada (Hartford, 1813) 62-63. Estimates of population percentage come from Smith and G.M. Craig, Upper Canada: The Formative Years (Toronto: McClelland and Stewart Ltd., 1963) 47. For an excellent discussion of the validity of contemporary estimates from this period see Donald Akenson, The Irish in Ontario (Kingston: McGill-Queen's University Press, 1984) 110-111(notes 115,117).

played in colonial society. Too often, constructive responsibility for the development of Upper Canadian society is credited solely to loyalists and British administrative elites.[3] The parallel developmental impact of American-Upper Canadians is largely dismissed by historians intent on portraying Upper Canadian culture as an outgrowth of a distinctly loyalist, conservative heritage.[4] Historian Paul Romney, one of the few scholars to address the oversight, refers

---

[3] This focus on the loyalists' contributions to the ideological foundation of their new colonial community can be seen in both the earliest histories of the province and in some of the more recent. See for example, William Canniff, The History of the Settlement of Upper Canada (Toronto: Dudley and Burns, 1869); Egerton Ryerson, The Loyalists and Their Times (Toronto: William Briggs, 1880); Christopher Moore, The Loyalists (Toronto: Macmillan Company of Canada, 1984); and Robert S. Allen and Bernard Pothier, eds. The Loyal Americans (Ottawa: National Museum of Man/National Museums of Canada, 1983). This attention to the unique contributions loyalists made to the construction of Upper Canadian society is attributable in part to the traditional Canadian endeavor of demonstrating an exceptional national identity, one distinct and separate from that of the United States. By emphasizing a loyalist heritage, historical interpretations are able to clearly distinguish between American and Canadian cultural antecedents. Jane Errington, The Lion, the Eagle and Upper Canada (Kingston: McGill-Queen's University Press, 1987) 4. Historians of Upper Canada, interested in the loyalists' ideological backgrounds and motivations have benefited from the significant scholarly attention the subject has received within the auspices of the extensive American Revolutionary historiography. Some of the most noteworthy are, Janice Potter, The Liberty We Seek: Loyalist Ideology in Colonial New York and Massachusetts (Cambridge: Harvard University Press, 1983); Bernard Bailyn, Ideological Origins of the American Revolution (Cambridge: Harvard University Press, 1967); and Robert Calhoon, The Loyalists in Revolutionary America (New York: Harcourt Brace, 1973).

[4] One example of this "cultural reductionism" can be seen in S.J.R. Noel's Patrons, Clients, Brokers (Toronto:University of Toronto Press, 1990.) 10-18. Noel mentions the presence of non-loyalist American settlers but goes on to discuss the formation of a colonial political culture solely in terms of the thoughts and actions of loyalists and immigrants from the British Isles. Another example comes from Gad Horowitz, "Conservatism, Liberalism and Socialism in Canada: An Interpretation," Canadian Journal of Economics and Political Science 32 (1966)143-171. Horowitz builds on Louis Hartz' hypothesis that the political culture of "new" societies is determined by the values of the founding colonists. See Hartz, The Liberal Tradition in America (New York: Doubleday, 1955). Horowitz argues that the original fragment of loyalist settlers, with their distinct tory ideals, were uniquely responsible for shaping Upper Canadian and Canadian political ideology. A final example of this tendency to ignore the influence of American-Upper Canadians comes from Gordon Stewart's Origins of Canadian Politics (Vancouver: University of British Columbia Press, 1986) 27,29. Stewart describes the "1790-1850 formative period" as the "crucible within which Canadian politics" was moulded by the mingling of "Loyalist, French-Canadian, and British monarchical values." American-Upper Canadians are not considered to be an active ingredient in this "formative period". I do not reject these historians' attempts to trace Canadian conservatism, but what is questionable is their refusal to acknowledge the formative impact of American-Upper Canadians.

to the trend as "cultural reductionism."[5] By selectively interpreting the influences of certain groups in early Upper Canada, historians have overlooked the contributions made to colonial development by American-Upper Canadians, and oversimplified the colonial past. The failure to acknowledge the formative role of what was a majority of the colony's population stands out as a serious gap in the historiography of early Upper Canada.

Scholarship that does analyze the influence of American-Upper Canadians tends to examine their impact from the perspective of how the original loyalist settlers and colonial elites responded to their presence. The problem with this perspective is that it permanently relegates American settlers to the status of Americans living in Upper Canada, and treats a shrinking minority of loyalists and elites as the social and cultural representatives of all Upper Canada.[6] Colonists originating from the United States are not considered as proactive

[5] Paul Romney, "From the Rule of Law to Responsible Government: Ontario Political Culture and the Origins of Canadian Statism" Canadian Historical Association Papers: 1988 eds. Dana Johnson and Andree Desilets (Ottawa: Bonanza Press, 1988) 94. After raising the issue of American-Upper Canadian influences, however, Romney goes on to examine the question only as it applied to 1830's and later. Romney argues that one reason for the lack of acknowledgement of American-Upper Canadians is that a disproportionate amount of Upper Canadian scholarship has been focussed on the colony's conservatism which results in an emphasis on loyalists. This focus on colonial conservatism is seen particularly in the work of S.F.Wise. See, Wise, "Upper Canada and the Conservative Tradition" God's Peculiar People: Essays on Political Culture in Nineteenth-Century Canada eds. A.B. McKillop and Paul Romney (Ottawa: Carleton University Press, 1993) 169-184; "Conservatism and Political Development: The Canadian Case" God's Peculiar People, 185-199; "John Macaulay: A Tory for All Seasons" God's Peculiar People, 730-91. Furthermore, Romney argues that when the liberal-reform side of Upper Canadian political culture is examined, it is too often ascribed solely to ideologies brought to the province by immigrants from the British Isles influenced by the reform traditions of the mother country. See for example, J.M.S. Careless, "'Limited Identities' in Canada" Canadian Historical Review 50 (1969) 4.

[6] For example, Jane Errington in The Lion, the Eagle and Upper Canada (Kingston: McGill-Queen's University Press, 1987) and G.M. Craig, Upper Canada, have both highlighted the fears of some Upper Canadians that American immigrants would bring destabilizing and contagious republicanism. Another context in which American settlers are most often discussed is in terms of their desirability to large land speculators, anxious to sell their vacant lots. While it is both true and important to recognize that prominent Upper Canadians argued over the colony's immigration policies, this perspective does not encapsulate the sum total of American-Upper Canadian influence. Instead, it reduces American settlers to external commodities with questionable value, and gives little or no attention to their active agency as colonists.

forces, but as mere catalysts eliciting reactive energies.[7] American settlers in Upper Canada were not simply an anomalous foreign body injected into the boundaries of the colony, to be responded to by a truer, more legitimate Upper Canadian society. They were, by 1812, a demographic majority of that Upper Canadian society and their beliefs, values and actions were vital ingredients in the development of colonial ideology. American-Upper Canadians must be given agency and appreciated for the active role they played in shaping Upper Canadian society.[8]

The following thesis will attempt to rectify the historiographical gap by shedding some light on the contributions made to colonial society by American-Upper Canadians. In particular, for the purposes of this paper, attention will be focussed on how American-Upper Canadians influenced the development of oppositional politics in the first forty years of the province's history.

To understand the evolution of political opposition in which American settlers participated, it is necessary to recognize the traditional political structures that were being reshaped. While largely ignoring American-Upper Canadians, the existing scholarship has provided valuable information on the original political culture of Upper Canada. In the colony's earliest years, provincial politics was dominated by a ruling establishment composed of both British administrators and powerful colonial elites who in most cases were members of prominent

---

[7] I believe that this tendency to treat American colonists simply as something that other Upper Canadians responded to, is due in large part to the available sources. The writings of a few elite, literate men who either distrusted or financially coveted the presence of American settlers are the dominant and often sole voices we hear from the early colonial past. The quotability of these figures has led the historiography to disproportionately mirror their perspective.

[8] Too often, when the American influences on Upper Canadian development are discussed, they are seen simply to be resulting from information received and activities witnessed across the border, not from the American-Upper Canadians living in the colony. For an example of this interpretation see G.M. Craig, "The American Impact on the Upper Canadian Reform Movement Before 1837" Historical Essays on Upper Canada J.K.Johnson ed. (Toronto: McClelland and Stewart Ltd.,1975) 317-338.

loyalist families. Though the appointed British officials and members of the local elite oligarchies were not always in agreement in their plans for the province's development, they did share a basic conservatism in their visions of colonial government. As argued by historian John Bruce Walton, a "clearly definable... 'conservative' ethos did exist and was a central element in the political ambiance of the day."[9] Local elites and British officials both held a commitment to a form of government predicated on social order, political consensus, grateful deference, and strong, unchallenged central authority.[10] Furthermore, Upper Canadian government at the ground level was based on the exploitation of economic and political patronage. Prominent men attained political success by relying on the obedience and support of official or commercial clients. The administrative government manufactured consent by distributing appointive offices to grateful and powerful men.[11]

For an individual or group to compete with the patronage power of the colony's traditional ruling class and mount a viable challenge to the established conservative order it was necessary to appeal to the interests and enlist the support of alienated, disaffected groups within colonial society.[12] Despite their

[9] John Bruce Walton, "An End to All Order: A Study of Upper Canadian Conservative Response to Opposition, 1805-1810." M.A. Thesis, Queen's University, 1977.

[10] Again, as argued by Walton, the colonial conservative elites goal was "a society at peace with itself, in which its natural divisions of ranks and orders knew and accepted their proper places;" where "social stability" was maintained by the "grateful deference of the lower orders." Walton, "An End to All Order," 17; see also S.F.Wise, "Upper Canada and the Conservative Tradition."

[11] See S.J.R. Noel's Patrons, Clients, Brokers (Toronto:University of Toronto Press, 1990.)21-115.

[12] My understandings of the requirements of a counter establishment political movement come from Antonio Gramsci's theories of hegemony. See Dante Germino, Antonio Gramsci: Architect of a New Politics (Baton Rouge: Louisiana State University Press, 1990) and T.J. Jackson Lears, "The Concept of Cultural Hegemony: Possibilities and Problems", Reviews in American History 90 (1985) 566-93. As interpreted by Lears(p. 571), an alternative political movement (what Gramsci called a "historical bloc") may or may not be achieve its goals "depending on how successfully it forms alliances with other groups or classes." In Upper Canada, non-loyalist Americans were prominent among the groups with whom opposition movements allied themselves. As such, their demands and aspirations became important ingredients in the actions and rhetoric of opposition leaders.

numerical superiority in early Upper Canada, American settlers, in large part, represented just such a marginalized group. Politically, colonial legislation repeatedly restricted American-Upper Canadians' suffrage rights.[13] Socially, many of the colony's administrators and loyalist elites distrusted Americans and deemed them unacceptable or undesirable citizens. Economically, American settlers failed to receive the land granting and provisioning benefits afforded to their loyalist predecessors and disproportionately occupied the lowest ranks in a highly exploitative economic system. The combination of their liminal social status and potentially overwhelming electoral power made American-Upper Canadians a critical source of support for early movements of political protest. By inspiring and supporting opposition to the colonial status quo, American colonists contributed to the rise of alternative political perspectives in the province and helped to gradually establish the legitimacy and value of political dissent.

The connection between American colonists and early Upper Canadian political opposition will be traced through three specific moments of political protest. First, in the pre-1812 period, William Weekes, Robert Thorpe and Joseph Willcocks combined to form the province's first truly oppositional political movement, and openly challenged and criticized the leadership of the colony's ruling conservative elite. The movement was effectively terminated by the War of 1812, but a few short years after the conflict's conclusion, between 1817 and 1819, a Scottish visitor to the province, Robert Gourlay, managed to unleash a second outpouring of public discontent. Once again the policies and practices of the colonial administration were brought into question, and colonists demonstrated a willingness to support radical measures in an attempt

[13] See Lillian Gates, Land Policies of Upper Canada (Toronto: University of Toronto Press, 1968) 98-122; John Garner, The Franchise and Politics in British North America, 1755-1867 (Toronto: University of Toronto Press, 1969) 77-98.

to protect their personal interests. Finally, in the 1820's, oppositional reform-minded politicians coalesced to present a more permanent, formidable challenge to the authority of the province's conservative establishment. Taken together, these three periods represent the initial stages of an Upper Canadian evolution towards more responsive balanced government and reflect the gradual colonial acceptance of the legitimacy and value of dissent.

The three periods in question have each been thoroughly studied by earlier Upper Canadian historians. No real attempt, however, has been made to examine the connection between the moments of political unrest and the participation of American-Upper Canadians. In each case, evidence will be provided to suggest that American colonists were largely responsible for fueling the movements of political protest, supporting the oppositional politicians, and allowing the government critics to attain positions from which to challenge conservative standards of political behavior.

Along with demonstrating American-Upper Canadian involvement, I have also tried to offer explanations for their participation in colonial political dissent. To do so, analysis has been focussed on the motivations, aspirations and experiences that informed American-Upper Canadians' migration to the province, and on the conditions members of the group encountered upon settlement.[14] It will be argued that the actions of American-Upper Canadians were fundamentally shaped by their commitment to agrarian ideals of landed independence, family security and competency. Their willingness to support

[14] A great deal of attention has been directed towards the presettlement experiences of loyalists, and to determining how their beliefs and experiences influenced the manner in which they constructed a society out of the "howling wilderness." See note 3 above. In contrast, very little scholarship has incorporated the ideological and physical backgrounds of American-Upper Canadians. Their arrival in Upper Canada has typically been dismissed as simply "volitional" movement and described as part of the "traditional American search for better lands and a perfect home." Donald Akenson, Irish in Ontario, 52; Marcus Lee Hansen and J.B. Brebner, The Mingling of the Canadian and American Peoples (Toronto: Ryerson Press, 1940) 69. See also Fred Landon, Western Ontario and the American Frontier (Toronto: Ryerson Press, 1941) 12-23.

political opposition stemmed from a determination to protect their personal interests regardless of any resulting disruption to the harmony or stability of the colonial social order. American-Upper Canadians were not alone in their commitment to agrarian ideals. The majority of the Upper Canadian population, including most loyalists, shared an attachment to the precepts of agricultural enterprise. American colonists, however, demonstrated a propensity to pursue their interests through unconventional political channels, and to demand satisfaction and responsive representation from their government. Because of this disposition, American-Upper Canadians had an important formative influence on the emergence and evolution of colonial political opposition.

In addition to the second, fourth, and fifth chapters that look specifically at moments of political opposition, two other sections are included to provide background with which to analyze the political events. The first chapter will examine the pre-settlement experiences of loyalists and American-Upper Canadians, looking at the similarities and differences in their agrarian and political heritages, in order to better assess the unique contributions of the latter group. The third chapter provides a brief overview of the War of 1812, to confirm assumptions about colonists' agrarian ideals and to introduce consequences of the war that would be important in postbellum political debates.

One of the problems of attempting to illuminate the impact of American-Upper Canadians on the colony's early development is the dearth of definitive sources. Government records, private papers and other useful documents are scarce, and those that do exist tend to originate from members of the colonial elite. This has in part contributed to the historical focus on the ideologies and influences of the province's prominent loyalists and British administrators. Few

American-Upper Canadians had the time or perhaps the inclination to record their thoughts or explain their actions. Thus this thesis employs available evidence of colonists' actions, as well as relevant contemporary commentary, in order to illustrate their political aspirations and behaviors. In the chapter that deals with the Weekes, Thorpe, Willcocks movement, evidence is derived predominately from existing electoral records, assessment records and land patent information found in the personal papers of Robert and Abraham Nelles. The Nelles brothers lived in Grimsby township in the Niagara District, a part of the riding that repeatedly elected Willcocks, and close examination of that specific locality sheds considerable light on the conditions faced and actions taken by American-Upper Canadians in the pre-war period. For the Gourlay agitations, evidence is taken from the records kept by Gourlay himself, and from other contemporary sources that identify some of his individual supporters. In the 1820's the connection between political oppositionists and American colonists is revealed largely by the positions taken by the former in a decade-long debate over the citizenship rights of American-Upper Canadians.[15]

It should not be argued that the loyalist settlers of Upper Canada did not have an important influence on the nature of the society that would emerge in the province. The powerful positions that many elite loyalists held within the province's power structure enabled them to forcefully impose their conservative values onto the colony's political culture. Moreover, many loyalists also participated in the early movements of political opposition and helped to advance the legitimacy of political dissent. The purpose of this thesis is not to discount the formative contributions of loyalists but to reveal the equally

---

[15] In all cases where documents provide colonists names, American-Upper Canadian/loyalist status is determined by cross referencing the names with the United Empire Loyalist list provided in William Reid, The Loyalists in Ontario (Lambertville, NJ: Hunterdon House, 1973). I am borrowing this method from Donald Akenson, Irish in Ontario , 48-115.

influential impact of their American-Upper Canadian counterparts. American-Upper Canadians were not passive bystanders to the evolution of colonial political culture. Instead, their values and aspirations, as expressed through political action, played a pivotal role in the growth and gradual legitimization of oppositional movements that slowly redefined the standards by which Upper Canadian politics operated.



Map 1. Plan of the Province of Upper Canada, 1793. Taken From Jane Errington, The Lion, the Eagle and Upper Canada (Kingston: McGill-Queen's University Press, 1987) 12.

Chapter 1
The Question of Experience: Contrasts in Pre-Settlement Backgrounds

The settlement of Upper Canada represented a mingling of diverse peoples. For the purposes of this study, attention is focussed particularly on the divisions within the Euro-American community between loyalists and American-Upper Canadians. Members of both groups introduced values and assumptions to the colony that combined and interacted to create the belief systems upon which colonial society was founded. To track the developments in political thought that occurred in Upper Canada in the province's first forty years, and to be able to assess how loyalists and American-Upper Canadians influenced that development, it is necessary to recognize the pre-settlement backgrounds of the two groups. The cultural and ideological heritage of Upper Canadians shaped their behavior as members of colonial society. Analysis of the similarities and differences in the province's collective heritage provides the basis for a greater understanding of the specific contributions loyalists and American-Upper Canadians made to the evolution of colonial thought.

The single greatest similarity between loyalists and American-Upper Canadians arose from shared general assumptions about appropriate economic activity. In his study of Upper Canadian society, S.J.R. Noel discusses the operative dimensions of colonial culture, which he describes as the "usually unarticulated assumptions, expectations, and understandings" of the province's inhabitants.[1] Borrowing Noel's term, it can be seen that the operative dimension of Upper Canadian society centered on the pursuit of household prosperity through the control and exploitation of fertile land. Large numbers of loyalists and American-Upper Canadians were united by a common

[1] S.J.R. Noel, Patrons, Clients, Brokers: Ontario Society and Politics, 1791-1896 (Toronto: University of Toronto Press, 1990) 2.

commitment to a mutually recognizable form of agricultural subsistence.[2] Members of both groups held a mutual attachment to agrarian enterprise because, for the large part, both groups shared a common pre-settlement background in American eighteenth century rural agricultural society. The loyalist settler population in Upper Canada had proportionately higher numbers of farmers and frontiersmen than among loyalists as a whole, and a majority came from inland regions of New York and Vermont.[3] The later American migration was composed predominately of farming households leaving areas of the rural north in search of accessible property.[4] Both groups inherited the values and aspirations of a distinct agrarian culture that dictated ideal social and economic practices.

Beginning with the arrival of the first European colonists to New England, farming societies in the northern American colonies had developed cultural structures with which to organize relationships both to the land they settled and to each other. Land was abundantly available to the first settlers of New

---

[2] Jane Errington, The Lion, the Eagle and Upper Canada: A Developing Colonial Ideology (Kingston: McGill-Queen's University Press, 1987) 15: "Most Upper Canadians during the formative years of settlement were pioneer farmers...Clearing the land, planting and harvesting, and attending the myriad of tasks necessary to sustain life demanded all their time and effort." The concentration of early Upper Canadians on the basic demands of land acquisition and improvement is also asserted in Douglas McCalla, Planting the Province: The Economic History of Upper Canada, 1784-1870 (Toronto: University of Toronto Press, 1993) 13-30; and in George Sheppard, Plunder, Profit and Paroles: The Social History of the War of 1812 in Upper Canada (Kingston: McGill-Queen's University Press, 1994) 35-38. There is considerable debate over the specifics of Upper Canadian economic behavior, ie. levels of market imbeddedness, reliance on trade, etc., a treatment of which would exceed the scope of this paper. A good examination of these arguments is offered by McCalla. See also Errington, Lion, 195, note 6.

[3] Noel, Patrons, 9.

[4] Sheppard, Plunder, 20: "...most early immigrants had been from New York, New Jersey and Pennsylvania, later colonists included people from Vermont, Massachusetts, and from as far away as the Carolinas". My understanding of the origins of non-loyalist Upper Canadian settlers is further influenced by Fred Landon, Western Ontario and the American Frontier (Toronto: Ryerson Press, 1941) 12-23; and the comments in various travel journals such as Isaac Weld's Travels through the States of North America and the Provinces of Upper and Lower Canada 1807. Reprint, (New York: Augusta Kelley, 1970), and Michael Smith's A Geographical View of the Province of Upper Canada (Philadelphia: J. Bioren, 1813).

England and New York, and an environment of accessible property enabled nearly universal landholding. Abundance of productive property, coupled with a low ratio of human labor to land, led early colonists to develop an agrarian yeoman culture predicated on independent landownership.[5]

The model lifestyle prescribed by this agrarian culture was "competency", which Daniel Vickers defines as the attainment of a comfortable existence through the independent application of family labor on family owned land.[6] It was believed that this lifestyle offered the greatest level of individual and familial autonomy from external, arbitrary social and economic forces. The building block of agrarian culture was the household. The patriarch's ultimate intent was to insure guaranteed subsistence and long term financial safety for his family, and to provide the prospect of landed independence to his sons. The ability of a family to succeed as an economic unit rested on the exploitation of intergenerational dependence. Children committed their invaluable labor to the farm enterprise in exchange for security, and (for sons) the promise of land of their own upon maturity.[7] Parents directed their efforts towards the provision of land for their sons in return for support in their unproductive old age.[8]

In the seventeenth century, patriarchs could provide landed independence

---

5 Allan Kulikoff, The Agrarian Origins of American Capitalism (Charlottesville: University Press of Virginia, 1992) 34-35.

6 Daniel Vickers, Farmers and Fishermen: Two Centuries of Work in Essex County Massachusetts, 1630-1850 (Williamsburg VA: UNC Press, 1994) 14-23.

7 The labor of daughters in the agrarian household was equally essential as that of sons, though the long term rewards for their service were much different. Daughters could not generally expect to inherit landed property. In the majority of cases, women's options were constricted to the exchange of labor for support from landed male relatives: fathers, brothers, husbands, sons. For the role of women in agrarian society, see John Mack Faragher, Women and Men on the Overland Trail (New Haven: Yale University Press, 1979); Marylynn Salmon, Women and the Law of Property in Early America (Chapel Hill: UNC Press, 1986).

8 James A. Henretta, "Families and Farms: Mentalite in Pre-Industrial America" WMQ 35 (1978) 19; John Demos, Little Commonwealth: Family Life in Plymouth Colony (New York: Oxford University Press, 1970).

to the frontiers of townships or counties.[9] By the eighteenth century the original settlements had alienated most of their chartered holding, and rapid natural increase of the population intensified demands on any available land. By mid century, the path to competency required a young family to accumulate capital during their early adult years. As stated by James Henretta, "propertied status was the product of one or two decades of" dependent labor by "young male farmers and their wives."[10] Daniel Vickers has shown that in Essex County, Massachusetts, young men regularly practised by-employments, in conjunction with laboring on their fathers' farms, through which they could help to finance the purchase of their own farms once they reached middle adulthood.[11] As an alternative to by-employment, or many cases in conjunction with it, young aspirants to independent yeoman status occupied land as tenants in anticipation of eventually being able to own their property outright.[12] The drive to achieve land ownership harnessed the productive power of the entire family unit. Fathers attempted to enhance their sons' patrimony by producing more saleable surplus crops, and wives and mothers intensified production of household goods for market sale.[13] The ideological imperative of landownership and filial and parental support was a cultural legacy that informed the economic and social goals of both loyalist and later American

---

9 Often the primacy of a family within a chartered community could guarantee sons rights to unclaimed lands. Early colonial patterns of land acquisition can be seen in Dedham, and Essex County Massachusetts: see Kenneth Lockridge, A New England Town: The First Hundred Years (New York: W.W. Norton and Company,1970) 148; Vickers, Farmers, 3-4.

10 Henretta, "Mentalite", 7-8.

11 Vickers, Farmers, 198-99, 203, 247-58. In Essex County, common by-employments included shoemaking, blacksmithing, wheelwrighting, and various maritime trades.

12 Henretta, "Mentalite", 7.

13 Women's labor within the household economy had always included some level of production, such as textile or produce, for trade or sale outside the home. The transition was one of degree. The revenue from female craft production shifted in nature from important contributions to immediate family subsistence to necessary sources of cash for future generations' acquisition of land.

settlers of Upper Canada. As a result of this shared cultural inheritance, nearly all Upper Canadians in the colony's early years aspired to the same fundamental objective: family security and prosperity through the control and improvement of productive land.[14]

For both loyalists and later American settlers, the basic drive for land ownership was compounded by the experiences and circumstances that provoked their removal to Upper Canada. Noel recognizes the centrality of land ownership and asserts that for Upper Canadians, land held both a "symbolic significance" and a "real and immediate primacy in their lives."[15] However, he attributes the society's focus on land solely to the loyalists' experience of being dispossessed during and after the American Revolution. For loyalist settlers, the acquisition of land was not only a fulfilment of agrarian cultural ideals but also a legitimation of war time sacrifices.[16] Loyalists who had lost land and property because of their choice of sides in the revolution, migrated to Upper Canada in order to recoup their losses. As argued by Noel, the experience of dispossession led loyalists to acquire land as "vindication of what they had done, of the risks they had taken."[17] Unfortunately, Noel fails to consider how the the distinct values and pre-settlement experiences of non-loyalist American settlers equally contributed to and reinforced the society's operative priorities of

---

14 On the American side of the historiography, the centrality of land control and development in Northern agricultural society has received a great deal of attention. Valuable works include, Henretta, "Mentalite"; and Allan Kulikoff, Agrarian Origins .

15 Noel, Patrons,11; McCalla, Planting, 13-30.

16 Noel, Patrons, 11.

17 Noel, Patrons,11.

land ownership, competency, and household financial security.[18]

For loyalists and later American settlers, migration to Upper Canada marked the beginning of new lives in a new colony. The conduct of both groups once in Upper Canada was very much a function of the events that had compelled their resettlement. Both groups shared a desire to acquire productive property, but the immediate pre-settlement experiences that led them to pursue land ownership in Upper Canada were different. American-Upper Canadians' land needs did not stem from martial expulsion but rather developed as a symptom of economic and demographic transitions in northern American rural society.

Many loyalist families, originating from northern agricultural societies, would have understood the endemic obstacles to landed independence and recognized the strategies of by-employment and tenancy as necessary, acceptable phases in the path to competency. They would not, however, have experienced the difficulties of land acquisition as sharply as the American-Upper Canadian households that remained in the U.S. into the final decades of the eighteenth century. In the first decades of the early Republic, the combined

---

[18] I do not disagree with Noel's interpretation of loyalists' land desires, but the loyalists' drive to acquire land in retribution for their revolutionary losses is only one contributing factor to the colony-wide concentration on autonomous control of property. The land desires of non-loyalists must be taken into consideration when attributing causal responsibility for the operative dimensions of colonial culture. Noel's isolated concentration on the experiences of loyalist settlers is in keeping with the broader historiographical tendency to focus solely on loyalist influences. The deficiency is highlighted when it is considered that human migrations can be said to have both push and pull components. Both facets of the loyalist migration have received examination. Loyalists were pushed out of the United States by the combination of a political climate they found morally reprehensible and living conditions they could not tolerate. In turn, they were pulled to Upper Canada by the sanctuary of military protection, by the offer of land in compensation for wartime property losses, and by the opportunity presented to psychologically vindicate their losses by creating an ideal British society. In the case of American settlers, the pull component of their migration has been typically dismissed as simply "volitional" movement and described as the "traditional American search for better lands and a perfect home." Little consideration is given to the values and beliefs that compelled these settlers to remove to Upper Canada or to the physical and social conditions that pushed them away from their homes and families. Donald Akenson, The Irish in Ontario (Kingston: McGill-Queen's University Press, 1984) 52; and Marcus Lee Hansen and J.B. Brebner, The Mingling of the Canadian and American Peoples (Toronto: Ryerson Press, 1940) 66.

pressures of natural increase, land scarcity and increased capitalization of virgin property intensified, placing the goal of competency beyond the reach of many rural Americans. Property values increased, crippling the ability of young families to finance landed independence. Increasingly, "dependent employment was turning from a phase of life into a lifetime fate."[19] By the 1790's, cotters and other landless laborers accounted for fifty percent of the population in many districts of southeastern Pennsylvania. In 1799 for example, East Caln Township, in Chester County, held fifty-one property owning families, twenty-four married cotters, and forty-eight propertyless freemen.[20] The career of John Mears of Ipswich, Massachusetts provides an example of the growing permanence of wage employment. Mears married in 1799, but seventeen years later he still lived in a leased home on his employer's land, supporting his family as a hired hand alongside his grown son, with whom he shared his dependent status.[21]

The American Revolution had accelerated the trend toward permanent wage labor in the northeast. Trade isolation during the war had forced extensive development of domestic manufacturing in order to supply both military and civilian demands. After the conflict, despite the reopening of European trade connections, shop manufacturers, craftsmen, and merchants continued to expand their operations, drawing the surplus labor force into dependent

---

19 Vickers, Farmers, 324.

20 James Henretta, The Origins of American Capitalism (Boston: Northeastern University Press, 1991. 258, 276.

21 Vickers, Farmers, 302-303. Mears' example demonstrates the growing inability of farmers to attain the degree of landed independence achieved by their fathers. As stated by Vickers: "What had been a gully of dependency to be bridged with a few years of youthful labor was now a valley from which many New Englanders never emerged."

employment.[22] By the first decade of the nineteenth century, Dutchess County, one of New York's largest wheat producing regions, also supplied the labor for a sawmill, a hat factory, a nail factory, an iron foundry, a plaster works, a woollen mill, a cotton mill and a brewery.[23] Enterprising artisans expanded their shops and increased the scope of their outwork manufacturing. Small-scale operations proliferated in both urban and rural areas, and the traditionally dependent labor population of women and children was joined by growing numbers of under-employed men.[24]

The growth of a permanently dependent laboring class was part of an economic transformation that extended into the mid nineteenth century, but its dangers were already identifiable to rural farmers by the 1790's. The agrarian households most committed to the yeoman ideals of household competency "dreaded prolonged economic dependence as tenants or wage workers" and considered it "the path to 'slavery'."[25] Faced with the inability to achieve landed independence for themselves or guarantee it for their progeny, families migrated west to newly opened frontier regions.[26] The frontier served as a

---

22 Henretta, Origins, 286. Vickers, Farmers, 310-321: The war time experience created important commercial networks, and served as a "forcible education" to manufacturers and merchants about the ways that the handicraft skills of their communities could be turned into valuable market oriented production. The lessons learned and connections made during this period provided the structural basis for an expanding manufacturing industry. In Essex County, MA, shoemaking, sailmaking, and shipbuilding in particular emerged from the Revolution as viable business enterprises, exploiting a growing labor force "hungry for the sort of full employment that the rural...economies could no longer provide." Vickers, Farmers, 320.

23 Henry Noble McCracken, Old Dutchess Forever (New York: Hastings House, 1956) 462.

24 Vickers, Farmers, 314-315.

25 Alan Taylor, Liberty Men and Great Proprietors (Chapel Hill: UNC Press, 1990) 6. In a letter to New York landlord James Duane, a land agent explained Yankee settlers' resistance to tenancy, stating: "Their whole fear was, drawing their Posterity into Bondage."

26 The Revolution's acceleration of manufacturing industries in the east was tempered by the new land opportunities created by the war's outcome. Of particular importance was the appropriation of territory in central and western New York formerly controlled and protected by the Iroquois nations. See Henretta, "Mentalite",9; David Ellis, Landlords and Farmers in the Hudson-Mohawk Region, 1790-1850 (New York: Octagon Books, 1967) 2-10.

refuge in which farm families could recreate and sustain traditional productive autonomy and intergenerational support.[27] The propensity of northern farmers to resist market dependence through migration is evidenced by the numerical increase and geographic expansion of the citizenship of New York. The population of New York jumped from 73,348 in 1749 to 586,756 in 1800, the peak period of growth in the half century coming between the years 1790 and 1800, when the annual increase was 5.5 per cent.[28] As the older regions of the Hudson Valley approached saturation, unprecedented numbers of migrants flooded into the newly opened territories in the north and west.[29] By 1800, the populations of Oneida, Herkimer, Otsego, and Schoharie counties in the Mohawk Valley had more than doubled.[30]

For many farm households, however, western migration did not produce instant competency, but instead presented renewed threats to landed independence. The territories were newly opened and largely unoccupied, but they were not unowned. Large land speculators like William Cooper held title to huge tracts of western land and treated their property as a capital commodity. To maximize the return on their landed investments, speculators employed a variety of strategies distasteful to aspiring yeomen families. Some speculators established themselves as landlords and refused to sell their lots, forcing settlers into long term tenancy as a means of prolonging profits without alienating land. Other landholders, willing to sell lots, did so at prices beyond

---

27 Kulikoff, Agrarian Origins,17,21,39-40,207; Henretta, "Mentalite", 27.

28 Robert Wells, "What then is New York, This New State?" in New Opportunities in a New Nation eds. Manfred Jonas and Robert Wells (Schenectady, NY: Union College Press, 1982) 8,9.

29 Ellis, Landlords, 27-28. The majority of counties in the Hudson Valley had reached the limits of the region's land resources. In an account of his travels through the area at the time, Timothy Dwight commented on the saturation, noting that "every acre was being cultivated" and that there was "no need of greater population." As quoted in McCracken, Dutchess, 425,454.

30 Ellis, Landlords, 17.

acted from the calculated assumption that the first wave of settlers would most likely forfeit on their debts, returning possession of the lots to the speculator along with the added value of the pioneers' improvements.[31]

Rather than escaping landless dependence on the frontier, many migrants at the end of the eighteenth century merely encountered new obstacles to competency in the form of capitalist exploitation of land and labor. Families unwilling to settle for leasehold tenancy and unable to pay mounting mortgage and credit debts took further migratory steps in search of more easily accessible land. It was members of this population group, fleeing the land scarcity and labor markets of the east and unsatisfied with the settlement opportunities on the American frontiers, who crossed the border into British territory and became American-Upper Canadians.[32]

---

31 Kulikoff, Agrarian Origins, 84-85;Charles Brooks, Frontier Settlement and Market Revolution (Ithaca: Cornell University Press, 1996) 13-46; Ellis, Landlords, 66-118.

32 The origins of large portions of the American-Upper Canadian population is suggested by the observations made by contemporary writers. The anonymous author of Canadian Letters: A Description of a Tour through the Province of Lower and Upper Canada in the Course of the Years 1792 and 1793 in, Canadian Antiquarian Journal, 9, nos 3,4 (1912) 53-54, argued that the majority of American settlers came from Vermont, Massachusetts and the Mohawk Valley. Other observers like John Maude noticed large numbers of settlers arriving from Pennsylvania, especially in the wake of the 1794 Whiskey Rebellion. A Visit to the Falls of Niagara in 1800, (London: Longman, Rees and Green, 1826) 60. See also, Isaac Weld, Travels; Michael Smith, A Geographical View. The Mohawk Valley formed a natural corridor for Americans travelling to the western frontiers, and led migrants directly to the U.S.-Upper Canada border.



Map 2. A Map of the Located Districts in the Province of Upper Canada, 1813. Taken From Jane Errington, The Lion, The Eagle and Upper Canada (Kingston: Mcgill-Queen's University Press, 1987) 88.

By choosing to migrate to Upper Canada, large numbers of American settlers demonstrated an acute commitment to the agrarian cultural ideals of landed independence. Moreover, the process of migration, often entailing a series of sequential resettlements, served as an educational experience that informed American-Upper Canadians of the realities of capitalist land speculation, indebtedness, and landless subsistence. The loyalists had encountered land loss as a singular cataclysmic event in a time of violent strife. In contrast, later American settlers experienced landlessness as a more gradual though equally unappealing structural transformation. Their concomitant apprehension of dispossession influenced the way they viewed property, debt, and economic relationships and shaped their reactions to the conditions they met in their new colony.

Aside from influencing American-Upper Canadians' attitudes towards land holding and debt, life in the newly formed United States also exposed many later American settlers' to currents of political thought and practice different from those of their loyalist predecessors. Male rural farmers emerged from the war with a powerful new political voice. They had comprised a majority of the troops needed to prosecute the American military effort and as such had been able to demand a greater role in determining public policy.[33] "The strength of the country," argued Abraham Yates of New York in 1788, "lays in the yeomanry thereof....; if the rich intended to avail themselves of the yeomanry...to fight for their riches, it would require to shew them...that they intended no partiality."[34] Many states reduced their franchise restrictions in the face of yeoman pressure. In New York for example, the assembly voting requirement was lowered from forty pounds to twenty pounds or "renting a tenement to the yearly value of forty

---

[33] Kulikoff, Agrarian Origins, 43.

[34] As quoted in Kulikoff, Agrarian Origins,136.

shillings."[35]

The increase in political power of small farmers coincided with a period of intense political competition. The Treaty of Paris had not ended the turmoil unleashed by the Revolution. No consensus existed among Americans as to the precise form their new country would assume. Rather, the post-war decades are best understood as a climactic struggle between competing visions of the ideal national polity. "Conflict," argues Thomas Slaughter, "remained the body and soul of American politics through the end of the [eighteenth] century."[36] Average Americans, with their new found political voice, became important components in the political battles of the time. Early Republic political parties recognized the value of the farm vote, and attempted to capitalize on it.[37] In the 1790's, Federalists and Jeffersonians at the state and national level shaped their rhetoric to try to court agrarian constituents.[38]

The expanded electorate did not, however, passively submit to the direction of political elites. Many early Americans, animated by their new electoral strength, seized the opportunity to actively participate in the politically charged atmosphere of the early Republic. Moreover, concepts of possessive individualism and Lockeian liberalism that had developed from the revolutionary movement inspired many Americans with the belief in a person's right to direct and control their own destiny. Public debate came to be shaped

---

35 As quoted in Alfred F. Young, The Democratic Republicans of New York (Williamsburg: UNC Press, 1967) 19.

36 Thomas P. Slaughter, The Whiskey Rebellion (New York: Oxford University Press, 1986) 165.

37 The Jeffersonians in particular "were confident they could manage an expanded electorate" as evidenced by an 1805 election bulletin exhorting: "Turn Out! Turn Out! Therefore to the election. EVERY MAN, TURN OUT! Let no one stay at home through sloth or cowardice. If you will turn out, you will carry the point, you will secure your cause, and these haughty, selfish Aristocrats will be no longer in office, to controul your meetings." Alan Taylor, Liberty Men, 211-212.

38 Party endorsement of agrarian concerns, is discussed in, Kulikoff, Agrarian Origins, 146-148; Alfred F. Young, Democratic Republicans; and, Steven E. Siry, Dewitt Clinton and the American Political Economy (New York: Peter Lang Publishing Inc., 1990).

by a "tumultuous popular movement" of "ordinary men" who had emerged from the war with a growing unwillingness to accept authority from an aristocratic, deference-based hierarchy.[39] Commitment to the equality of individual political choice fuelled the decline in deference and emboldened voters to reject traditional elite leadership in favor of candidates more closely attuned to the values and needs of their constituents.[40] For example, compared to prerevolutionary standards, the 1780's saw the number of men of moderate wealth elected to the lower assemblies in New Hampshire, New York, and New Jersey increase from a sixth to over three-fifths, and the proportion of farmers rise from a quarter to more than a half.[41] Instead of acquiescing to the directives of prominent men, "newly politically conscious farmers" battled with "monied men" over whose desired economic policies would be adopted.[42]

Lockeian liberalism and its emphasis on the social contract further revolutionized rural agrarians' concepts of representation. Voters demanded accountability from their political leaders and protection and satisfaction from their government.[43] Farmers became aware of the potential power of legislatures to "advance economic development and, in the process, to favor one social group over others."[44] In response, they learned to use politics as a mechanism by which to attain or sustain the agrarian goal of landed

---

39 Joyce Appleby, Capitalism and a New Social Order (New York: NYU Press, 1984) 50,86,14,104,38.

40 Ronald P. Formisano, "Deferential-Participant Politics: The Early Republic's Political Culture, 1789-1840" The American Political Science Review 68 (1974) 371-387.

41 Kulikoff, Agrarian Origins, 140.

42 Henretta, Origins, 261.

43 Appleby, Capitalism, 50,86,14,104,38.

44 Henretta, Origins, 287.

competency.[45] The franchise served as one useful tool in the arsenal of individuals striving to craft an ideal social and economic existence.

Experience in early Republic politics informed many American latecomers to Upper Canada with a sense of greater government responsibility and the increased right of citizens to a constructive voice in civic affairs. The rise of parties in the 1790's institutionalized the post revolutionary trend towards factional, interest-based politics. Opposition to administrative policies and vocal discord in electoral campaigning became acceptable forms of public expression. Participation in American government conditioned many American-Upper Canadians to perceive politics as a venue through which to redress grievances and pursue ambitions.

Loyalists did not share the experiences of their American counterparts in the decades after the revolution. While the agrarian household that would become American-Upper Canadians struggled with land shortages, dependent labor, capitalist exploitation and dispossession, loyalists - as shall be seen in the next chapter - were enjoying competency in their new homes, clearing their freely granted land and supporting their families with government subsidized provisions. As Americans participated in or at least observed tumultuous party politics, loyalists in Upper Canada operated under the leadership of a ruling establishment that stressed and enforced stability, order, social deference and strong central government.

---

[45] For example, in New York large numbers of rural farmers supported the anti-federalist camp in 1788 and voted against ratification of the constitution, seeing it as being too favorable to the monied elite, with insufficient protection for small producers. Later in the 1790's farmers in much of the state supported the Clintonian Republicans as champions of the debt ridden yeoman. Other farmers, closer to the frontier pragmatically supported the Federalists in response to the party's more favorable platforms on Indian protection and road development. Young, Democratic Republicans, 270-275, 566-582. Aside from electoral expressions, the early Republic also saw a growing tendency of "empowered ordinary men to launch petition campaigns on broader political issues." Kulikoff, Agrarian Origins,139; see also Ruth Bogin, "Petitioning and the New Moral Economy of Post-Revolutionary America" WMQ 45 (1988) 391-425.

Any attempt to understand the ideological background - both economic and political - of American-Upper Canadians risks assigning an unrealistic uniformity to the American settlers and denying them their individuality. Yet it is reasonable to assume that many American colonists shared similar pre-settlement experiences and were exposed to many of the same intellectual currents. That separate individuals would have responded differently to these events is undeniable. What is critical for this study, however, is to accept that past experience did shape future behavior. "The behavior of [a] population," according to James Henretta, "constitutes a crucial (although not a foolproof) indicator of its values and aspirations."[46] In the case of individual American settlers, those values and aspirations were structured by a lifetime of experiences that suggested both an ideal form of subsistence and the appropriate means by which to obtain it. The following chapters will attempt to demonstrate how the beliefs of American-Upper Canadians, as expressed through their actions, distinctly contributed to the development of Upper Canadian society.

---

[46] Henretta, "Mentalite", 20.

Chapter Two
"Factious Demagogues": Precursors of Dissent in Upper Canada

Upper Canada in the the first decade of the nineteenth century, though still in its initial stages of growth, already possessed established structures upon which, government, politics, and economics were organized. A nucleus of administrative and commercial elite, centered at York and throughout the province's regional districts, exercised power within the colony and attempted to enforce parameters of legitimate social and political behavior. Though heavily entrenched by networks of official and economic patronage, the authority of the colonial elite was neither absolute nor immune to attack. The arrival of large numbers of American settlers to Upper Canada in the 1790's and 1800's helped set in motion political developments that challenged the elites' control of the population and undermined the traditional conservative standards that shaped the colony's political climate. An early example of the impact of American-Upper Canadians is seen in the contributions members of the group made, in the years leading up to the War of 1812, to the rise of the colony's first truly radical political opposition movement.

Though the group, under the direction of Robert Thorpe, William Weekes and Joseph Willcocks, was limited in its ability to carry any radical or innovative bills through the Legislative Assembly, it did on occasion command enough support to block or amend legislation.[1] More significant than the group's legislative successes, however, were the roles its members played as vocal, critical opponents of the colony's administrative officials, and political and economic elite. The Thorpe-Weekes-Willcocks movement was an important, initial step in the evolution and gradual legitimization of organized opposition politics in

[1] George Sheppard, Plunder, Profit, and Paroles (Kingston: McGill-Queen's University Press, 1994) 30.

Upper Canada. These men carved out positions as adversarial critics of colonial government and acted as precursors of the reform politicians who emerged in the postbellum period.[2] The rise to influence of this group of political agitators is attributable in large part to the electoral support and social influence of American-Upper Canadians. Willcocks and his associates attained their mandates by championing measures that appealed to American settlers. The economic and social aspirations of American colonists, and their willingness to assert their demands through the mechanism of politics significantly contributed to the unprecedented success of the "first sustained opposition group" in Upper Canadian history.[3]

The novelty of the political mobilization that enabled the rise of the Thorpe-Weekes-Willcocks opposition movement is best understood when viewed in contrast to the colony's established social and political mores. Even in Upper Canada's earliest years, the elite administrators of the region already possessed and actively pursued highly developed visions of the social and political structure the new colony would assume. In the final decades of the eighteenth century, while the province remained little more than an infant frontier settlement on the edge of a "howling wilderness," only partially and sporadically populated, loyalist elites and colonial officials had already engineered blueprints by which to construct in Upper Canada an ideally loyal,

---

2 David Mills, The Idea of Loyalty in Upper Canada: 1784-1850 (Kingston: McGill-Queen's Universtiy Press, 1988) 19-25. While both Mills and Sheppard consider Thorpe, Willcocks and their associates as examples of individualized opposition, there was a level of collaborative effort and consolidated support among members of the group. While the oppositional platform advanced by these men was highly disapproved of and for the most part, effectively resisted by the colonial administration and elite, the ability of the movement to garner enough support to achieve and sustain positions of critical opposition must be recognized as a vital preliminary stage in the development of the colony's political culture.

3 Elwood H. Jones, "Joseph Willcocks" Dictionary of Canadian Biography ed. Francess G. Halpenny,Vol. V, (Toronto: University of Toronto Press, 1987) 859.

prosperous and ordered imperial possession.

It should not be suggested however, that there was a magical consensus among the colony's prominent leaders as to the precise steps by which the province would be administered. Many of the imperial officials, appointed in London and sent out to administer the colony, hoped to create in Upper Canada a distinctly British society. Upper Canada's first Lieutenant Governor, John Graves Simcoe, aspired to mould the province into a "little Britain."[4] In pursuit of that goal Simcoe endeavored to recreate, virtually unchanged, the social and political institutions of the mother country, and argued that, "the utmost Attention should be paid that British Customs, Manners, and Principles...be promoted and inculcated."[5] Foremost among the ingredients to be transplanted, it was hoped, was a parliamentary political system, "the very image and transcript" of that prescribed by the envied and time tested British constitution, and a hierarchical social structure presided over by an entrenched aristocracy.[6]

Many of the resident loyalist elite, however, retained serious reservations as to the wisdom of trying to indiscriminately shape the colony into a little Britain. "A government should be formed for a country," argued prominent loyalist Richard Cartwright, "not a country strained and distorted for the accommodation of a preconceived and speculative scheme of Government."[7] Men like Cartwright and commercial baron Robert Hamilton, while committed to the colony's British connection, were not Englishmen but British-Americans. They

---

4 As quoted in Jane Errington The Lion, the Eagle and Upper Canada (Kingston: McGill-Queen's University Press, 1987.) 6-7.

5 Simcoe to Dundas, 30 June 1791, as quoted in Errington, Lion, 31.

6 Simcoe's speech proroguing parliament, 15 Oct. 1792, as quoted in Mills, Idea, 18, S.F Wise, "The 1790's", Colonists and Canadiens Ed. J.M.S. Careless (Toronto: Macmillan Co., 1971) 64.

7 Cartwright and Hamilton, Speech on the Judicature Act, 1794, as quoted in Errington, Lion, 30. Numerous early community leaders shared this viewpoint. See, Bruce Wilson, The Enterprises of Robert Hamilton (Ottawa: Carleton University Press, 1983) 105-125; Gerald Craig, Upper Canada: The Formative Years (Toronto: McClelland and Stewart, 1963) 31-32.

possessed a greater understanding of the realities of the province's unique demographic and geographic conditions. Many worried that Simcoe's ultra British policies would only generate undue discontent, and felt they needed to be tempered by concessions to the practical demands of the North American frontier in order to avoid "sowing the seeds of Civil discord and perhaps laying the Foundation for future Revolution."[8]

Nevertheless, though British administrators and loyalist elites did not always agree completely on how best to incorporate the colony's American and British traditions, there did exist a usable common ground between the two groups' visions of state formation. Both externally appointed officials and indigenous leaders approached the challenge of colonial development with the shared intention of creating an ordered, harmonious, and stable polity, capable of providing "as much freedom and happiness" as was possible while maintaining the requisite "subordination necessary to civilized society."[9] Loyalist elites and colonial officials shared a reactionary conservatism reinforced by the radical political innovations of their time. Many loyalists responded to what they considered to be the chaotic licentiousness and disorder of the American Revolution. British administrators likewise bore in mind the lessons of the recent colonial turmoil along with the ongoing threat posed by French political radicalism.[10] Just as the Americans and the French consciously attempted to create ideal political societies, so too did the prominent leaders of Upper Canada. Rather than experimenting with radical republicanism or democracy,

---

8 Cartwright to Todd, 1 Oct. 1794, as quoted in Errington, Lion, 32.

9 Simcoe's speech proroguing parliament, 15 Oct. 1792, as quoted in Mills, Idea, 18.

10 John Bruce Walton, "An End to All Order: A Study of Upper Canadian Conservative Response to Opposition" M.A. Thesis, Queen's Universtiy, 1977, 4,12. Walton suggests that the combined experiences of the American Revolution, French Revolution, and rise of Napolean, produced a ruling group "with a strongly defensive cast of mind." The ideas of administrators and loyalist elites were shaped by virtue of having lived through what Reverend John Strachan called an "Age of Revolution." As quoted in Walton, "Order," 9.

however, the elite architects of Upper Canada committed themselves to creating a "counterrevolutionary society on the borders of a revolutionary one."[11] The colony was meant to stand out as a shining example to an Atlantic community rocked by political innovation. Loyalists hoped to attain a level of prosperity and stability within the imperial community that would be the envy of their disloyal neighbors, and thereby both vindicate and compensate them for maintaining their attachment to King and country. British leaders saw in the infant colony a chance to clearly demonstrate the ultimate superiority of the British governmental system. Upper Canada, if properly shepherded, could and would become a "bastion of British liberty" of such power and value as to "not only replace, but...eclipse that which had been lost in the thirteen colonies."[12]

Not only did the two groups of colonial leaders share a common desire for a tranquil, ordered, conservative community, they also largely agreed on which social and political attitudes needed to be fostered in order to produce that community. If the elite vision of a smoothly operating polity were to come to fruition, the citizens of Upper Canada needed to learn to accept the primary importance of social order and to be obedient and respectful of the authority of their leaders.[13] Only by willingly deferring to the wise and benevolent direction of their social superiors, it was felt by the colonial elites, could Upper Canadians hope to enjoy true liberty and prosperity.[14] Prominent loyalists and administrative officials further agreed on what types of public behavior needed

---

[11] S.F.Wise, "The Origins of Anti-Americanism in Canada" Fourth Seminar on Canadian-American Relations, as quoted in Errington, Lion, 4.

[12] Errington, Lion, 6.

[13] Errington, Lion, 4.

[14] Walton, "An End to All Order," 17: According to Walton, the colony's ruling elite aspired to create a "society at peace with itself, in which its natural divisions of ranks and orders knew and accepted their proper places." The goal was "social stability" predicated on the "grateful deference of the lower orders." Watlon, "Order," 17.

to be avoided. In response the revolutionary spirit of the times, colonial leaders collectively developed a "siege mentality" and became acutely apprehensive of any public discord.[15] Elite proponents of order and stability "considered all political and social opposition to the policies of those in government evidence of disloyalty."[16] Popular activism and factional opposition were considered dangerously turbulent and disdained as symptoms of the encroaching "radical disease" of republicanism.[17] Planners of the province felt it prudent to reduce the democratic power of the populace by ensuring that the governor and his appointed legislative and executive councils held the balance of power necessary to control the legislative assembly. As stated by Simcoe, the "checking of the Elective Principle" would help guarantee administrative control over the colony.[18]

It is vital to recognize that the vision of a loyal, orderly, gratefully deferential society was the product and possession of an elite minority of Upper Canadians who clearly articulated their objectives for colonial development. The societal aspirations of this small group did not necessarily accurately represent the desired colonial community envisioned by the majority of Upper Canadian settlers. Nonetheless, in Upper Canada's earliest years, the colony's elite leaders succeeded in establishing parameters of political and social behavior and were reasonably successful in eliciting popular conformity. The question that must be answered, therefore, is what enabled the colonial establishment to impose its standards on the community at large?

In part, the ability of provincial leaders to assert their authority did rest on the kind of passive, tractable population that provincial planners had hoped for. In

[15] Walton, "An End to All Order", 16.

[16] Errington, Lion, 183.

[17] Walton, "An End to All Order,"16.

[18] As quoted in,Sheppard, Plunder, 16.

the earliest years, some of the original loyalist settlers seemed willing to abide and promote a hierarchically ordered society, based on deferential authority and acquiescence to social harmony. As argued by Jane Errington, "many of the Loyalists...had and continued to be conservative" and believed that "all members of the community" must "accept their place in the social order. Clearly, some were born and educated to lead, others to 'follow the dictates of wise and beneficial laws'."[19] The importance placed on acquiescence to social superiors in loyalist ideology is further argued by Janice Potter. Potter contends that the concept of deference was central to loyalist attitudes and was formed by the belief that "there was a natural aristocracy of men" and that there should be "voluntary acceptance by the majority of the minority's...superior merit to...govern."[20] Significant numbers of loyalists probably took comfort in the ideal of a stable, ordered society. Their experience in the American Revolution made some loyalists apprehensive of the dangers of political volatility and factious discord. Many of the American colonists who rejected the Patriot cause did so because they had felt a greater threat from the arbitrary power of those clamoring for independence than they had from the villified British government. The breakdown in political decorum in the revolutionary period had produced a "tyranny of the mob" and subjected many loyalists to a "state of licentious tumult and the evils of lawless anarchy."[21] As a result, many loyalists developed an

[19] Jane Errington, "Loyalists in Upper Canada: A British American Community" in None Was Ever Better Eds. S.F.Wise et al (Stormont, Dundas, Glengarry Historical Society, 1984) 60. Errington's views on the conservatism and deference of loyalists have changed since writing this article. She would now probably argue that the ideas of natural ranks and orders and voluntary acquiescence to minority rule were held mainly by a few elite loyalists and promoted as a means to solidify their authority. See Errington, Lion, 13-35. Nevertheless, I choose to accept her earlier interpretation. How many loyalists held these views is difficult to determine, but I am convinced that numbers of them did operate, at least in part, upon these principles.

[20] Janice Potter, The Liberty We Seek (Cambridge: Harvard University Press, 1983.) 26; see particularly her chapter, "The Loyalists' Conservatism," 39-62.

[21] As quoted in Potter, Liberty,15-17. On loyalists' fears of anarchy and popular tyranny, see also William Nelson, The American Tory (Boston: Oxford University Press, 1961).

appreciation for the tranquil stability offered by a strong, authoritative government. They learned that to condone oppositional behavior served only to give "a stimulus to the passions and designs of the factious."[22] As stated by one Upper Canadian loyalist, the "misfortune" of living in Maryland during the Revolution and being "an eyewitness" to the discord and dangers of the time, had caused him to "dread anything that may lead to any innovation of government."[23] Participation in the hierarchical, authoritative political culture of early Upper Canada, that prioritized loyalty and obedience above all, served only to foster and further ingrain the conservatism and deference of the original loyalist settlers.[24]

Upper Canda's elite leaders did not maintain power and control over colonial affairs solely as a result of certain loyalists' natural acquiescence to central

---

22 Peter Oliver, as quoted in Potter, Liberty, 20.

23 Major Graham to D.W. Smith, as quoted in Walton, "An End to All Order,"10.

24 The nature of loyalist conservatism is a question of historical debate. Historians disagree about whether loyalists were even primarily motivated by political ideology, or if they weren't simply pragmatists who placed their interests with the side of the conflict they felt would most likely to emerge victorious. At question is whether these refugees brought any truly distinct loyal, conservative political perspectives with them to Upper Canada. I am obviously placing myself on one side of that argument, and suggesting that they did in large part act out of social and political ideological motivations. There is an extensive body of scholarship committed to the loyalist question, much too lengthy to summarize here. The precise political beliefs of Upper Canadians is difficult to uncover; most did not leave written record of their thoughts and values. They can be judged, however, by their actions. The conservatism and deference of the Upper Canadian population in the earliest years is testified to by the fact that in the first decade or so of the colony's existence, voters predominately elected and supported elite, socially and politically acceptable representatives. See, J.K. Johnson, Becoming Prominent (Kingston: McGill-Queen's University Press, 1989). An application of Louis Hartz' theory of cultural "fragmentation" to the Upper Canadian setting, provides one perspective into the political climate of the colony in its earliest years. The original loyalist fragment that settled Upper Canada was a distinctly conservative group, as attested by their unwillingness to reject the monarchy and revolt against Britain. Thus, based on the tory character of this founding population, conservatism "became proportionately a much stronger part of the political culture" of Upper Canada "then it had ever been in the original American colonies." Noel, 7-8; Gad Horowitz, "Conservatism, Liberalism, and Socialism in Canada: An Interpretation," Canadian Journal of Economics and Political Science 32 (1966): 143-71. For Upper Canadian Conservatism, see also S.F.Wise, "Upper Canada and the Conservative Tradition" God's Peculiar Peoples (Ottawa: Carleton University Press, 1993)

authority. In many cases, conservative beliefs represented only one component in the value systems upon which colonists operated. Many of the colonists who embraced political deference and conservatism also committed themselves, along with what was most likely the strong majority of Upper Canadians, to the ideological imperatives of family competency and independent ownership of productive property. As shown in the previous chapter, many loyalists and non-loyalists shared common agricultural backgrounds. Furthermore, numerous members of both groups possessed varied but equally influential inherited motivations to strive for landed independence. In early Upper Canada, access to the province's coveted resources of land, and indeed to all institutional offices, was controlled by colonial administrators and prominent local leaders. As such, this elite minority held an immediate positional advantage from which to capitalize on the land desires of the majority of Upper Canadians. Whether naturally deferential or not, large numbers of Upper Canadians had to conform to conservative standards and submit to elite authority in order achieve land-based wealth and independence. Economic and political leaders exploited their control over the colony's land and commerce to both enrich themselves and coerce proper public behavior.

Upper Canadian politics was administered and manipulated through networks of patronage and clientelism. At both the colonial and local level there were a myriad of valuable administrative and judicial positions that were filled by appointment. Access to these posts was largely requisite on earning the favor of either the Governor and his executives or the local power brokers in a specific region. Men who gained access to important official positions might then consolidate their authority by appointing grateful and obedient clients to the offices that fell under their discretion.[25] Official positions were not coveted

[25] Noel, Patrons, 61-79.

for the meagre stipends they earned, but rather for the added entitlement to land that came with them.[26] Politics served to a large extent as an extension of the colony-wide drive to acquire and control land. The elite men who sat atop these networks of patronage organized their clients to insure themselves unfettered control of their property and greater access to future landholdings. Elected positions were equally controlled by the disbursement of patronage. Power brokers paid the campaign expenses of promising candidates, with the expectation that once in office, the candidates would promote measures advantageous or profitable to their prominent sponsor. Aspiring Upper Canadians who hoped to climb the social, political and economic ladder needed first to attach themselves to a powerful individual or group, and then acquit themselves in a manner that would be rewarded by further advancement.

Along with enriching elite placemen, control of official and commercial patronage networks also provided an extensive infrastructure through which to inculcate and enforce prescribed standards of acceptable public behavior. During the colony's earliest years when Upper Canada's choicest lands were being transferred to private ownership, there existed a clear reciprocal relationship between loyal behavior and the attainment of land.[27] To fully understand the implications of this relationship, it is necessary to realize that in the colony's formative years, land acquisition, particularly for loyalists, was not a "short, simple, impersonal, one-shot transaction." Rather, as argued by S.J.R. Noel, it was "a complex, long-drawn-out affair," a lifelong process involving "much face-to-face interaction with those who...controlled access to land."[28] Therefore, in keeping with the temporal realities of land acquisition and the

---

[26] Noel, Patrons, 62; Lillian Gates, Land Policies of Upper Canada (Toronto: University of Toronto Press, 1968) 66.

[27] Noel, Patrons,12.

[28] Noel, Patrons,12-13.

inherent behavioral expectations, Upper Canadians had to carefully and continually consider the ramifications of their actions. This fact was poignantly impressed upon Upper Canadians by the 1787 disbursement of "Lord Dorchester's bounty." The Governor General of Canada at the time, Sir Guy Carleton, Lord Dorchester, empowered a commission to award an additional 200 acres of land to settlers who had successfully improved their initial grants. However, only those residents deemed to be of "peacable decent deportment" received bounty land, while persons of "doubtful principles and reputations" were denied.[29] As suggested by Lillian F. Gates, the commission served "to make it plain" to colonists "that the role of agitator would prove an unprofitable one."[30]

Upper Canadians repeatedly received variations on the same lesson, often through the venue of periodic parliamentary elections. Open polling stations allowed official and commercial patrons to monitor the votes of anyone who cast a ballot. Powerful elites could dictate public behavior through base extortion, by either rewarding compliant voters, or punishing those who supported the opposition. In some cases prominent men gave location tickets in return for votes. In other cases voters who cast their ballots inappropriately could find themselves on "black lists" that essentially denied them any future access to land or office.[31] Of course, the maintenance of order did not always entail either malicious coercion or blind obedience. Large numbers of colonists may have found the reciprocal relationship of land for loyal behavior to be quite

---

29 Directions to commission, as quoted in Lillian F. Gates, Land Policies of Upper Canada, (Toronto: University of Toronto Press, 1968) 17.

30 Gates, Land,17.

31 Noel, Patrons, 62; Bruce G. Wilson, The Enterprises of Robert Hamilton (Ottawa: Carleton University Press, 1983) 162. Another valuable source on the coercive nature of Upper Canadian elections is G.H. Patterson, "Studies in Election and Public Opinion in Upper Canada" PH D Thesis, University of Toronto 1969.

acceptable. Noel suggests that earning land grants for their loyalty served to emotionally vindicate loyalists, boosting their sense of self-worth and righteousness and confirming their distinct superiority as "a people highly favored of God."[32] It is likely that many loyalists, retired military officers and others felt genuinely satisfied with the land they had received and with their prospects of future grants. Individuals such as these, operating towards their own best interests, may have felt little incentive to agitate for change or drastically disrupt the status quo.

Nevertheless, despite the natural conservatism of some Upper Canadians and the grateful deference of others, in the decade before 1812, a major disruption of the colonial status quo did occur. After 1804, the truly radical, counter establishment opposition movement of Weekes, Thorpe and Willcocks emerged onto the Upper Canadian political stage and achieved significant levels of popular support. The opposition movement first took shape in 1805 under the leadership of Robert Thorpe, a puisne judge, and William Weekes who held a seat in the assembly from West York riding. After Weekes' death in an 1806 duel, and Thorpe's banishment from the colony, Willcocks, a close friend and ally of the two, took over leadership of the party.[33] He entered the

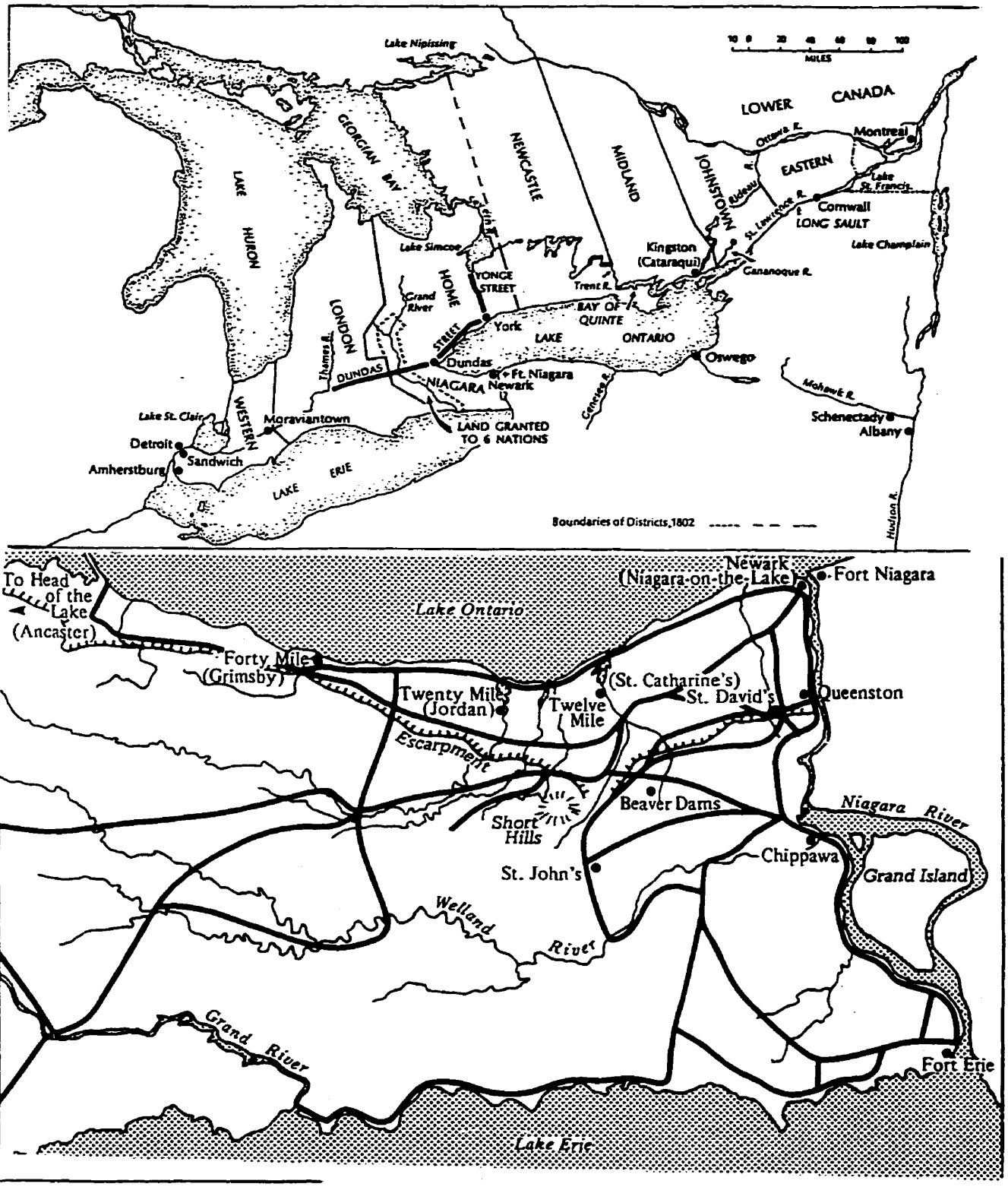
---

32 Noel, Patrons,11.

33 The use of the term "party" in reference to this group is potentially very misleading. There was no formal party apparatus normally associated with more modern political parties. Willcocks had no real authority by which to control his associates in the House, no "whip" to enforce discipline, and members voted independently on all issues. Sheppard, Plunder, 30. Though the three men, Weekes, Thorpe, and Willcocks, did conspire together and share political strategies, they did not achieve the same level of collaboration with other assembly members with whom they served. Nonetheless, the term was used on occasions by contemporaries to describe the mens' political behavior. For example, when Thorpe was suspended from the puisne bench, one of the charges levelled against him was that he had mixed "in the political parties of the Province". Mills, Idea, 22. Achievement of actual party status was still decades away, but as will be seen in later chapters, advances towards greater organization would be a major component of the growing strength of political oppositionists in the postbellum period.

assembly in an 1807 bi-election to replace Grimsby's Solomon Hill, and held his seat up to the war of 1812.

The Niagara District provides a venue from which to analyze the popular success of this movement. Grimsby Township, in the north west corner of the peninsula, is particularly relevant as it was part of the First Lincoln riding that consistently returned Joseph Willcocks, the group's eventual leader, to a seat in the Legislative Assembly. The rise to influence of Willcocks and his fellow agitators is historically important in two ways. First, it represented a specific moment at which American-Upper Canadians had a direct impact on the outcome of colonial political competitions. Second, at the broader level of colonial development, the Thorpe-Weekes-Willcocks movement can be seen as an early phase in the emergence of oppositional politics and the gradual evolution of definitions of legitimate loyal behavior.



Map 3. Above. Upper Canada, c. 1800. Taken from G.M. Craig, Upper Canada: The Formative Years (Toronto: McClelland and Stewart Ltd., 1963) 45.

Map 4. Below. Settlement in the Niagara Peninsula before 1812. Taken from Bruce G. Wilson, The Enterprises of Robert Hamilton (Ottawa: Carleton University Press, 1983) 190.

The importance of American-Upper Canadians in the rise of the political opposition movement rested in large part on the economic conditions many American colonists encountered upon settlement in the province. The influx of American settlers greatly increased the number of small, poor farming households in the province. More particularly, American-Upper Canadians swelled the ranks of colonists who suffered from the exploitation of the colony's established commercial and political patronage networks. Thorpe, Weekes, and Willcocks rose to influence by catering to the demands and discontents of the colony's small farmers. By nature of their distinct settlement experiences, American-Upper Canadians came to represent a significant section of this marginalized population group upon whose electoral support Willcocks and his associates relied.

Loyalists and American-Upper Canadians confronted different economic situations upon their settlement in Upper Canada. American colonists entered a system of commercial and political patronage predicated on the control of access to land, in which they suffered from both their political alignment and their late arrival. An American settler could not expect to claim land in the amounts granted to loyalists. Moreover, in many cases, by the time non-loyalists arrived in a community the most valuable lots would have already been alienated.[34] Loyalists as a group controlled a disproportionate amount of the available land. By 1838, despite their numerical minority, loyalists and their

---

[34] For the most part, the early loyalist immigrants to Upper Canada had strong agrarian backgrounds and could easily recognize the most valuable pieces of property in their respective townships. In most cases, primacy of their settlement allowed them to claim lots with the most fertile soil and the best aspect and access to irrigation. As well, the first settlers often occupied the riverfront properties that were conducive to the construction and operation of profitable mills. This type of early distribution of valuable land occured in Grimsby; see Grimsby Historical Society Annals of the Forty 10 Vols. (Grimsby, ON: Grimsby Historical Society, 1959) i, 10-25; and was also demonstrated in Leeds and Lansdowne township. See, Donald Akenson, The Irish in Ontario (Kingston: McGill-Queen's University Press, 1984) 48-116.

descendants owned 55 percent of the alienated land in Upper Canada.[35] This trend was mirrored in Grimsby. Loyalists controlled 66 percent of the lands patented in the township before 1812. In 1806, Grimsby loyalists owned over twice as many improved acres as their American-Upper Canadian neighbors, and nearly five times as many unimproved acres.[36]

In addition, in Grimsby as in most of Upper Canada, the early loyalists were equipped and provisioned in their first years of settlement with subsidized supplies from the colonial government.[37] American colonists did not enjoy these privileges. While later American settlers did receive their lands largely through free grants, their pioneering enterprises were not inexpensive. American-Upper Canadians paid mandatory administrative fees on the land they claimed, and independently accrued the costs necessary to feed, clothe and shelter their families in the first hard years of pioneering. Conversely, loyalists reaped the benefits of original settlement. By the mid 1790's, successful loyalists had accumulated valuable land and capital, and had entrenched themselves in commercial and political patronage networks that put them in positions to exploit later settlers. American settlers were relegated to lesser positions in a hierarchical system already in place upon their arrival.[38]

---

35 Noel, Patrons,12.

36 Patent information compiled from Grimsby land patent records found in, Robert Nelles Papers, MS503, Archives of Ontario. Quantities of improved and unimproved land determined by 1806 assessment records also found in Robert Nelles Papers, AO. Loyalist status determined by cross referencing names with United Empire Loyalist list in William Reid, Loyalists in Ontario (Lambertville, NJ: Hunterdon House, 1973).

37 Annals, 1, 8-12.

38 Akenson argues that in Leeds and Lansdowne township "there was no difference between loyalists and the Americans who arrived later as far as fundamental economic behavior was concerned." This is not entirely accurate. While both loyalists and American-Upper Canadians may have behaved similarly with respect to the settlement and improvement of their land, the latter group had to submit to more exploitative economic relations than their loyalist predecessors. Akenson, Irish,114. Americans were filling in places in a preexisting system, what Akenson would call "subinfeudation", but were constrained in their access to the highest positions. Akenson, Irish, 202.

The economic advantages derived by the earlier loyalist settlers of Grimsby township is evidenced in the tax rolls of 1799 and 1806. In 1799, loyalists represented 85 percent of those assessed who paid two dollars or more, and 100 percent of those who paid over two and a half dollars. In 1806, loyalists were the only residents with more than 50 improved acres, while American-Upper Canadians accounted for 75 percent of the men with less than 20 and 85 percent of the men with none at all.[39]

Despite the free grants of land available to American settlers, success in the new colony was far from guaranteed. Most new farm households had to go into debt to local merchants in order to support themselves while clearing their land. Often the same men controlled the grist and timber mills and thus further skimmed profits from local settlers. S.D. Clark clearly expresses the predicament, explaining that:

> the Upper Canadian Farmer found himself in a hopelessly unprotected position...Heavy capital expenditures during the first few years of settlement in the country had put him in debt, and as a result of his unequal bargaining position in buying and selling his debt mounted.[40]

While such a settler might own his land outright, commodity debt was tantamount to mortgage debt and equally jeopardized his hold on his land.[41] A poor harvest could mean an inability to pay and the threat of foreclosure. As

---

[39] Assessment Lists, Robert Nelles Papers, Archives of Ontario.

[40] S.D.Clark, Movements of Political Protest in Canada: 1640-1840 (Toronto: University of Toronto Press, 1959) 429-430.

[41] In the Niagara District these merchants were usually either wealthy loyalists or factors of the Scottish commercial clique headed by Robert Hamilton. In Grimsby, Robert Nelles represented an example of one such shopkeeper, merchant, miller, speculator. Nelles was a loyalist veteran from one of the principle founding families of the township, and was also well positioned in the local patronage network. At various times he occupied a J.P. position, a post as Indian Agent, and a seat in the house of assembly. As well, along with his family, Nelles was one of the largest landholders in Grimsby and among the largest in the peninsula. In Grimsby township, Nelles represented a prototype of the manner of man to whom a new settler could easily fall into debt. H.V. Nelles, "Robert Nelles" Dictionary of Canadian Biography Vol. V. (Toronto: University of Toronto Press, 1983) 650-652.

Lillian Gates has argued, settlers' "need for capital to develop [land] caused them to become hopelessly indebted to" merchants and in many cases "eventually to lose their land."[42] Upper Canada's exploitative economic system acted as an endemic threat to the competency ideals of the colony's small farmers. Because of their inferior economic status, American settlers formed a preponderance of those most at risk, and of those most needing beneficial political representation.

Furthermore, most American-Upper Canadians, unlike many of their loyalist counterparts, could not expect to qualify for additional land grants beyond those received upon their initial settlement. While this was obviously something of a disadvantage, it was simultaneously somewhat liberating. The lack of prospects of future land grants made American-Upper Canadians less susceptible to the coercion and extortion inherent in the traditional reciprocal relationship of land for loyal behavior. Non-loyalists possessed an immunity to one of the Upper Canadian elites most effective mechanisms of social control.

Along with increasing the number of disaffected small farmers immune to elite coercion and imperilled by the province's existing economic system, the influx of American settlers also transformed the colony's collective ideological disposition towards government and politics. It is possible to conceptualize the competing political attitudes of Upper Canadians as existing along a spectrum of ideological definitions of liberty. At one pole is a purely Hobbesian view of liberty and society, primarily committed to the maintenance of order and informed by a fear of anarchy. The spectrum is framed at the opposite pole by a more Lockeian conception of liberty, emphasizing the contractual responsibilities of a government to its people, and the right of those people to

[42] Gates, Land, 43; See also, Douglas McCalla, "Rural Credit and Rural Development in Upper Canada, 1790 to 1850" Patterns of the Past eds. Roger Hall et al. (Toronto: Dundurn Press, 1988) 37-54.

demand and agitate for satisfaction.[43] The colony's administrators and elite held a largely Hobbesian view of society, and fervently attempted to prevent any disruption of order or emergence of public discord. In the early years, colonial leaders achieved moderate success in these endeavors because the original, predominately loyalist, population also tended to favor order over less fettered liberty. This is not to say that all loyalists stood directly at the Hobbesian pole of the spectrum. Undoubtedly, many harbored beliefs that incorporated elements of both extremes. In fact, it is safe to assume that some individual loyalists may have been remarkably liberal in their political dispositions. Nonetheless, loyalists' responses to the American revolution and life in early Upper Canada, both articulated and demonstrated by actions, suggests that as a group the loyalists' collective political mentality focussed primarily on the maintenance of order and the avoidance of faction.[44]

The arrival of American settlers injected fresh social and political perspectives into the colonial agregate, and gradually shifted the province's collective ideological balance towards the Lockeian liberal pole. By participating in the heated public debates and party politics of the early Republic, many American-Upper Canadians would have been conditioned to expect more responsive representation in government and to exert their political influence regardless of the discord or public disruption it might cause. Many American settlers would have witnessed and experienced movements of popular political resistance to threats on agrarian life, and understood the franchise to be a viable and acceptable mechanism by which to pursue

---

[43] The conceptual framework of a Hobbesian-Lockeian spectrum comes from Thomas P. Slaughter's analysis of political and social discord in 1790's Pennsylvania: The Whiskey Rebellion: Frontier Epilogue to the American Revolution (New York: Oxford Universtiy Press, 1986) 127-142.

[44] See footnote 24.

personal goals. American-Upper Canadians brought to colonial politics a population group that was collectively more predisposed to the abandonment of deference and acceptance of alternative radical political options.

The Thorpe-Weekes-Willcocks opposition movement advanced because of its ability to harness the support of disaffected agrarian constituents who were prepared to elect unconventional candidates in order to protect their prosperity and competency. The group appealed directly to colonists struggling under the province's exploitative economic and political system, to colonists in exactly the positions occupied by the bulk of American settlers. As argued by S.D. Clark, "the danger of the...movement lay in its essential agrarianism, in its attempt to mobilize the strength of the large Upper Canadian farm population."[45] Willcocks, Weekes and Thorpe, and the nucleus of men that formed around them, attacked the "Scotch pedlars" of the "shopkeeper aristocracy" who, it was argued, had "so long irritated and oppressed the people."[46] A pamphlet written by a member of the group denounced the members of the patronage network who had "combined their functions as issuers of credit and officers of the law to exploit the struggling pioneer farmers."[47] In the *Upper Canada Gazette*, on 8 November 1806, Thorpe criticized the way his opponents in the administration and colonial elite exercised their official and economic power to coerce and oppress residents of the province.[48] Willcocks further stressed this theme in the pages of the *Upper Canadian Guardian*, the newspaper he published from 1807 to 1812. In one issue, Willcocks offered to prepare property documents for

---

[45] Clark, Movements, 227.

[46] Thorpe to Shee, 1 Dec. 1806, as quoted in H.H.Guest, "Upper Canada's First Political Party" Ontario History Vol. LIV, 4 (1962) 283.

[47] John Mills Jackson, A View of the Political Situation of the Province of Upper Canada in North America (London: W. Earle, 1809) 11. H.H.Guest suggests that Thorpe assisted Jackson in writing the pamphlet. Guest, "Party," 292.

[48] *Upper Canada Gazette*, 8 Nov. 1806, as discussed in Guest, "Party," 288.

his readers at prices much lower than the current standards. He was motivated to do so out of disgust, he argued, after seeing the exorbitant fees that appointed officials were charging for simple legal procedures.[49] "Sycophant Office-Hunters, Pensioners and Pimps," were consuming the wealth of the province, he argued, and impoverishing its residents.[50]

The group's commitment to agrarian interests was further demonstrated by some of the specific legal and legislative endeavors the men undertook. As Puisne judge of the Court of King's Bench, Thorpe ruled in 1806 that land held in free and common socage could not be seized for the payment of debt.[51] Willcocks argued in the assembly for the lowering of tax rates and officials' salaries and attacked the executive council for the arbitrariness of its land granting system.[52] Along with colleague John Mills Jackson, Willcocks criticized how government officials had granted themselves, nearly free of charge, huge tracts of land and then proceeded to raise fees paid by other colonists in order to enrich themselves. For example, in the years before 1812, the fees owing on a 200 acre grant rose to nearly 40 dollars, increasing the debt load of pioneer farm households.[53] An understanding of the oppressive political economic system which the party frequently harangued reveals something of the motivations behind these political attacks. In voicing their criticisms,

---

49 *Upper Canadian Guardian*, 14 April 1810. In other issues, Willcocks accused military leaders of embezzling fees paid by militia members, and called for the prosecution of officials for extortion. See W.R.Riddell, "Joseph Willcocks: 'Sheriff, Member of Parliament and Traitor'" Ontario History 24 (1927) 485.

50 *Upper Canadian Guardian*, 9 June 1812.

51 Guest, "Party," 285.

52 As sheriff of York until 1807, Willcocks had grown both familiar and sensitive to the injustices and traumas of land foreclosures and farm sales. Jones, "Willcocks," 856.

53 Clark, Movement, 224; Jones, "Willcocks," 855. Elwood Jones argues that this government policy of larger fees along with tighter restrictions on free grants, implemented between 1802 and 1804, was largely responsible for the electoral mandates given to Thorpe, Willcocks and their associates.

Willcocks and the rest sculpted their rhetoric to appeal to the interests of those small farmers eager to protect their property and profits from the exploitation of merchants and creditors.

In courting the colony's struggling small farmers, members of the opposition movement were in reality appealing in large part to the interests of American-Upper Canadians. Other colonists, including some loyalist small farmers, may have been equally enticed by the group's platform, but evidence suggests that American settlers represented a bulk of the province's economically challenged inhabitants and a large portion of the voters who supported the movement. The important contributions American-Upper Canadians made in supporting the opposition movement can be assessed in part by focussing specifically on Joseph Willcocks' political career. Willcocks held his seat in the house much longer than either of his colleagues, and his term marked the culmination of the group's political influence. By supporting Willcocks, American settlers helped the movement achieve its highest level of oppositional power.

To recognize Willcocks' ultimate importance within the group it is necessary to understand how the Weekes-Thorpe-Willcocks movement progressed. While the men were colleagues and friends, and advised and influenced each other's political perspectives, they never held concurrent seats in the assembly. They are best understood as a series of intimately connected political agitators who emerged in succession to provide a focus to political opposition both within the assembly and in the province at large. Weekes and Willcocks formed a friendship in 1800, soon after the latter's arrival, and after finding they had similar political views became close allies. In 1805, Willcocks worked dilligently to support and assist the election campaign that earned Weekes a seat in the House of Assembly. In July of the same year Judge Thorpe arrived in the

province and quickly took an interest in colonial politics. Like Willcocks, Thorpe found himself drawn to Weekes as a friend and political compatriot. The two men soon began conspiring together over the policies they would advance, for Weekes in the assembly and for Thorpe in his courtroom. Simultaneously, Thorpe and Willcocks ended up neighbors in York and became according to Thorpe, "most particular friend[s]."[54] For a short time the three worked in unison, providing each other with support and friendship. After Weekes' death, Thorpe became the recognized leader of the movement and maintained the group's political influence by entering the assembly in the bi-election for Weekes' vacated seat. When Thorpe left the province in 1807, leadership of the movement fell to Willcocks who solidified his position as the new focal point of political opposition by entering the assembly himself in a bi-election of the same year.[55] Willcocks' tenure as leader of the agitation represented the pinnacle of the group's oppositional political influence. He sustained pressure in the house for seven years and garnered more support from fellow assembly members than either of his predecessors. Thus an examination of his political and electoral successes specifically provides valuable insight into the ultimate importance American-Upper Canadian support played in the success of the movement.

Willcocks' only full term in office was as a member of the fifth parliament from 1808 to 1812. This was also the period in which he exercised the greatest amount of influence. Analysis of the fifth parliament voting records shows that by the second session in 1810, six other representatives were voting in unison

---

54 As quoted in Riddell, "Sheriff," 478.

55 Details of the relationships between Weekes, Thorpe and Willcocks come from Guest, "Party," 276-293; Riddell, "Sheriff," 475-495; Jones, "Willcocks," 854-859; Walton, "An End to All Order," 65-77.

with Willcocks on a fairly consistent basis.[56] By 1812, Willcocks had fluctuating support from eleven of the assembly's twenty three members.[57] In the final session of that year, he was able to exercise his power in the house to block legislation introduced by the administration that called for the tightening of militia regulations and the suspension of habeas corpus.[58]

The membership of the fifth parliament reflected what J.K. Johnson describes as a "'levelling' process" in Upper Canadian electoral politics.[59] It was a "benchmark" assembly, and marked a culmination of a "movement toward a more pluralistic and democratic House."[60] Sir Isaac Brock, whose proposed military preparations had been defeated by Willcocks and his supporters in 1812, was convinced that American settlers were responsible for the intransigent assemby. In February of that year, he complained of "the great influence which the vast number of settlers from the United States possess over the decisions of the Lower House."[61]

The connection between the emergence of this more popular, troublesome assembly and the participation of American voters is further suggested when it is recognized that due to a seven year residency restriction, the 1808 elections

---

56 The ratio of voting agreement was as follows: David Rogers: 18/21; Benajah Mallory: 16/21; Peter Howard: 18/23; John Roblin: 18/20; John Willson: 25/26. Taken from Elwood Jones, "Joseph Willcocks" Dictionary of Canadian Biography, 856.

57 Jones, "Willcocks," 858.

58 Jones, "Willcocks," 858; Sheppard, Plunder, 42-44. It is important to recognize that the fact that other assemblymen voted in conjunction with Willcocks does not mean that he actively collaborated with them or organized them in collective action. No evidence exists to suggest that Willcocks planned legislation or voting strategies in conjunction with others in the house, or that the members that voted in unison with Willcocks looked to him for guidance. As the most outspoken critic in the house Willcocks perhaps provided an influential example to other assembly members, but there is no reason to believe that he led them or controlled them in any way. Nevertheless, the fact that other representatives, however independent, chose to vote similarly to Willcocks helped to make his presence in the assembly more disruptive.

59 J.K. Johnson, Becoming Prominent (Kingston: McGill-Queen's University Press, 1989) 127.

60 Johnson, Prominent,126.

61 Brock to Prevost, 25 Feb. 1812, as quoted in Clark, Movements, 229.

were the first to involve any American settlers that arrived after 1797.[62] That American-Upper Canadians played a critical role in colonial elections by 1808, is demonstrated by a comparison of the available polling records for the First Lincoln riding that Willcocks represented. In 1800, American settlers represented only 35 percent of the voters. In 1808, they represented 69 percent.[63] A strong, final testament of the support American-Upper Canadians gave to the political opposition movement is provided by analyzing records of the elections in which Willcocks himself was a candidate. The results of his first 1807 victory have not survived, but in 1808 sixty-six percent of the voters who reelected him were American-Upper Canadians. Four years later, in his third election, seventy percent of his votes came from American colonists.[64]

Undoubtedly, Willcocks and his associates received support from a wide range of groups within the colony. Their defence of agrarian interests appealed to all colonists, whether loyalist or American-Upper Canadian, that felt their prosperity or competency threatened. Nonetheless, taken together, the evidence suggests that American settlers represented a significant and perhaps critical component of the electoral support that allowed Willcocks to further the efforts of his predecessors and mount a sustained opposition to the colony's political establishment. By the end of the first decade of the nineteenth century, American-Upper Canadians represented a strong majority of the colonial population. At the same time, many of them were achieving colonial suffrage for

---

[62] Gates, Land, 99.

[63] 1800 and 1808 poll results taken from Robert Nelles Papers, AO. It is important to note in addition that two of the men that regularly voted in unison with Willcocks, Benajah Mallory and Peter Howard, were themselves American-Upper Canadians, and the majority of his voting partners in the fifth parliament came from ridings west of York, the section of the province with the heaviest concentration of American settlers. Jones, "Willcocks," 857-858; Johnson, Prominent, 24, 169-239; Landon, Western Ontario, 12-23.

[64] Taken from 1808 and 1812 poll results for the "townships of Grimsby, Clinton, Gainsborough, Caistor, and so much of Haldimand County as lies between the Onandaga Village and the mouth of the River Ouse." Robert Nelles Papers, Archives of Ontario.

the first time, after having endured a system of fiscal and social inequities for seven years with no means of political recourse. Moreover, upon settlement in Upper Canada, many of these American settlers entered the lowest economic ranks in their communities, putting them among the prime victims of commercial and political exploitation. American colonists responded to their new environment in accordance to their inherited cultural values. Their numerical strength, combined with their commitment to agrarian ideals and predisposition to popular, representative government, greatly contributed to the rise of Upper Canada's first radical opposition party.

The political opposition that developed in the years before 1812 is not only relevant as an example of the growing electoral influence of American-Upper Canadians. It must also be considered from a wider historical perspective as a period of innovation and change in the strategies and standards of Upper Canadian politics. The measures taken by Weekes, Thorpe and Willcocks to attain office and mount a political opposition transformed the way colonial politics operated, particularly in the Niagara District.

First, it is necessary to recognize that Willcocks and his colleagues were not the first politicians to raise agrarian issues. The attention they gave to the concerns of colonial farmers, however, and uses they made of agrarian support, differed fundamentally from their political predecessors. Prior to the emergence of Weekes, Thorpe and Willcocks, political power in the Niagara Peninsula was divided between two groups. The first, and arguably the most dominant, was a consortium of Scottish merchants, headed by Robert Hamilton, who controlled the carrying trade on the Niagara River and most of the commercial goods supplied to the region. The commercial ties of Hamilton and his cohorts

provided a firm base from which to dispense patronage, call in favors, and maintain a coercive hold on dependent political and economic clients.[65] Competing for political control with the Hamiltonian faction was a loose affiliation of loyalist veterans, local worthies and minor merchants who opposed the Scottish clique's domination of trade and patronage. Members of the second group resented the way Hamilton and his closely knit associates exploited their commercial power, at the expense of their own aspirations.[66] They believed their own prominence and prosperity was being hampered by the Hamiltonian coterie's trade monopoly and administrative connections.[67]

Elections in the region were in most cases simply a competition between candidates promoted and financed by the two groups. To oppose the powerful Scottish group, loyalist officers and office holders attempted to harness the votes of farmers in the Niagara District by exercising their local patronage influence, and by exploiting the common resentment to Hamilton's commercial dominance. Thus when agrarian issues were raised, they were employed

65 Wilson, Robert Hamilton,182. Through his exploitation of the system, Hamilton became by far the largest and most powerful landholder in the peninsula.

66 The animosity between the two groups was seen in 1798 when Hamilton presented his accumulated land certificates to a local commission appointed to verify titles. Chief Justice John Elmsley noted that the board was made up predominantly of "Country Gentlemen" , local position holders of the second group, who resented how much land Hamilton had been granted and offered a "silent opposition" to his extensive claims. Elmsley to D.W.Smith, 4 March 1798, as quoted and discussed in Wilson, Robert Hamilton, 149. On another occasion, in 1799, Hamilton from his seat in the Legislative Council, proposed a bill to improve the portaging facilities at Niagara. Hamilton offered to make the improvements himself in return for the right to collect a two pence per hundred weight toll on all goods for twenty-one years. Many of the official elite and minor merchants vigorously opposed the measure seeing it as merely another attempt by Hamilton to enrich himself at the expense of colonists who relied on Niagara River transport. Petitions flooded into the assembly, headed by names of prominent loyalist officers, office holders and merchants, calling the bill "monopolous and oppressive." The improvement bill was not passed. Wilson, Robert Hamilton, 150-151.

67 In fact, the elite loyalist officials that largely made up the second group, had reason to be frustrated. In other regions of the province, men exactly like themselves represented the dominant local political factions. The Niagara peninsula was unique because of the presence of two powerful, contending elite groups. See Wilson, Robert Hamilton, 145-146; Frederick H. Armstrong, "The Oligarchy of the Western District of Upper Canada: 1788-1841" Historical Essays on Upper Canada ed. J.K.Johnson (Ottawa: Carleton University Press, 1989) 513-537.

merely as a way for jealous elites to challenge each other. For example, in the 1790's and early 1800's, the "country gentleman" faction achieved representation in the house by supporting and manipulating assemblyman Isaac Swayze. Along with the help he received from the patronage influence of his prominent backers, Swayze attained office, in part, by playing off the disenchantments of small farmers. In 1795, he drummed up popular support by campaigning against the wording of land grant deeds. He expressed the concerns of many small farmers who feared that the documents failed to transfer full ownership and control of assigned land, and might be used by large speculators to strip them of their property.[68] These earliest veins of agrarian agitation were far from radical, however, and threatened little real change. They served merely as hollow rhetoric in an attempt to garner support for a counter elite who, rather than wanting to change the system, merely hoped to make room for themselves to reap some of the benefits. Other legislation proposed and supported by Swayze and his running mates showed clearly where their interests lay. In the third colonial parliament, from 1800 to 1804, they fought to increase the fees paid to local office holders, raise the militia ranks of loyalist veterans, and institute differentiated commercial licenses to make small local merchants more competitive.[69] Politics remained simply a competition between opposing elites fighting over the right to control an exploitative political economy.

The defence of agrarian interests mounted by the Thorpe-Weekes-Willcocks movement differed fundamentally from the appeals of earlier politicians. Willcocks and the others were not the clients of powerful political or commercial patrons, nor were their agrarian agitations simply minor elements of an

---

[68] Wilson, Robert Hamilton,152-153.

[69] Wilson, Robert Hamilton,153.

essentially elite-oriented political platform. Instead, Willcocks and his associates criticized the elite and identified their abuse of both commercial and official positions as the true source of farmers' hardships. In the process the movement drastically altered the dynamics of politics in the Niagara Peninsula. By attacking both commercial and official elites, Wilcocks and his associates put both of the Niagara Peninsula's elite groups on the defensive. Moreover, by more genuinely addressing the interests of farmers they robbed men like Swayze of their popular political capital.[70] As a result, the two factions that had previously competed for power between themselves, coalesced to resist the assault mounted by Willcocks and his colleagues. As argued by historian Bruce Wilson, Willcocks "forced the [Hamilton] oligarchy and its former opponents to ally themselves in the face of a common foe."[71]

Willcocks and his associates were able to disrupt the traditional political

---

[70] Swayze was not returned to office in 1808. Wilson, Robert Hamilton, 161.

[71] The collective effort made by Niagara elite to protect themselves from their vocal critics is seen in the 1812 election that returned Willcocks to the assembly for the second time. In 1812, Willcocks competed for the First Lincoln seat against Abraham Nelles. It was Nelles' first attempt to run for elected office and his campaign reflected the emerging coalition between Niagara elites. Nelles came from a prominent loyalist family, that derived its wealth from both extensive landholdings and the operation of a mill and a store in Grimsby. Abraham and his brother Robert very much represented the types of prominent loyalist officials that prior to 1806, would have most likely been opponents of Robert Hamilton and his associates. In operating their store, they were forced to attain supplies from members of the Scottish conglomerate, and as such they were at the mercy of that group's trade monopoly. Nevertheless, Abraham Nelles' campaign appears to have been very much a cooperative effort between a loyalist officer official and the Hamiltonian merchant oligarchy. A note found in Nelles' papers reveals that prior to the election, Nelles engaged in some underhanded arrangements in order to improve his chances of victory. He transferred title to property in Caistor township, part of the First Lincoln riding, to two men so they could vote for him and help him defeat Willcocks. The understanding was that the transfer would be temporary and the lands would be returned immediately upon the conclusion of the election. What is interesting is that one of the manufactured voters was Colonel Robert Nichol, a man who began his Upper Canadian career as a dependent of Robert Hamilton, had run for office as a Hamiltonian client, and was, after Hamilton's death in 1809, the chief organizer of the scottish merchant groups political interests. The cooperation between Nelles and Nichol seems to demonstrate how Niagara elite were prepared to disregard earlier differences in order to eliminate the threat posed by men like Willcocks. Abraham Nelles Papers, Archives of Ontario; H.V. Nelles, "Robert Nelles," Dictionary of Canadian Biography ed. Francess G. Halpenny, Vol. VII, (Toronto: University of Toronto Press, 1987) 650-652, Wilson, Robert Hamilton, 150-159.

structure of the Niagara Peninsula and challenge the region's established elite despite their lack of commercial or political connections. Their success in this endeavour must be attributed to the fact that the tactics the men employed to acquire and maintain positions of political influence broke from the traditional paths followed by colonial politicians in search of power. Willcocks and the others did not operate according to the traditional patronage strategies of their elite adversaries. They did not gain their supporters by dispensing land and positions, or by economic threats; they had none to give. Instead, the group earned electoral success by espousing rhetoric and advancing measures that promised tangible benefits to their agrarian constituents.

Rather than relying on deferential support, the men truly courted potential voters by attempting to accurately represent their desires. Willcocks, for example, regularly held meetings with the inhabitants of his riding to allow them to advise him on issues of local significance.[72] Willcocks and his group forged a new strategy for political success, based on an unprecedented articulation of the

---

[72] Wilson, Hamilton,160-161.

concerns and demands of small farmers in Upper Canada.[73]

Not only did Weekes, Thorpe and Willcocks introduce innovative strategies by which to accumulate popular electoral support, they also distinguished themselves by their behavior in public office. They did not constrain their activities to simply advancing pro-agrarian policies. Rather, they consistently and stridently opposed the colonial government and vocally criticized the policies and abuses of administrators and their officials. By their actions, the three men offered a direct challenge to the colony's traditional standards of political behavior. According to historian W.R. Riddell, the group's "repeated and virulent attacks upon the government violated every rule of official decorum."[74] William Weekes, the first of the three to take office, wasted little time in demonstrating his disdain and opposition to the government status quo. In an address to voters, he declared his commitment to vigilantly protect his constituents from the "arbitrary or oppressive measures" of the administration.[75]

---

[73] Whether Weekes, Thorpe and Willcocks genuinely sympathized with the small farmers they championed in the Legislative Assembly is uncertain. Some historians question the sincerity of the group's agrarian sentiments and suggest that in fact the men differed little from their political contemporaries in that their primary objective was individual prominence. It has been argued that their agitations merely represented the pursuit of personal, pragmatic goals; that the men were disaffected, power hungry, would-be officials spitefully taking out their resentments on a colonial administration that had spurned them. Thorpe had been angered by being passed over for the Chief Justice position, and Willcocks had been dismissed from a somewhat lucrative position as Sheriff of York. See Mills, Idea, 3-34; Sheppard, Plunder, 30-40. Donald Graves, for example, has described Willcocks as an "opportunist whose major concern was his personal career." As quoted in Sheppard, Plunder, 30. In arguing the same point, J.B. Walton points out that when Willcocks first arrived in Upper Canada he cannily attached himself to Peter Russell, W.W. Baldwin and Judge Allcock, and attempted to climb the social ladder by exploiting the patronage of these prominent men. Willcocks' ambitions were thwarted, however, after a falling out with Russell and Baldwin, and the departure of Allcock left him without elite patronage. Walton, "An End to all Order," 66-72. Nevertheless, the details of Willcocks' early Upper Canadian career does not diminish his distinctiveness. The fact that, initially,Willcocks unsuccessfully attempted to follow the traditional route to personal advancement only highlights the novelty of his eventual strategy. Moreover, it may be true that the group ultimately intended only to replace their elite opponents in power and thereby improve their own conditions. This does not, however, detract from the fact that their mobilization of and reliance on popular support reflected a unique innovation in Upper Canadian politics.

[74] Riddell, "Sheriff," 480.

[75] As quoted in Guest, "Party," 277. Address was delivered in January 1805.

Then in February, immediately upon assuming his seat in the house, Weekes forwarded a motion to consider "the disquietude which prevails in the province by reason of the administration of Public Offices."[76] In the next session of 1806, he continued his attack on the colonial government by drafting a resolution that denounced the administration for misappropriating funds from the provincial treasury without the consent of the Assembly.[77] Weekes was able to get the resolution passed in the assembly and Lieutenant Governor Grant was forced to admit the validity of the complaint, renounce the practice and return the money.[78]

Thorpe, like Weekes, confounded and annoyed colonial leaders with his unconventional assault on the officers of government. While he was on judicial circuit in 1806, Thorpe made use of his courtroom forum, and particularly his addresses to the jury, to launch strongly worded criticism against the province's administration. Speaking to a London District jury in open court, Thorpe described the colonial government under the stewardship of Peter Hunter, as having been characterized, "by neither talent, education, information or even manner."[79] On other occasions, he advised juries to carefully consider the "fifteen years of disgraceful administration in this province."[80] Thorpe further disregarded the traditional precepts of ordered and tranquil government by actively fomenting agitation and opposition in the Legislative Assembly. Long before Thorpe had won his own seat in the house, the judge maintained a regular attendance at assembly sessions in York. At these sessions, Thorpe frequently and blatantly conferred with Weekes and others who welcomed his

---

[76] Journals of the Legislative Assembly: 1805-1811 (Toronto: L.K.Cameron, 1912) 47.

[77] Craig, Upper Canada, 59.

[78] Guest, "Party," 278.

[79] As quoted in Guest, "Party," 282.

[80] As quoted in Mills, Idea, 20.

council, and advised the men with arguments and motions with which to oppose or bedevil the executive.[81]

Like his colleagues, Willcocks spent his time in office openly questioning and criticizing the actions of the colony's ruling elite. As has been suggested, Willcocks wielded more influence in the assembly than either of his associates, and he revelled in his ability to oppose the administration. "I am flattered," he wrote in his paper in 1812, "at being ranked among the enemies of the King's servants in this colony - I glory in the distinction."[82] In combination with his legislative endeavors in the house, he used his role as publisher of the *Upper Canadian Guardian* to further attack and embarrass the colonial establishment. He suggested in the opening issue of the paper that his purpose in publishing it was to "check the...inordinate power," being wielded by the provinces administration.[83] In the 1 October 1807 issue of the paper, he accused the Lieutenant Governor of attempting to bribe assembly members. [84] In another issue, he described Lieutenant Governor Gore as "violent and impotent" and argued that his administration had made "venality the ladder of elevation and virtue the victim of oppression."[85]

The degree to which the actions and statements of the opposition leaders were anathema to the established standards of civil behavior is evidenced by the reactions the men elicited from the province's administrators and elites. William Weekes' audacity in rebuking the administration's fiscal irresponsibility was decried as "intemperate" by Alexander Grant. Earlier, his address to voters

---

[81] Guest, "Party," 279. On one occasion, Thorpe even stood up and intervened personally in an assembly debate.

[82] *Upper Canadian Guardian*, 9 June 1812, as quoted in Riddell, "Sheriff," 495.

[83] *Upper Canadian Guardian*, 24 July 1807.

[84] Gates, Land Policies, 83.

[85] As quoted in Riddell, "Sheriff," 481.

referring to the "arbitrary or oppressive measures" of government was pulled from the pages of the government organ the *Upper Canada Gazette*.[86] An even more telling example of the displeasure Weekes initiated in his opponents came in October, 1806. At the Niagara assizes, in open court, Weekes referred to the late Governor Hunter as a "Gothic barbarian whom the providence of God has removed from this world for his tyranny and iniquity."[87] Thorpe, presiding over the trial, took no action, but Legislative Councillor William Dickson found the insult intolerable and proceeded to vigorously attack and harangue Weekes. The quarrel escalated into a duel in which Weekes lost his life.[88]

The elite disapproval invoked by Thorpe was more fully articulated. Colonial leaders considered the Judge's activities to be entirely "outside the accepted bounds."[89] Lieutenant Governor Gore denounced Thorpe as a "'factious demagogue' intent on sowing the seeds of Ingratitude and Disloyalty".[90] In a letter to the *Upper Canada Gazette* "Spy" (who was probably S.P.Jarvis, a member of the colonial administration) attacked Thorpe for having threatened "the original confidence so necessary to the existence of civil society," and having endeavoured "to violate the peace of the public...upon the altar of...indistinguishing malice and ambition."[91] While Thorpe was not killed as a result of his inappropriate activities, those he offended did manage to bring an end to his Upper Canadian oppositional career. In 1807, as a result of Thorpe's "uniform tendency to degrade, embarrass, and vilify his Majesty's Servants and Government" Gore suspended him from his judicial duties, and in financial

---

86 Guest, "Party," 277.
87 As quoted in Guest, "Party," 284.
88 Guest, "Party," 285.
89 As quoted in Errington, Lion, 49.
90 As quoted in Mills, Idea, 21.
91 As quoted in Mills, Idea, 20-21.

straits, the judge left the province at the end of November.[92]

Willcocks' efforts to attack the colonial establishment both in the press and the assembly, quickly earned him the disdain of his more conservative colleagues in government. For his accusations of bribery and corruption in the assembly, Willcocks' companions in the house charged him with sedition and had him jailed. Gore considered him a "blackguard," and a "villain" and was furious at the "vulgar attacks" the "seditious printer" levelled upon him in the *Guardian* and in the assembly.[93] In a letter to Colonel Talbot in 1811, the lieutenant governor confided that because of the fierce agitation of "Joe's party" he was being forced to return to England to personally defend the charges against his administration.[94] A further testament to the suspicion and animosity that Willcocks incited in colonial leaders is the fact that when the publisher-statesman travelled to New York to purchase a new press for his operation, Gore hired spies to follow Willcocks' movements and intercept his mail in the expectation of uncovering a revolutionary plot.[95]

The behavior of Weekes, Thorpe and Willcocks reflects not only on the men themselves, but equally so on the character of the voters who continued to support them. The fact that a man like Willcocks, who had been arrested by the assembly and publicly denounced by top government officials, could continue to garner considerable electoral support suggests a shift in the public's tolerance and acceptance of oppositional representation. Not only were their assembly members exhibiting deviant behavior, constituents who condoned and endorsed that behavior challenged the traditional expectation that loyal

92 As quoted in Craig, Upper Canada, 62; Guest, 292.

93 As quoted in Jones, "Willcocks," 856.

94 Gore to Talbot, 16 March 1811, as quoted in Guest,"Party," 293.

95 Guest, 290.

colonists would "elect only those representatives who could work harmoniously with the provincial administration."[96] The success of such an openly critical opposition group reflected a new willingness on the part of farmers to exert a stronger voice of resistance to the economic and administrative system that threatened their hold on the land. The Weekes-Thorpe-Willcocks group flouted convention and pushed against the parameters of acceptable oppositional behavior. They forced Upper Canadians to consider the potential of a vigilant opposition, and familiarized colonists with the realities of anti-government activity, and thus laid the groundwork for subsequent political reform movements. Limited as it was, the success of this opposition party represented a development in the ideological approach to representative government in Upper Canada.

Finally, the rise to influence of the Weekes-Thorpe-Willcocks movement provides an early example of the role non-loyalist Americans and other marginalized Upper Canadians would play in the emergence and development of oppositional politics in the province. The manner in which the members of the group achieved and maintained access to the public forum demonstrates the symbiotic relationship that necessarily existed between colonists intent on criticizing and reforming government and the colonial subgroups that remained unrepresented and disaffected. In early Upper Canada, if an aspiring politician presented a threat to the established order or to the authority that empowered and enriched colonial leaders, he would most likely find himself denied all the assistance and advantages provided by elite patronage. In order to maintain a position from which to plausibly effect change, the agitator needed to seek alternative channels by which to attain access to the corridors of power. This meant a need to exploit untapped sources of support; to form alliances with

[96] Sheppard, 15.

groups that had no compelling or indissoluble connection to the established order. Filling this requirement were numerous, struggling Upper Canadian households that faced indebtedness and dispossession from an exploitive political economy and whose concerns were largely overlooked by an elite representative with little desire to disrupt the status quo. For these dissatisfied colonists to actively pursue redress for their complaints, they needed the representation of a politician willing to challenge the propriety of the system and promote changes unfavorable to the colony's power brokers. American-Upper Canadians significantly contributed to the growth and behavior of this disaffected electorate in Upper Canadian society. In the decades after 1812, the need and willingness of American-Upper Canadians to endorse nontraditional political alternatives enabled reformers to maintain a consistent presence in Upper Canadian politics and to gradually establish the propriety of their oppositional behavior.

Chapter Three:
The War of 1812

On 18 June 1812, six days after Joseph Willcocks earned his final electoral victory over Abraham Nelles, American President James Madison signed a declaration of war against Great Britain. On 27 June, news of the war's commencement reached colonial administrators at York. Two weeks later, American Brigadier-General William Hull crossed the Detroit River with an invasion force of 2500 troops.[1] For the next two and a half years, Upper Canadians reaped the consequences of their British affiliation. The colony became the major theater of hostilities between the two belligerent powers, and colonists faced the dangers and deprivations of prolonged warfare. Over the course of the war, inhabitants struggled with impressed military service, the demands of troop provisioning, military plundering and enemy invasion. The War of 1812 has been extensively studied and written upon by several generations of historians.[2] It is not my intention to consider the conflict in detail. To do so would exceed the scope of this thesis. Nevertheless, particular elements of the war can not be ignored in a study of colonial ideological development. Colonists' participation in the war influenced and reflected how they judged the loyalty of their neighbors and themselves. It also deeply

---

[1] George Sheppard, Plunder, Profit, and Paroles: A Social History of the War of 1812 in Upper Canada, (Kingston: McGill-Queen's University Press, 1994) 39-40. Hull's invasion from the west was part of the Americans' three pronged military strategy. Forces were also prepared to assault Canada via the Niagara Peninsula and through the Richelieu route to Montreal. Craig, Upper Canada: the Formative Years, 72. For a detailed analysis of American strategy, see Daniel Kenneth Crosswell, The American Invasion of the Niagara Peninsula, M.A. Thesis, Western Michigan University, 1979.

[2] On the War of 1812, see among others, War Along the Niagara: Essays on the War of 1812 ed. R. Arthur Bowler (Youngstown, NY: Old Fort Niagara Association, 1991); S.F. Wise, "The War of 1812 in Popular History" God's Peculiar Peoples eds. A.B. McKillop and Paul Romney (Ottawa: Carleton University Press, 1993) 149-169; The Defended Border: Upper Canada and the War of 1812 ed. Morris Zaslow (Toronto: MacMillan Company of Canada Ltd., 1964).

both in the United States and within the colony itself. The issues of loyalty and anti-Americanism raised by the conflict continued to preoccupy Upper Canadians and remained a focus of political debate in the decades following the war's conclusion. Furthermore, colonists' conduct under the stress of war revealed and confirmed assumptions about the dominant values and beliefs of the province's residents. The majority of Upper Canadians did not selflessly commit themselves to the military conflict, but instead directed their energies towards protecting their property, maintaining their agricultural productivity and preserving their family competency. Nevertheless, despite colonists' efforts, many areas of the province, particularly in the west, absorbed severe economic damage as a result of the years of battle, plunder and destruction that accompanied the war. These economic ramifications of the war would also emerge as a source of political conflict in the postbellum years.

Understandably, the War of 1812 reinforced many colonists' fear and mistrust of the United States. Prior to the conflict, though many Upper Canadians maintained close personal and economic ties to the United States, a significant number constantly regarded their southern neighbors with a watchful eye. Many conservative Upper Canadians believed it was their colony's destiny to stand out as a pillar of the British Empire, in stark contrast to the turbulent, deplorably democratic republic on their border. The explosive growth of the United States combined with assumptions about the tyrannical, expansionary ambitions of American leaders, fueled the concerns of some colonists that Americans would ultimately attempt to overrun Upper Canada. The perceived belligerence of the Americans in provoking the war confirmed in many Upper Canadians the traditional conservative belief that the United States would exist

as a constant threat to the peace and safety of the province.

For a number of colonists, particularly members of the province's conservative elite, the war also generated renewed apprehensions of the threat posed by the Americans within their midst. Well before the outbreak of war, prominent colonists including numbers of elite loyalists, had questioned the wisdom of admitting too many American settlers. The events of the war served only to confirm and strengthen their concerns. American-Upper Canadians could not be trusted, they believed, to defend the province in its time of need. Considering the number of American settlers in Upper Canada, staunch conservative John Strachan concluded that the colony was "environed almost with our enemies, and mixed with doubtful characters and secret Traitors."[3] Vindicating the conservative fears were a limited number of highly publicized desertions by American-Upper Canadians. Andrew Westbrook and Benajah Mallory, for example, both American settlers, joined the American forces shortly after the war's commencement and helped lead raids against their former communities. By 1814 several others had been captured for a variety of offences ranging from simple plundering and provisioning of American troops to espionage and open assault of militia officers. The conservative fears fueled zealous prosecution, and at the Ancaster "Bloody Assize" of May and June, 1814, Attorney General John Beverly Robinson succeeded in having eight of

---

[3]As quoted in A.N. Bethune, Memoir of the Right Reverend John Strachan, First Bishop of Toronto (Toronto: Henry Roswell, 1870) 42. For a good discussion of Upper Canadian conservatives' attitudes towards Americans during and after the war, see David Mills, The Ideal of Loyalty in Upper Canada (Kingston: McGill-Queen's University Press, 1988) 25-28; Jane Errington, The Lion, the Eagle and Upper Canada (Kingston: McGill-Queen's University Press, 1987) 89-97, 119-137. Earnest Cruikshank, A Study of Dissaffection in Upper Canada in 1812-1815 (Ottawa: Royal Society of Canada, 1912); S.F. Wise, "The War of 1812 in Popular History" and "Canadians View the United States: Colonial Attitudes from the Era of of the War of 1812 to the Rebellions of 1837" God's Peculiar Peoples Eds. A.B.McKillop and Paul Romney (Ottawa: Carleton University Press, 1993). 149,45.

the suspected traitors hanged.[4]

Further contributing to assumptions of American-Upper Canadian disloyalty were the difficulties that colonial military leaders had in organizing and deploying militia troops. The failure of large numbers of colonists to fully commit themselves to the war effort was understood by many contemporary observers to be attributable, particularly in the west, to the presence of American settlers. On the day before his death, General Brock, alluding to an impending American attack, commented that "if it were not for the number of Americans in our ranks we might defy all their efforts."[5] Instead, he complained, his ability to raise sufficient militia forces was impeded by the fact that "the greater part" of the population in the Niagara Peninsula was "so completely American as to rejoice in the prospects of a change of Government."[6] Many of the province's conservative elite drew the same conclusion. It was the Americans among them who were responsible for the "treasonable spirit of neutrality" that had infected the colony.[7] The war convinced them that Americans in any form could be

---

[4] William Renwick Riddell, "The Ancaster 'Bloody Assize' of 1814" The Defended Border: Upper Canada and the War of 1812 , 241-251; George Sheppard, Plunder, 165-169; G.M.Craig, Upper Canada, 81-82. Along with the American-Upper Canadians captured as traitors, numbers of others simply returned to the United States and abandoned their homes in Upper Canada. While these departures were seen by conservatives as signs of the general disloyalty of all Americans, in reality the number of departed Americans represented a small fraction of the American-Upper Canadian population and in most cases were settlers who had not been in the province long enough to establish themselves. Sheppard, Plunder, 89-92.

[5] Brock to Prevost, 12 Oct. 1812, as quoted in Fred Landon, Western Ontario and the American Frontier, (Toronto: Ryerson Press, 1941)33.

[6] Brock to Prevost, 12 July 1812, as quoted in David Mills, The Idea of Loyalty (Kingston: McGill-Queen's University Press, 1988) 26. Michael Smith, an American observer present in the province at the outbreak of war, believed that nearly all the American settlers in the Niagara District were adamantly opposed to bearing arms against invading U.S. forces. Smith, A Geographical View of the Province of Upper Canada (Philadelphia: J. Bioren, 1813) 85. Many of the early histories that acknowledged a lack of voluntarism from Upper Canadians accepted the statements of Brock, Smith and others and attributed militia disaffection mainly to American-Upper Canadians. See for example, Earnest Cruikshank, A Study of Dissafection in Upper Canada in 1812-1815 (Ottawa: Royal Society of Canada, 1912).

[7] Brock in speech to House of Assembly, 3 Aug. 1812., as quoted in Craig, Upper Canada, 76.

Not only did the war confirm conservatives' worst fears and prejudices of American-Upper Canadians, it also reinforced the belief that political dissenters were inherently disloyal and threatening to the colony. In 1813, after having served briefly in the Upper Canadian Militia, Joseph Willcocks deserted to the American side, became a colonel in the American army, and proceeded to lead raids and attacks into the Niagara Peninsula.[8] Along with ending his Upper Canadian political career and his life - he was killed in a battle at Fort Erie in 1814 - Willcocks' decision to join the Americans provided justification for conservatives' refusal to tolerate political opposition. Willcocks' treason further convinced conservatives that any attack on the government was undoubtedly the work of secret enemies whose ultimate intention was to weaken the authority of colonial leaders in order to convey the "devoted province to the United States of America."[9] In the post-war years conservative elites would use Willcocks' example to argue the dangers of "designing men" and to reassert that the "Law should enable the Government to discriminate and control the few, for the benefit of the whole."[10]

In reality, aside from the few exceptional colonists who deserted to the enemy, most Upper Canadians responded to the war in much the same way. Despite conservative assumptions, American-Upper Canadians were not

---

[8] The motivation behind Willcocks' desertion are not clear. H.H. Guest suggests that Willcocks grew disgusted with the Upper Canadian government's continued attempts to suspend civil rights in the form of habeas corpus, and grew frustrated by the oligarchy's bitter attacks on his political behavior. "Upper Canada's First Political Party" Ontario History 4 (1962) 293-296. Sheppard suggests that Willcocks may have been falsely accused of treason by political enemies and fled to the United States under the assumption that, regardless of his innocence or any defence he could provide, the administration would seize the opportunity to forcefully punish him. Sheppard, Plunder, 162.

[9] Gore to Powell as quoted in Mills, Idea, 28.

[10] John Powell as quoted in Mills, Idea, 27.

uniquely disloyal in comparison to their loyalist counterparts.[11] Members of both groups abstained from service when possible, and contributed to the war effort when it could not be avoided. Despite moments of unquestionable courage and valour, colonists' involvement in the war effort was most notably marked by chronic absenteeism. As argued by George Sheppard, "voluntary service was aberrant behavior," and many inhabitants of the province "employed an amazing array of excuses and tricks to evade military service."[12] As an example of militia truancy, in the summer of 1812 eighty-five percent of the militiamen from the Home, Niagara, London and Western districts failed to serve when called out. Furthermore, as suggested by Sheppard's allusions to "excuses and tricks" numerous colonists found ways to avoid military duty short of blatant absentia. On several occasions, most notably in the wake of the

---

[11] Studies of militia service in eastern sections of the province with large loyalist populations, show similar rates of absenteeism as displayed in the west. At times during the war, the absentee rate for the Grenville and Leeds militia reached seventy and eighty-five percent respectively. Akenson, Irish in Ontario (Kingston: McGill-Queen's University Press, 1984)123-124; Shirley Campbell Spragge, "Organizing the Wilderness" PH D Dissertation, Queen's University, 1986, 193; Sheppard, Plunder, 88. The similarity between loyalist and American-Upper Canadian war time activities in the Niagara District is evidenced by a return to statistics for Grimsby township. First of all, no one from Grimsby who voted in June 1812, elected to withdraw to the United States during the course of the war. Taken from a comparison of poll results for June 12 1812, and a list of Upper Canadians that withdrew from the Province. Abraham Nelles Papers, AO; Cruikshank, Study of Dissafection, 55-58. Grimsby residents, loyalists and American-Upper Canadians, stayed on their farms and did their best to weather the conflict. Available materials suggest that in Grimsby, members of both groups demonstrated nearly equivalent willingness to meet their war time obligations. A roll compiled by Captain William Nelles for the Fourth Lincoln Militia, shows that of the members who had absconded or were absent in July and August of 1812, five were loyalists and six were not. Abraham Nelles Papers, AO. Grimsby residents also showed a fairly uniform willingness to provide non-military support for the war effort. In November 1814, inhabitants of the Grimsby region were asked to provide wheat, rye and peas for the provisioning of troops. A list of the materials provided shows nearly identical per capita contributions for loyalists and American colonists. Lists taken from Abraham Nelles Papers, AO. The data shows loyalist and American-Upper Canadian contributions as: Wheat, 34.4 units to 30.5 units, Rye, 6.4 units to 6.5 units respectively. Considering the lower economic standing of Grimsby's American colonists demonstrated in the preceding chapter, it can be seen that they perhaps made even greater sacrifices than their loyalist counterparts. The evidence, though limited, suggests that American-Upper Canadians for the large part, did not represent a distinctly disloyal group, but merely manifested behavior common to the general colonial population at large.

[12] Sheppard, Plunder, 5.

American invasions of York and Niagara in 1813, many Upper Canadians opportunistically exploited the existing system of prisoner paroles. According to established military conventions of the time, prisoners captured in battle were given parole in return for the guarantee that they would not take up arms again during the conflict. The possession of such a parole gave an Upper Canadian an incontrovertible excuse to refrain from future militia service. In both the York and Niagara cases, in the days after the conflict had ended, scores of men who had not actually been overcome by the enemy or who had been far from the scene of battle, surrendered themselves to the American troops in hopes of receiving a parole.[13]

As has been suggested by Donald Akenson, the war provides a "natural experiment" by which historians can test assumptions about the character and attitudes of past peoples.[14] Observing the manner in which Upper Canadians acquitted themselves in the face of wartime crises provides behavioral evidence with which to determine what fundamental principles dictated colonists' actions, and what measures colonists would take to maintain faithful observance of those principles.

Upper Canadians' avoidance of military service should not be attributed solely to cowardice, though inevitably this was probably the case in some instances. Upper Canadians' actions during the war, as they did before and after, revolved around the precepts of an agrarian ideology: family security, maintenance of competency, and defence of individual property. The evasion of duty represented a concerted effort on the part of many, and perhaps the majority, of the eligible militia members to avoid service that would take them away from their families and farms. The absence or loss of a household's male

---

13 Sheppard, Plunder, 79-84.

14 Akenson, Irish,116.

labor force reduced the productive capacity of the farm unit.[15] Many men attempted to stay on their farms in order to protect their households' personal and financial security, and to ensure a requisite level of production to guarantee family subsistence. An example of the conflicting demands between family and military service is revealed in a July 1812 letter from Colonel Thomas Talbot to General Isaac Brock. In his letter, Talbot related the response he received in his efforts to mobilize a group of Norfolk militia. Arriving at the mustering site, Talbot wrote, "I found a large assembly of the Farmers with their Women, who upon my approach addressed me, by declaring that their Men should not March."[16] Colonists' commitment to maintaining the productive capacity of their farms was further demonstrated by militia protests in 1814. In the summer of that year, military commanders ordered a mass levy of all militia troops in the London, Niagara and Home districts. The men protested and petitioned the officials to reconsider, arguing that if they were kept from the harvest there would be insufficient crops to either supply the army or feed their families.[17]

The primary importance that Upper Canadians placed on protecting their particular homes or localities is further evidenced by the occasions in which militia members reversed the trend of non-participation and actively assumed a militaristic posture. In July 1814, members of the Lincoln militia mounted a fierce resistance to a band of marauding American invaders that threatened the

---

[15] One of the biggest problems for farmers was being forced to leave their land at the same time that crops came to maturity. Despite leaves provided to many men to return for harvests, crop volumes dropped. A report out of the Western district in August 1812 suggested that wheat and corn yields were less than a half and less than a quarter respectively in comparison to usual standards. Michael Smith, A Geographical View, 100-102.

[16] Talbot to Brock, 27 July 1812, as quoted in Landon, Western Ontario, 32.

[17] Landon, Western Ontario, 40. Farmers were also anxious to maximize their harvests because prices for wheat and other crops skyrocketed during the war. As an example, between 1812 and 1815 prices for flour rose from $6 to $12 and even $14 a barrel in some areas, substantially increasing the profitability of any possible surplus a farmer could produce. Sheppard, Plunder, 136.

local village of St. Davids. In the words of Sheppard, "the plundering eventually prompted" the local residents "to dust off their muskets and take the field."[18] In another case, when American troops landed at Dover in May 1814, local militia members, according to one observer, "expressed indignation at being ordered" to retreat to Brantford and made clear their "wish to try to prevent the American landing."[19] The selective participation on the part of many colonists demonstrated that their interests lay less in the general protection of the province and more in the defence of their own personal and familial interests. In carefully choosing when and where to avoid military service, Upper Canadians demonstrated the central role the ideals of family security and prosperity played in determining individuals' civic behavior.

In truth, many Upper Canadians were somewhat justified in trying to avoid service to protect their homes and belongings. The two and half years of war wreaked havoc on the regions of the province that served as the primary theaters of battle. The western sections of the colony bore the brunt of the conflicts' destructive effects. The Western, London, and Niagara districts witnessed some of the fiercest battles of the war and inhabitants of those regions endured repeated enemy invasions. The Niagara District in particular was invaded and occupied by American forces on two separate occasions, in May 1813 and July 1814. Along with the disruptions to the agricultural cycle that decreased productivity, the war also brought the serious threat of loss of property. Troops on both sides, British and American, regularly plundered provisions from Upper Canadian households or inflicted damages to local

---

[18] Sheppard, Plunder,104.

[19] Amelia Harris in Loyalist Narratives from Upper Canada, ed. J.J. Talman (Toronto: The Champlain Society, 1946) 147.

utilities.[20] Whole families were exposed to death in combat or in raids, and household possessions were constantly in danger of being stolen, confiscated or destroyed. The loss of property and disruption of productive enterprises adversely affected the economic prosperity of the colony's western inhabitants. One post-war visitor to the province commented that the "people of the Niagara District, in particular, were torn to pieces by the war."[21] Another observer who travelled through the Niagara peninsula in 1815 reported: "everywhere I saw devastation, homes in ashes, fields trampled and laid waste...truly a most pitiful sight."[22] In 1823-1826, a commission appointed to investigate war losses received 2055 claims. Eighty percent of the claims submitted came from the province's westernmost districts, and represented ninety percent of the total estimated losses. The Niagara District reported losses of £181,200 for a per capita loss of over £18.[23] In the postbellum years, colonists who had endured dangers and deprivations during the war expected restitution and assistance from their government, both for their military service and their economic sacrifices. The economic repercussions of the war became a major source of political debate in the years to follow.

The war, with all its concomitant dangers, deprivations and losses became, understandably, a watershed moment in the lives of all those involved. In 1817,

---

[20] Sheppard, Plunder,126: Based on analysis of claims submitted to the 1823-26 commission, Sheppard concludes that while British forces may have done less overall damage, they were involved in almost as many incidents of property theft or destruction. Sheppard's conclusions represent an important break in the historiography. Many earlier studies of the war, while acknowledging war time plundering, attribute the incidents of theft almost entirely to American forces. See, Landon, Western Ontario, 42-43.

[21] Robert Gourlay, Statistical Account of Upper Canada, 2 Vols. (New York: Johnson Reprint Corporation, 1966) ii 414.

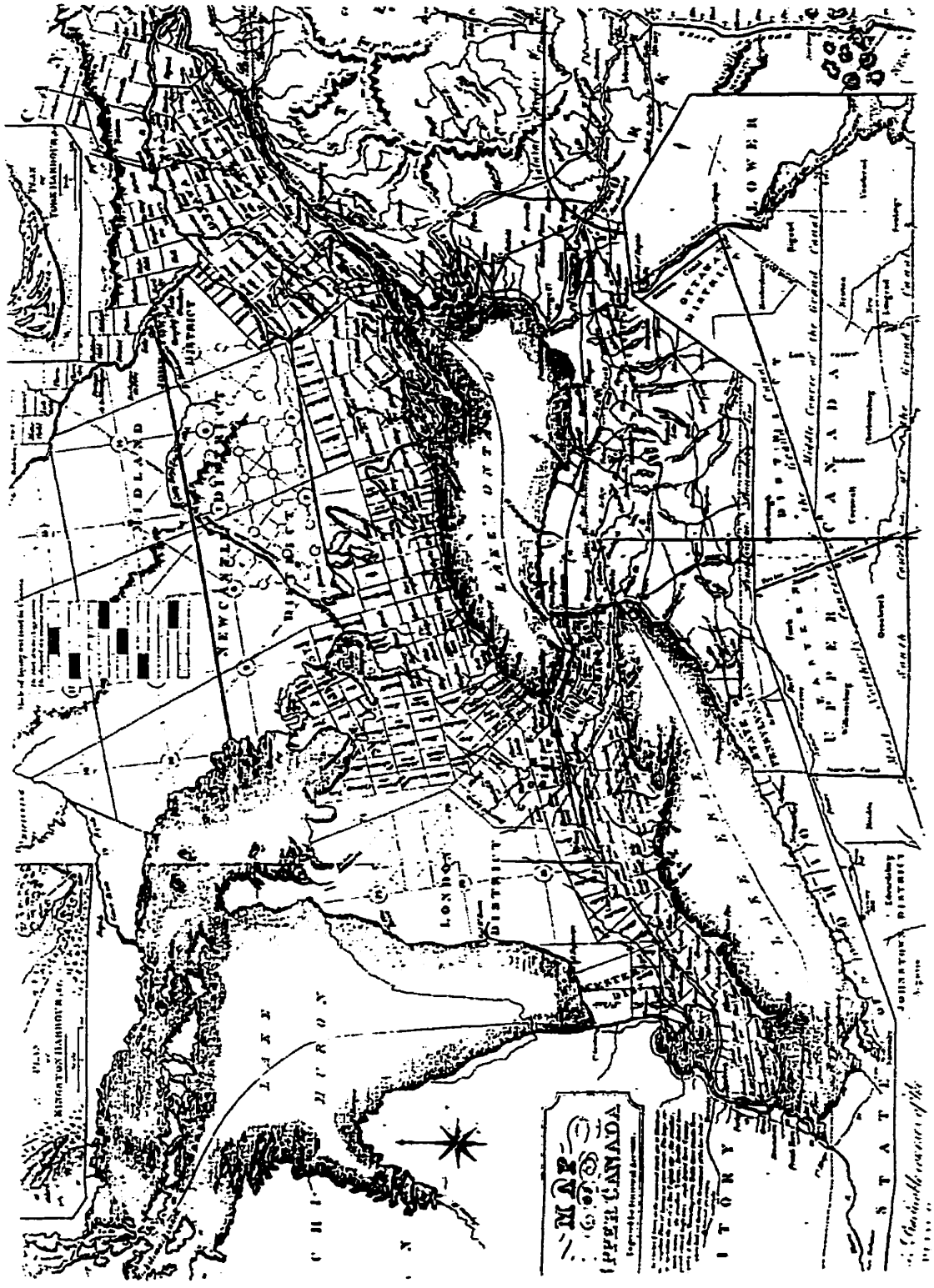
[22] Thomas Vercheres, as quoted in Sheppard, Plunder,172.

[23] Claims analysis comes from Sheppard, Plunder,123-126.

event in the history of Upper Canada." John Howison added to this sentiment, stating that the war "is continually referred to by the people," who "when alluding in a general way to the time in which any circumstance occurred, say that it happened before or after the war."[24] The events and experiences of the war years resonated in the collective consciousness of Upper Canadians for years to follow. The lessons of the war became a constant source of reference in the subsequent debates that shaped the course of colonial development. For the conservative elements in the province, the war vindicated their apprehensions of the United States in general, and of American-Upper Canadians in particular. Many other colonists, however, did not accept suggestions that American-Upper Canadians had been distinctly disloyal, and remained convinced that American settlers were a necessary component for the province's continued development and prosperity. In the years to follow, conflicting arguments about the war-time conduct of American-Upper Canadians would be repeatedly raised in crucial debates over immigration and naturalization policies. Of equal importance, large numbers of colonists, particularly in the war-torn western districts, emerged from the conflict with a strong sense of sacrifice and an expectation that their losses would be compensated by postbellum prosperity. When post-war conditions were slow to improve, many Upper Canadians channelled their disappointment into political opposition to the colonial administration.

---

[24] As quoted in Errington, Lion, 89.



Map 5. Upper Canada, c. 1818. Taken from Robert Gourlay, Statistical Account of Upper Canada 2 Vols. (New York: Johnson Reprint Corporation, 1966) vol i, leaf.

Chapter Four
"Dynamite to the Dam": Gourlay and the Resurgence of Unrest, 1817-1819

The War of 1812, and the subsequent desertion and death of Joseph Willcocks, effectively marked the end of the Thorpe-Weekes-Willcocks opposition movement. In the wake of the conflict, colonists, particularly in the war-torn western districts, directed their attention towards repairing their damaged farms, restoring their land to its pre-war productive capacity and recouping their war time losses. All hopes were for a quick return to agricultural prosperity. Colonists expected their sacrifices to be compensated by post-war success. To the disappointment of the colony's farming population, the detrimental economic effects of the war extended far beyond the cessation of battle. In the absence of renewed agricultural prosperity, the anger and dissatisfaction that had fuelled antebellum political opposition resurfaced. Struggling with poor crop returns and mounting debt, many colonists began to question the leadership and direction they were receiving from their government. Instead of working to improve conditions in the province, it seemed to many that the administration was following policies that impeded the colony's development. To defend their interests, members of the colonial community mobilized to oppose the leadership of their political representatives. New individuals, filling the roles left vacant by Willcocks and his associates, emerged onto the political stage to openly criticize the government and clamor for the redress of popular grievances. Only a few short years after the Treaty of Ghent, a new political opposition movement rose up in Upper Canada that challenged the province's ruling conservative elite and promoted new conceptions of colonists' political rights. Once again, American-Upper Canadians actively participated in and supported the outpouring of public

discontent, and in doing so contributed to the further evolution of colonial standards of loyalty and legitimate oppositional behavior.

Less than three years after the conclusion of the war, in the summer of 1817, Robert Fleming Gourlay arrived in Upper Canada to begin his short, though highly influential career, as colonial agitator. In the two years that followed, Upper Canadian society experienced a second major period of radical political opposition. The fiery Scot had not set out for the province with the intent of creating a political stir. He travelled to North America out of economic necessity. Gourlay's family fortunes had collapsed in Britain, and he came to Upper Canada to investigate some lands owned by his wife in Dereham Township of the Western District. Nevertheless, Gourlay soon found himself at the center of a major political uproar. Throughout his life, Gourlay had devoted himself to the protection of the public good, and coupled that characteristic with a keen sensitivity to civic or moral injustice. Moreover, he had a tendency towards broadcasting his thoughts through print, and he could not resist engaging any would-be opponents in open public debate.[1] These qualities

[1] Lois Milani, Robert Gourlay, Gadfly: Forerunner of the Rebellion in Upper Canada 1837 (Toronto: Ampersand Press, 1971) 74-179; Craig, Upper Canada: The Formative Years, (Toronto: McClelland and Stewart Ltd., 1963) 93-100. A survey of Upper Canadian historiography reveals a range of opinions on Robert Gourlay's personal character. Milani, in the only full length biography of the man, suggests that an ambition to champion grand enterprises combined with a low tolerance for criticism, led Gourlay to take intemperate actions. Milani portrays Gourlay as a man with good ideas and intentions who continually damaged his own prospects by his inability to avoid public controversies. Nevertheless, she does argue that Gourlay felt a real commitment to small farmers and the poor in general, and considered himself an agricultural scientist who could solve the problems around him. Recognition of Gourlay as an agrarian reformer can be seen in Robert G. Bloch, "Gourlay's Vision of Agrarian Reform" Canadians Papers in Rural History, Vol. 3, ed. D.H.Akenson, (Gananoque: Langdale Press, 1982); and in Mills, The Idea of Loyalty in Upper Canada, 1784-1850 (Kingston: McGill-Queen's University Press, 1988) 29-31. Other historians give the man even less consideration and simply dismiss him as a "congenital dissident" and "inveterate scribbler". Craig, Upper Canada,93; see also Lillian Gates, Land Policies of Upper Canada, (Toronto: University of Toronto Press, 1968) 101-112. At the furthest extreme, Aileen Dunham, Political Unrest in Upper Canada (Toronto: McClelland and Stewart Ltd., 1963) dismisses Gourlay's actions as the results of "fits of insanity" and a "muddled brain" and calls him an interesting subject for those interested in "abnormal psychology." She calls him "scurrilous" and "excuses" him by saying "he was never properly balanced." 53,60.

soon brought him into conflict with the colony's conservative establishment.

Gourlay's visit to Upper Canada began with a walking tour from Montreal, down the St. Lawrence, up through the Perth settlement, and then on to Kingston.[2] He proceeded from Kingston, via steamship, to Niagara where he fell into the company and hospitality of his wife's cousins, Thomas Clark and William Dickson, both prominent land speculators and legislative counsellors. His limited knowledge of the colony combined with information he received from his hosts fuelled his imagination and ambition and inspired him with a scheme. He became convinced that Britain's surplus population problems could be solved by the mobilization of large scale immigration to Upper Canada.[3]

Gourlay's emergence onto the Upper Canadian public stage began innocently enough with the publication and postal distribution of his first "Address to the Resident Landowners of Upper Canada" which asked townships to respond to an accompanying thirty-one part questionnaire. He hoped that the responses would provide the material for a thorough statistical account of the colony's conditions that would inform and inspire would-be

---

[2] Milani, Gourlay, 83-88.

[3] In the post-war years, Britain suffered from a severe economic depression, and unemployment and poor rates rose drastically. Many Upper Canadians were very desirous of this surplus population, seeing it as a way to fill in the empty spaces in the province and promote development. At the same time, some in the province worried that they would be deluged with the worst riff-raff of Britain, who would be more trouble than they were worth. Meanwhile in Britain, parliament continually debated the economy of subsidizing large scale emigration to the province. That the surplus population was a problem of malthusian proportions was acknowledged, but initial post-war emigration schemes did not seem to have much effect. Moreover, it was seen to be very expensive for the number of people moved. See Craig, Upper Canada,127-130; Helen Cowan, British Emigration to British North America: 1783-1837, (Toronto: University of Toronto Library, 1928) 76-125; Errington, Lion, 159-163.

immigrants from Britain to settle in the province.[4] Had Gourlay made this enterprise his only foray into the public dialogue, his impact on Upper Canadian society would likely have been much less noteworthy. He did not, however, limit himself to the simple task of collecting statistical evidence, for which he had received administrative approval.[5] Over the next two years, compelled by his contentious and inquisitive nature and his inability to resist elevating his personal sentiments to the level of public discussion, Gourlay took it upon himself to attack government policies and to encourage colonists to recognize the damages done them by their official leaders.[6] He proceeded to publish four more addresses to the inhabitants of the province and maintained a running print discourse with any detractors who chose to criticize his statements. In the process, he openly accused members of the colonial executive of tyranny and corruption and suggested that they had "thwarted" the laws of the colony and "trifled with" the "constitutional charter of Canada." He went on to warn Upper

---

[4] Gourlay's idea of promoting British immigration to the province was not entirely novel. Shortly after the war, Emigrant Aid Societies sprung up around the province to help arriving settlers and to petition the government to contribute assistance. Many colonists were initially very excited by Gourlay's proposed statistical account because they felt many potential immigrants were uninformed. Upper Canadians were also very concerned that they were losing a great deal of British emigrants to the U.S. Englishman Morris Birkbeck had organized a group settlement in the Illinois Territory and published two accounts, in 1817 and 1818, to promote other Britons to follow. Many in Upper Canada felt betrayed and shocked that their countrymen would choose the American republic over their British colony, and hoped to reverse the trend. Errington, Lion, 158-163; Craig, Upper Canada,127-130. See also Daniel Keon, "The New World Idea in British North America: An Analysis of Some British Promotional, Travel and Settler Writing, 1780-1860." PH D Thesis, Queen's University 1984.

[5] Milani, Gourlay, 95-120. Gourlay's plan for a statistical account of the province was approved by many leading dignitaries at York, including Administrator Smith and Chief Justice Powell.

[6] It has been suggested by some historians that Gourlay's agitations and criticisms of the government were mainly the result of personal insult. Gourlay had hoped to make himself into a large landholding immigration promoter, something like Colonel Thomas Talbot of the London District. Talbot had been granted vast tracts of land as part of an immigration scheme he had proposed to the colonial administration. It is argued that Gourlay's attack on the government was motivated mainly by the fact that he and his brother Thomas' petitions for land were denied. See Dunham, Political Unrest, 53-60. Gourlay's own writings seem to suggest that while he was upset by his treatment at York, he was well on his way to outright government criticism before he learned of his failed land request.

Canadians that the actions of government officials had put "the constitution of the province...in danger" and that as a result, "all the blessings of social compact are running to waste."[7]

Of perhaps greater significance, Gourlay motivated colonists to question the actions of their leaders and to openly express their dissatisfaction with the colony's prevailing conditions. At Gourlay's suggestion, colonists across the province met to discuss and document their collective grievances and concerns with the colony's established order. The result was an unprecedented display of overt public dissent. Not surprisingly, Gourlay's agitations quickly earned him the enmity of the administration. Defenders of the colonial government refused to stand by and allow Gourlay to incite what they considered to be dangerous and treasonous insubordination. Officials at York mobilized their power through the judicial branch of the government to attempt to silence Gourlay and prevent him from instigating any further unrest. In November 1818, Chief Justice Powell and Judges William Campbell and D'Arcy Boulton produced a novel interpretation of the province's 1804 Seditious Alien Act that qualified Gourlay, though a British citizen, as a candidate for arraignment.[8] Armed with the judges' decision, Thomas Meritt, the sheriff of Niagara, arrested Gourlay in December 1818 and placed him in the Niagara jail. At the next assize, in August of the following year, Gourlay was prosecuted by Attorney General John Beverly Robinson, found guilty of being a seditious alien, and banished from the

---

[7] Robert Gourlay, Statistical Account of Upper Canada, 2 Vols. (New York: Johnson Reprint Corporation, 1966), ii 582-583.

[8] Milani, Gourlay,186. The judges found a loophole with which to charge Gourlay. Because of a brief visit to New York, Gourlay had not been in residence in the colony for six continual months, nor had he taken the oath of allegiance in the province. As such it was determined that he could be considered an alien.

colony on penalty of death.[9]

Gourlay's success in inspiring widespread political unrest stemmed from his ability to identify and endorse the colonists' primary concerns. It was not necessary for Gourlay to manufacture grievances for the colonists whose support he enlisted. Before he set foot in Upper Canada, many colonists possessed ample reason to be concerned and disaffected by the conditions they faced. Gourlay merely served as a catalyst that helped to unleash and accelerate the expression of public discontent. In the words of Lois Milani, a Gourlay biographer, the Scot acted as "dynamite to the dam."[10] He caused the existing collective grievances of the colonists to spill over into public displays of dissatisfaction, and suggested effective ways that the disaffected could express their concerns. Gourlay tapped into the central fears and desires of many Upper Canadians and coopted those concerns into his own program of political agitation.

At the time of Gourlay's arrival in 1817, Upper Canada was a fertile ground for the fomentation of popular unrest. In keeping with the widespread colonial commitment to the agrarian ideals of household financial security and the maintenance of family competency, the primary concerns of most colonists focussed on threats and impediments to individual economic prosperity. Initially, many Upper Canadians optimistically anticipated that the post-war years would bring prosperity, opportunity and a "period of more rapid growth." In February 1816 the speaker of the House of Assembly, Allan MacLean, remarked with great confidence that the colony had "the brightest prospects of

---

[9] Milani, Gourlay,187-212. The trial in November 1818 that eventually led to Gourlay's banishment was in fact the third attempt made by conservative elements in the province to silence the Scot agitator through prosecution. Gourlay was tried twice for seditious libel in the preceding summer, in Kingston and Brockville, but juries failed to convict.

[10] Milani, Gourlay,121.

the future."[11] Contrary to popular hopes, however, the postbellum period brought not prosperity but economic stagnation. The province's fiscal difficulties arose from a combination of factors. First, the disruption of the war retarded the productive capacity of the province's large agricultural sector, particularly in the west where the majority of the fighting had occurred. Labor scarcity and property damage inhibited the ability of many farms to produce a surplus. Accompanying these structural difficulties were several years of uncommonly poor harvests. The colony did not produce sufficient crops for large scale export until the 1820's.[12] Moreover, when surpluses were produced, they brought greatly diminished returns. By 1817, wheat around Lake Ontario fetched only half the 1814 price.[13] Along with reduced crop production, the province also suffered from a shortage of domestic animals. According to William Crooks of Grimsby, the war had "drained the country of horses, horned cattle and sheep."[14] To meet the demand for flour and animals, it became necessary to import goods from outside the province, quickly draining the colony of specie.[15] Adding further to the currency shortage, the end of the war marked the end of army bill circulation which had effectively become Upper Canada's first system of paper money. Moreover, British expenditures in the province dropped drastically in the years after the war, further reducing the amount of circulating currency. By 1817, the monthly British expenditures fell to less than a tenth of

---

[11] "Journals and Proceedings of the House of Assembly of the Province of Upper Canada." 1812-1818. Ninth Report of the Bureau of Archives of the Province of Ontario, ed. Alex Fraser (Toronto: 1912). 7 February 1816,171-172.

[12] George Sheppard, Plunder, Profit and Paroles (Kingston: McGill-Queen's University Press, 1994) 183.

[13] Douglas McCalla, Planting the Province (Toronto: University of Toronto Press, 1993) 37. According to Lillian Gates, wheat prices fell from $3.00 a bushel in 1815 to 40 and 50 cents in 1818. Gates, Land,114.

[14] Sheppard, Plunder,185.

[15] The colony's trade deficit continued, at fluctuating levels, into the 1820's. 1816 was a particularly bad year in which imports far outweighed exports. McCalla, Planting, 39.

1815 levels.[16] The lack of currency made it very difficult for households to purchase necessary supplies to support themselves and to replenish lost stock. Families were forced to make purchases on credit and many fell into deep debt.[17]

Another cause of concern for colonists was their inability to exact restitution for militia back pay and war time loss claims. The monetary demands of the colony held little priority in London. Britain owed more than 900 million pounds sterling to creditors and had little inclination to direct sorely needed funds toward Upper Canada. The lack of expected reimbursements served to intensify the indebtedness of many Upper Canadians who had purchased on credit in anticipation of forthcoming compensation.[18] Referring to detrimental effects of the currency shortage, residents of Trafalgar township explained that the materials a farmer needed to provide for his family had to "be got out of the store; and merchants goods are very dear in this province; and as he hath nothing to pay with, he is obliged to go on credit." "These [debts] in a few years soon run up high," they continued, so that though the farm is developed to a level that could provide comfortable subsistence, the farmer "is frequently obliged to sell it, in order to pay off his debts."[19] Six years after the war, John Howison, a visitor to the province, noted that merchants were owed such huge sums that a consolidated attempt to collect would have meant the "ruin of two-

---

16 Sheppard, Plunder,183. On specie shortages, see also McCalla, Planting,34-35; Gates, Land,114-115.

17 Sheppard, Plunder,185.

18 Upper Canadians waited nine years before the first instalments of wartime compensation were received, and the money was not paid in full until 1833. Gates, Land,115.

19 As quoted in Gourlay, Statistical Account, i 362; from the Trafalgar response to the Gourlay questionnaire.

thirds of the farmers of the Province."[20]

Many colonists were also upset by the dwindling number of settlers coming into the province. Prior to the war, the principal source of immigrants to Upper Canada had been the United States. On 10 January 1815, orders were issued by Lord Bathurst to withhold land grants to all American immigrants. Returning Lieutenant-Governor Gore effectively achieved the object of Bathurst's directive by ordering all the colony's justices of the peace to refrain from administering the oath of allegiance to American newcomers. Since the oath remained a prerequisite for land ownership, whether by grant or purchase, even arriving Americans with sufficient funds to buy property outright were excluded.

The ban on American immigration seriously retarded the colony's economic growth. Between 1815 and 1817 the province's population declined for the first time since the 1780's.[21] Wild lots remained unsettled, and when coupled with empty Crown and Clergy Reserves, left tracts of vacant land that stood out as impediments to the development of more intricate networks of communication and trade. Moreover, up to the war, immigration had been the single most reliable source for the infusion of capital into the province.[22] Many colonists had expected to sell land and materials to post-war settlers as a means of

---

[20] John Howison, Sketches of Upper Canada, (Edinburgh: Oliver and Boyd, 1821) 81. Though a visitor to the province, Howison was in Upper Canada with the intention of writing an emigrant guide, and as such would have been examining and paying particular attention to the colony's economic condition. A contributing factor to the colony-wide debt was the deflation of colonial currency. Debts incurred on imports during and immediately after the war had to be repaid in British £ sterling that were suddenly much more expensive. McCalla, Planting,34-35.

[21] Sheppard, Plunder, 9, 186.

[22] Sheppard lists the colony's four major sources of capital infusion. In his opinion they were, in order of importance: funds brought in by immigrants, British government expenditures, profits on exports, and import duties. Sheppard, Plunder,183-186. Retired half-pay officers who chose to settle in the province did continue to inject currency but their capital could not compare to war time standards. The naval establishment alone spent £47,327 in 1814. One authority estimated that the Kingston military chest disbursed £1000 a day a the mid point of the war. In addition, in the post-war years, Upper Canada entered into serious disputes with Lower Canada officials over their failure to receive their proper share of import duties collected at St. Lawrence ports.

recouping war time losses.[23] Instead, hundreds of well-to-do farmers who could have contributed to the colony's economic development moved on to the Ohio region.

The popular animosity created by the immigration freeze is testified by the fact that most of the elected members of the House of Assembly opposed the ban and argued for an "open door" policy. In April 1817, assembly members in the first session of the seventh parliament formed themselves "into a committee of the whole to take into consideration the present state of the province." The result was a report that contained eight resolutions calling for the ban on American immigration to be rescinded such that "valuable settlers" would no longer be "prevented from emigrating to this province."[24] The importance colonists placed on the immigration issue is further demonstrated by the responses given to Gourlay's statistical questionnaire. The final question posed by the inquiry asked respondents: "What, in your opinion, retards the improvement of your township in particular, or the province in general; and what would most contribute to the same?"[25] In the Niagara District, nine out of the eleven townships that responded with answers to the final question specifically mentioned the detrimental effects of the lack of immigration.[26] The residents of Grantham and Stamford complained of the "want of immigration" and the Willoughby respondents stated clearly that "inhabitants from the United States, under proper restrictions, would add much to the advantage" of the colony. Similarly, Grimsby residents regretfully postulated that the colony's population would have been "at least one-third or a half " greater than existing levels if it

---

23 Sheppard, Plunder,186,9.

24 As quoted in Sheppard, Plunder,189.

25 Gourlay, Statistical Account, i 270-271.

26 Gourlay, Statistical Account, i 407-454.

weren't for the ban on American immigration.[27] The sentiments of many colonists mirrored those expressed by "William Penn", when he had argued in the Kingston *Gazette* that all sources of immigration should be exploited since "every additional labourer is a valuable acquisition."[28]

The administration's immigration policy convinced many colonists that their government leaders, instead of ameliorating the effects of the colonial recession, were actually hindering individuals from achieving renewed economic prosperity. Grantham residents complained that the province wallowed in economic stagnation "for want of...being correctly represented" by the colonial government. Grimsby respondents expressed their disappointment at the fact that their "rulers" had, "by a dash of the pen, endeavoured to abrogate" the former open immigration policies, which they considered, "some of the wisest statutes that ever emanated from the British senate." Their comments clearly revealed the anger and dismay generated by the government's decision to "interdict the admission" of "wealthy and industrious emigration from the United States."[29]

Gourlay had arrived on the Upper Canadian scene at a time when many colonists felt threatened by the prevailing economic conditions and were dissatisfied by the leadership and representation they were receiving from their government officials. Two consecutive sessions of parliament, in the springs of 1817 and 1818, had been prorogued by the executive before assembly members could advance measures in keeping with the desires of their

---

27 Gourlay, Statistical Account, 421, 412, 430.

28 *Kingston Gazette*, November 20 1810, as quoted in Errington, Lion, 156.

29 Gourlay, Statistical Account, i 425, 430-431.

constituents.[30] Rather than feeling satisfied with the colonial status quo, large numbers of Upper Canadians became resentful of the manner in which authority was being exercised and felt a need to effect political change and improve their personal prospects. Gourlay capitalized on these desires and discontents and orchestrated an unprecedented outpouring of anti-government expression.

After the 1818 prorogation, Gourlay published his third "Address to the Resident Landowners of Upper Canada." In it he called on colonists to exercise their constitutional right of "petitioning the Prince of Parliament" in order to defend themselves from the "tyranny", "abuse", and "cunning of the few in power."[31] As a consequence, over the spring and summer of 1818, colonists held local and regional meetings in which they openly discussed the causes of their unhappiness. They drafted and signed petitions delineating their objections to administrative practices, and elected delegates to a province-wide convention for the purposes of composing a message to be sent to the Prince Regent. The Niagara petition, which became the template for the final document produced at York in July, beseeched George IV to eradicate favoritism and patronage from the disposition of crown lands, end the executive's abuse of arbitrary power, and appoint a commission of independent men, immune from government influence, to inquire into the causes of the provinces economic stagnation.[32]

---

[30] The 1817 assembly was prorogued after it tried to submit the previously mentioned report that called for an end to the American immigration ban. The 1818 assembly was prorogued as a result of a debate between the Legislative Council and the assembly over a matter of American trade policy. The battle was in part constitutional, with the assembly arguing that the council could not amend a money bill. The council had changed a piece of assembly legislation to allow for easier entry of American goods. Aside from constitutional principles, however, the assembly opposed the measure out of appreciation of their constituents' agrarian fears that the entry of such goods would pose competition to the farmers of the province. Craig, Upper Canada, 91-92.

[31] Gourlay, Statistical Account, ii 581, 583.

[32] Gourlay, Statistical Account, ii 579.

Gourlay not only instigated the province-wide petitioning movement, but also actively organized and participated in the local, regional and colonial conventions.[33] He disseminated the Niagara petition in the colony's eastern districts in an attempt to inspire other potential petitioners, and advised and directed the final York convention as a non-voting delegate. Despite Gourlay's efforts, the colonists' final petition never reached its intended recipient. The York convention decided to delay sending the document to the Prince Regent and instead chose to offer it to the colony's incoming lieutenant governor, Peregrine Maitland, in hopes that he would endorse it and forward it to London.

Maitland refused to accept the petition or to provide the convention leaders with an audience. Instead, he took quick and forceful measures to stop the unrest spawned by the petitioning movement. He convened the House of Assembly and roundly denounced Gourlay and his followers for their attempts to "excite discontent, and to organize sedition."[34] He called upon the assembly to declare the convention campaign illegal and in return received "An Act Preventing Certain Meetings in the Province." The legislation found the actions of Gourlay and other would-be petitioners to be unconstitutional and a threat to "the public tranquillity," and determined that only members of the House of Assembly had the right to petition the monarch.[35] The parliamentary backlash was followed closely by the judicial machinations that resulted in Gourlay's

---

33 Eric Jackson argues that in organizing the convention campaign, Gourlay "gave to Upper Canadian Reformers their first systematic organization on a provincial scale." Jackson suggests that though Gourlay is commonly dismissed as a notorious malcontent, he should be recognized for creating "the model after which subsequent reform organization in Upper Canada was to be constructed." "The Organization of Upper Canadian Reformers, 1818-1867" Historical Essays on Upper Canada ed. J.K.Johnson (Toronto: McClelland and Stewart Ltd., 1975) 96,97.

34 House of Assembly, 12 October 1818, 5.

35 House of Assembly, 22 October 1818, 8.

banishment.[36]

Analysis of Gourlay's popular support reveals that American-Upper Canadians continued to play an important role in contributing to the development of colonial political reform. Unfortunately, the electoral evidence that connected American colonists to the rise of the Thorpe-Weekes-Willcocks movement does not exist for the Gourlay period. Nevertheless, there is good reason to assume that American-Upper Canadians were major participants in the Gourlay agitations. First of all, Gourlay admitted to receiving the greatest amount of his support from the Niagara, London and Western districts, regions of the province with the highest concentrations of American settlers.[37] A closer look at the Niagara peninsula in particular confirms American-Upper Canadians' involvement. The first phase of the agitations began in the winter of 1817-1818, when colonists held township meetings in order to respond to Gourlay's statistical questionnaire. Under the auspices of these meetings, neighbors willing to endorse the project and anxious to share their opinions, met and openly discussed their collective grievances over existing conditions. Of the replies received from the Niagara townships, seventy-two percent of the

---

36 The decision to prosecute Gourlay with the Seditious Alien Act, is credited mainly to John Strachan and John Beverly Robinson. Craig, Upper Canada, 98, argues that Maitland and others in the administration did not advocate the plan, feeling it was imprudent and would only draw more attention to the agitator. Maitland and the others did not, however, intercede and Gates suggests that Maitland personally interviewed the three judges in the case in advance in order to be sure of their ultimate decision. Gates, Land, 112-113.

37Gourlay, Statistical Account ii 576-577; Milani, Gourlay, 160-161. On the concentration of American settlers in the western half of the province, see Gates, Land, 105; Bruce Wilson, The Enterprises of Robert Hamilton (Ottawa: Carleton University Press, 1983) 6; Fred Landon, Western Ontario and the Western Frontier (New Haven: Yale University Press, 1941) 12-23. That Gourlay was particularly popular in the western half of the province is suggested by the assembly voting on the "Act preventing certain meetings in the province". The act was passed in the assembly by thirteen votes to one. Eleven of the thirteen members who favored the bill were from ridings east of York. Eleven assembly members from ridings in the west, unwilling to either declare the petition and convention campaign illegal or oppose Maitland on the issue, abstained from voting. Gates, Land,111.

respondents listed were American-Upper Canadian.[38] Furthermore, large American-Upper Canadian contributions continued to be seen as the movement entered the more radical stage of the convention campaign. In May of 1818, the *Niagara Spectator* published lists of residents who attended local petition conventions and endorsed the campaign with their signatures and the subscription of one dollar. In total, the paper listed nine hundred Niagara subscribers, of which seventy-seven percent were American-Upper Canadians.[39] Taken together, the evidence suggests that the outpourings of popular discontent that fuelled the Gourlay opposition movement resulted in large part from the energies and actions of American-Upper Canadians.

That American-Upper Canadians participated in the petition campaign is not surprising. In the post-war years, American-Upper Canadians struggled with the same economic stagnation as other colonists and were just as likely to face the threat of indebtedness and dispossession.[40] Furthermore, like their loyalist counterparts, they had demonstrated, both during and before the war, that they

---

[38] Names of respondents taken from, Gourlay, Statistical Account, i 407-452. Respondents names were then cross referenced with the list of loyalist Upper Canadians and their descendants found in Reid, The Loyalists in Ontario (Lambertville, NJ: Hunterdon House, 1973) Individuals determined to be non-loyalists according to Reid's list, are not necessarily American-Upper Canadians. There is the chance that some could be immigrants from Britain. However, immigration from Britain prior to 1812 had been quite meagre. Contemporaries estimated British immigrants in 1812 to represent only 5-15 percent of the province's population. Michael Smith, A Geographical View of the Province of Upper Canada (Philadelphia: J. Bioren, 1813) 62-63; Craig, Upper Canada, 47. During the war years, there was very little immigration of any type. After the war, the number of voluntary and subsidized British immigrants did begin to increase, but not significantly until 1818-1819, and even then, the largest groups were directed to the eastern parts of the province, around the Perth and Glengarry settlements. At the time of Gourlay's questionnaire and convention campaign, British settlers remained a small percentage of the inhabitants of the Niagara district. As such, it is assumed that evidence of non-loyalist involvement represents American non-loyalists predominately. Helen Cowan, British Emigration, 76-125.

[39] Lists taken from *Niagara Spectator*, May 14, May 28 1818. Loyalist status determined by cross reference to Reid, The Loyalists in Ontario.

[40] In fact, economic evidence presented in the chapter two shows that prior to the war, American-Upper Canadians were among the least prosperous in Grimsby township. Based on this, it is possible to assume that the post-war depression put American settlers in even greater risk from escalating debt and dispossession.

were fiercely committed to taking political action to protect their agrarian ideals. As well, it is possible that the agitators' goal of legalizing American immigration may have have had a particular interest to American-Upper Canadians. It may be assumed that for the colony's large American population, the decision to ban further immigration from the United States represented more than simply an imposed obstacle to economic success. American-Upper Canadians, like their loyalist neighbors, undoubtedly appreciated the potential value of new immigrants. It is possible to imagine, however, that the government's decision to prevent individuals similar to themselves from entering the colony may have meant more to American colonists than just administrative ignorance.

Colonial leaders decided to halt the influx of American settlers based on the assumption that American immigrants were undesirable and dangerous candidates for colonial citizenship. In part, the change in policy resulted from the perceived disloyalty of earlier American settlers during the war of 1812. The fact that some American-Upper Canadians had deserted to the enemy during the conflict renewed officials' suspicions of the detrimental impact of admitting unscrupulous, "ambitious and arrogant people" from south of the border.[41] In justifying the exclusion of Americans, proponents of the ban argued the "character" of such settlers to be "always doubtful and most often dangerous."[42] But the majority of American-Upper Canadians had not deserted to the American side; they too had endured the hardships of war and even engaged in battle to defend their adopted country. The implication by their government that they were unworthy or objectionable citizens could not have helped but have an alienating and upsetting effect. After meeting and conversing with large numbers of American-Upper Canadians, Gourlay wrote that "the monstrous

---

41 Charles Fothergill, "Port Hope Meeting", as quoted in, Errington, Lion, 158.

42 *Kingston Gazette*, 11 May 1816.

conduct of the government, forbidding free ingress from the States, had keenly wounded the feelings of these people."[43] The government's posture not only retarded their economic prospects, but maligned their character and discounted the contributions they had already made to the colony.

The Gourlay Affair revealed important historical lessons about the methods and strategies employed by early Upper Canadian political agitators. First of all, the motivating forces behind the Gourlay movement were highly reminiscent of those at play in prewar reform efforts. As was the case in the Thorpe-Weekes-Willcocks movement, the Gourlay agitations resulted, in part at least, from Upper Canadians' jealous defence of their economic interests. Colonists protested because they felt their agrarian ideals of household financial security and family competency were in danger. Farmers struggled in the face of economic stagnation marked by currency shortages and mounting personal debt. Making matters worse, the colonial government, rather than assisting the province's inhabitants, persisted in policies that impeded development and further threatened colonists' prosperity. As a final insult, the administration refused to consider calls for change from the people's elected representatives. Marginalized and ignored by an intransigent executive, colonists, out of desperation, took unconventional steps in order to assert their political demands. Gourlay received support in his oppositional efforts because his plans offered a viable alternative to Upper Canadians who had been driven to radical actions by their commitment to agrarian ideals. Gourlay recognized, harnessed and inflamed that desperation in order to mount an unprecedented

---

[43] Gourlay, Statistical Account, ii 422. Gourlay explains that his contact with a large number of American-Upper Canadians came when he travelled through the Niagara, London and Western districts in the winter of 1817-1818. In his journeys he found that "four-fifths of the settlers" had come from the United States, and that "there is not one British-born subject among twenty."

attack on government policy.

In order to understand the Gourlay agitations, it is necessary to recognize that Gourlay himself was very much a political agent. Though he did not pursue either appointed or elected office, he did actively attempt to effect political change in the province: to reverse established policies, to transform governmental structure, and to elicit more responsive administrative leadership. Like the reform-minded politicians who came before him, Gourlay needed to exploit innovative channels in order to attain a position from which to pressure governmental action. Gourlay possessed neither official nor economic power within the province and could not exert influence through the traditional patronage networks. Instead, in order to threaten the established order he relied on his ability to motivate ordinary Upper Canadians to accept and participate in unconventional forms of political expression. As argued by S.F. Wise, Gourlay understood that change would not come from what he considered the "tainted pools" of the colony's prominent elite, but from "the dwellings of the poor."[44] In this way, the oppositional movement mounted by Gourlay demonstrated the symbiotic relationship between aspiring government critics and those marginalized members of colonial society who had little incentive to support or defer to the ruling establishment. As has been argued, colonists who supported Gourlay did so because he provided a way to assert demands that conventional political leaders had been unable or unwilling to address. Conversely, Gourlay recognized that only by mobilizing widespread popular support could he hope to exert enough influence to effect political change.

Gourlay's dependence on popular support is partially suggested by the way

---

[44] As quoted in S.F. Wise, "Robert Gourlay", Dictionary of Canadian Biography, Ed. Francess G. Halpenny, Vol. IX (Toronto: University of Toronto Press, 1987) 331.

the content of his public statements shifted over time. In the pre-war period, Willcocks and Thorpe had held meetings with the residents of their ridings in order to be able to shape their rhetoric to address the genuine concerns of their constituents. Gourlay took steps similar to those of his antebellum predecessors to learn the minds of disgruntled Upper Canadians. The responses he received to his statistical questionnaire provided him with invaluable insights into the concerns of the colonial population. In addition, he travelled through the province, particularly the Niagara, Western and London districts, and personally interviewed the colonists with whom he came in contact. In the fall of 1817, when Gourlay first began involving himself in colonial affairs, he called for increased immigration from Britain. However, after travelling to the west and meeting directly with many of his supporters, and receiving the responses to his questionnaire, Gourlay significantly changed his platform. He recognized that though immigration in general was desired, it was the ban on American settlers that most infuriated the bulk of the colonists.[45] Immediately upon his return to Niagara from the western districts, in January 1818, he acquired and published a copy of Simcoe's 1792 proclamation that had invited immigrants from the United States. Then, the following month, in his second address to the colony's inhabitants, he advocated the opening up of the colony to American settlers. Gourlay carefully crafted the content of his message to best be able to inspire the support of disgruntled colonists.

Gourlay's rhetoric also demonstrated the need of early Upper Canadian political agitators to defend the legitimacy of their actions. The novelty of his behavior placed his methods and motives under suspicion. To elicit support, Gourlay struggled to convince his listeners that not only did their grievances deserve redress, but that the strategies he prescribed were acceptable. Of

[45] Gourlay, Statistical Account, ii 422.

particular importance was the colonists' right to form conventions and petition the imperial government. Conservative opponents of the convention movement denounced it as a seditious endeavor to "promulgate suppositious oppressions" and consummate "Rebellious destruction."[46] In his third address to the residents of Upper Canada, Gourlay forwarded arguments to counter charges that his strategies were seditious. He told colonists that when the time came that they could not "expect anything of value" from their government leaders, it was "proper" and "virtuous" for them to take bold steps to improve their colony and protect the "public prosperity." "The British constitution," he said, gave them the "right of petitioning the Prince of Parliament." Colonists were at liberty to keep their government leaders "to the strict performance of their duties" by exposing their inappropriate actions to criticism.[47] The notion that colonists should blindly follow the leadership of the executive, he argued, was a "false, deceitful, and ruinous" ideal concocted by the "cunning...few in power" in order to maintain "domestic tyranny."[48] In the weeks after Gourlay called for colonists to form petition conventions, opponents of the plan spread rumors that it was illegal for ordinary citizens to direct petitions to London. In response, Gourlay published another statement reaffirming the right of petition and stating that he had personally been in the House of Commons to witness Lord Folkestone submit, without objection, a petition from the citizens of Spa Fields. The Upper Canadian petition meetings could not be considered seditious, he argued, because they did not take place in secret nor involve the stockpiling of arms.[49] Gourlay continued to defend the legitimacy of the convention movement by

---

[46]John Simpson, An Essay on Modern Reformers Addressed to the People of Upper Canada to which is Added a Letter to Mr. Robert Gourlay, (Kingston: Stephen Miles, 1818)13.

[47] Gourlay, Statistical Account, ii 581, 582-583.

[48] Gourlay, Statistical Account, ii 593.

[49] Gourlay, Statistical Account, ii 598-600. Published in the *Niagara Spectator*, 23 April 1818.

providing the *Niagara Spectator* with a 1794 legal opinion by Lord Erskine that clearly stated that "to create a national delegation, amongst a free people, already governed by representation, can never be, under all circumstances, a crime."[50]

Regardless of the influence that Gourlay had on the political agitations that emerged around him in 1818, he was only a single individual whose residence in the province lasted barely two years. In the final analysis, the sentiments and actions expressed by the inhabitants of Upper Canada were of much greater importance than the political views of Gourlay himself. The outpouring of vocal opposition that occurred during the Gourlay years suggests that many colonists believed themselves entitled to the political rights that Gourlay ascribed to them.[51] The radical sentiments expressed in Gourlay's rhetoric accurately represented the political disposition of a significant section of colonial society. Popular support for the petition campaign revealed that the gradual abandonment of traditional standards of political behavior, begun in the pre-war period, had progressed to an even greater extent in the years after the conflict. Gourlay supporters manifested behavior that suggested that their attitudes towards governmental authority had diverged significantly from the standards of obedience and deference idealized by the province's conservative official elite.

---

[50] *Niagara Spectator*, 30 June 1818. Gourlay represented a link between Upper Canadian political agitation and the British reform movement going on at the same time. He had involved himself in reform efforts prior to his travels, and brought to Upper Canada many of the political theories and practices being used by political radicals in Britain. The ongoing reform effort in Britain also influenced the conservative sections of the province in their response to Gourlay. Having seen the turmoil and disorder unleashed by men like Cobbett and Hunt in England, conservative elite worried that to permit any public disaffection to escalate would be highly dangerous in the fragile colony. On Gourlay's connection to British reform currents, see Milani, Gourlay, 42-74; Bloch, "Robert Gourlay's Vision of Agrarian Reform" Rural History, 110-125; Errington, Lion, 105-108.

[51] In some cases, colonists may have been well aware of their political rights long before Gourlay's arrival. In other cases, Gourlay's arguments may have played an important role in convincing reticent colonists that they were legally justified in meeting and directing criticism towards the government via conventions and petitions.

As was true before and during the war, colonists made political decisions in the attempt to improve their individual economic prospects and ensure their household financial security. The novelty of the Gourlay affair lay in the measures the participants employed in the effort to assert their demands and protect their agrarian ideals.

The "Gourlayites" went beyond electing recalcitrant representatives who clashed with the provincial administration. They took it upon themselves to bypass the parliamentary process altogether. Instead of limiting their involvement in colonial affairs to a quadrennial trip to the polls, petitioners chose to exert a non electoral political voice. By convening an alternate body of public delegates intended to address popular grievances to London, colonists openly implied a lack of respect for the representative authority of the colonial government. Petitioners were acting out on a principle argued by Gourlay in his third address: "The rights of parliament may be trifled with, those of the people of Upper Canada are not so easily to be set at defiance."[52] Upper Canadians were unwilling to abide inaction from an intransigent parliament, and endorsed the convention movement as a way to repossess and exercise their political mandate.[53]

The popular support given to the petition movement revealed a growing disparity between official and public conceptions of the limits of popular political activity. In a letter to a friend in December 1818, executive counsellor John

---

[52] Gourlay, Statistical Account, ii 583.

[53] The act of petitioning was of secondary importance to the conservative authorities. Petitioning had long been a standard measure by which Upper Canadians could address issues to the assembly. It was the novelty of the convention process, its appearance as an alternate public assembly, and the perceived attempt to usurp authority away from the colonial parliament that most threatened the government and initiated the parliamentary crack down. As argued by Gary W. O'Brien, the extra-parliamentary nature of the conventions challenged the conservative concept that Upper Canadians had to be "institutionally controlled." "Parliamentary Procedure in Upper Canada" Ontario History 4 (1982) 292.

Strachan characterized the objectives of the petitioners as "unreasonable hopes."[54] The following year, the administration passed legislation denouncing the petition movement as, "highly derogatory and repugnant to the spirit of the Constitution." [55] By participating in Gourlay's campaign, agitators attempted to exercise political powers that their leaders felt they had neither reason nor legal grounds to claim. Attorney General John Beverly Robinson fiercely opposed the "Gourlayites" because he felt their "mode" of popular agitation to be a "dangerous...example" to other colonists.[56] The sentiments of *Kingston Chronicle* editor John Macaulay accurately represented the official perspective on dissent. Macaulay believed, argues S.F. Wise, that to "support government was to be truly loyal; to oppose it on principle was to be factious and even subversive of good order, and hence to menace the existence of the colony."[57]

In contrast, supporters of the Gourlay petition campaign felt it their "duty" to protest for "radical change" when they sensed the colony to be endangered.[58] As stated by George Adams of Grantham in a speech to Niagara petitioners: "True loyalty did not consist in mere passive submission," but in "watching over" the colony and defending its best interests "with jealousy and affection."[59] Like their leader, "Gourlayites" actively defended their behavior. Petitioners in Grantham began their discussions by asserting that the suggestion that their meeting "tends to sedition...is an erroneous opinion."[60] When acting Solicitor

---

[54]John Strachan to Dr. Brown, York, 1 December 1818, as quoted in Milani, Gourlay,196.

[55] House of Assembly, 17 October 1818, 8.

[56] Robinson to Col. Samuel Smith, 29 June 1818; Upper Canada Sundries, vol. 40, as quoted in Mills, Idea, 30-31.

[57]S.F. Wise, "John Macaulay: A Tory for all Seasons," God's Peculiar People, eds. A.B. McKillop and Paul Romney (Ottawa: Carleton University Press, 1993) 76.

[58] *Niagara Spectator*, 14 May 1818.

[59] As quoted in Gourlay, Statistical Account, intro d-di.

[60] As quoted in Gourlay, Statistical Account, ii 591.

of rebels, convention participant, Amos Ansley of Kingston responded vehemently: "We never ware Rebels and we Never will Be."[61] The ideals and behavior of the petitioners proved that many Upper Canadians felt legitimately entitled to take oppositional political actions far beyond what the conservative administration believed to be acceptable.

David Mills argues that the fact that the administration successfully expelled Gourlay and effectively stifled the petition movement "certainly indicated that the idea and practice of opposition had not as yet been accepted in Upper Canada."[62] Mills' statement is not completely accurate. The governmental crackdowns only demonstrated that the colony's conservative leaders at York had not accepted the legitimacy of political opposition, and that the administration continued to wield enough constitutional and patronage power to suppress dissent, and enforce compliance. To impress upon the province that insubordination would not be tolerated, Maitland punished the petitioners by ordering that any persons involved in the "late Convention of delegates" would be ineligible to receive land grants for recognition of past military service.[63] Richard Beasley, who had chaired the York convention, lost his position in the magistracy and was removed from his command of the Second Regiment of the Gore militia.[64] Even before Gourlay was banished and the conventions were deemed illegal, the government's power exerted a strong influence on the decisions of potential Gourlay supporters. As administrative opposition intensified in the spring and summer of 1818, William Dickson and Thomas

---

61 As quoted in Milani, Gourlay,161.

62 Mills, Idea, 32.

63 Sheppard, Plunder, 201.

64 Tory elite in the province also exacted retribution on Bartimus Ferguson, the editor of the *Niagara Spectator*, who provided a forum for most of Gourlay's statements. Ferguson was charged with seditious libel and jailed in Niagara. H.V. Nelles, "Loyalism and Local Power: Niagara District, 1792-1812" Ontario History 2 (1966) 105.

Clark, who had offered early encouragement to their visiting cousin, shrewdly removed their support and distanced themselves from Gourlay. They feared losing their seats in the legislative council and jeopardizing their connections to the valuable web of official patronage. Clark, out of fear of reprisal, attempted to deny the fact that he had subscribed to the petition campaign and issued a public statement denouncing his relative. Dickson, operating from the same motives, cooperated in Gourlay's eventual arrest.[65]

The government's ability to coerce silence did not mean that the conservative elite at York succeeded in eradicating the political beliefs and dispositions that had fuelled the agitation. Significant sections of the colonial community had chosen to support the petition campaign. As stated by the editor of the *Niagara Spectator*, in May 1818, "the public mind" accepted "the propriety of" the opposition movement, and "the strength of the country is enlisted in the cause."[66] A testament to the public support for Gourlay and his proposed convention plan was provided by the decisions handed down by two juries in the summer of 1818. Prior to the trial that expelled Gourlay as a seditious alien, Attorney General John Beverly Robinson and Solicitor General Henry Boulton twice attempted to prosecute him for seditious libel.[67] To support their charges, the conservative attorneys cited statements made by Gourlay in his third address, and passages of the Niagara petition which he was busy circulating. In both cases, in Kingston and Brockville, juries returned verdicts of not guilty. In the first case, "as soon as the verdict was delivered," the *Kingston Gazette* reported, "an instantaneous and general burst of applause, which continued for

---

65 Mills, Idea,199-201; Milani, Gourlay,138-141.

66 *Niagara Spectator*, 14 May 1818.

67 As an indication of Gourlay's place in the pantheon of Upper Canadian political agitators, in addressing Kingston court, Boulton compared Gourlay with Joseph Willcocks and expressed hopes that his fate would be the same. Milani, Gourlay,170. At other times, conservatives connected him with Robert Thorpe. Errington, Lion, 108.

some minutes, marked the state of the public's feelings on this interesting matter."[68] In Brockville, the courthouse crowd received the jury's decision with shouts of "Gourlay and Freedom!"[69] Even after Gourlay's banishment, many Upper Canadians undoubtedly continued to harbor the beliefs that had led them to support the fiery Scot and to exercise overt political dissent. The extent to which Upper Canadians retained the convictions which had caused the Gourlay agitations would be demonstrated in the years to follow.

In the wake of Gourlay's expulsion, E.A. Talbot, a British visitor to the colony, commented that though he personally considered the agitator to be a dangerous radical, the vast majority of colonists with whom he spoke did not share the opinion. Instead, he conceded, Gourlay had been "in truth, the idol of the people."[70] The continuing influence of Gourlay and his movement earned further comment by Andrew Heron, publisher of the *Niagara Gleaner*, in a June 1819 editorial. Heron, who like Talbot held no fondness for Gourlay, observed that "nine-tenths of the freeholders of the province," had been "disgusted" by the government's actions in silencing and punishing the turbulent Scot and his supporters. Heron went on to predict that sentiments unleashed by the Gourlay movement would "have a decided influence at the ensuing election."[71] Marshall Bidwell, a reform minded politician who would enter the assembly in 1823, echoed Heron's statement, writing "The spirit of Gourlayism is about...and behold! many are they that are possessed...Little York trembles...Gourlayism will

---

[68] *Kingston Gazette*, 18 August 1818; in September, "Bob Short" wrote to the same paper, "if the verdict of the jury ever expressed the public sentiment, it was in that case." *Kingston Gazette*, 15 September 1818.

[69] As quoted in Milani, Gourlay,177. From Gourlay, The Banished Briton, #12, 112. It is interesting to note that after Gourlay's dual victories over the conservative forces, Boulton personally removed the minutes of the two trials, and never returned them to the crown office.

[70] Talbot, Five Years Residence in the Canadas (London: Longman, Hurst, Rees, Orme, Brown, and Green, 1824) 416-417.

[71] As quoted in Sheppard, Plunder, 205.

be triumphant at the polls."[72] In the 1820 provincial election that followed, Heron and Bidwell's estimates proved accurate. Isaac Swayze, a tory supporter in the House of Assembly, who had conspired in the arrest and banishment of the Scottish agitator, lost his seat to Gourlay supporter Robert Randall. Randall was joined in the house by seven other veterans of the petitioning campaign, all of whom had been delegates to the final York convention.[73] In the coming decade, the group of newly elected "Gourlayites" formed a nucleus of parliamentary opposition to the government faction led by John Beverly Robinson and Charles Jones.[74] The 1820's witnessed the formation of a recognized "opposition faction" whose members committed themselves to serving their constituents by vigilantly checking the "influence" and "power of the executive."[75]

The arguments made by Gourlay and his supporters demonstrated an important link between the development of oppositional political behavior and the advancement of more inclusive conceptions of individual loyalty. Instead of accepting the conservative idea that immigrants from the United States were by nature dangerous, undesirable candidates for colonial citizenship, "Gourlayites" advocated for the acceptance of American settlers. In doing so, they articulated new, more accommodating definitions of loyalty. In part, reformers accepted the idea of their conservative counterparts that loyal character could be proved by

---

72 Bidwell to John Hunt, 22 May 1820, as quoted in Milani, Gourlay, 227.

73 The Niagara district threw out all four former assembly members in favor of "Gourlayites" John Clark, William J Kerr, Robert Hamilton and Robert Randall. Other elected Gourlay supporters were William Chisholm for Halton, George Hamilton for Wentworth, Samuel Casey for Lennox and Addington, and Thomas Horner for Oxford. Sheppard, Plunder,205; Milani, Gourlay, 227-228.

74 Sheppard, Plunder,205; Milani, Gourlay, 227-228. Attorney General Robinson sat in the assembly for York and Charles Jones represented Leeds. Both had been pupils of John Strachan at his school in Cornwall.

75 As quoted in Errington, Lion, 94,113; Mills, Idea, 32-33.

moments of individual action.[76] They disagreed, however, with the post-war application of the theory that had produced the ban on American immigration. The administration argued that American settlers had been generally disloyal during the War of 1812. In contrast, proponents of American immigration argued that settlers from the United States had "behaved in the late war...with as much fidelity and loyalty to his Majesty's government as any natural born subject could do." Moreover, "had it not been for their zeal and gallantry," it was suggested, Upper Canada "might perhaps at this time been a province of America."[77] Gourlay reiterated these sentiments. He agreed that the presence of "unprincipled villains in Canada was indeed proven by the war." "But who were they?" he inquired, "and from whence did they come? Has it been proven that the majority were American?" He argued that it had not, and that in fact "these men [had] stood foremost in the battle defending British rights."[78] "The settlers from the United States," Gourlay asserted, "were to be depended upon as loyal and faithful subjects."[79]

In addition to offering opposing interpretations of American's military service, "Gourlayites" also advanced more non-traditional reasons to accept immigrants from the United States. While loyalty could be proved by momentary displays of bravery and commitment, it could also be earned and developed over time through quiet, productive residence in a prosperous colony. It was "safe to admit Americans amongst us," argued Grimsby residents in 1818, because the labors and valuable contributions of American-Upper Canadians in the

---

[76] Loyalists clung strongly to this theory, arguing that their choice to abstain from revolution had irrevocably demonstrated their commitment to the crown. Mills, Idea, 3-13.

[77] As quoted in Gourlay, Statistical Account, i 431. From the Grimsby response to the Gourlay questionnaire.

[78] Gourlay, Statistical Account, ii 475.

[79] Gourlay, Statistical Account, ii 416.

committed members of colonial society.[80] Furthermore, it was argued that settlers in a flourishing colony would inevitably develop a grateful attachment to their government. As had been stated by "Penn" in 1810, "prosperous individuals according to a well known principle of human nature are generally loyal subjects."[81] Gourlay and his supporters embraced this philosophy and suggested that new American settlers would increase the prosperity of the colony and thus naturally become loyal themselves.

Defending the loyalty of current and potential American settlers served two purposes. First and most obviously, an assimilative definition of loyalty, that allowed room for Americans, strengthened agitators' arguments for the repeal of the immigration ban.[82] Secondly, for Gourlay, the legitimacy of his reform efforts depended on the acceptance of American-Upper Canadians as full members of colonial society. Gourlay understood that much of his popular backing came from American colonists. Through his travels in the province, particularly in the western sections, he realized that "four-fifths of the settlers" that supported him in his efforts, "had come from the United States."[83] If the conservative elements in the province succeeded in portraying American-Upper Canadians as secondary citizens then the social significance of Gourlay's efforts could be put into question. Gourlay's actions in this matter stood as a precursor to the activities of reformers who followed him. The need of reformers to legitimize the citizenship of their constituents in order to justify and maintain

---

80 As quoted in Gourlay, Statistical Account, i 431. From the Grimsby response to the Gourlay questionnaire.

81 *Kingston Gazette*, November 20 1810, as quoted in Errington, Lion,156.

82 The idea of an "assimilative" definition of loyalty comes from Mills, Idea, 7, 32. Most colonists who agitated for the admission of Americans did so out of personal economic motives. Nevertheless, in making the argument for U.S. immigration they demonstrated that they were willing to concede that Americans could be acceptable fellow citizens.

83Gourlay, Statistical Account, ii 422.

in the 1820's.

The Gourlay affair represented a critical phase in the evolution and diversification of Upper Canadian political culture. Significant numbers of Upper Canadians assumed the right to take unconventional political actions in defence of their interests. Their actions revealed an increasing split between traditional conservative ideals of political consensus and social harmony and public conceptions of acceptable oppositional behavior. The developments in political thought, demonstrated and produced by the Gourlay agitations, provided the impetus and ideological basis for the emergence of a recognized group of political reformers in the decade to follow. Moreover "Gourlayites", by advocating renewed American immigration, forced Upper Canadians to consider and articulate their beliefs on the requirements of colonial citizenship. In doing so, they began a debate on personal and political loyalty that occupied colonial affairs for the next ten years and defined and expanded the factional divisions between colonial politicians. Finally, the significant involvement of American settlers in the Gourlay agitations reinforced the important role that American-Upper Canadians played in the rise of colonial movements of political reform. Just as in the prewar period, the support of American colonists enabled opponents of the colonial government to exert pressure for change and to expand the limits of Upper Canadian political activism.

Chapter Five
"Godless Republicans": Reformers and "Aliens" in the 1820's

In the wake of Gourlay's banishment, supporters of the conservative establishment reflected upon the short career of the "dangerous incendiary" with resentment and relief.[1] He had undoubtedly disturbed the tranquility and order of the province, and "done harm," argued John Strachan, to "a quiet Colony" with "little or no spirit of inquiry & very little knowledge."[2] Nevertheless, by 1820, prominent conservatives comforted themselves with the idea that the seditious public spirit of "commotion and disaffection" that Gourlay had unleashed had dissipated.[3] After expelling the ringleader and punishing his supporters, the colonial executive believed that it could be confident in the "prevailing good sense and good principles of the great majority" and be assured that "the inhabitants of this happy country are in truth contented."[4]

In reality, however, Upper Canada did not become the tranquil ordered society that some had optimistically imagined. Instead, during the 1820's, the authority of the colony's conservative elite continued to be challenged by oppositional politicians and discontented citizens. The decade was marked by a significant growth in the stature and organization of political opposition within the House of Assembly. Political reformers became more confident and collaborative in their positions as opponents of the colonial administration, and established themselves as a more permanent, recognizable and effective opposition bloc within the provincial government. In the process, they

---

1 *Kingston Gazette*, 12 May 1818, as quoted in Jane Errington, The Lion, the Eagle and Upper Canada (Kingston: McGill-Queen's University Press, 1987) 108.

2 Strachan to Dr. Brown, 1 December 1818, as quoted in Lois Milani, Robert Gourlay, Gadfly (Thornhill: Ampersand Press, 1971) 196.

3 *Niagara Spectator*, 29 July 1819, as quoted in Errington, Lion, 108.

4 Charles Fothergill, "Port Hope Meeting" 1818, as quoted in Errington, Lion, 110.

continued to fight for the legitimacy and value of dissent, and provided colonists with well articulated, viable alternatives to the political ideology advanced by the colonial administration. A detailed analysis of all the numerous political controversies of the period is beyond the scope of this study. One issue in particular, however, demands attention. Arguably the single most important political debate of the period revolved around the contested citizenship rights of American-Upper Canadians. Conservative elements in the province attempted to reduce American colonists to the status of resident aliens, and strip them of their political and property rights. The ensuing conflict over alien naturalization spanned nearly the entire decade, and the eventual conservative defeat demonstrated the growing influence and oppositional power of the province's political reformers. Moreover, the nature of the debate revealed that the ability of political reformers to maintain a parliamentary presence and promote advances in oppositional thought rested in large part on the critical support they received from American-Upper Canadians.

As Upper Canada itself became more physically complex in the 1820's, so too did the political consciousness of the province's residents.[5] Unconventional ideas about the constitutional authority of government and the meaning of representation openly competed with traditional conservative expectations of grateful deference and unquestioning loyalty. The willingness of many colonists to question their leaders and demand accountability from their government continued to grow. "Upper Canadians from all walks of life," argues

---

5 Between 1818 and 1828 the population of Upper Canada approximately doubled. New townships were settled and older regions became more highly developed. Canal projects were under construction, a provincial bank was established and a well endowed university was chartered. G.M. Craig, Upper Canada: The Formative Years, (Toronto: McClelland and Stewart, 1963) 188. On the individual political side, as stated by Jane Errington, "Upper Canadians had evolved into an active and relatively knowledgeable electorate." Errington, Lion, 188.

historian Jane Errington, "came together to debate the political, social, and economic issues of the day in the light of differing political viewpoints."[6] The legitimacy of political dissent of the style of Willcocks or Gourlay, though far from universally accepted, found new champions and gained greater appreciation. As a result, by 1828, "basic political divisions...polarized the colony into two warring political camps."[7] For the first time, representatives of both camps were firmly entrenched within the government and consistently confronted each other, particularly on the floor of the House of Assembly.

The executive branch of government continued to be dominated by a strong nucleus of tory elites who advised the lieutenant governor and defended the prerogative and policies of his administration. In the 1820's this nucleus centered around John Strachan and a group of young elite proteges who shared his conservative political beliefs. Strachan became an executive councillor in 1815, and increased his influence in 1820 by gaining membership in the legislative council. He was joined at York by four prominent former students: Attorney General John Beverly Robinson, executive and legislative counsellors Christopher Hagerman and George Markland, and assembly member Charles Jones. The political unit formed by these men stood as a bastion of traditional conservative political views. They refused to tolerate dissent and remained committed to maintaining social order and political

---

6 Errington, Lion, 91.

7 Errington, Lion, 93.

authority over colonial affairs.[8]

The novelty of the 1820's was that another group of politicians, advocating very different political ideals, coalesced to pose a formidable opposition to the policies of their conservative counterparts. As may be expected, these men did not achieve prominence by appointed office, but they did exercise influence through their membership in the House of Assembly and the support they received in the pages of the colonial press. As mentioned in the preceding chapter, the 1820 election admitted eight representatives who had acquired opposition experience as delegates to Gourlay's petition convention.[9] When combined with assembly members like John Rolph, William Warren Baldwin, and Marshall Spring Bidwell, the House of Assembly in the 1820's came to contain a strong body of reform minded politicians.[10] As a group, these men

---

[8] Gerald Craig, Upper Canada, 106-124; Errington, Lion, 93. Robinson also sat in the assembly representing the town of York from 1820-1830. He was appointed to the Executive Council in 1829, the same year he was appointed chief justice of the Court of King's Bench, and entered the Legislative Council in 1830. Jones sat for Leeds from 1820-28 before being appointed to the Legislative Council in 1829. Hagerman sat in the assembly for Kingston from 1820-24, and was also appointed to the Court of King's Bench in 1828 and to the position of solicitor general in 1829. Markland, along with his appointed positions in the two councils, was also given the office of Inspector General of Public Accounts. J.K.Johnson, Becoming Prominent (Kingston: McGill-Queen's University Press, 1989) 221,195,201. The men had attended Strachan's Cornwall school together and were united by their shared childhoods and the imprint of Strachan's conservative teachings. Together these men formed the nucleus of the province's ruling tory elite that historians have called the "Family Compact." Collectively the group was, as argued by S.F.Wise, "a coalition between a central bureaucracy and local conservative elites." "John Macaulay, A Tory for All Seasons" God's Peculiar People ed. S.F.Wise (Ottawa: Carleton University Press, 1993) 74. As the term suggests, the group was closely connected by family relations, political office, and personal enterprises. Members of the group were deeply embedded in networks of official and commercial patronage which they exploited for both personal prominence and political power. They represented the epitome of Upper Canada's traditional patronage power brokers. See S.J.R. Noel, Patrons, Clients, Brokers (Toronto: University of Toronto Press, 1990) 83-93; Graeme Patterson, "An Enduring Canadian Myth: Government and Family Compact" Historical Essays on Upper Canada ,ed. J.K. Johnson (Ottawa: Carleton University Press, 1989) 485-513; Errington, Lion, note 14, 220.

[9] George Sheppard, Plunder, Profit and Paroles (Kingston: McGill-Queen's University Press, 1994) 205.

[10] Rolph sat in assembly for Middlesex from 1824-30. Baldwin sat for York and Simcoe from 1820-24, and for Norfolk from 1828-30. Bidwell sat for Lennox and Addington from 1824-36. Johnson, Prominent, 223,172,174.

frustrated the executive by disputing proposed legislation, and took every opportunity to embarrass the administration by highlighting examples of corruption and abuse. Moreover, by their actions and the doctrines they espoused, reformers challenged the conservative establishment's exclusive right to define the standards of public political behavior.[11]

It is important to realize that neither of the two competing groups in the government fit the modern definitions ascribed to political parties. Both lacked the requisite strict organizational structure and were not completely unified in the political philosophy they espoused.[12] Nevertheless, the question of parties in the 1820's is a clouded issue. Officially, politicians took great care to present themselves as independent legislators, and even reformers like the respected Dr. W.W. Baldwin openly asserted that the people's representatives should not be involved in "a spirit of faction."[13] In practice, however, the term "party" was frequently used by the press and public, and in the discourse of politicians. The conservative tories came to be referred to as the "court" or "ministerial" party, and the reformers were labelled as the "country", "people's", or "patriots'"

---

[11] The rise and coalescence of the reform group is discussed in Craig, Upper Canada,106-124, 188-209; Errington, Lion, 93-95,111-138. See also Aileen Dunham, Political Unrest in Upper Canada (Toronto: McClelland and Stewart Limited, 1963); Eric Jackson, "The Organization of Upper Canadian Reformers," Ontario History 53 (1961): 95-115; Graeme Patterson, "Early Compact Groups in the Politics of York," Old Ontario: Essays in Honor of J.M.S. Careless Eds. David Keane and Colin Read (Toronto: Dundurn Press, 1990) 174-191.

[12] Of the two, the reformers probably had the least organization. Reform politicians often publicly disagreed with each other and certainly did not have a single uniform platform. Their conservative opponents shared close personal relationships, at times since childhood, and collaborated through their control of the official power structure. Nonetheless the tories still did not qualify as a true political party. Errington, Lion, 94.

[13] *Upper Canada Gazette*, 6 April 1820, as quoted in David Mills, The Idea of Loyalty in Upper Canada (Kingston: McGill-Queen's University Press, 1988) 33. Politicians and the public expressed a distaste for party politics. In 1816, Peter Robinson stated, "I hate parties," and four years later in an election speech, told voters, "I will make no boast to you of my independence; I trust you think me much above any unworthy attempt to court popularity." As quoted in Errington, Lion, 112-113. On 28 Oct. 1830, Francis Collins of the *Canadian Freeman* stated, "We want no parties...neither ministerial or popular." As quoted in Mills, Idea, 96.

party.[14] Colonists of the time, however, used the term more as a way to project critical aspersions than as an accurate political description. The political camps were not parties in the modern sense but rather, as argued by Errington, "loosely aligned groups whose expectations of government differed sharply."[15] Nonetheless, the increased use of the term revealed a tacit recognition on the part of colonists of the growing differentiation between colonial political factions.[16] Upper Canadians in the 1820's understood that references to the "ministerial" or "people's party" actually represented groups of specific individuals who had united to compete against one another within the government.

For the first time in the colony's short history, the proponents of political opposition took important initial steps towards modern day standards of party organization. Weekes, Thorpe and Willcocks had shared political views and goals amongst themselves, and had on rare occasions actually succeeded in swaying legislative voting. However, any cooperation they had received from other assembly members in the house represented less a collusion between conspiring party members than a fortuitous synchronization of the isolated decisions of independent representatives. None of the three men had

---

[14] These were not arbitrary terms, but rather carried significant meaning to readers and listeners of the day. The court/country dichotomy historically divided supporters of the executive from what were considered to be more independent, virtuous, government opponents. The terms "people's" or "patriots" when used by the tories, were intended to be derogatory allusions to the seditious practices of the patriots in the American Revolution. See Errington, Lion, 94,114. Errington suggests that the act of commonly labelling reformers as members of an "opposition faction" or "party" contributed in part to the group's coalescence. The court/country dichotomy is discussed in great detail in the historiography of the American Revolution, see for example; Lance Banning, The Jeffersonian Persuasion, (Ithaca: Cornell University Press, 1978).

[15] Errington, Lion, 94.

[16] It should be remembered that the term "party" was used in the colony's earliest years, and had been applied to other opposition groups such as the Thorpe-Weekes-Willcocks movement. Both Thorpe and Willcocks had been described by their conservative opponents as leaders of parties. See Chapter Two, note 33. In truth however, neither Thorpe or Weekes had organized the kind of consistent collaboration achieved by the reformers in the 1820's.

collaborated with other assemblymen to the degree undertaken by their 1820's successors. In contrast to their pre-war predecessors or to Robert Gourlay, reformers in the 1820's did not act as independent dissenters. Rather, they coordinated their oppositional attacks within the assembly, and solidified themselves as a collective, permanent component of the colonial government structure. By mid decade they had what Gerald Craig called an "acknowledged leader" in the form of Dr. John Rolph, a British-born reformer representing Middlesex of the London District.[17] The most prominent and vocal of the oppositionists actively shared ideas and strategies and formed themselves into what Rolph himself called a "cabinet" of reformers.[18] Evidence of the increased unity and cooperation of the group can be found in some of the men's personal correspondence. On 26 August 1828, Charles Fothergill, a reform assembly member representing Durham, wrote to W.W. Baldwin, informing the latter that he hoped, "to hold a meeting of a few of the leading Independent Members before the assembling of Parliament...to arrange our measures." Shortly afterwards, John Rolph, in a letter dated 9 October, stated how valuable he felt it was for "the more thoughtful politicians" to "consult together about the public good."[19]

Along with slowly modifying the ways in which colonists' elected representatives collaborated within the assembly, the reform movement of the 1820's also served to increasingly justify the legitimacy of political opposition. As had been true throughout the province's history, colonists who directed criticism towards the government risked being labelled disloyal by more

---

17 Craig, Upper Canada,119; *Colonial Advocate*, 2 February 1826.

18 Rolph to Baldwin, 9 October 1828, as quoted in Craig, Upper Canada,193.

19 Fothergill to Baldwin, 26 August 1828; Rolph to Baldwin, 9 October 1828, as quoted in Mills, Idea, 155 note 55, 47. Fothergill is an interesting case. He had formerly been a defender of the tory establishment as printer of the conservative organ, the *Upper Canada Gazette*, before switching camps and joining the reformers.

conservative members of the colonial community. Reformers, both in and outside the house, divided their efforts between opposing administration policies and actively defending their right to do so. To accomplish the latter, reformers (echoing Gourlay) offered legal, constitutional arguments that vindicated their actions and expanded the parameters of acceptable political behavior for all Upper Canadians. Both conservatives and reformers declared themselves to be committed to the British constitution and to the form of government that it prescribed.[20] In truth, however, their interpretations of the constitution differed substantially.

Reformers in the House of Assembly claimed entitlement to all the liberties assigned to members of the British House of Commons, and in turn argued that colonists of Upper Canada held the same rights as all Britons. In an 1829 debate in the assembly, William Baldwin declared that the assembly "should be placed on the same footing as the House of Commons...otherwise those who sat in it could not properly be called the Representatives of the people."[21] Colonists had a right to a strong voice in the affairs of their government. The Constitutional Act of 1791, argued reformers, gave "legislative power to the inhabitants of this province," to "make laws for their peace, welfare and good government."[22] As "friends of a free constitution" reformers had a duty, they believed, to protect the "Rights and Privileges" of their constituents.[23] Reformers justified their oppositional behavior by arguing that for Upper Canada's

---

20 After his first election in 1820, W.W. Baldwin commented that he believed voters had supported his candidacy "on the expectation of [his] rigid integrity towards the constitution." As quoted in Robert L. Fraser, "William Warren Baldwin" Dictionary of Canadian Biography ed. Francess G. Halpenny, Vol. VII (Toronto: University of Toronto Press, 1987) 38.

21 As quoted in Fraser, "William Warren Baldwin," 42.

22 W.W. Baldwin, speeches in House of Assembly, December 1821 and April 1823, as quoted in Fraser, "William Warren Baldwin," 39.

23 *Upper Canada Herald*, 8 November 1825;*United Empire Loyalist*, 9 March 1820, as quoted in Errington, Lion,114,112.

balanced government to operate effectively required "a vigilant activity on the part of all its constitutional checks," particularly the popularly elected branch.[24] Maintaining a vigilant opposition to questionable administrative policies protected colonists from the "arbitrary, oppressive and high-handed conduct of the colonial executive."[25] As argued by Marshall Bidwell in 1828, "power, unaccompanied with any real responsibility, any practical accountability," could never be "confided safely" to any isolated branch of the colonial government.[26] If colonists' representatives were not permitted to strongly influence or oppose legislation, argued Baldwin in his first assembly speech, then Upper Canadians were "without a constitution; at least a free one."[27] By vigorously arguing for the legitimacy of a popularly elected legislative counterbalance to administrative power, reformers helped to entrench themselves as a consistent, powerful oppositional presence within the government.

To demonstrate the necessity of a vigilant assembly, reformers made every

---

[24] 1820 electoral address by W.W. Baldwin, as quoted in Mills, Idea, 33.

[25] W.W.Baldwin to meeting of reform politicians, September 1828, as quoted in Fraser, "William Warren Baldwin," 40.

[26] Bidwell to Baldwin, 28 May 1828, as quoted in Fraser, "William Warren Baldwin," 42.

[27] As quoted in Fraser, "William Warren Baldwin," 38. Mills, Idea, 32-51, 93-111; Errington, Lion,111-115. In arguing for the necessity of constitutional checks and balances and vigilant defence of citizens' rights, reformers in the 1820's were very much in keeping with political debates being waged by British reform whigs in the same period. Robert Fraser in fact describes W.W.Baldwin as a "whig constitutionalist." "William Warrren Baldwin," 38. The connection between Upper Canadian and British reform thought is suggested by a comment made by Lieutenant Governor Maitland in September 1828, in which he described the colonial reformers as "promoters of Mr. Hume's projects," alluding to British radical politician Joseph Hume. Upper Canadian reformers were fulfilling their title as "country" politicians by invoking a deep mistrust of the potentially arbitrary and abusive power of the government's executive and ministerial branches. Baldwin described himself and his associates as "men and patriots, jealous of their rights and anxious to guard their liberties...from arbitrary power." As quoted in Fraser, "William Warren Baldwin," 40. Their arguments and apprehensions resonated with the political ideas circulated in the eighteenth century by British commonwealthmen and particularly by the patriots in the American Revolution. See, Caroline Robbins, The Eighteenth Century Commonwealthmen (Cambridge: Harvard University Press, 1961); Bernard Bailyn, The Ideological Origins of the American Revolution (Cambridge: Harvard University Press,1967); Graeme Patterson, "Whiggery, Nationality and the Upper Canadian Reform Tradition" Canadian Historical Review 56 (1975).

effort to point out incidents of administrative abuse of power. For example, on New Year's Eve, 1825, a group of assembly members attended a performance by a troupe of travelling American performers. At the conclusion of the show, Captain John Matthews, one of the more vocal critics in the house, asked the actors to sing "Yankee Doodle". Instead of being dismissed as a harmless gesture of civility between citizens of a neighboring country, Matthews' request was deemed by colonial officials to be a seditious expression of pro-American sentiment. Governor-in-Chief Lord Dalhousie called Matthews' conduct "utterly disloyal and disgraceful," ordered him to Quebec and suspended his military pension. Reform assembly members seized upon the event. In a committee report, they denounced the government action as a type of "political inquisition" and accused the administration of trying to "humble the independence of the legislature" and force government opponents into silence. It clearly showed, they argued, that the province was being ruled, "by a few aspiring men" who were prepared to abuse colonists "with the scourge of power."[28]

Government opponents further defended their actions by openly challenging the tory's definition of loyal political behavior. Reformers questioned the impartiality of many of the government's prominent conservative supporters. Tory assembly members who held appointed positions in government, they argued, could not be trusted to faithfully fulfill their obligations to the polity because they were too much under the influence of the executive. John Matthews, after being punished for his musical selection, bluntly challenged tory conceptions of loyalty: "Loyalty, loyalty is all the cry now a-days, but analyze the term as it is now used, and you will find that it is loyalty to the Attorney General

---

28 House of Assembly committee report, as quoted in Craig, Upper Canada,120. On the Matthews affair, see Craig, Upper Canada,119-120; Mills, Idea, 42.

Reformers attacked the traditional elite exploitation of patronage, which, they argued, had infected the operations of government. The best interests of the colony were being neglected by "base fawning cringing" public servants whose only concerns were the accumulation of "pensions, powers, places, titles, honours and emoluments."[30] Reformers cast themselves as the truly loyal members of the colonial government; they did not act out of personal interest, but out of a selfless commitment to the public good.[31] The same charges about the dangers of colonial political patronage had been made by Weekes, Thorpe, Willcocks, and Gourlay. Reformers in the 1820's effectively rearticulated the arguments to make a strong case for alternative conceptions of loyalty. By 1828, leading reformer John Rolph was prepared to proudly refer to himself as a member of "His Majesty's faithful opposition."[32]

Despite the best efforts of government critics to justify their actions, many Upper Canadians remained unconvinced. Conservatives refused to accept either the reformers' constitutional interpretations or their arguments against government influence. Tories rejected the idea that the House of Assembly had the right to openly challenge the legislative authority of the executive. Upper Canada was not Britain, they believed, and the constitution could only be partially applied to the administration of the colony. In an 1827 grand jury address, Chief Justice William Campbell effectively summed up the

---

30 William Lyon Mackenzie, *Colonial Advocate,* 18 May 1824, as quoted in Mills, Idea, 42; and Craig, Upper Canada,112. In a petition produced by reformers in a 5 July 1828 meeting, they complained that too many members of the province's ruling conservative elite were "placemen and pensioners, depending upon the executive for a living instead of being independent." As quoted in Fraser, "William Warren Baldwin," 41. Attacks on "placemen" and the lack of independence in ministerial politicians was a cornerstone of whig political ideology.

31 After his 1820 election, W.W. Baldwin commented that his victory would give "great public satisfaction to the independent part of the community and mortification to others." As quoted in Fraser, "William Warren Baldwin," 38.

32 Letter to W.W. Baldwin, 9 October 1828; as quoted in Mills, Idea, 155. On debates over influence and patronage, see Mills, Idea, 41-43; Errington, Lion,112-114.

conservative viewpoint, arguing that the constitution could not "in terms be precisely adopted in the Province" but rather could only be instituted "in principle and by analogy."[33] The province was in a distinctly vulnerable position and had to be ruled by a strong executive without challenge or debate from the assembly or the public. Political opposition in any form was considered a threat to the security of the colony.[34] Conservative leaders believed that Upper Canadians should be satisfied and grateful that they enjoyed "a due share in the formation of laws," and ought not disrupt a colonial administration that provided them with the "mildest of governments." [35] Like their reform opponents, tory administrators received considerable support for their stance from sections of the colonial community. One of the colony's more conservative papers, the *Gore Gazette*, stated bluntly:

> we do not hold that....an admiration of the institutions of our country, are best evinced by a systematic opposition to its government: we conceive the contrary, that it is the obvious duty of every good member of society to assist in sustaining the constitutional authorities of his country.[36]

Tories not only disagreed with reformers' constitutional interpretations, but also questioned the professed loyalty of their actions. A writer to the *Upper Canada Gazette*, in February 1825, argued that the reformers had dangerous, personal ulterior motives aside from defending the public good. "It has been

---

[33] As quoted in Errington,Lion,112.

[34] The conservative elements in the province, particularly in the administration, felt Upper Canada sat in a very precarious position. Many tories held very real fears of a renewed attack from their dangerous republican neighbours to the south. Any toleration of dissent could lead to the spread of democratic principles that would only encourage the United States, and pro-American sympathizers within the province, that the colony was ripe for annexation. Moreover, leaders in the administration worried that persistent controversy and popular unrest in the province would induce Britain to sever the imperial connection and rid itself of the troublesome colony. Tory fears of abandonment had been escalated by the 1815 proposal to transfer the colony's capital from York to Kingston. The proposed move was considered by some to be a prelude to a full scale British removal from the province. See Errington,Lion, 137-165.

[35] *Kingston Chronicle*, 18 December 1820, as quoted in Craig, Upper Canada,110.

[36] *Gore Gazette*, 3 March 1827, as quoted in Mills, Idea, 42.

always the case," the colonist wrote, "that those who intend to subvert good order in society began by making extraordinary pretensions of public virtue and crying up the necessity of reform."[37] Members of the tory faction also denied the suggestion that they were partial to or overly influenced by the executive. Men like Attorney General John Beverly Robinson and Solicitor General Henry Boulton saw no conflict in holding both appointed and elected office. They assured colonists that they would exercise the same loyalty and diligence in serving their constituents as they did in serving the administration.[38]

Although they faced continued conservative criticism, reformers in the 1820's did make important strides in convincing growing numbers of Upper Canadians of the probity of a vigilant but loyal opposition. The ability of reformers to propagate their unconventional political views and to be elected to the assembly was greatly enhanced by the growth and diversification of the colonial press. The number of colonial newspapers increased from two before the war to ten by 1828. Moreover, of those ten, several were strongly inclined to support and defend the actions of the opposition faction.[39] The expansion of the press fueled fierce debate over the relevant political issues of the day and exposed Upper Canadians to the arguments for and against the legitimacy of political opposition. The explosion of newspaper commentary on provincial politics along party lines forced literate colonists to address the competing theories and form their own conclusions.[40] The popularity of the opposition journals and the

---

37 *Upper Canada Gazette*, 13 February 1825, as quoted in Errington, Lion, 115.

38 Errington, Lion, 114.

39 Particularly the *Colonial Advocate*, the *Canadian Freeman*, the *Observer*, and the *Upper Canada Herald*; Errington, Lion, 116.

40 On the battle between competing newspapers and colonial debates about freedom of the press see Errington, Lion, 115-118; H. Pearson Gundy, Early Printers and Printing in the Canadas (Toronto: Ontario Publishing Co., 1963); Gundy, The Spread of Printing in Canada (New York: Abner Schram, 1972).

demonstrated that a healthy portion of the colonial community endorsed the arguments for political opposition.

Colonists published statements urging their fellow Upper Canadians "to keep in mind that the power of the executive is to be guarded with a jealous eye."[41] The assembly, argued one contributor, should not be expected in all circumstances to "work in common cause with the government," but instead had to be willing and able "to withstand the Influence of the Executive."[42] Many participants in the press debate also agreed with reformers concerning the dangers posed by political patronage. "Freeman" advised colonists to cast their votes only for a "person free from GOVERNMENT INFLUENCE and in whose honour, honesty and integrity you may with safety confide."[43] If all colonists practised this type of discretion, "Ploughjogger" argued, the community could rest assured that their representatives would "look to their constituents and not to the government for their reward."[44] What is particularly interesting in analyzing the press dialogues is that colonists began to clearly articulate an appreciation for the symbiotic relationship between the individual and the politician intent on effecting change. On 10 May 1825, the *Upper Canada Herald* wrote: "Let our Representatives support our cause with firmness and perseverance...and we will support them. This is the reciprocal duty. It is the true constitutional principle." The House of Assembly, the paper argued, was "the forum of the People's side."[45] Upper Canadians who welcomed such a statement with approbation understood the codependence between the discontented and the politically radical.

---

41 "A Freeman", *To the Electors of the Town of York*, broadside, Toronto Public Library.
42 *Kingston Chronicle*, 29 April 1825.
43 "A Freeman", Broadside, TPL.
44 *Upper Canada Herald*, 17 May 1825.
45 *Upper Canada Herald*, 10 May 1825.

Advocates of political opposition in the 1820's, both in the House of Assembly and in the community at large, succeeded in building on the ideological developments that had occurred in colonial society from 1805 to 1819. Their efforts to rationalize dissent, combined with what will be seen to be continued attempts to protect colonists' personal economic interests, motivated growing numbers of Upper Canadians to accept the legitimacy of opposition and to convert that belief into political action. The single greatest indication of the increasing public support for the principles and actions of government critics is that in the 1824 and 1828 provincial elections, colonists returned "a clear-cut majority of anti-government men" to the House of Assembly, for the first time in the province's history.[46] The 1828 election produced an assembly with fewer members holding concurrent government appointments than any preceding parliament, and "marked," argues historian J.K. Johnson, "the greatest degree of...civil deviation from the ideals of the elite."[47] In the wake of the 1828 election, the Sheriff of York, Samuel Jarvis, commented that there had never "been such a feeling of Radicalism existing (openly) in the Country as at the present time."[48] Political opposition became an established element of Upper Canada's political culture, and as argued by Errington, from 1828 onward, "the administration could no longer expect to pursue its programs without opposition."[49]

The coalescence of reform representatives into an effective, collaborative assembly bloc, their defence of oppositional behavior, and the accompanying

---

46 Craig, Upper Canada,118; Errington, Lion, 93.
47 J.K. Johnson, Becoming Prominent, 123.
48 From a letter to W.D.Powell, 12 June 1828; as quoted in Craig, Upper Canada,193.
49 Errington, Lion, 188.

attack on the conservative elite's efforts to alienate American-Upper Canadians. The citizenship of American settlers was the central topic of debate for politicians and colonists in general throughout the 1820's. A letter in the *Colonial Advocate* in January 1827, commented that the "public mind...seems occupied with nothing else at present; [the legitimacy of American-Upper Canadian citizenship] is the general topic of conversation."[50] The controversy provided reformers with a powerful issue upon which to attack the colony's tory leadership and demonstrate to colonists the value and necessity of a vigilant opposition. Moreover, the dispute revealed the affiliation between reformers and American-Upper Canadians. Public sentiment and actions taken by politicians during the debate demonstrated a contemporary recognition of the critical contributions American-Upper Canadians made to the rise of colonial political opposition.

In January 1817, the chief justice of Upper Canada, William Powell, informed Lieutenant Governor Gore that: "By law, the issue of natural born subjects born out of the King's allegiance, of Parents not in the service of Powers at enmity with Great Britain are considered as natural born subjects."[51] In Powell's opinion, therefore, all American settlers in the province and their children who had arrived before 1812 and taken the required oath, deserved the rights and privileges of natural born subjects, regardless of whether they had taken earlier oaths to the government of the United States. The more conservative elements of the province refused to accept Powell's opinion as the final word on the subject. Men like John Strachan and John Beverly Robinson remained fiercely opposed to the idea that Americans could be considered full citizens of the colony. "Americans should always be considered Aliens," argued Strachan,

---

50 *Colonial Advocate*, 23 January 1827, as quoted in Mills, Idea, 34.

51 Powell to Gore, 23 January 1817, as quoted in Errington, Lion,166.

and "should be declared incapable of holding landed property or of having any share in government."[52]

The acceptability of Americans as Upper Canadian citizens had been argued by Gourlay and his supporters in their attempt to open up immigration from the United States, but the question had remained unresolved after Gourlay's 1819 expulsion. The issue resurfaced in 1821 when Barnabas Bidwell won a seat in the House of Assembly for the riding of Lennox and Addington. Shortly afterwards, Attorney General Robinson forwarded a petition to the assembly from constituents opposed to Bidwell's victory. The man's election, they argued, could not be considered valid because he was a criminal and an alien. Bidwell had been born in Massachusetts in 1763, attended Yale University, and had remained in the United States after the Revolution and served both in congress and in the legislature of his home state. In 1810, he had been accused of embezzling public funds and fled to Upper Canada to avoid prosecution. Robinson and other tories declared Bidwell to be ineligible to run for public office and demanded that he be removed from the assembly. He had abjured his rights to British citizenship, they argued, by taking an oath to the United States in order to hold public office.[53] Reformers saw the motion as a challenge to the citizenship rights of all American-Upper Canadians and argued against Bidwell's removal. The motion to remove Bidwell passed by a margin of one vote. In the end, however, the house decided not to deal with Bidwell's alien status, and ejected him solely on the grounds of his "moral turpitude."[54]

The following year the alien question was again raised when Bidwell's son,

---

52 Strachan, A Letter to the Right Honorable Lord Selkirk, as quoted in Errington, Lion,166.

53 B. Bidwell's fortunes were not helped by the fact that he had been a vocal critic of the government and a contributor to Gourlay's petition campaign. Conservatives eagerly seized on the opportunity to punish Bidwell and keep him out of office. Craig, Upper Canada,116.

54 As quoted in Mills, Idea, 36; Craig, 115-116; Errington, Lion, 168-170. The assembly followed Bidwell's removal by passing a bill that disqualified him from running again in the future.

Marshall Spring Bidwell, attempted to run for his father's vacated seat. The issue now came much closer to the point. M.S. Bidwell could not be found guilty of "moral turpitude" and so conservatives in the assembly rejected his eligibility strictly on the grounds that he had been born in the United States. Once again, reformers and tories battled fiercely over the question. The two sides debated over the meaning of earlier British statutes and common law. Reformers argued that "a natural born subject could not shed or lose his nationality by unilateral action of the subject of the Crown," and that by "the treaty of 1783, the subject was not deprived of the right of claiming allegiance and protection of the British government."[55] Tories could not accept the reform interpretation. "Americans have always been treated as aliens by the government," claimed Robinson and no legal precedent existed that bestowed upon them "the privilege of natural-born subjects."[56] The assembly ultimately voted on the issue in April 1823, and determined that "Marshall S. Bidwell, so far as allegiance, was and is eligible to a seat in the house."[57]

The reformers' victory was short lived however. In 1824, the Court of King's Bench in England issued a decision on the rights of Americans living within the empire. The justices declared that any person who had been a subject of the United States, regardless of parentage or citizenship before 1783, was now considered an alien and could not inherit property in the British empire. Suddenly, American-Upper Canadians could not hold land, vote, or enjoy any of the rights of British subjects. The decision seemed to reject four fifths of the population from citizenship.

To the horror of the majority of the colony's farmers, Lieutenant Governor

---

55 *Kingston Chronicle*, 18 April 1823, as quoted in Mills, 37; and Errington, Lion, 171.
56 *Kingston Chronicle*, 25 April 1823, as quoted in Errington, Lion, 169.
57 *Kingston Chronicle*, 9 May 1823, as quoted in Errington, Lion, 173.

Maitland brought the assembly to session in November 1825, and informed members that regardless of any "difference of opinion...with respect to the civil rights of persons" from the United States, "the solemn decision of the question in the mother country, whose laws we have adopted, leaves no room for doubt." However, Maitland continued, he did have "His Majesty's express sanction" to pass a new bill, produced within the province, that would adequately resolve the situation. As such, he ordered the parliament to give "early and attentive consideration" to the matter.[58] Maitland wanted to conclude the issue quickly to quiet the growing unrest in the province. Nevertheless, like many other conservative minded members of the administration, he remained concerned that American settlers could potentially reduce the colony to a level of "godless republicanism."[59] As a solution, Maitland proposed that American settlers be granted security in their property rights, but stripped of all political privileges on the grounds that they were aliens.[60] In the ensuing session of parliament, the legislative council submitted a Naturalization Bill to the assembly that reflected much of Maitland's views. The proposed bill provided citizenship to American-Upper Canadians if they demonstrated seven years uninterrupted residence and took another oath of allegiance in open court. Until both requirements were fulfilled, the colonists in question would be without any political or property rights.[61]

The proposal sent the colony's population into an uproar. The bill being discussed in the assembly posed the ultimate threat to the agrarian ideals of four-fifths of the province's inhabitants. Independent ownership of all their

---

[58] *Upper Canada Herald,* 22 November 1825, as quoted in Errington, Lion, 173.
[59] Maitland to Bathhurst, 7 March 1826; as quoted in Mills, Idea, 40.
[60] Mills, Idea, 40.
[61] Mills, Idea, 40; Errington, Lion, 173-174.

jeopardy. The measures being promoted by the colony's administration represented exactly the type of arbitrary abuse of power that reformers had criticized. Farmers' competency was threatened, and they responded forcefully. Colonists at all levels across the province argued over the proposed measures in newspapers, taverns and town meetings. Politicians in the assembly began an acrimonious debate over the legality and moral implications of the proposed bill. Once again, opinion in the house split along the factional lines dividing tories and reformers. As in the Bidwell sessions, both groups employed historical convention and legal precedents to buttress opposing arguments.[62] As well, as Gourlay had done seven years earlier, reformers invoked the War of 1812 as a defence of American settlers' legitimacy. "Who are those persons to be styled Aliens?" opponents of the bill asked, "certainly it could not be those, or the sons of those who in danger rushed to our standard and repelled the Invaders from our shores." Charles Fothergill, former editor of the conservative *Upper Canada Gazette*, sided against the administration on the matter, exclaiming that he felt "a just and honest indignation at the idea of disenfranchising and alienating full three fourths of the most loyal inhabitants of the province without whose aid in the dark hour of danger and distress, we could not have been now here to question their just right."[63]

Alongside the legal and moral arguments that raged in the colony, an interesting subtext of sentiment emerged that provided compelling indications of the important link between American colonists and the reform opposition movement. Opponents of the administration's alienation efforts openly

---

[62] For an excellent detailed discussion of the specific legal arguments debated by conservatives and reformers, see Paul Romney, "Re-Inventing Upper Canada: American Immigrants, Upper Canadian History, English Law, and the Alien Question," Patterns of the Past eds. Roger Hall, William Westfall, and Laurel Sefton MacDowell (Toronto: Dundurn Press, 1988)78-107.

[63] *Kingston Chronicle*, 15 December 1826; *United Empire Loyalist*, 17 March 1827; as quoted in Errington, Lion, 175.

suggested that the entire episode had been concocted as a "plot" by the government - a partisan "measure that would neutralize political opposition."[64] "The Alien Question," argued colonial publisher Francis Collins in an 1827 pamphlet, "has been nothing but a snare - a hidden trap with which to destroy the civil rights of the American emigrants in the colony."[65] "Great fears are entertained," stated the *Canadian Freeman*, "that some trick is about to be played off by the ministerial party."[66] The attempted "disenfranchisement of thousands" many felt, was the carefully conceived ploy "of a few deep and designing politicians who have long nestled about the Colonial Executive."[67] Reformers even wondered publicly whether the colonial administration's measures accurately fulfilled the instructions received from London. In a letter to Robert Horton, the Colonial Under-Secretary, John Rolph suggested that "the present ministry has attempted to conceal or misrepresent the gracious intentions of His Majesty."[68] It was firmly believed that the "despotic...few in power" intended to "deprive the American emigrants of the elective franchise" in order to cripple the reform movement and exercise unchallenged control over the province.[69]

Reformers may have been somewhat paranoid in assuming that the colonial administration purposefully misrepresented their imperial instructions. No hard

---

64 Letter from Thomas Coleman to Reuben White; as quoted in Mills, Idea, 40; Mills, Idea, 42.

65 Collins, To the Loyal, Patriotic and Independent Anglo-Americans of Upper Canada, as quoted in Errington, Lion, 176.

66 *Canadian Freeman*, 1 December 1825; as quoted in Mills, Idea, 40.

67 *Kingston Chronicle*, 8 February 1822; Francis Collins An Abridged View of the Alien Question Unmasked, as quoted in Mills, Idea, 41.

68 Rolph to Horton, 18 May 1826, as quoted in Mills, Idea,41. The *Canadian Freeman*, 14 May 1828, charged that the instructions received concerning the Alien bill had been drawn up by Strachan and not by officials in London, Errington,Lion, 246, note 44.

69 William Lyon Mackenzie; as quoted in Mills, Idea,41; Francis Collins; as quoted in Errington, Lion, 177.

strong evidence to suggest that the colony's conservative faction saw a connection between the political opposition they faced and the province's large American-Upper Canadian population. Tories argued that many American-Upper Canadians did not possess "the least spark of British feeling." The growing political unrest and discord, they suggested, showed that the American colonists were "increasing in their endeavours to maintain a republican ascendancy in the colony."[70] American-Upper Canadians, explained "Catharus" in the *Colonial Advocate*, wished "the American character and party here to stand out in bold relief."[71] The opinion was shared by many in British North America's colonial administration. In a letter to the colonial secretary, Sir John Sherbrooke, Lieutenant Governor of Lower Canada, remarked on conditions in Upper Canada, stating that persons from the United States had "introduced...loose demoralising principles," and showed a "strong bias...in favor of the American" rather than "British form of government."[72] Conservatives happily anticipated that "one of the most beneficial effects" of the naturalization bill would be to eliminate the most dangerous and factious elements of colonial society and "distinguish them from the loyal part of the population."[73] The tory equation of American-Upper Canadians with the political opponents they encountered in parliament was summed up by "Watkin Miller" in a letter to *The Farmer's Journal*. Since the American settlers had "been early habituated to the customs and laws of a republick," argued "Miller", they now served as "pliant materials in the hands of designing and ill-disposed persons...who find little difficulty in persuading them that they are subject to much tyranny and

---

[70] *Kingston Chronicle*, 4 May 1827; as quoted in Errington, Lion, 180.

[71] *Colonial Advocate*, 5 January 1826; as quoted in Mills, Idea, 45-46.

[72] As quoted in J.H. Stewart Reid, Kenneth McNaught and Harry S. Crowe, A Source-Book of Canadian History, (Toronto: Longmans Canada Limited, 1964) 81.

[73] *United Empire Loyalist*, 21 April 1827; as quoted in Errington, Lion, 181.

oppression."[74]

Whether the tories manufactured the alien question as a sophisticated political plot to disable their opponents is debatable.[75] Regardless, the reformers clearly felt it was a plausible possibility. Moreover, the conservative faction undoubtedly seized upon the issue as an opportunity to rid the province of what they saw to be a key source of disloyal sentiment. In this case, the validity of the allegations is secondary to the accusations themselves. By suggesting that the tories were hatching a scheme to strip them of their political power, reformers demonstrated that they clearly recognized how much of their support came from American-Upper Canadians. Both conservative and reform sentiments showed that colonists of the day understood that the province's existing political climate had been largely shaped by American-Upper Canadian contributions. Reformers, in attacking the Alien Bill, were not just fulfilling a commitment to "the Rights and Privileges" of Upper Canadians in general, but were actively defending the electoral power of the people who had helped to put them in office.

The close connection between American-Upper Canadians and reformers in the 1820's is partially demonstrated by the assembly's stance on the Bidwell issue. In the house votes on the Bidwells' eligibility, members were split largely along east-west lines. Opposition to the citizenship restrictions came from representatives of ridings west of York, the regions of the province with the

---

74 *The Farmer's Journal*, 12 November 1828; as quoted in Mills, Idea, 46.

75 Paul Romney argues that there was a "secret policy" being pursued by conservative government forces. He suggests the "law officers of the Crown [ie. John Beverly Robinson] declared the late loyalists to be aliens, not on an "objective" analysis of "the law" but on the basis of a legal construct invented by Robinson- a construct favourable to the government." Romney, "Re-Inventing Upper Canada," 96-97; Paul Romney, Mr. Attorney: The Attorney General for Ontario in Court, Cabinet, and Legislature, 1791-1899 (Toronto: University of Toronto Press, 1986) 96-104.

highest concentration of American settlers.[76] Even more compelling are statements made by William Lyon Mackenzie, a strong supporter of political opposition, who joined the reformers in the assembly in 1828. In 1826, Mackenzie asserted that whatever political liberalism existed in the province was "owing chiefly to...the independent principles brought into the colony by settlers from" the United States. Years later, reflecting back on the 1820's alien controversy, Mackenzie wrote that "to lose the American votes would have been the downfall of the democratic [reform] party."[77]

As the battle over the Alien bill continued to rage in the assembly, reformers eventually concluded that no adequate outcome could be reached within the colony. As such, they arranged for Robert Randall to travel to England in 1827 to petition imperial authorities to intervene. Randall's mission succeeded and in 1828 the Colonial Secretary authorized the House of Assembly to pass new legislation that gave full citizenship rights to "all persons who had at any time received grants of land from the provincial government, or who had held public office..., or who had taken the oath of allegiance, or who had come in before 1820."[78] Settlers who had arrived after 1820 could be naturalized after seven years' residence. Passage of the new legislation was a huge victory for the

---

[76] Craig, Upper Canada, 116. In fact, according to J.K. Johnson, Prominent, 169-239, over sixty percent of the assembly members that he considered reformers and that served in the 20's, represented ridings west of York. Of course, many prominent reformers found support in the heart of traditional loyalist regions in the east. For example, Marshall Bidwell was consistently elected in Lennox and Addington, of the Midland District.

[77] *Colonial Advocate*, 18 May 1826; *The Caroline Almanack and American Freeman Chronicle*, 1840; as quoted in G. M. Craig, "The American Impact on the Upper Canadian Reform Movement Before 1837", Historical Essays on Upper Canada, ed. J.K. Johnson, (Toronto: McClelland and Stewart Limited, 1975) 334, note 3. It is true that Mackenzie did have a great admiration for the United States and for American industry and enterprise (see Errington,Lion, 128.) and that could have influenced the importance he credited on American settlers. Nevertheless, this should not discount what are important statements indicating American-Upper Canadian contributions to the reform movement. Craig also stated that American votes were "the largest single prop of the growing reform movement." Upper Canada, 122.

[78] As quoted in Mills, Idea, 44.

reform movement. Over the course of the decade they had developed into a powerful political unit that could not only harass and criticize the colonial administration, but also outmanoeuvre and defeat their conservative opponents on an issue of major political importance. As argued by historian Paul Romney, the "Alien question...taught aggrieved colonists that they could hope to thwart the provincial government."[79] By achieving success in the alien debate, reformers protected the electoral power of their constituents and made important strides in justifying the legitimacy and necessity of political opposition.

Fueling the growing influence and organization of reformers in the 1820's was a continuing evolution in colonial political thought. Divergent perspectives on the proper nature of government and political representation openly competed for acceptance in the public mind. While conservative sections of the society remained committed to the traditional ideals of a stable social order, political consensus and dominant executive leadership, many other Upper Canadians demonstrated a willingness to sacrifice social and political harmony in return for more responsive government. American-Upper Canadians were a significant component in the growing ranks of colonists prepared to reject traditional conservative standards and exploit radical political options. This increasing public acceptance of the necessity and value of dissent enabled reform politicians to form a permanent parliamentary opposition group powerful enough to challenge the authority of the colony's ruling conservative elite. The positions taken and arguments made by reformers in the Alien debate revealed that their ability to mount a concerted opposition and promote the legitimacy of dissent rested on the electoral support they received from the colony's large American-Upper Canadian population.

---

[79] Romney, "Re-Inventing Upper Canada," 79.

NOTE TO USERS

Page(s) not included in the original manuscript are unavailable from the author or university. The manuscript was microfilmed as received.

This reproduction is the best copy available.

UMI

Conclusion

The three exceptional periods of political opposition discussed in this paper represented pivotal moments in an ongoing assault on the political authority and dominance of Upper Canada's conservative establishment. In the colony's earliest years, an elite ruling class of British administrators and prominent loyalists had attempted to construct in Upper Canada a distinctly conservative, ordered, hierarchically governed polity. Through control of the province's official institutions and powerful commercial networks, the colony's elite leaders endeavoured to create and maintain a stable society in which their political vision would be dominant and unchallenged. Despite their command over the colony's power structure, however, the conservative portion of the province's population was unable to completely suppress dissent or to contain public political action within what they considered to be acceptable parameters. Their efforts to establish an ideal counterrevolutionary society were repeatedly challenged by political agitators who promoted alternative visions of colonial government.

In the years before 1812 Weekes, Thorpe, and Willcocks vigorously attacked the colonial administration and criticized the manner in which political appointees and commercial barons abused their power to exploit the colony's small farmers. As a response to the group's outspoken opposition, defenders of the conservative establishment rallied to silence their critics and protect their political authority. Weekes was killed by a legislative councillor, Thorpe was dismissed from his judicial position, and Willcocks, though it did not end his oppositional career, was arrested by the House of Assembly. In 1818, another oppositional assault was mounted against the colonial administration by Robert

Gourlay and his petition campaign. Once again, in an effort to maintain social stability and defend their control of the political establishment, conservative elites exercised their power to have Gourlay banished and his supporters punished. Nonetheless, despite the administration's ability to suppress its leading critics, colonial conservatives were not able to eradicate the popular beliefs and dissatisfactions that had fueled these early oppositional movements. Early government critics existed as a substantial threat because the positions they took resonated with large sections of the colonial community. The expulsion of a Thorpe or a Gourlay did not erase the discontent or political activism of the Upper Canadians who had chosen to support them. The persistence and growth of public oppositional thought was demonstrated in the reform advances of the 1820's.

By 1828, the political forces that had alligned to challenge the authority of the province's conservative leaders were sufficiently established and had enough popular support to not only endure government reprisals, but also overturn legislation advanced by the administration. Political opposition had developed from momentary explosions of popular unrest into the consistent, concerted presence of reform politicians, able and eager to challenge the legislative dominance of the colonial executive. Reformers who rose to prominence in the 1820's, men like William Warren Baldwin, Marshall Bidwell, and William Lyon Mackenzie, would play fundamental roles in the future political debates of the province. It is not coincidental that the eleventh parliament, from 1828 to 1830, witnessed the first open debates in the House of Assembly over the principles of responsible government.[1]

Nevertheless, it is important not to overstress the developments in

[1] Paul Romney, "Re-Inventing Upper Canada" Patterns of the Past eds. William Westfall et al. (Toronto: Dundurn Press, 1988) 101; G.M. Craig, Upper Canada (Toronto: McClelland and Stewart, 1963) 120-122.

oppositional politics that took place in Upper Canada between the colony's founding in 1791 and the end of the 1820's. The transformations that unfolded by no means represented a revolution in colonial thought. Reformers' concepts of more responsive representation and the necessity and value of a loyal opposition had not eclipsed the conservative ideals of their opponents. In 1828, men like John Strachan and John Beverly Robinson, and the tory faction they represented, retained their dominance of the colony's power structure and continued to impose a conservative influence on Upper Canadian political discourse by persistently equating opposition with disloyalty. What had occurred was a crystallization of colonial political divisions. Prominent oppositionists had successfully challenged the conservative elite's exclusive right to define what was legitimate political behavior. They advanced arguments that defended broader conceptions of personal and political loyalty. Conservative ideals of political consensus and strong central administrative authority now had to actively compete for public acceptance with more liberal, Lockeian political views. Upper Canadian political culture was diversifying to more accurately reflect the pluralistic nature of the colonial community. In helping to foster alternative political perspectives, oppositional politicians garnered public support and established themselves in positions of political influence from which to more effectively challenge traditional standards. As argued by historian Jane Errington however, the achievements of political oppositionists by 1828, though significant, "really marked only the end of the beginning of serious political controversy in Upper Canada."[2] It would take nearly twenty years and two armed rebellions before the Upper Canadian electorate would attain the kind of responsive representation and legislative

---

2 Jane Errington, The Lion, the Eagle, and Upper Canada (Kingston: McGill-Queen's University Press, 1987) 187.

power discussed by reformers in the 1820's.

Simply tracking the progression of reform political thought in early Upper Canada is not groundbreaking scholarship. The Weekes-Thorpe-Willcocks movement, the Gourlay agitations, and the coalescence of reformers in the 1820's are well known and well studied events in Upper Canadian history. Numerous historians have studied the period and identified the growing influence and organization of opponents to the colonial establishment. Many acknowledge the formation of a reform bloc in conjunction with the Alien debate, and the subsequent majority victory in 1828 as pivotal moments in colonial politics. Not enough attention, however, has been directed towards examining the popular forces that enabled reform advances.[3] While much scholarship has focussed on tracing colonial conservativism to the beliefs and experiences of loyalists, a similar level of analysis has not been applied to the origins of Upper Canadian reform oppositional thought.

The simple purpose of this thesis has been to complicate the picture of early Upper Canadian political development by demonstrating the dynamic influences of a subsection of Upper Canadian society whose impact has been largely overlooked by previous scholars. The basic themes, plainly stated, are straightforward. First, the arrival of large numbers of American settlers between 1792 and 1812 dramatically shifted the demographic makeup of the province and created a substantial population group that was both economically threatened and socially and politically marginalized. Second, the electoral

---

[3] For example, David Mills argues that by 1828 reformers, by challenging the administration in the Alien debate and successfully imposing a more assimilitive definition of who was a loyal Upper Canadian, had made important strides towards establishing the legitimacy and necessity of an organized legislative opposition. Mills does not, however, make the final connection and link the reformers accomplishments to their American-Upper Canadian support. Their ability to challenge the executive rested on this support and in attacking the Alien Bill they were protecting what they themselves knew to be their electoral strength. David Mills, The Idea of Loyalty in Upper Canada (Kingston: McGill-Queen's University Press, 1988) 49-51, 134.

support and popular endorsement of many of these American-Upper Canadians greatly enabled movements of political unrest that helped to legitimize dissent and transform the colony's political culture.

Men like Willcocks, Gourlay, Baldwin, Rolph and Bidwell did not change colonial politics solely on the strength of their personal convictions or individual influence. Their impact on Upper Canadian political culture was a function of their popular support. By virtue of their choice to criticize and challenge the colonial government, oppositionists were denied access to the traditional channels of patronage and coercion. They accumulated power by their ability and willingness to promote the interests of their constituents more accurately than their opponents. Reformers' success rested on their symbiotic relationship to the province's disgruntled, dissatisfied inhabitants who were prepared to assert their demands through disorderly representatives. Whatever political advances oppositionists achieved must be attributed to the individual political actions of Upper Canadians.

Upper Canadian society represented a forum of competing values. The majority of the province's inhabitants were driven by a commitment to the agrarian ideals of household security, landed independence, and family competency. No consensus existed, however, as to how far colonists would go to pursue and maintain those ideals. For some, belief in the necessity of social stability and the ultimate authority of the executive government prevented them from participating in movements of political dissent. Others refrained from associating with oppositional unrest out of a sense of responsibility to their patrons or fear of official reprisal. A final group of colonists uninhibited by these reservations, actively criticized the ruling elite, and supported the rise of political oppositionists. The colony's political culture evolved in relation to how the

province's population divided itself among these three categories.

No single group monopolized any of these three positions. Some loyalists were staunchly conservative and abhored political controversy. Others actively participated in political dissent. Some British immigrants attached themselves to and fiercely defended the authority and prerogative of the colonial executive. Others became leaders of movements that vigorously attacked the administration. Likewise, some American-Upper Canadians undoubtedly abstained from politics all together while others defended their interests through radical opposition. Nevertheless, the fact remains that the influx of American settlers between 1792 and 1812 changed the demographic complexion of the province and in turn significantly increased the number of colonists who were immune to coercion, undisposed to deference and prepared to accept the value and legitimacy of political dissent.

Responsibility for the ideological political foundations of the province can not be solely credited to loyalist settlers and British administrators. That these two groups fundamentally shaped the way colonial politics operated is undeniable. They did not, however, act in isolation. They were joined in the province by what was by 1812 an American-Upper Canadian majority. The actions and beliefs of this latter group must be considered when discussing the formative influences on early Upper Canadian political thought. Just as certain prominent loyalists are recognized for instilling a conservative ethos in the colony, American-Upper Canadians must be acknowledged for tempering provincial conservatism through the critical support they provided to movements of political opposition.

This brief exploration into the popular causes of political change in early Upper Canada represents only an initial foray into the subject of the cultural

influences of American-Upper Canadians. Much more work remains to be done. If we accept loyalist values and experiences to be important ingredients of a colonial ideology, and if we believe that proximity and attachment to the United States and Britain shaped how colonists thought, we must also respect the contributions of the tens of thousands of American-Upper Canadians who lived and worked in the province during its formative years. Based on their demographic importance alone, American-Upper Canadians demand scholarly attention. This focus on politics has barely scratched the surface. American settlers also distinctly transformed the colony's religious composition and their presence may very well have shaped agricultural practices, gender relations, and colonial attitudes towards issues of race.[4] I hope to expand and continue my study of this subject to incorporate these fields. If at all successful, this thesis will have convinced the reader that American-Upper Canadians had an important impact on colonial society, and demonstrated the necessity of further research.

---

[4] The influence of American-Upper Canadians on colonial religion stemmed in part from the fact many of the American settlers held Methodist beliefs in contrast to the Anglicanism of many of the province's elite loyalists and administrators. See, G.S. French, Parsons in Politics (Toronto: Ryerson Press, 1962); George Rawlyk, The Canada Fire: Radical Evangelicalism in British North America (Kingston: McGill-Queen's University Press, 1994). For agriculture, gender and race, see: Douglas McCalla, Planting the Province (Toronto: University of Toronto Press, 1983) 13-45; Peter Russell, "Upper Canada: A Poor Man's Country?" Canadian Papers in Rural History 3 (1982) 134-144; Beth Light and Alison Prentice, eds., Pioneer and Gentlewomen of British North America: 1713-1867 (Toronto: New Hogstown Press, 1980); Jane Errington, Wives and Mothers, School Mistresses and Scullery Maids: Working Women in Upper Canada (Kingston: McGill-Queen's University Press, 1995); J.R. Miller, Skyscrapers Hide the Heavens: A History of Indian-White Relations in Canada (Toronto: University of Toronto Press, 1989); Jason H. Silverman, Unwelcome Guests: Canada West's Response to American Fugitive Slaves, 1800-1865 (Millwood, NY: Associated Faculty Press, 1985); Robin Winks, The Blacks in Canada: A History (New Haven: Yale University Press, 1971).

Bibliography

Primary Sources:

Archival Material

Robert Nelles Papers, MS 503, Archives of Ontario.

Abraham Nelles Papers, MS 502, Archives of Ontario.

Government Documents

"Journals and Proceedings of the House of Assembly of the Province of Upper Canada." 1805-1811. Eighth Report of the Bureau of Archives of the Province of Ontario. Ed. Alex Fraser. Toronto 1911.

---------.1812-1818. Ninth Report. 1912.

---------.1819-1821. Tenth Report. 1913.

---------.1822-1824. Eleventh Report. 1914.

---------.1825-1828. Twelfth Report. 1915.

Newspapers

Colonial Advocate,1824-28

Kingston Chronicle, 1822-25

Kingston Gazette, 1816-1818

Niagara Spectator, 1818-1820

Upper Canadian Guardian, 1807-1812

Upper Canada Herald, 1825-28

Contemporary Printed Sources

Anonymous. Canadian Letters: A Description of a Tour through the Province of Lower and Upper Canada in the Course of the Years 1792 and 1793. Reprint. Canadian Antiquarian Journal. 9, nos. 3,4. (1912).

"A Freeman". To the Electors of the Town of York. Broadside. Toronto Public

Library.

Howison, John. Sketches of Upper Canada. London: G. & W.B. Whittaker, 1821.

Jackson, John Mills. A View of the Political Situation of the Province of Upper Canada in North America. London: W. Earle, 1809.

Maude, John. A Visit to the Falls of Niagara in 1800. London: Longman, Rees, and Green, 1826.

Simpson, John. An Essay on Modern Reformers Addressed to the People of Upper Canada to which is Added a Letter to Mr. Robert Gourlay. Kingston: Stephen Miles, 1818.

Smith, Michael. A Geographical View of the Province of Upper Canada. Philadelphia: J. Bioren, 1813.

Talbot, E.A. Five Years Residence in the Canadas London: Longman, Hurst, Rees, Orme, Brown and Green, 1824.

Weld, Isaac. Travels Through the States of North America and the Provinces of Upper Canada. 1807. Reprint. New York: Augusta Kelley, 1970.

Printed Collections

Reid, J.H. Stewart., et. al., eds. A Source Book of Canadian History. Toronto: Longmans Canada Limited, 1964.

Talman, J.J., ed. Loyalist Narratives from Upper Canada. Toronto: The Champlain Society, 1946.

Secondary Sources:

Akenson, Donald. The Irish in Ontario: A Study in Rural History. Kingston: McGill-Queen's University Press, 1984.

Allen, Robert S. and Bernard Poithier, eds. The Loyal Americans. Ottawa: National Museum of Man/National Museums of Canada, 1983.

Appleby, Joyce. Capitalism and a New Social Order. New York: New York

University Press, 1984.

Armstrong, Frederick H. "The Oligarchy of the Western District of Upper Canada: 1788-1841." Historical Essays on Upper Canada. Ed. J.K. Johnson. Ottawa: Carleton University Press, 1989. 513.

Bailyn, Bernard. The Ideological Origins of the American Revolution. Cambridge: Harvard University Press, 1967.

Banning, Lance. The Jeffersonian Persuasion: Evolution of a Party Ideology. Ithaca: Cornell University Press,1978.

Bethune, A.N. Memoir of the Right Reverend John Strachan, First Bishop of Toronto. Toronto: Henry Roswell, 1870.

Bloch, Robert G. "Gourlay's Vision of Agrarian Reform." Canadian Papers in Rural History. Ed. Donald Akenson. Gananoque, ON: Langdale Press, 1982.

Bogin, Ruth. "Petitioning and the New Moral Economy of Post-Revolutionary America." William and Mary Quarterly. 45 (1988) 391.

Bowler, R. Arthur. Ed. War Along the Niagara: Essays on the War of 1812. Youngstown, NY: Old Fort Niagara Asssociation, 1991.

Brebner, J.B. and Marcus Lee Hansen. The Mingling of the Canadian and American Peoples. Toronto: Ryerson Press,1940.

Brooks, Charles. Frontier Settlement and Market Revolution. Ithaca: Cornell University Press, 1996.

Calhoon, Robert. The Loyalists in Revolutionary America. New York: Harcourt Brace, 1973.

Canniff, William. The History of the Settlement of Upper Canada. Toronto: Dudley and Burns, 1869.

Careless, J.M.S. "Limited Identities in Canada." Canadian Historical Review. 50

(1969) 4.

Clark, S.D. Movements of Political Protest in Canada: 1640-1840. Toronto: University of Toronto Press, 1959.

Cowan, Helen. British Immigration to British North America: 1783-1837. Toronto: University of Toronto Library, 1928.

Craig, G. M. Upper Canada: The Formative Years. Toronto: McClelland and Stewart, 1963.

---------. "The American Impact on the Upper Canadian Reform Movement Before 1837." Historical Essays on Upper Canada. Ed. J.K.Johnson. Toronto: McClelland and Stewart, 1975. 317.

Crosswell, Daniel Kenneth. "The American Invasion of the Niagara Peninsula." M.A.Thesis, Western Michigan University, 1979.

Cruikshank, Earnest A. A Study of Disaffection in Upper Canada in 1812-1815. Ottawa: Royal Society of Canada, 1912.

Demos, John. Little Commonwealth: Family Life in Plymouth Colony. New York: Oxford University Press, 1970.

Dunham, Aileen. Political Unrest in Upper Canada: 1815-1836. Toronto: McClelland and Stewart Limited, 1963.

Edgar, Matilda Ridout. Ten Years of Upper Canada in Peace and War, 1805-1815. Toronto: William Briggs, 1890.

Ellis, David. Landlords and Farmers in the Hudson-Mohawk Region, 1790-1850. New York: Octagon Books, 1967.

Errington, Jane. The Lion, the Eagle and Upper Canada. Kingston: McGill-Queen's University Press, 1987.

---------. "Loyalists in Upper Canada: A British American Community." "None was ever better..." The Loyalist Settlement of Ontario. Cornwall: Stormont,

Dundas and Glengarry Historical Society, 1984. 57.

--------.Wives and Mothers, School Mistresses and Scullery Maids: Working Women in Upper Canada, 1790-1840. Kingston: McGill-Queen's University Press, 1995.

Faragher, John Mack. Women and Men on the Overland Trail. New Haven: Yale University Press, 1979.

Formisano, Ronald P. "Deferential-Participant Politics: The Early Republic's Political Culture, 1789-1840." The American Political Science Review. 68 (1974) 371.

Fraser, Robert L. "William Warren Baldwin." Dictionary of Canadian Biography. Ed. Francess G. Halpenny. Vol. VII. Toronto: University of Toronto Press, 1987. 36.

French, G.S. Parsons and Politics. Toronto: Ryerson Press, 1962.

Garner, John. The Franchise and Politics in British North America. Toronto: University of Toronto Press, 1969.

Gates, Lillian. Land Policies of Upper Canada. Toronto: University of Toronto Press, 1968.

Germino, Dante. Antonio Gramsci: Architect of a New Politics. Baton Rouge: Louisiana State University Press, 1990.

Gourlay, Robert. Statistical Account of Upper Canada. 2 Vols. New York: Johnson Reprint Corporation, 1966.

Grimsby Historical Society. Annals of the Forty. Grimsby, ON: Grimsby Historical Society, 1959.

Guest, H.H. "Upper Canada's First Political Party." Ontario History. 4 (1962) 283.

Gundy, H. Pearson. Early Printers and Printing in the Canadas. Toronto: Ontario Publishing Company, 1963.

-------.The Spread of Printing in Canada. New York: Abner Schram, 1972.

Hartz, Louis. The Liberal Tradition in America. New York: Doubleday, 1955.

Henretta, James. "Families and Farms: Mentalite in Pre-Industrial America." William and Mary Quarterly. 35 (1978) 3.

--------The Origins of American Capitalism. Boston: Northeastern University Press, 1991.

Horowitz, Gad. "Conservatism, Liberalism and Socialism in Canada: An Interpretation." Canadian Journal of Economics and Political Science. 32 (1966) 143.

Jackson, Eric. "The Organization of Upper Canadian Reformers." Historical Essays on Upper Canada. Ed. J.K.Johnson. Ottawa: Carleton University Press, 1989.

Johnson, J.K. Becoming Prominent: Regional Leadership in Upper Canada, 1791-1841. Kingston: McGill-Queen's University Press,1989.

Jones, Elwood H. "Joseph Willcocks." Dictionary of Canadian Biography. ed. Francess G. Halpenny. Vol. V. Toronto: University of Toronto Press, 1987. 855.

Keon, Daniel. "The New World Idea in British North America: An Analysis of Some Promotional, Travel and Settler Writing, 1780-1860." PH D Dissertation, Queen's University, 1984.

Kulikoff, Alan. The Agrarian Origins of American Capitalism Charlottesville: Universtiy Press of Virginia, 1992.

Landon, Fred. Western Ontario and the American Frontier. Toronto: Ryerson Press, 1941.

Leers, T.J. Jackson. "The Concept of Cultural Cultural Hegemony: Possibilities and Problems." Reviews in American History. 90 (1985) 566.

Light, Beth and Alison Prentice. Eds. Pioneer and Gentlewomen of British North America: 1713-1867. Toronto: New Hogstown Press, 1980.

Lockridge, Kenneth. A New England Town: The First Hundred Years. New York: W.W. Norton and Company, 1970.

Lynd, Staughton. Anti-Federalism in Dutchess County, New York. Chicago: Loyola University Press, 1962.

McCalla, Douglas. Planting the Province: The Economic History of Upper Canada: 1784-1870. Toronto: University of Toronto Press, 1993.

---------."Rural Credit and Rural Development in Upper Canada, 1790-1850." Patterns of the Past. Eds. Roger Hall et al. Toronto: Dundurn Press, 1988. 37.

McCracken, Henry Noble. Old Dutchess Forever. New York: Hastings House, 1956.

Milani, Lois Darroch. Robert Gourlay, Gadfly. Thornhill: Ampersand Press, 1971.

Miller, J.R. Skyscrapers Hide the Heavens: A History of Indian-White Relations in Canada. Toronto: University of Toronto Press, 1989.

Mills, David. The Idea of Loyalty in Upper Canada, 1784-1850. Kingston: McGill-Queen's University Press, 1988.

Moore, Christopher. The Loyalists. Toronto: Macmillan Company of Canada, 1984.

Nelles, H.V. "Robert Nelles." Dictionary of Canadian Biography. Ed. Francess G. Halpenny. Vol. V. Toronto: University of Toronto Press. 650.

---------."Loyalism and Local Power: Niagara District, 1792-1812." Ontario History. 2 (1966) 105.

Nelson, William. The American Tory. Boston: Oxford University Press, 1961.

Noel, S.J.R. Patrons, Clients: Brokers: Ontario Society and Politics, 1791-1896. Kingston: McGill-Queen's University Press, 1990.

O'Brien, Gary W. "Parliamentary Procedure in Upper Canada." Ontario History. 4 (82) 892.

Patterson, Graeme. "An Enduring Canadian Myth: Government and Family Compact." Historical Essays on Upper Canada. Ed. J.K.Johnson. Ottawa: Carleton University Press, 1989. 485.

---------. "Whiggery, Nationality and the Upper Canadian Reform Tradition." Canadian Historical Review. 56 (1975) 25-44.

--------."Early Compact Groups in the Politics of York." Old Ontario: Essays in Honour of J.M.S. Careless. Eds. David Keane and Colin Read. Toronto: Dundurn Press,1990.

---------."Studies in Election and Public Opinion in Upper Canada." PH D Dissertation, University of Toronto, 1969.

Potter, Janice. The Liberty We Seek: Loyalist Ideology in Colonial New York and Massachusetts. Cambridge: Harvard University Press, 1983.

Rawlyk, George. The Canada Fire Radical Evangelicalism in British North America. Kingston: McGill-Queen's University Press, 1994.

Reid, William. The Loyalists in Ontario. Lambertville, NJ: Hunterdon House, 1973.

Robbins, Caroline. The Eighteenth Century Commonwealthmen. Cambridge: Harvard University Press, 1961.

Riddell, W.R. "Joseph Willcocks: 'Sheriff, Member of Parliament and Traitor'." Ontario History. 24 (1927) 475.

---------."The Ancaster 'Bloody Assize' of 1814." The Defended Border: Upper Canada and the War of 1812. Toronto: Macmillan Company of Canada

Ltd., 1964. 241.

Romney, Paul. "From Rule of Law to Responsible Government: Ontario Political Culture and Origins of Canadian Statism." Canadian Historical Association Papers: 1988. eds. Dana Johnson and Andree Desilets. Ottawa: Bonanza Press, 1988.

---------."Re-Inventing Upper Canada: American Immigrants, Upper Canadian History, English Law, and the Alien Question." Patterns of the Past. Eds. Roger Hall, William Westfall, and Laurel Sefton MacDowell. Toronto: Dundurn Press, 1988.

---------.Mr. Attorney: The Attorney General for Ontario in Court, Cabinet, and Legislature, 1791-1899. Toronto: University of Toronto Press, 1986.

Russell, Peter. "Upper Canada: A Poor Man's Country?" Canadian Papers in Rural History. 3 (1982) 134.

Ryerson, Egerton. The Loyalists and Their Times: From 1620 to 1816. 2 Vols. Toronto: William Briggs, 1880.

Salmon, Marylynn. Women and the Law of Property in Early America. Chapel Hill: Univeristy of North Carolina Press, 1986.

Sheppard, George. Plunder, Profit, and Paroles: A Social History of the War of 1812 in Upper Canada. Kingston: McGill-Queen's University Press, 1994.

Silverman, Jason H. Unwelcome Guests: Canada West's Response to American Fugitive Slaves, 1800-1865. Millwood, NY: Associated Faculty Press, 1985.

Siry, Steven E. Dewitt Clinton and the American Political Economy. New York: Peter Lang Publishing Inc., 1990.

Slaughter, Thomas P. The Whiskey Rebellion. New York: Oxford University

Press, 1986.

Spragge, Shirley Campbell. "Organizing the Wilderness: A Study of a Loyalist Settlement, Augusta Township, Grenville County, 1784-1820." PH D Dissertation, Queen's University, 1986.

Stacey, C. P. "The War of 1812 in Canadian History." The Defended Border: Upper Canada and the War of 1812. Ed. Morris Zaslow. Toronto: The MacMillan Company of Canada Limited, 1964.

Stewart, Gordon. Origins of Canadian Politics. Vancouver: University of British Columbia Press, 1986.

Taylor, Alan. Liberty Men and Great Proprietors. Chapel Hill: University of North Carolina Press, 1990.

Vickers, Daniel. Farmers and Fishermen: Two Centuries of Work in Essex County Massachusetts. Williamsburg, VA: University of North Carolina Press, 1994.

Walton, John Bruce. "An End to All Order: A Study of Upper Canadian Conservative Responses to Opposition, 1805-1810." M.A. Thesis, Queen's University, 1977.

Wells, Robert. "What Then is New York, This New State?" New Opportunities in a New Nation. Eds. Manfred Jonas and Robert Wells. Schenectady, NY: Union College Press, 1982.

Wilson, Bruce. The Enterprises of Robert Hamilton. Ottawa: Carleton University Press, 1983.

Winks, Robin. The Blacks in Canada: A History. New Haven: Yale University Press, 1971.

Wise, S. F. "John Macaulay: A Tory for All Seasons." God's Peculiar People. Ed. S.F. Wise. Ottawa: Carleton University Press, 1993.

--------."Upper Canada and the Conservative Tradition." God's Peculiar People. Ed. S.F. Wise. Ottawa: Carleton University Press, 1993.

---------."Conservatism and Political Development: The Canadian Case." God's Peculiar People. Ed. S.F. Wise. Ottawa: Carleton University Press, 1993.

--------."The 1790's." Colonists and Canadians. Ed. J.M.S. Careless. Toronto: Macmillan Co., 1971. 62.

--------."The War of 1812 in Popular History." God's Peculiar People. Ed. S.F. Wise. Ottawa: Carleton University Press, 1993. 149.

--------."Robert Gourlay." Dictionary of Canadian Biography. Ed. Francess G. Halpenny. Vol. IX. Toronto: University of Toronto Press, 1987.

Young, Alfred F. The Democratic Republicans of New York. Williamsburg: University of North Carolina Press, 1967.

Zaslow, Morris. Ed. The Defended Border: Upper Canada and the War of 1812. Toronto: Macmillan Company of Canada Ltd., 1964.

Vita

Name:	Andrew James Young
Place and Year of Birth:	North Bay, Ontario, 1974
Education:	Yale University, 1994-98 Bachelor of Arts, History Cum Laude, Distinction in Major
Experience:	Teaching Assistant, Dept. of Hist, Queen'sUniversity, 1998-1999
Awards:	Slotnick/Slater Scholarship Yale University

MQ

42641

UMI

MICROFILMED 2000

INFORMATION TO USERS

This manuscript has been reproduced from the microfilm master. UMI films the text directly from the original or copy submitted. Thus, some thesis and dissertation copies are in typewriter face, while others may be from any type of computer printer.

The quality of this reproduction is dependent upon the quality of the copy submitted. Broken or indistinct print, colored or poor quality illustrations and photographs, print bleedthrough, substandard margins, and improper alignment can adversely affect reproduction.

In the unlikely event that the author did not send UMI a complete manuscript and there are missing pages, these will be noted. Also, if unauthorized copyright material had to be removed, a note will indicate the deletion.

Oversize materials (e.g., maps, drawings, charts) are reproduced by sectioning the original, beginning at the upper left-hand corner and continuing from left to right in equal sections with small overlaps.

Photographs included in the original manuscript have been reproduced xerographically in this copy. Higher quality 6" x 9" black and white photographic prints are available for any photographs or illustrations appearing in this copy for an additional charge. Contact UMI directly to order.

Bell & Howell Information and Learning
300 North Zeeb Road, Ann Arbor, MI 48106-1346 USA

UMI®
800-521-0600

Haptic Face Processing

by

Andrea R. Kilgour

A thesis submitted to the Department of Psychology

in conformity with the requirements for

the degree of Master of Arts

Queen's University

Kingston, Ontario, Canada

August, 1999

copyright © Andrea R. Kilgour, 1999

National Library of Canada
Acquisitions and Bibliographic Services
395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale du Canada
Acquisitions et services bibliographiques
395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-42641-6

Canada

Abstract

An exploratory study investigated the accuracy with which participants used touch to identify a standard face from among three comparisons in a match-to-sample task. Experiment 1 served as an existence proof that by using only touch participants were indeed surprisingly capable of identifying a human face.

In Experiment 2, participants were deliberately biased toward encoding faces more in terms of geometric properties through two modes of exploration. The first mode of exploration (VH – H) allowed vision during the exploration phase but only haptics for matching. The second mode of exploration (H_{Mask} – H_{Mask}) used rigid masks of the same exemplar faces for haptic exploration and matching. Relative to Experiment 1, matching accuracy tended to decline with VH – H and statistically declined with H_{Mask} – H_{Mask}. The VH – H mode of exploration also allowed examination of matching accuracy when two redundant sources of information (vision and haptics) were available. Surprisingly, vision during the exploration phase did not result in better matching accuracy.

Through two modes of exploration, Experiment 3 examined whether intersensory transfer between vision and haptics occurred and whether this was constrained by the input modality. For the most part, intersensory transfer did occur and was not consistently poorer when haptics was the input modality.

Finally, we addressed two related issues across all three experiments. First, we examined how faces are haptically represented. Second, we investigated whether a visual-mediation strategy was used during processing.

Acknowledgements

I have been blessed by many friends and supporters throughout this project. I thank my supervisor Dr. Susan Lederman, first for believing in me when few others did and second, for allowing me to explore but knowing exactly when to pull in the reins. I look forward to our continuing relationship.

I also thank two people who I am lucky to count as friends: Cheryl Hamilton and Louise Wasylkiw. Cheryl and Louise spent many hours directly involved in this work as well as providing me with friendship and support.

This project certainly could not have happened without the cooperation of the 18 wonderful women who acted as the "face exemplars." I am thankful for their participation and enthusiasm. Sarah, Ange, and Jen particularly went above and beyond the call of duty and friendship in their efforts.

I thank Dr. David Murray for his support and the use of his lab space, and Dr. Kang Lee and Dr. Darwin Muir for their support and feedback as committee members.

Last, but certainly not least, I thank Randy and Rachel, the two most important people in my life. My education would be so much more difficult, if not impossible, without their continuing patience, understanding and love.

Table of Contents

Abstract ii

Acknowledgements iii

Table of Contents iv

List of Tables vi

List of Figures vii

List of Appendices viii

INTRODUCTION 1

Haptic perception 1

The ability of the haptic system to identify objects 2

Two-dimensional displays and planar objects 2

Three-dimensional common objects 4

Another case of three-dimensional objects: faces 6

The nature of object representations: Material/geometric distinction 9

Processing issues: Is visual translation present? 13

Current investigation 15

Experiment 1 20

Method 21

Results 27

Discussion 34

Experiment 2 36

Method 38

Results 40

Discussion 48

Experiment 3 49

Method 50

Results 51

Discussion 58

GENERAL DISCUSSION 60

Accuracy in haptic face processing 61

The nature of face representation: Material/geometric distinction 64

Processing issues 65

Limitations 66

Future Directions 67

Summary 71

References 73

Footnote 78

Appendices 79

Vita 97

List of Tables

1. Experimental design for Experiments 1, 2, and 3 26
2. Geometric and material characteristics used to identify the standard faces 29
3. Summary of cues used to identify the standard faces in Experiments 1 and 2 30
4. VVIQ scores and correlation between VVIQ and accuracy for VH – H and H_{Mask} – H_{Mask} 43
5. Mean comfort ratings for VH – H and H_{Mask} – H_{Mask} 47
6. Summary of cues used to identify the standard faces in V – H and H – V 54
7. VVIQ scores and correlation between VVIQ and accuracy for V – H and H – V 55

List of Figures

1. Experiment 1: Mean accuracy (%) as a function of trial by set 28
2. Experiment 1: Mean standard RT as a function of trial by set 33
3. Experiment 1: Mean total RT as a function of trial by set 35
4. Experiments 1 and 2: Mean accuracy (%) as a function of mode of exploration 41
5. Experiment 2: Mean standard RT as a function of trial by mode of exploration 45
6. Experiment 3: Mean accuracy (%) as a function of set by mode of exploration 52
7. Experiment 3: Mean standard RT as a function of trial by mode of exploration 57

List of Appendices

Appendix A: Vividness of Visual Imagery Questionnaire 79

Appendix B: Visual and tactual rating form 81

Appendix C: Final tactual ratings of the exemplar selection process 82

Appendix D: Consent Form.....84

Appendix E: Participant Instructions 85

Appendix F: Debriefing Sheet.....86

Appendix G: ANOVA source table: Standard RT (H - H) 87

Appendix H: ANOVA source table: Total RT (H - H).....88

Appendix I: ANOVA source table: Accuracy of Matching

(H – H, VH – H, and H_{Mask} – H_{Mask}).....89

Appendix J: ANOVA source table: Standard RT (VH – H and H_{Mask} – H_{Mask}).90

Appendix K: ANOVA source table: Total RT

(H – H, VH – H and H_{Mask} – H_{Mask}) 91

Appendix L: ANOVA source table: Comfort ratings

(H – H, VH – H, and H_{Mask} – H_{Mask}).....92

Appendix M: ANOVA source table: Accuracy of Matching

(V – H and H – V).....93

Appendix N: ANOVA source table: Standard RT (V – H and H - V).....94

Appendix O: ANOVA source table: Comfort ratings (V – H and H - V) 95

Appendix P: Ethics Face Sheet 96

HAPTIC FACE PROCESSING

Haptic perception

The haptic system refers to the information processing subsystem that takes into account not only tactile or cutaneous input, but also kinesthetic information (Loomis & Lederman, 1986). Kinesthesis refers to information about our movements and the positioning of our bodies in space. This information is derived from sensory input gathered by the tendons, muscles, and joints. Thus, haptic perception is a more inclusive term than tactile perception, which refers to purely cutaneous input from mechanoreceptors and thermoreceptors (e.g., pressure, temperature, and vibration).

To date, research on haptic object processing has dealt exclusively with inanimate objects. These objects have varied in their two and three-dimensional form and have been either nonsense objects specifically engineered for the purposes of research or common objects found in everyday life. Early experiments concentrated on the geometric properties of objects, that is, primarily size and shape. Given the focus on geometric properties, these experiments tended to use as stimuli, two-dimensional or planar homogeneous shapes. More recently haptic object processing has expanded to consider the material properties of objects, (e.g., texture, compliance, and thermal conductivity) as well. However, as yet no one has examined whether a human face is processed with the same accuracy as that of other three-dimensional, multiproperty common objects.

The ability of the haptic system to identify objects

A large body of literature has accumulated on the ability of the haptic system to process and recognize objects. Much of the work has been differentiated into the ability to recognize two-dimensional objects, such as raised-line drawings and planar objects (e.g., Bryant & Raz, 1975; Cashdan, 1968; Lederman et al., 1990; Magee & Kennedy, 1980), and common, three-dimensional objects (e.g., Klatzky, Lederman, & Metzger, 1985).

Two-dimensional displays and planar objects. Earlier research concentrated on the apprehension of contour and essentially required the haptic system to process information in the same manner as vision. Stimuli used in these experiments included raised two-dimensional line drawings, graphic displays, planar nonsense shapes, and braille or other forms of raised written communication (e.g., Loomis, 1985).

Magee and Kennedy (1980) considered the ability of participants to identify two-dimensional, raised-line drawings. The drawings were all readily identifiable visually. In the condition that allowed participants to freely haptically explore the drawings, only 17% of them were recognised.

Another example of research involving the haptic processing of two-dimensional stimuli is considered applied research as well as theoretical. Individuals who are blind must rely on two-dimensional representations of written communication if they are to read and write. A number of researchers (e.g., Foulke, 1982; Heller, 1986; Heller et al., 1990; Loomis, 1981), therefore, have

devoted their careers to examining haptically presented written communication, particularly braille.

As many blind people, particularly those blinded later in life, cannot read braille (Heller et al., 1990), some research has focused on alternatives in the form of embossed Morse code (e.g., Heller, 1985) or raised letters (e.g., Heller et al., 1990; Loomis, 1981). The results are somewhat conflicting. Loomis has argued that the haptic system is limited in its ability to resolve fine spatial detail (an ability required for reading braille). In contrast, Heller et al. (1990) have maintained that given appropriate conditions (i.e., stimulus size and free exploration), participants can read raised letters through their fingertips. Like raised-line drawings and braille, these forms of raised writing introduce similar processing constraints.

The area of research addressed in the past section demonstrates the inability of participants to perceive both accurately and rapidly two-dimensional stimuli by touch alone. There are several constraints that contribute to the haptic system's poor ability to process such stimuli. First, haptic exploration of these stimuli provides information to the fingertips sequentially, thus requiring the haptic system to integrate the information not only spatially, but also temporally. In some cases, the memory load is too great to allow for efficient integration. Second, information provided by these displays is limited. Although there is contour information, there is little, if any, variation in material properties such as texture, compliance and thermal conductivity.

Focusing on the haptic system's performance with two-dimensional displays highlights how these displays constrain its perceptual abilities. Research, as outlined below, has documented object properties (material properties) that are optimally extracted by the haptic system. As stated earlier, two-dimensional displays simply do not include or do not vary these properties. They also lack information from variation in the third dimension and other sources of information such as moving parts.

Three-dimensional common objects. As opposed to two-dimensional displays and planar objects, three-dimensional common objects naturally vary in both geometric and material properties. Presumably, this abundance of information, which can be efficiently extracted by the haptic system, would result in better identification accuracy as compared to two-dimensional displays. Klatzky et al. (1985) conducted the principal study that investigated the ability of the haptic system to recognize common three-dimensional objects. Twenty blindfolded participants were required to haptically explore and name 100 common objects as quickly and as accurately as possible. Naming accuracy was 99% and the modal response time was under 2 s. These findings are tremendously discrepant with those involving two-dimensional objects. So, what is it about common objects that allows for highly accurate identification?

Lederman and Klatzky (1987) discussed the performance discrepancy between objects with multiple properties (e.g., common objects) and those with limited properties (e.g., two-dimensional displays). They pointed out that three-dimensional common objects make full use of the capabilities of the haptic

system, in that not only is there cutaneous input but also motor input. Not having differentiating or salient properties in the third dimension, two-dimensional displays and planar objects do not demand the same extensive variation in manual exploration in that there is less information available to extract. Lederman and Klatzky carried out two experiments that demonstrated the connection between desired knowledge about object properties and specific hand movements during haptic exploration of three-dimensional, multiproperty, nonsense objects. These hand-movement patterns were termed "exploratory procedures" (EPs), and are defined as stereotyped patterns of hand movements executed during haptic exploration of an object. Each specific hand movement pattern is associated with one or more particular object property and is spontaneously executed in order to extract desired information in the most efficient manner about an object. A particular EP is used because it is the optimal, or even necessary, movement for extracting a particular, desired object property. For example, an "unsupported holding" EP involves holding an object in one's extended palm away from any supporting surface. This EP is performed in order to determine its weight and perhaps coarse volume; whereas, if exact shape were desired, unsupported holding would not suffice. In order to obtain precise shape information, one would explore the object's contours (a "contour following" EP).

Ballesteros, Manga, and Reales (1997) have also confirmed the specificity of EPs. Using Lederman and Klatzky's (1987) criteria for scoring EPs, Ballesteros et al. tested the accuracy and sensitivity of the haptic system in

detecting bilateral symmetry of both raised-line two-dimensional shapes and unfamiliar three-dimensional objects. They found that not only was the haptic system more accurate with the three-dimensional shapes but that both accuracy and speed of discrimination were best when the choice of EP was not constrained by the experimenter. That is, when participants were only permitted to grasp the object within their hands (an "enclosure" EP), accuracy of discrimination decreased.

Thus, the haptic system methodically utilizes fundamental hand-movement patterns (EPs) in order to extract specific object properties. However, only when the object under consideration inherently includes multiple varying properties, can the haptic system manifest its capabilities maximally. As stated earlier, in the case of two-dimensional displays, there are fewer varying properties. Typical two-dimensional displays may vary in two-dimensional shape and size, but rarely in texture, compliance, or temperature-related cues (e.g., thermal conductivity).

Another case of three-dimensional objects: faces. Human faces are not typically referred to as "objects" but are somehow considered special. Although there is some controversy, the visual-perception literature has made a distinction between objects and faces (e.g., Farah et al., 1998; Nachson, 1995). Nevertheless, faces are three-dimensional "objects" that vary in both geometric and material properties. To date, there has been no published research investigating whether, and if so, how the haptic system processes faces. There have been, however, several indirect and limited contributions to the question of

haptic face processing. The studies presented below are limited to the extent that whole faces were not the stimuli to be recognized.

Kaitz and colleagues (e.g., Kaitz, 1992; Kaitz et al., 1992; Kaitz, Meirov, & Landman, 1993; Kaitz et al., 1994) conducted several studies in which participants were required to identify their romantic partners or newborn infants solely by haptic exploration. In all the studies, visual, auditory, and olfactory information were eliminated, leaving only haptic information available with which to perform the designated task. The first study (Kaitz, 1992) required participants to identify their romantic partners by actively touching only the dorsal surface of the hands or a small area of the forehead. The romantic partner was designated the "target" and he/she was to be identified from among the target and two other "foils" (chance therefore equaled 33%). Kaitz found that individuals could accurately perform this task approximately 58% of the time. Although both men and women could identify their opposite-sex partners by touching a small area on the forehead (50% and 67% success, respectively), only women were able to recognize their partners by touching the back of the hand (69% accuracy). Kaitz concluded that men have more differentiating characteristics (particularly hair – a material cue) on their hands. The overall conclusion was that tactile cues are sufficiently salient to allow for recognition of a highly familiar individual.

Three subsequent studies (Kaitz et al., 1992; Kaitz, Meirov, & Landman, 1993; Kaitz et al., 1994) required parturient women and fathers of newborn infants to identify their infants, as before, from among three comparisons. Again, the only accessible cues were haptic. In these studies, the parents were allowed

to touch only the dorsal surface of the hand or the cheek. Although parents were not successful at identifying their infants less than one-hour old (36% accuracy), parents identified infants as young as 7-hours old approximately 65% of the time. Participants in these experiments identified two material characteristics, texture and temperature, as the most salient diagnostic characteristics.

Although these studies did not directly address whether humans are able to recognize faces per se through haptic input alone, they provide a basis for hypothesizing that humans can do so. Rather than face recognition, the studies by Kaitz demonstrated skin-recognition abilities. One would expect skin recognition to be more difficult than face recognition given the poverty of information provided only by the skin as compared to the complexities of an entire face. Like three-dimensional common objects, faces vary in their three-dimensional geometric properties as well as in their material properties.

All previous studies discussed demonstrate that the haptic system's accuracy in identifying objects varies depending on the stimuli used. When homogeneous two-dimensional objects are the explored stimuli, the haptic system performs object identification poorly. Identification accuracy increases dramatically when more information, such as three-dimensional geometric and material variation, and moving parts, is provided in the third dimension. However, individuals familiar to experimental participants are not identified as accurately as are common three-dimensional objects. These studies do not, however, address how objects are perceptually represented during haptic exploration.

The nature of object representations: Material/geometric distinction

Lederman and Klatzky (1987) proposed that the EPs used for extracting material properties are executed more quickly and more accurately than those used to obtain information about geometric properties. Other research determined the most cognitively salient object properties for haptics versus vision, given perceptual equivalence of the set of objects used (Klatzky, Lederman & Reed, 1987). Here, cognitive salience refers to "...the differential weighting of properties in object representation or processing" (Lederman, Summers & Klatzky, 1996; p.984). Participants were required to sort (in two tasks) a set of custom-designed two-dimensional objects. Each object varied factorially on four dimensions: size, shape, texture, and compliance. The objects were designed such that no one dimension was more difficult to perceive than another (i.e., equivalent "perceptual accessibility"). Perceptual accessibility refers to the relative discriminability of dimensions that are varied in a limited object domain (e.g., current stimulus set). Given the perceptual equivalence of these objects, it was proposed that sorting strategy would be ascribed to "modality-encoding bias" rather than to perceptual accessibility. Modality-encoding bias is based on lifetime experience of encoding property variations within an extensive domain of objects using the different modalities.

Participants were instructed to sort by touch along a particular dimension and one of three modality-sorting biases was introduced through the instructions. The first bias was actually "unbiased haptics," where participants were instructed to sort objects based on their similarity (no definition of similarity was provided).

The second was "haptically biased," where similarity was defined as "objects feeling similar". Finally, the third group – "visually biased" – was instructed that "similarity was to be based on the objects' visual images". When these instructions biased participants toward haptic encoding, objects were sorted most often on the basis of material properties (i.e., texture and compliance). On the contrary, when a visual bias was elicited through instructions (visual image or actual visual input), participants sorted on the basis of geometric properties (i.e., shape and size). Material properties were found to be more salient in the object representations formed by the haptic system than by the visual system.

Lederman et al. (1996) extended their investigation of the relative salience of material and geometric properties. This research made use of three-dimensional custom-designed objects that varied along two geometric (shape and size) and two other material (weight and thermal conductivity) dimensions. A sorting task revealed that instructions to sort by targeted geometric properties resulted in overall faster sorting performance. However, modality-encoding bias (the lifetime experience in employing different modalities to encode different properties) affected relative cognitive salience (differential weighting of properties in object processing) as in the Klatzky et al. (1987) study. Participants chose to sort objects by similarity more on the basis of material properties than geometric properties when haptically biased; conversely, they sorted more by geometric properties than material properties when visually biased. This finding illustrates that the nature of object representation within the haptic system emphasizes material properties in addition to geometric properties, whereas, the visual

system represents objects more in terms of geometric properties and does not include as much emphasis on material properties. Certainly, visual textural cues can be important. For example, a change in the texture of the ground will influence ones' gait. However, often a viewer is too far from a surface to extract precise textural information. In addition, other material properties such as temperature and compliance only provide visual information at one extreme (i.e., very hot or very soft).

The studies reviewed above focused on the influence of modality-encoding bias on the relative importance of material vs. geometric properties under extensive haptic exploration. Lederman and Klatzky (1997) have further demonstrated the material/geometric distinction in initial haptic contact lasting only about 200 ms. Target and distractor stimuli, which varied along one of four property classes, were simultaneously presented to combinations of from one to six fingertips. These four property classes were material, abrupt-surface discontinuity, orientation, and continuous three-dimensional surface contour. On each trial participants were simply required to state whether or not a target was present. Relative perceptual availability of a property class was assessed through examination of the slopes of the haptic search functions. A very low slope was interpreted as indicating that for each additional finger stimulated, the additional processing load was relatively low; therefore, the property under inspection was available relatively early on for further processing. Generally, it was found that the stimuli presenting material properties and edges resulted in functions with very low or flat slopes. In contrast, orientation and three-

dimensional surface contour stimuli resulted in search functions with higher positive slopes. Lederman and Klatzky proposed that the cognitively salient object properties for haptics (material properties) are coded intensively (i.e., with no reference to a spatial coordinate system); whereas, geometric properties that are not as readily available are coded spatially.

The material/geometric distinction is relevant to the current research, in that faces inherently include both geometric and material properties. It can be argued, however, that neither class of properties varied to the same degree as compared to three-dimensional common objects (e.g., Klatzky et al., 1985). The current research required participants to match at the "subordinate" level of classification; whereas, Klatzky et al. had participants perform at the "basic" level of classification. Basic categories (e.g., pen, pencil) are those that carry the most information, possess the highest category cue validity, and are, thus, the most differentiated from one another (Rosch et al., 1976). Exemplars grouped at the subordinate level (e.g., fountain pen, used pencil) naturally vary perceptually to a lesser degree than do those at the basic level.

Lederman and Klatzky (1990) examined what haptically available object properties were most diagnostic of object classes at both the basic and subordinate levels of classification. They also investigated the EPs used by participants and how those EPs were associated with the reported diagnostic properties. They found more diagnostic properties of targeted common object classes at the basic level than at the subordinate level. Furthermore, geometric properties were weighted more heavily. However, at the subordinate level,

material properties were weighted more heavily in their diagnosticity than at the basic level and the EPs associated with material properties were performed.

As with the issue of accuracy, no one has examined the impact of the subtle geometric and material variations of a face on the haptic identification of faces. All previous studies discussed demonstrate that the haptic system's accuracy in identifying objects varies depending on the stimuli used. When homogeneous two-dimensional objects are the explored stimuli, the haptic system performs object identification poorly. Identification accuracy increases dramatically when more information, such as three-dimensional geometric and material variation is provided. These studies do not, however, address the process by which the haptic system arrives at identification.

Processing issues: Is visual translation present?

Lederman et al. (1990) noted that many studies, such as the one by Magee and Kennedy (1980), seemed to assume that the haptic system processes information in a similar but inferior manner to vision. That is, haptic input is translated into a visual image and then the object is represented through the visual-processing system. They called this process the "image-mediation" model of haptics (Klatzky & Lederman, 1987; Lederman & Klatzky, 1990). Lederman et al. conducted a study to verify the image-mediation model for two-dimensional displays under conditions that encouraged visual mediation. As two-dimensional displays are difficult for the haptic system to process, one would expect individuals to utilise visual-image mediation, as it offered one of the very few heuristics possible when only contour information was available.

In Experiments 1 and 3 they required sighted, blindfolded participants and congenitally blind participants, respectively, to haptically recognise two-dimensional raised-line drawings of highly familiar objects. Additionally, participants in Experiment 1 were asked to complete the Vividness of Visual Imagery Questionnaire (VVIQ; Marks, 1973). This questionnaire measures visual-imagery ability. If a visual-mediation strategy was used to identify the drawings, one would expect that those participants who showed better visual imagability would also show higher identification accuracy. For Experiment 2, a different group of participants was asked to rate the vividness of the visual image they could create of each of the line drawings used in Experiment 1. The vividness rating was interpreted as a reflection of the imagability of each drawing.

The mean percent accuracy of identification was 33.5% for sighted - blindfolded participants and even poorer -- 10.4% -- for blind participants. Furthermore, the mean reaction time was greater than 90 s.

Three main findings that provided support for the image-mediation model emerged from the Lederman et al. (1990) study. First, there was a significant, negative correlation between VVIQ score and both recognition speed and accuracy. Participants who scored lower on the VVIQ (indicating high ability to use visual imagery) demonstrated higher identification accuracy and faster response times. Second, there was a positive correlation between the ability of the participant to image and the obtained imagability ratings (vividness) for the stimuli. The stimuli that were rated as easier to image were, in fact, rated as such by participants who demonstrated high imagability. Finally, there was superior

performance with two-dimensional depictions of objects as opposed to objects depicted as three-dimensional using perspective cues (e.g., the use of interior lines). The results provided empirical support for the image-mediation model when haptically exploring two-dimensional stimuli; they also underscored the very poor haptic recognition of two-dimensional drawings.

To date, no research has examined whether visual mediation is used with three-dimensional objects. It is unlikely that visual mediation is required for an easy task and when classification of objects is at the "basic" level. These objects provide a variety of geometric and material properties for the haptic system to directly extract and apply to identification and recognition of the explored object. The studies in which faces were used as the stimuli (e.g., Kaitz, 1992; 1993; 1994), however, were not at near-perfect accuracy. Therefore, it is possible that visual mediation is a strategy that may be used for haptic face identification. We have illustrated that two-dimensional displays do not provide adequate variation of material properties. The lack of information in these displays might impel participants to use a visual-mediation strategy. On the other hand, three-dimensional common objects contain a variety of both geometric and material cues and therefore one need not employ a visual-mediation strategy.

Current investigation

The present research was necessarily exploratory, in that it directly assessed how well humans can haptically identify totally unfamiliar faces in three experiments using a match-to-sample task. Such research is required in order to investigate haptic face processing with respect to specific neuropsychological

issues in the future. Experiment 1 served as an existence proof that the haptic system can identify an unfamiliar face with a surprising level of accuracy using a haptic-only matching task (H – H). Based on the literature, it was reasonable to predict that accuracy matching would be above chance. Identification accuracy similar to or better than that of the Kaitz et al., (1992; 1993; 1994) studies might be predicted as the current investigation allowed exploration of whole faces (multiple cues). However, the exemplars here were unfamiliar to participants; therefore, we predicted that performance might be worse as compared to the Kaitz et al. studies. Through the use of neuroimaging, Dubois et al. (1999) have demonstrated that the human brain processes familiar and unfamiliar human faces differently. It is, therefore, not unreasonable to presume that matching accuracy of familiar (e.g., Kaitz et al.) and unfamiliar faces (current research) would be different. Conversely, performance was not expected to be as accurate as that reported by Klatzky et al. (1985), as the latter involved a basic-level task while the current experiments required identification at the subordinate level – a more difficult task.

Experiment 1 also addressed how people represent faces derived from haptic inputs only. Participants were asked to report the cues that they used in identifying the standard faces. These cues were subsequently categorized as geometric or material and the reported proportions of these two classes were examined.

One important question was whether people would resort to visual mediation when identifying faces, as they had demonstrated previously when

identifying two-dimensional pictures of common objects (Lederman et al., 1990). To test this, participants were required to complete the VVIQ. Due to the presumed difficulty of the task, it was expected that participants would draw on any available strategy to identify the target face. Moreover, face identification is typically a visual task, and therefore, it is not unreasonable to expect that participants might employ a visual heuristic as they have been shown to do in past research (Lederman et al., 1990).

Experiment 2 further addressed the role of geometric and material cues in haptic face processing. Exploration was deliberately biased toward geometric cues. Two modes of exploration were included in this study. In the first mode, participants were biased toward the use of geometric properties by permitting both visual and haptic exploration of the standard face, followed by haptic identification of that face from among three comparison faces (VH – H). The second mode of exploration biased participants toward the use of geometric cues by eliminating material cues. The exemplars here were rigid masks of the same faces. They were haptically explored and participants were required to haptically match the standard face from three comparisons (H_{Mask} – H_{Mask}). These exemplars provided all the geometric information without the natural variation in material properties.

With the addition of visual input (VH – H), we expected matching accuracy to be better than that of Experiment 1. Conversely, based on the literature addressing haptic object processing, we predicted that without variation in

material properties matching accuracy for $H_{Mask} - H_{Mask}$ would decline relative to that in Experiment 1.

The deliberate biasing toward geometric properties led to the expectation that participants would report the use of more geometric cues in their attempts to identify the standard faces. Bimodal exploration (VH – H) allowed participants to optimally extract both geometric cues through visual exploration and material cues through haptic exploration. This combination of both types of cues should have provided a richer perceptual representation that would result in better matching accuracy. Conversely, the elimination of material cues ($H_{Mask} - H_{Mask}$) forced participants to build a representation based only on geometric properties. Given the difficulty of subordinate-level tasks, this relatively insufficient representation would then lead to poorer matching accuracy.

With respect to processing, vision during the exploration phase might increase the likelihood that participants would adopt a visual-translation stage when haptically identifying the target. Likewise, the presumed difficulty of the $H_{Mask} - H_{Mask}$ task might impel participants to utilize visual imagery. To the extent that a visual-mediation heuristic is adopted, those participants who demonstrate better visual-imagery ability (as measured by the VVIQ) should demonstrate better matching performance than those who demonstrate poorer imagability.

Experiment 3 extended the current investigation to specifically address intermodal-matching performance. Again, two modes of exploration were included. The first mode of exploration in this experiment required participants to visually explore the standard faces and then identify the standards haptically

from among three comparisons (V – H). The second mode of exploration required participants to explore the standard faces haptically and then identify them visually from three comparisons (H – V). Similar to Experiments 1 and 2, we examined three main issues: matching accuracy, encoding (the nature of the representation), and perceptual processing.

Classic research (Meltzoff & Borton, 1979) has demonstrated that even very young infants are capable of intermodal matching. Therefore, the prediction for the current investigation was that participants would be able to accurately identify the standard faces at above-chance levels. However, Jones (1981) has suggested that initial haptic processing followed by visual matching results in poor performance. This poor performance was attributed to insufficient haptic processing of the stimulus rather than to low intermodal transfer. Based on the Jones (1981) review, we expected that the H – V mode of exploration would result in poorer matching accuracy than the V – H mode of exploration.

All participants were again asked to report the cues they used in identifying the standard faces. Through examination of these reported cues, we could speculate on how faces are encoded during an intermodal-matching task.

Finally, we investigated whether participants would adopt a visual strategy. Given that vision was involved in both modes of exploration, it was not unreasonable to expect that participants might use visual mediation. To the extent that it was used, participants who demonstrated better visual imaging ability (as measured by the VVIQ) were expected to show better matching accuracy.

Experiment 1

Experiment 1 served as an existence proof that the haptic system alone is indeed capable of identifying a human face. Participants were blindfolded throughout the entire task and were required to complete a match-to-sample task with human faces as the exemplars. There were two possible contrasting predictions with respect to matching accuracy. It was not unreasonable to predict that matching accuracy would be poor. In the Kaitz et al. studies (1992; 1993; 1994), accuracy ranged from chance to approximately 66%, depending on the degree of familiarity with the exemplars. In the current study, none of the current faces was at all familiar to the participants. Moreover, the current task required subordinate-level matching – a perceptually more difficult task than basic-level matching. So, there was no reason to expect performance to be at the same accuracy as that shown by Klatzky et al. (1985). On the contrary, we could argue that accuracy would be better than in the Kaitz studies due to an increase in the amount of available information (the entire faces, rather than a limited area of the forehead).

We also anticipated that participants would report using both geometric and material properties in their attempts to identify the standard faces. Furthermore, to the extent that participants used visual mediation as a means of performing such a challenging task, participants who had better visual-imagery scores should show better matching performance as well.

Method

Participants

Thirty undergraduate students (6 men and 24 women, mean age 19.3 years, SD = 2.4) participated in the current study in partial fulfillment of an Introductory Psychology course credit. Testing procedures met with the standards of the Ethics Review Committee in the Department of Psychology at Queen's University.

Materials

The VVIQ (see Appendix A; Marks, 1973) was administered to each participant. This questionnaire is a measure of visual-imagery ability that presents participants with four different scenarios: the thought of a friend, a rising sun, a shop, and a country scene. Each scenario is followed by four questions requiring participants to rate the vividness of the image that comes to them. The VVIQ has a minimum score of 16 (highest imaging ability) and a maximum score of 80 (lowest imaging ability). Test-retest reliability coefficients for the VVIQ range from .67 (McKelvie & Gingras, 1971) to .74 (Rossi, 1977). As well, research (e.g., Rossi, 1977) reports that the VVIQ is a valid scale of visual imagability. Of the two other tests of visual imagery we know of, no research shows better relaibility and validity scores than those that have used the VVIQ. Therefore, it seemed reasonable to use the VVIQ in this initial investigation.

Manual exploration of the exemplar faces by each participant was recorded with a Quasar S-VHS video camera. Each participant's hand movements were recorded in order to ensure accuracy of the response-time

data. Videotaping was further required to permit the hand movements to be scored subsequent to the current thesis. A portable stereo system with headphones was used to present white noise to participants.

Selection of face exemplars. Forty-seven women volunteered to be potential face exemplars for this study. Two photographs, one full-front face and one profile face, were taken of each individual using a Samsung-AF camera. Each photograph was taken at a distance of three feet under florescent lighting.

Three independent raters viewed all the photographs and visually categorized each potential exemplar's facial features (see Appendix B). For example, an individual was categorized as having a round, square, oval, or heart-shaped face. In addition, the raters were asked to view all the photographs presented together and to subjectively group potential exemplars based on visual similarity. All 47 rating sheets were categorized into four groups according to the overall shape-of-face ratings. These four groups were further subdivided based on ratings regarding similarity of nose, chin, and forehead characteristics, resulting in eight possible groups composed of 31 potential face exemplars. Based on the rating sheets and the subjective groupings, 16 potential face exemplars were discarded from the pool. Interestingly, the subjectively rated groups were largely similar to the objectively rated groups.

Two independent raters then categorized all remaining potential face exemplars (31) based on a set of designated tactual characteristics (see Appendix B). The raters were blindfolded and were unaware of both the identity

of each potential face exemplar and the assigned visual rating. Again, potential face exemplars were grouped according to similarity of tactual characteristics.

The visual and tactual ratings were compared. Potential face exemplars that were grouped together based on both visual and tactual similarity were included in the next step of face-exemplar selection. Those that had disparate ratings and did not fit into a group with other potential face exemplars were discarded from the pool. This process left 30 potential face exemplars arranged into eight groups. Four of these potential exemplars were classed as possibly belonging to more than one group. The groups ranged from three to eight potential face exemplars.

Each of the eight groups of potential exemplars was asked to return to the lab to be haptically rated a second time. The two raters were blindfolded and were unaware of the identity of the potential face exemplars. The members of each group were compared to one another in pairs; the raters haptically explored all possible pairs. The raters classified each pair as poor, good, very good, or excellent on the basis of tactual similarity. The three potential face exemplars from each group that were classified as the most similar were chosen as the face exemplars for this study. Appendix C shows the results of the final process of face-exemplar selection.

In total, six groups (each with three face exemplars) were chosen for the current study. The mean age of the women who were the face exemplars was 23.6 years (SD = 2.8) with a range of from 20 to 30 years. Three of the groups were designated as Set 1; the remaining three groups were specified as Set 2.

Within each group of three, one exemplar was chosen as the standard and the remaining two were designated as the comparisons. The exemplar that was rated as most similar to the other two exemplars was designated as the standard. For example, if A was rated as excellent in similarity to both B and C, but B was only rated as a very good match to C, A would be designated as the standard.

During the task, only the faces were presented to participants. All the exemplars wore headbands to remove potential differentiating cues provided by their hair.

Procedure

Haptic exploration – haptic matching (H - H). Fifteen participants[1] were randomly assigned to Set 1 face exemplars, while 15 explored the exemplars assigned to Set 2. All participants read and signed a consent form (see Appendix D) and were then required to wash their hands thoroughly with antibacterial soap. Participants were given instructions for the task (see Appendix E) and informed that they would be required to mask olfactory cues by applying vaporizing chest rub ointment under their nose. Furthermore, during the task participants were required to wear a blindfold and headphones. White noise was delivered through the headphones. Olfactory, auditory and visual cues were masked in order tc ensure that the identification of the standard faces was based solely on haptic information. As this task was rather unusual and potentially uncomfortable for participants, they were asked a second time if they wished to continue with the study. When the ointment, headphones, and blindfold were in place, participants were asked to familiarize themselves with the standard face through manual

exploration; no time constraint was imposed on the duration of exploration. Participants were then sequentially presented with three comparison faces, one of which was the standard. Participants were not permitted to re-explore a face once they moved on to the subsequent face. The presentation order of the standard was counterbalanced between trials and participants. Participants were asked to identify the standard face. This phase of the procedure was videotaped. After identifying the standard face, participants were allowed to remove the blindfold and headphones. They were asked to rate how comfortable they were with the task. Responses, on a 5-point scale, ranged from 1 ("not comfortable") to 5 ("very comfortable"). Finally, participants were asked to provide information regarding the characteristics that they used in order to identify the standard face. Responses were not restricted in any fashion.

The entire procedure was repeated three times in total, with each trial including a different standard and the two appropriate comparisons. Finally, after all three trials, each participant completed the VVIQ. Upon completion, each participant was given a debriefing sheet (see Appendix F) and thanked for participating in the study.

Design

The design for Experiment 1, as well as Experiments 2 and 3, is shown in Table 1. A one within-subjects/one between-subjects design was used with 30 participants randomly assigned to one of two sets (between-subjects factor), 15 participants in each set. Each participant completed three trials, each with a different set of standard/comparison faces. Each participant provided five

Table 1

Experimental design for Experiments 1, 2, and 3.

	Mode of Exploration	Set		Trials 1	2	3
Experiment 1:	H – H	1	(n=15)			
		2	(n=15)			
Experiment 2:	VH – H	1	(n=15)			
		2	(n=15)			
	H_{Mask} – H_{Mask}	1	(n=15)			
		2	(n=15)			
Experiment 3:	V – H	1	(n=15)			
		2	(n=15)			
	H – V	1	(n=15)			
		2	(n=15)			

measures: accuracy of matching (from the three trials), subjective reports of diagnostic features, VVIQ score, response time, and subjective comfort rating.

Results

Accuracy data

Each trial was scored as one (correct) or zero (incorrect). The three trials were combined by calculating the sum; therefore, each score ranged from zero to three.

These scores were entered into an independent samples t-test. This analysis revealed that there was no difference between the sets, $t(28) = .67$, $p > .05$. Collapsed across trial and set, the mean percent accuracy was 78.9%, as shown in Figure 1.

Diagnostic facial-characteristics data

As mentioned earlier, each participant was asked to report the facial characteristics used to identify the standard face. Each response was assigned a score of 1, and was categorized as either "geometric" or "material". The responses were then further sub-categorized as shown in Table 2. This categorization system allowed a count of the geometric and material cues used with each mode of exploration. The relative importance of geometric and material properties was assessed on the basis of these data.

Geometric vs. material cues. To permit subsequent comparison with Experiment 2, Table 3 summarizes the percentages of cues used in the two sets across all modes of exploration in both Experiments 1 and 2. Although H – H relied heavily on geometric cues, material cues were clearly used as well in

Figure 1

Experiment 1: Mean accuracy (%) as a function of trial by set (error bars = ± 1 SEM).

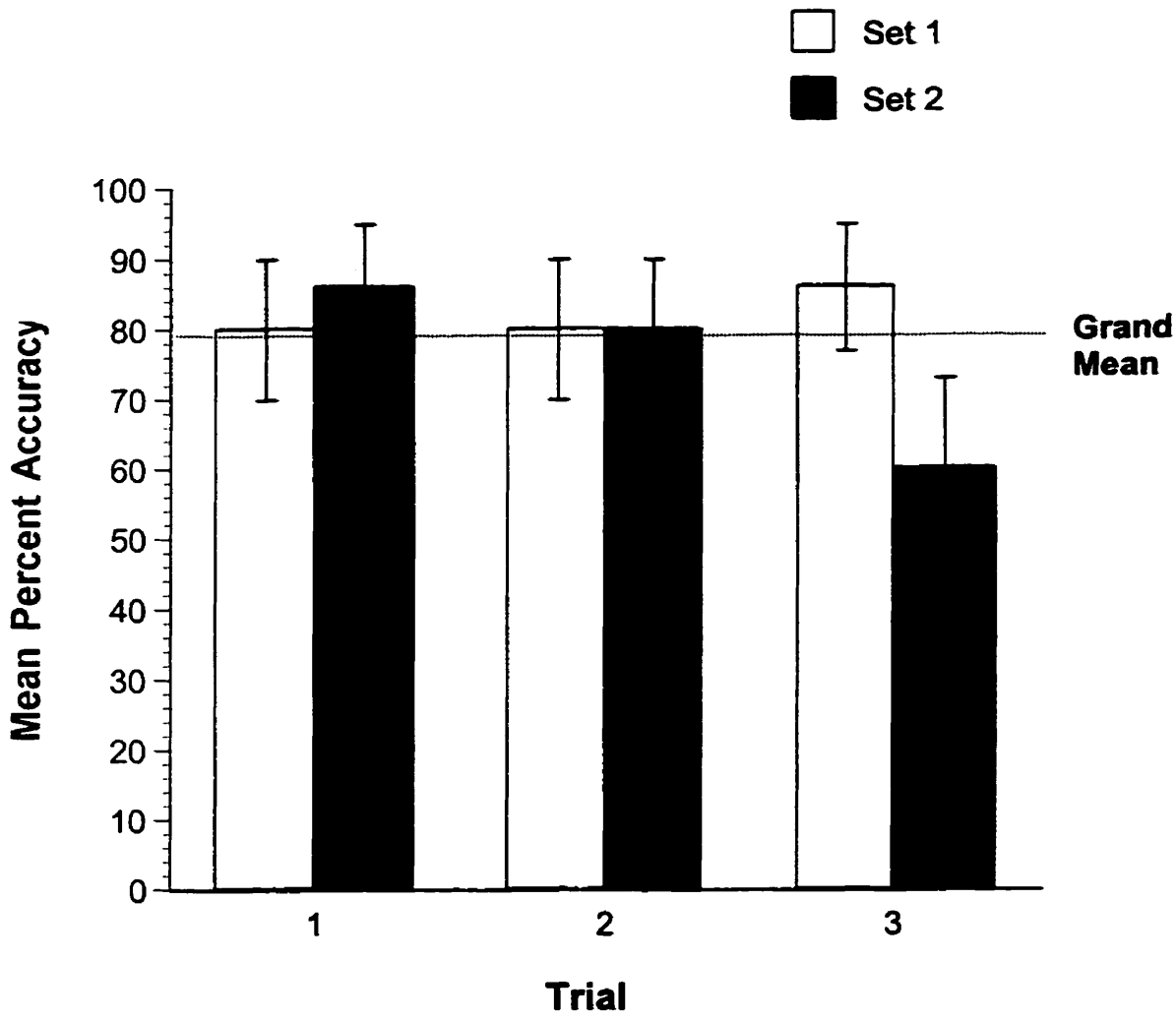


Table 2

Geometric and material characteristics used to identify the standard faces.

GEOMETRIC CHARACTERISTICS								
Global	Feature							
	Chin	Jaw	Cheeks	Nose	Forehead	Brows	Lip/ Upper lip	Eyes

MATERIAL CHARACTERISTICS					
Texture	Compliance	Blemishes	Hair	Brow Texture	Temperature

Table 3

Summary of cues used to identify the standard faces in Experiments 1 and 2.

Mode of Exploration	Set	Expt.	Geometric Percent of Total (%)	Material Percent of Total (%)	Percent Total (%)
H – H	1	1	73.4	26.6	100
	2	1	70.0	30.0	100
	Mean	1	71.7	28.3	100
VH – H	1	2	84.9	15.1	100
	2	2	67.0	33.0	100
	Mean	2	76.0	24.0	100
H_{Mask} – H_{Mask}	1	2	95.7	4.3	100
	2	2	96.1	3.9	100
	Mean	2	95.9	4.1	100

identifying the standard faces. Again, there was no difference between the sets. A Goodness of Fit test showed that participants in both sets used the same proportion of geometric and material cues, $\chi^2_{(1, N = 184)} = .04$, $p > .05$. Overall, participants reported using 71.7% geometric cues and 28.3% material cues in Experiment 1.

VVIQ data

The mean VVIQ score for Set 1 was 32.9 (SD = 8.5) and for Set 2 was 33.2 (SD = 7.7). Taken together, the overall mean is 33.0 (SD = 7.9). These scores are indicative of a fair ability to employ visual imagery. Recall that the score reflecting the best ability to visually image is 16, whereas, higher scores to a maximum of 80 reflect poor ability to image.

There was no correlation between VVIQ score and accuracy, $r = .10$, $p = .72$ and $r = -.14$, $p = .61$ for Sets 1 and 2, respectively, or for the overall mean, $r = -.002$, $p = .99$.

Response-time (RT) data

For each face exemplar, the duration of contact was measured, in seconds, from initial contact to disengagement. In this exploratory study, two RT measures were subsequently considered: (a) standard RT, that is, duration of contact with the standard face only; and (b) total RT, that is, standard RT plus the response times for each comparison face exemplar. The significance of these measures will be discussed in the General Discussion. These data violated both the assumptions of normality and homogeneity of variance for Analysis of Variance (ANOVA) in that the data were positively skewed. Accordingly, the data

were subjected to a logarithmic transformation. After transformation the data met both required assumptions.

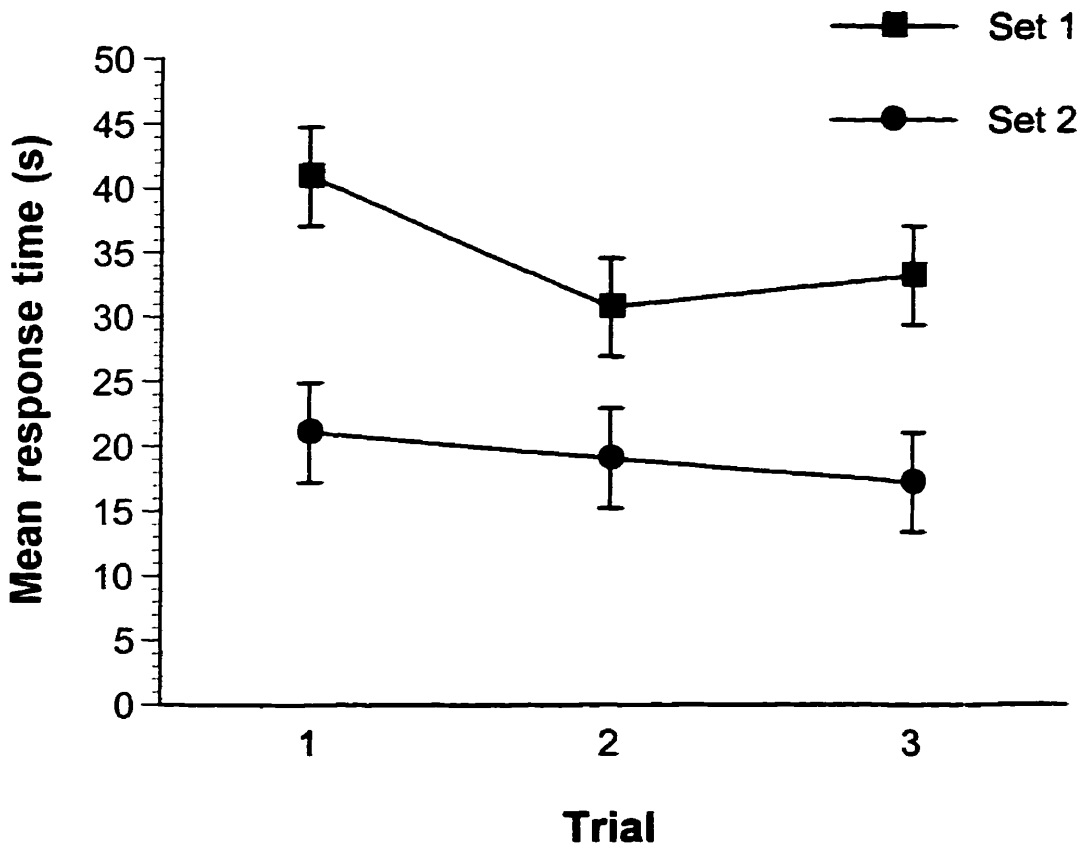
Standard RT. The transformed data were entered into a one-within/one-between subjects ANOVA with trial (three levels) as the within-subjects variable and set (two levels) as the between-subjects variable. There was a main effect for trial, $F(2,56) = 9.15$, $p < .0001$: Trial 1 took longer than Trials 2 and 3, presumably owing to the effect of practice.

There was also a main effect of set, $F(1,28) = 7.89$, $p < .05$. Participants exposed to Set 2 exemplars were faster in their exploration of the standard faces than those exposed to the Set 1 exemplars. There was no significant Trial x Set interaction, $F(2,56) = 1.01$, $p > .05$. The source table for this ANOVA is provided in Appendix G. The pattern of results for the log-transformed data are the same as those for the untransformed data; therefore, for purpose of clarity, the raw data are displayed in Figure 2.

Total RT. Again, the transformed data were entered into a one-within/one-between subjects ANOVA with trial (three levels) as the within-subjects factor and set (two levels) the between-subjects factor. As seen in Appendix H, statistical significance was reached for the main effect of trial, $F(2,54) = 11.90$, $p < .0001$, the main effect of set, $F(1,27) = 5.13$, $p < .05$, and the Trial x Set interaction, $F(2,54) = 4.89$, $p < .05$. Post-hoc analyses show that total RT for Trial 1 was longer than for Trials 2 and 3, but only in Set 1. As with the standard RT data, overall participants in Set 1 took longer than participants in Set 2. Here,

Figure 2

Experiment 1: Mean standard RT as a function of trial by set (error bars = ± 1 SEM).



again the pattern of the raw data did not differ from that of the transformed data; therefore, the raw data are displayed in Figure 3.

Comfort ratings

A mean comfort rating for each participant was calculated from the ratings given after each of the three trials. With the scale used, 1 represents "not comfortable" and 5 represents "very comfortable". The mean comfort ratings for Set 1 and 2 are 3.3 (SD = .92) and 3.9 (SD = 86), respectively.

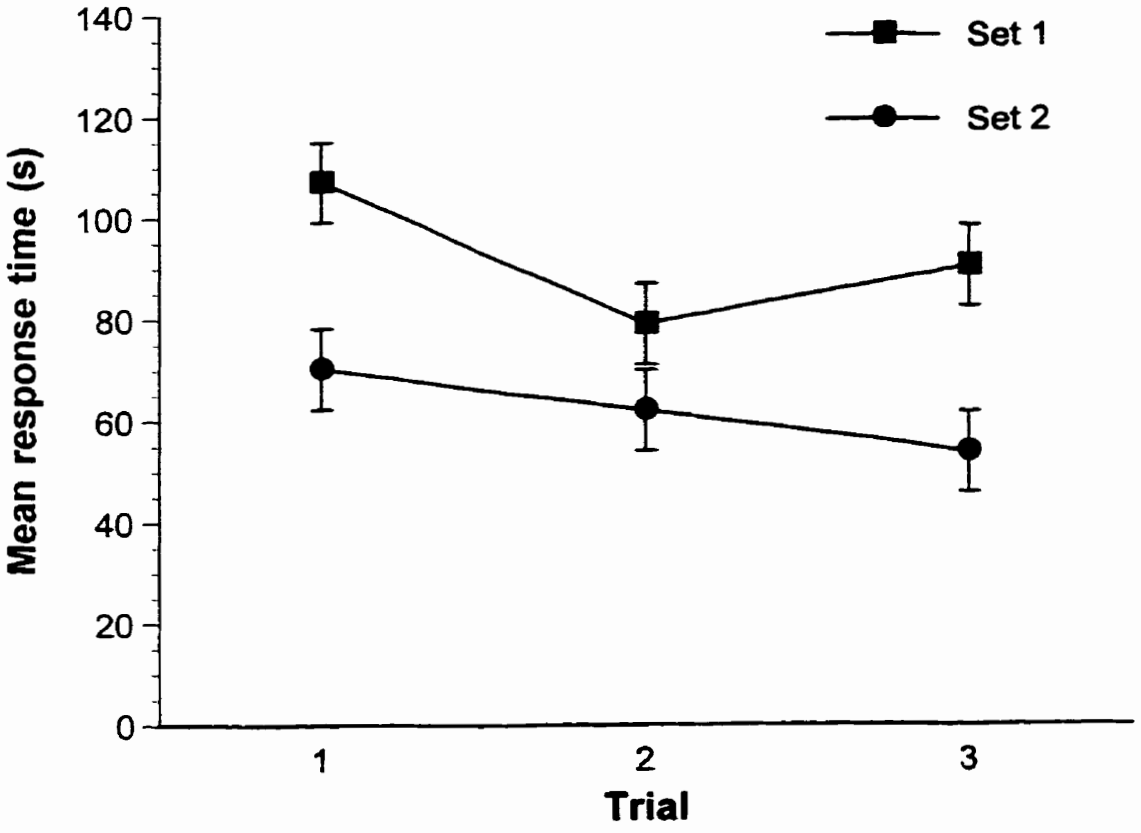
Discussion

The primary question investigated in Experiment 1 was whether the haptic system is capable of identifying an unfamiliar human face using a match-to-sample paradigm. The results of the current study show that the haptic system is quite good at processing and identifying unfamiliar human faces. Blindfolded participants were able to identify the standard face from among three comparison faces with an accuracy of up to 82.2%. This value is well above the chance level of 33%.

Klatzky et al. (1985) demonstrated that their participants were able to identify many common objects accurately and quickly. These objects were at the basic level of classification. In contrast, the match-to-sample task in the current experiment required a subordinate level of object classification, in that all the exemplars were of the same basic-level class (faces). As such, the task was somewhat more difficult than that performed by Klatzky et al. Moreover, the objects presented in the Klatzky et al. study were common objects that were frequently manipulated and thus reasonably familiar to individuals. The Kaitz et

Figure 3

Experiment 1: Mean total RT as a function of trial by set (error bars = ± 1 SEM).



al. (1992; 1993; 1994) studies also used exemplars that were familiar to participants. In contrast, the "objects" in the current study were completely unfamiliar to participants; yet, they were still able to accurately haptically identify the standard faces very well.

In their attempts to identify the standard faces, participants used both geometric and material cues, although they placed greater emphasis on the geometric cues. Nonetheless, participants did report that up to 30% of all the cues used were material in nature. It can be inferred, therefore, that haptic face encoding involves both geometric and material properties.

There was no evidence to support the image-mediation model (Lederman et al., 1990), as there was no correlation between participants' ability to use visual imagery and matching accuracy. That is, participants did not appear to include a visual-translation stage when performing the face-matching task haptically.

The results of Experiment 1 will be compared to those of Experiment 2, to clarify the properties or characteristics of faces that are important in the ability to identify a face haptically.

Experiment 2

Experiment 2 addressed the relative importance of geometric and material cues for haptic face processing more directly. Two modes of exploration were included: VH – H and H_{Mask} – H_{Mask}. The VH – H mode of exploration included both vision and haptics during exploration of the standard faces and thus, allowed for more precise geometric information during the standard phase than

possible with haptics alone. In this way, we attempted to bias participants toward using geometric properties to encode faces more than Experiment 1. At the same time, additional visual sources of information were provided about both geometric and material properties. Matching accuracy was expected to increase as compared to haptics only (cf. H – H in Experiment 1).

The second mode of exploration (H_{Mask} – H_{Mask}) also biased participants toward geometric properties, as the face exemplars used had no material variation. Therefore, the results allowed us to evaluate the relative importance of material cues. Experiment 1 demonstrated a strong reliance on geometric properties. If these properties were solely sufficient for identification, then the H_{Mask} – H_{Mask} mode of exploration should result in similar matching accuracy to that obtained with the H – H mode of exploration in Experiment 1. However, if material cues were important, then removing material variation would result in a decline in matching accuracy.

The matching accuracies obtained using VH – H and H_{Mask} – H_{Mask} modes of exploration, together with the reported cues used in matching judgements, were utilised to shed further light on the relative importance of geometric and material properties in encoding faces during haptic exploration.

Given that VH – H included vision during exploration of the standards, it seemed reasonable that participants might use a matching strategy based on a visual heuristic that included a visual-mediation stage. According to the same logic, when material cues were removed in H_{Mask} – H_{Mask}, participants would presumably focus more on geometry, again possibly increasing the use of a

visual-mediation process. To the extent that visual mediation was adopted, we should find a correlation between obtained VVIQ scores and matching accuracy.

Method

Participants

Sixty undergraduate students (16 men and 44 women, mean age 19.9 years, SD = 2.5) participated in the current study in partial fulfillment of an Introductory Psychology course credit. Testing procedures met with the standards of the Ethics Review Committee in the Department of Psychology at Queen's University.

Materials

The six groups of exemplar faces used in Experiment 1 also served as the stimuli in Experiment 2. A Quasar S-VHS video camera was used to record participant responses. The VVIQ was administered to each participant. A portable stereo system, with headphones, was used to present white noise to participants during the "mode of exploration" phase of this study.

Masks. A plaster cast of each exemplar's face was made. Each face was first coated with petroleum jelly. Gypsona, 7.5 cm x 7.5 cm plaster of paris slabs were applied and carefully molded to each face. After approximately 10 minutes of drying time, the casts were removed from the exemplars' faces.

The masks were made by molding Cone 6 – 8 stoneware clay into the interior surface of the casts. The clay was allowed to slowly air dry and was removed from the casts. Imperfections on each mask due to artificial bumps and/or crevices in the clay were sponged smooth. The masks were then placed

in a kiln and fired at 1700° F. Again, imperfections due to the clay were removed with 400-grit sandpaper.

Procedure

Visual and haptic input – haptic identification (VH – H). Thirty participants were randomly assigned to this condition: 15 to the Set 1 exemplars and 15 to the Set 2 exemplars. The procedure was identical to that of Experiment 1 with one exception. During the initial exploration phase, participants were not blindfolded; rather they were instructed to look at, as well as manually explore, the standard face. As in Experiment 1, participants were blindfolded during the matching phase. Also as before, participants completed three trials after which they completed the VVIQ.

Haptic input and identification with face masks ($H_{Mask} - H_{Mask}$). The procedure used with this mode of exploration was identical to that of Experiment 1; however, the exemplars consisted of the face masks. Fifteen participants explored the masks that corresponded to the nine exemplars of Set 1 and 15 participants explored those masks designated as Set 2.

Design

Table 1 shows the experimental design for Experiment 2. In addition to matching accuracy, each participant provided four other measures: subjective reports of diagnostic features, VVIQ score, response time, and subjective comfort rating.

Results

Accuracy data

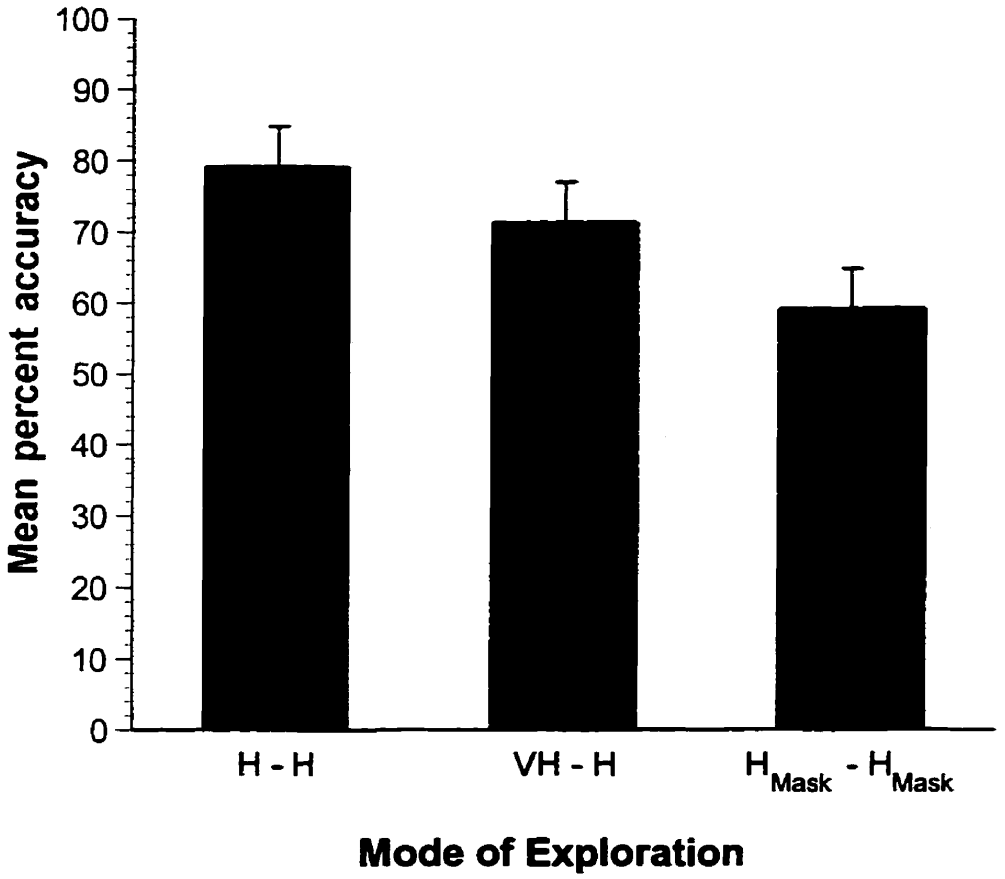
Each trial was scored as one (correct) or zero (incorrect). The three trials were combined and each participant received a score out of three. Figure 4 displays the mean percent accuracy across trials for both sets and the three modes of exploration (including H – H).

These scores were entered into a 2 x 3 (Set x Mode of Exploration) ANOVA that included the accuracy data from Experiment 1. The source table is found in Appendix I. This analysis was completed in order to evaluate the relative importance of material and geometric properties, as indicated above.

There was a main effect for mode of exploration, $F(2,84) = 3.91$, $p < .05$, but not for set, $F(1,84) = 1.10$, $p > .05$, or for the Mode of Exploration x Set interaction, $F(2,84) = .11$, $p > .05$. Using a significance level of .05, a post-hoc Tukey test revealed that H – H was significantly different from $H_{Mask} - H_{Mask}$. The VH – H mode of exploration was included in subsets with both H – H and $H_{Mask} - H_{Mask}$, indicating that while this mode of exploration was not statistically different from either H – H or $H_{Mask} - H_{Mask}$, it tended to lie somewhere between the two. Collapsed across set, the mean percent accuracy for H – H, VH – H, and $H_{Mask} - H_{Mask}$ was 78.9%, 71.1%, and 58.9%, respectively.

Figure 4

Experiments 1 and 2: Mean accuracy (%) as a function of mode of exploration (error bars = ± 1 SEM).



Diagnostic facial-characteristics data

Although both modes of exploration relied heavily on geometric cues, there was a difference between the modes of exploration in terms of the percent of material cues available and utilized. The percent of material cues reportedly extracted to identify the standard face in the VH – H mode of exploration (24%) was found to be greater than that in H_{Mask} – H_{Mask} (4%) using a Goodness of Fit test, $\chi^2_{(1, N = 51)} = 12.01$, $p < .001$. Conversely, more geometric cues were used during the H_{Mask} – H_{Mask} mode of exploration than during VH – H. Similarly, the percentage of material cues reportedly used in H – H (Experiment 1; 28.3%) was greater than in H_{Mask} – H_{Mask}, $\chi^2_{(1, N = 51)} = 32.26$, $p < .001$. However, there was no difference between the percentage of material cues used in H – H and VH – H, $\chi^2_{(1, N = 51)} = .85$, $p > .05$.

VVIQ data

Table 4 displays both the mean VVIQ scores and their correlations with accuracy, for each mode of exploration. None of the correlation coefficients was significant. In fact, most values were opposite to the expected direction.

Response-time data

Similar to Experiment 1, the RT data of Experiment 2 violated both the assumptions of normality and homogeneity of variance for ANOVA in that the data were positively skewed. After a logarithmic transformation the data met the assumptions for ANOVA.

Standard RT. The transformed data were entered into a 3 x 2 x 2 ANOVA (Trial x Set x Mode of Exploration). The source table for this ANOVA is found in

Table 4

VVIQ scores and correlation between VVIQ and accuracy for VH – H and H_{Mask} – H_{Mask}.

Mode of Exploration	Set	Mean VVIQ Score (SD)	Correlation with Accuracy (r)*
VH – H	1	32.8 (9.5)	.27
	2	35.5 (5.9)	.16
	Mean	34.2 (7.9)	.19
H_{Mask} – H_{Mask}	1	33.8 (7.4)	.24
	2	39.9 (9.6)	-.45
	Mean	36.83 (8.9)	-.17

* no p-value < .05

Appendix J. As with Experiment 1, the raw data show the same pattern of results as do the log-transformed data; therefore, the raw data are displayed in Figure 5. There was a main effect for trial, $F(2,112) = 18.41$, $p < .0001$: Trial 1 ($\bar{x} = 23.2$ s, $SD = 15.2$) took longer than Trial 3 ($\bar{x} = 19.9$ s, $SD = 13.9$), which took longer than Trial 2 ($\bar{x} = 17.5$ s, $SD = 11.6$). There was no Trial x Set interaction, $F(2,112) = 2.82$, $p > .05$, Trial x Mode of Exploration interaction, $F(2,112) = 1.19$, $p > .05$, or 3-way interaction, $F(2,112) = 2.52$, $p > .05$.

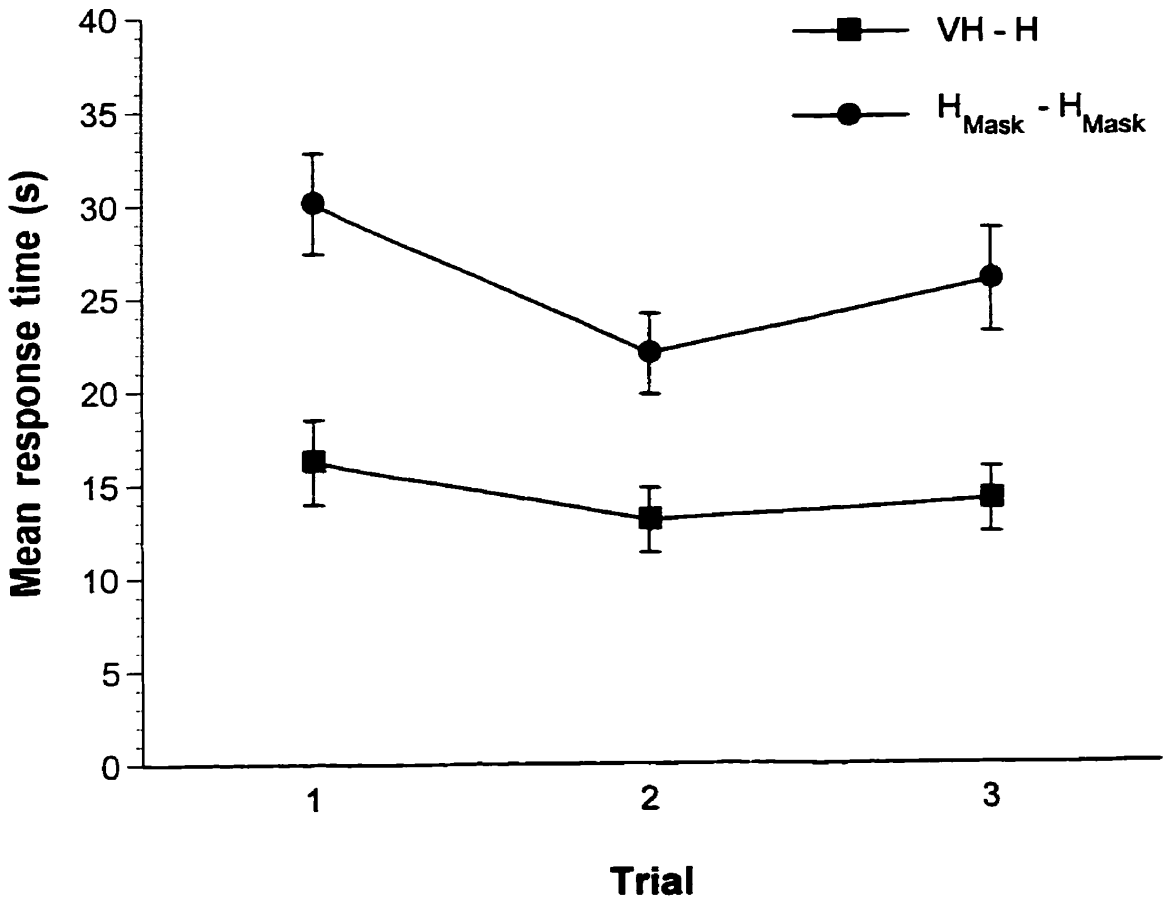
With respect to the between-subjects factors, there was no main effect of set, $F(1,56) = .11$, $p > .05$, but there was a main effect of mode of exploration, $F(1,56) = 20.51$, $p < .0001$. As expected, the standard RT for VH – H was significantly faster than that for H_{Mask} – H_{Mask}.

Total response time. The transformed data were entered into a 3 x 2 x 2 ANOVA (Trial x Set x Mode of Exploration; see Appendix K) together with the Experiment 1 data. Statistically significant main effects were found for trial, $F(2,168) = 78.82$, $p < .0001$, and for mode of exploration, $F(2,84) = 3.81$, $p < .05$. Trial 2 was faster than either Trials 1 and 3 which did not differ from one another. Participants taking part in VH – H were faster overall than those in H – H or H_{Mask} – H_{Mask}.

Additionally, there were several significant interactions: (a) Trial x Set, $F(2,168) = 70.61$, $p < .0001$; (b) Trial x Mode of Exploration, $F(4,168) = 52.63$, $p < .0001$; (c) Trial x Set x Mode of Exploration, $F(4,168) = 42.05$, $p < .0001$; and (d) Set x Mode of Exploration, $F(2,84) = 8.51$, $p < .0001$. Briefly

Figure 5

Experiment 2: Mean standard RT as a function of trial by mode of exploration (error bars = ± 1 SEM).



summarizing these interactions, the participants in Set 1 performed the task faster on Trial 2 but only in the $H_{Mask} - H_{Mask}$ mode of exploration.

The speed of Trials 1, 2, and 3 during Set 2 was equal to one another for all three modes of exploration, as were all trials during Set 1 in the VH – H mode of exploration.

Comfort ratings

A mean comfort rating for each participant was calculated from the ratings given after each of the three trials. The mean comfort ratings for VH – H and $H_{Mask} - H_{Mask}$ in each set are listed in Table 5.

Together with the H – H comfort rating means, these means were compared using a 2 x 3 ANOVA (Set x Mode of Exploration). The source table for this ANOVA is found in Appendix L. Neither the main effect for set, $F(1,84) = .19$, $p > .05$, nor the main effect for mode of exploration, $F(2,84) = 2.05$, $p > .05$, was statistically significant. However, the Set x Mode of Exploration interaction was significant, $F(2,84) = 3.22$, $p < .05$: although there were no differences in comfort ratings between the two sets for VH – H and $H_{Mask} - H_{Mask}$, in the H – H mode from Experiment 1, participants in Set 1 scored significantly lower. These findings indicate that participants' discomfort with the task did not affect their performance detrimentally as the participants in Set 1, Experiment 1 achieved 82.2% matching accuracy.

Furthermore, comfort ratings were not correlated with the amount of time spent exploring the standard faces, $r = .068$, $p = .53$. Thus, discomfort with the task did not seem to effect premature disengagement with the standard faces.

Table 5

Mean comfort ratings for VH – H and H_{Mask} – H_{Mask}.

Mode of Exploration	Set	Mean comfort rating (SD)
VH – H	1	4.2 (.59)
	2	3.8 (.83)
H_{Mask} – H_{Mask}	1	4.1 (.84)
	2	3.9 (.77)

Discussion

Experiment 2 assessed how matching performance was affected when participants were biased more toward processing geometric information. We predicted that accuracy would be higher in the VH – H mode of exploration than in H – H, as both visual input and haptic input were allowed during the exploration phase. Vision is both practiced and highly accomplished in face-processing tasks. Furthermore, this combination of input modalities is highly complementary in that it makes use of the superior processing skills of vision with respect to geometric properties and the superior haptic processing of material information. Newman et al. (1990) previously found that during a haptic-matching task involving braille characters, vision and haptic exploration resulted in more accurate haptic matching than did haptic-only exploration (cf. Experiment 1). However, contrary to prediction, there was no difference in accuracy between the two modes of exploration: H – H and VH – H. If anything, performance tended in the opposite direction. Although there was no significant difference between the two modes, the VH – H mode of exploration tended (71.1% accuracy) to be poorer than the H – H mode of exploration (78.8% accuracy).

In the H_{Mask} – H_{Mask} mode of exploration there was no variation in material properties. Accordingly, we predicted that matching accuracy would decline relative to H – H and this was indeed the case.

The results of the current experiment clearly highlight the importance of material cues in haptic face identification. Without question, geometric or structural cues are important in any identification/recognition task. However,

when all the geometric cues were available and the material cues were removed, the accuracy of participants in identifying the standard face dropped by 20% in comparison to Experiment 1 when all material cues were available. Nevertheless, the 58.8% accuracy performance in the $H_{Mask} - H_{Mask}$ mode of exploration remains above the chance-level.

As in Experiment 1, there was no evidence to support the use of a visual-mediation stage during processing. Nor does this appear to be due to a lack of power: although Lederman et al. (1990) found evidence for visual mediation with 20 participants, the current study used 30 participants.

Experiment 3

Experiment 3 examined whether intersensory transfer would occur, and if so, whether it would be constrained by the input modality. Two modes of exploration were included: vision as the input modality with haptic matching (V – H) and haptic input with visual matching (H – V). Given that infants can successfully perform intermodal matching (Meltzoff & Borton, 1979), the prediction for the current experiment was that participants would be able to accurately identify the standard faces at above-chance levels. However, based on Jones (1981) findings, we expected that the H – V mode of exploration would result in poorer matching accuracy than the V – H mode of exploration.

All participants were again asked to report the cues they used in identifying the standard faces. Through examination of these reported cues, we could speculate on how faces were encoded during the intermodal-matching task.

Given that vision was involved in both modes of exploration, it was not unreasonable to expect that participants might adopt a visual-mediation strategy in identifying the standard faces. To explore this possibility, participants were administered the VVIQ and correlations with accuracy were examined.

Method

Participants

Sixty undergraduate students (14 men and 46 women, mean age 20.4 years, SD = 3.2) participated in this study in partial fulfillment of an Introductory Psychology course credit. Testing procedures met with the standards of the Ethics Review Committee in the Department of Psychology at Queen's University.

Materials

The six groups of exemplar faces used in Experiments 1 and 2 also served as the face exemplars in Experiment 3. A Quasar S-VHS video camera was used to record participant responses. The VVIQ (Marks, 1973) was administered to each participant. A portable stereo system was used to present white noise to participants through headphones.

Procedure

Visual input – haptic identification (V – H). Thirty participants were randomly assigned to this condition; 15 were exposed to the exemplars designated as Set 1 and 15 explored the exemplars specified as Set 2. The procedure was identical to that of Experiment 1 with one exception. During the initial exploration phase, participants were not blindfolded; rather, they were

instructed to look at the standard face. Haptic exploration was not permitted. As in Experiment 1, the matching phase proceeded with participants being blindfolded and again, they completed three trials after each of which they gave a comfort rating and reported the cues used to identify the standard. Only after all three trials, did participants complete the VVIQ.

Haptic input – visual matching (H – V). Thirty participants were randomly assigned to this condition; 15 were exposed to the exemplars designated as Set 1 and 15 explored the exemplars specified as Set 2. The procedure was identical to that of V – H, but in reverse. During the initial exploration phase, participants were required to explore the standard face using touch alone. Matching was executed visually, after which each participant completed the VVIQ.

Design

Table 1 shows the experimental design for Experiment 3. Each participant provided five measures: accuracy of matching, subjective reports of diagnostic features, VVIQ score, response time, and subjective comfort ratings.

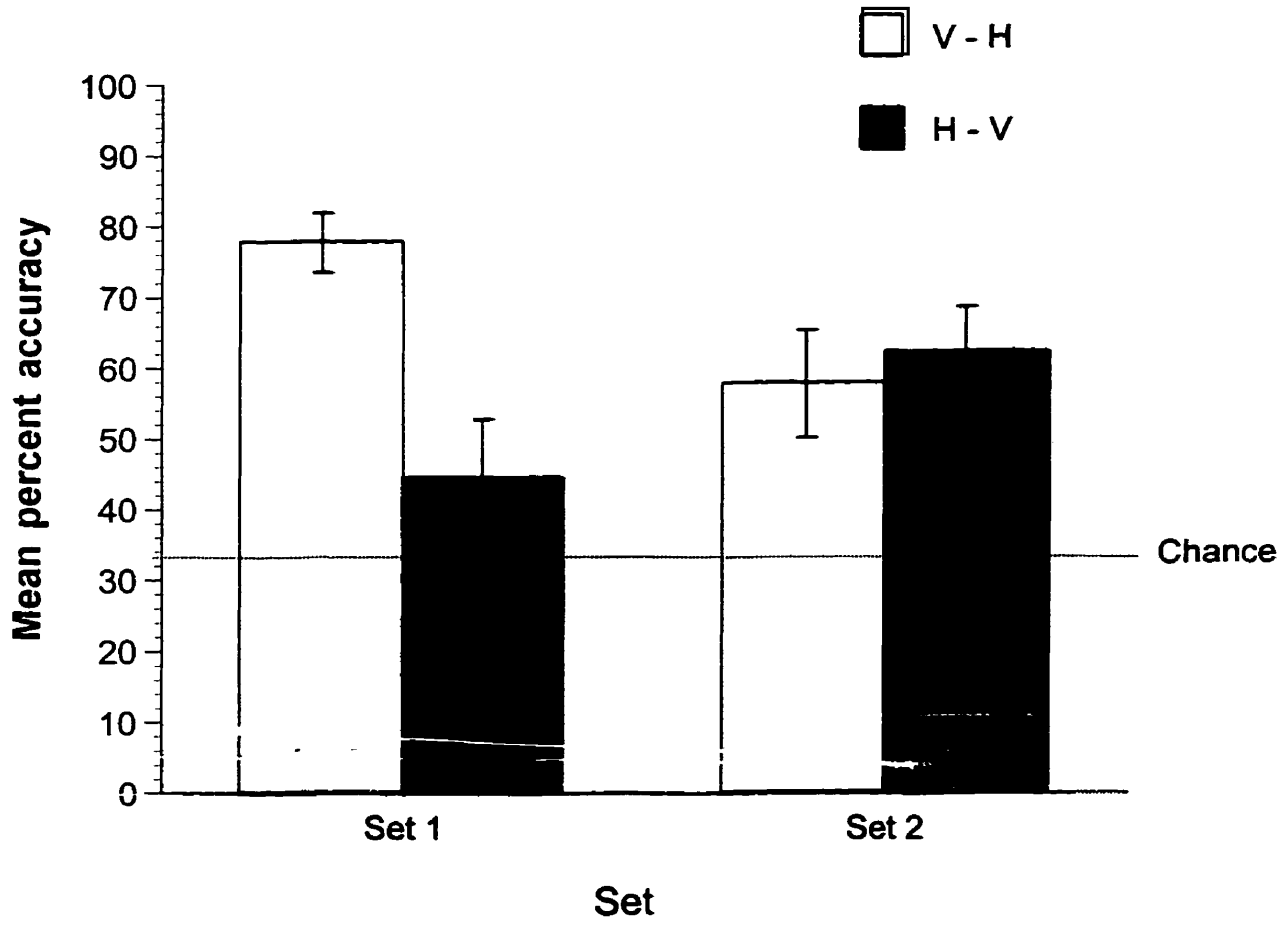
Results

Accuracy data

Accuracy scores were combined to produce a maximum score of 3 for each participant. Figure 6 presents mean identification accuracy for the two intermodal modes of exploration. A 2 x 2 (Set x Mode of Exploration) ANOVA (see source table in Appendix M) revealed that there was no main effect of set, $F(1,56) = .03$, $p > .05$, but that there was a main effect of mode of

Figure 6

Experiment 3: Mean accuracy (%) as a function of set by mode of exploration (error bars = ± 1 SEM).



exploration, $F(1,56) = 4.46$, $p < .05$. The Set x Mode of Exploration interaction was also significant, $F(1,56) = 7.63$, $p < .01$. As Figure 6 depicts, participants in Set 2 did not differ in their performance between the two modes of exploration; whereas, participants in Set 1 performed significantly better in the V – H mode of exploration than in the H – V mode. In fact, for Set 1, mean percent accuracy obtained by H – V participants (44.4%) was not statistically above chance, $t(28) = 1.32$, $p = .21$. The percent accuracy obtained by V – H participants in both sets and by H – V participants in Set 2 were all well above chance, $t(28) = 10.58$, $p < .0001$, $t(28) = 3.21$, $p = .006$, and $t(28) = 4.52$, $p < .0001$, respectively.

Diagnostic facial characteristics data

Table 6 exhibits the percentage of geometric and material cues reportedly used in the identification of the standard faces. Although both modes of exploration relied heavily on geometric cues, the modes of exploration differed in terms of percent geometric and material cues used. Using a Goodness of Fit test, the number of material cues reportedly used to identify the standard face in the V – H mode of exploration was found to be less than that in the H – V mode, $\chi^2_{(1)} = 9.6$, $p < .01$. Conversely, geometric cues were used more in the V – H mode than in H – V. These two patterns held across sets.

VVIQ data

Table 7 displays the mean VVIQ scores, as well as correlations between VVIQ and accuracy scores for both modes of exploration. None of the

Table 6

Summary of cues used to identify the standard faces in V – H and H – V.

Mode of Exploration	Set	Geometric Percent of Total (%)	Material Percent of Total (%)	Percent Total
V – H	1	95.3	4.7	100
	2	84.9	15.1	100
	Mean	90.1	9.9	100
H – V	1	80.0	20.0	100
	2	79.5	20.5	100
	Mean	79.8	20.2	100

Table 7

VVIQ scores and correlation between VVIQ and accuracy for V – H and H - V.

Mode of Exploration	Set	Mean VVIQ score (SD)	Correlation with Accuracy (r)*
V – H	1	34.5 (6.2)	-.44
	2	36.7 (6.8)	-.04
	Mean	35.6 (6.5)	-.22
H – V	1	36.3 (7.4)	-.33
	2	34.0 (7.2)	.03
	Mean	35.2 (7.2)	-.21

* no p-value < .05

correlations was significant although all but one value were in the expected direction. Like the results of Experiments 1 and 2, participants did not employ a visual-imagery strategy in order to identify the standard face.

Response-time data

As in Experiments 1 and 2, the standard RT was measured, in seconds, from initial contact with the standard face to disengagement from the face during input. The H – V mode of exploration consisted of the visual exploration of all three comparisons. However, as the timing of this exploration could not be precisely measured, the total RT was not assessed.

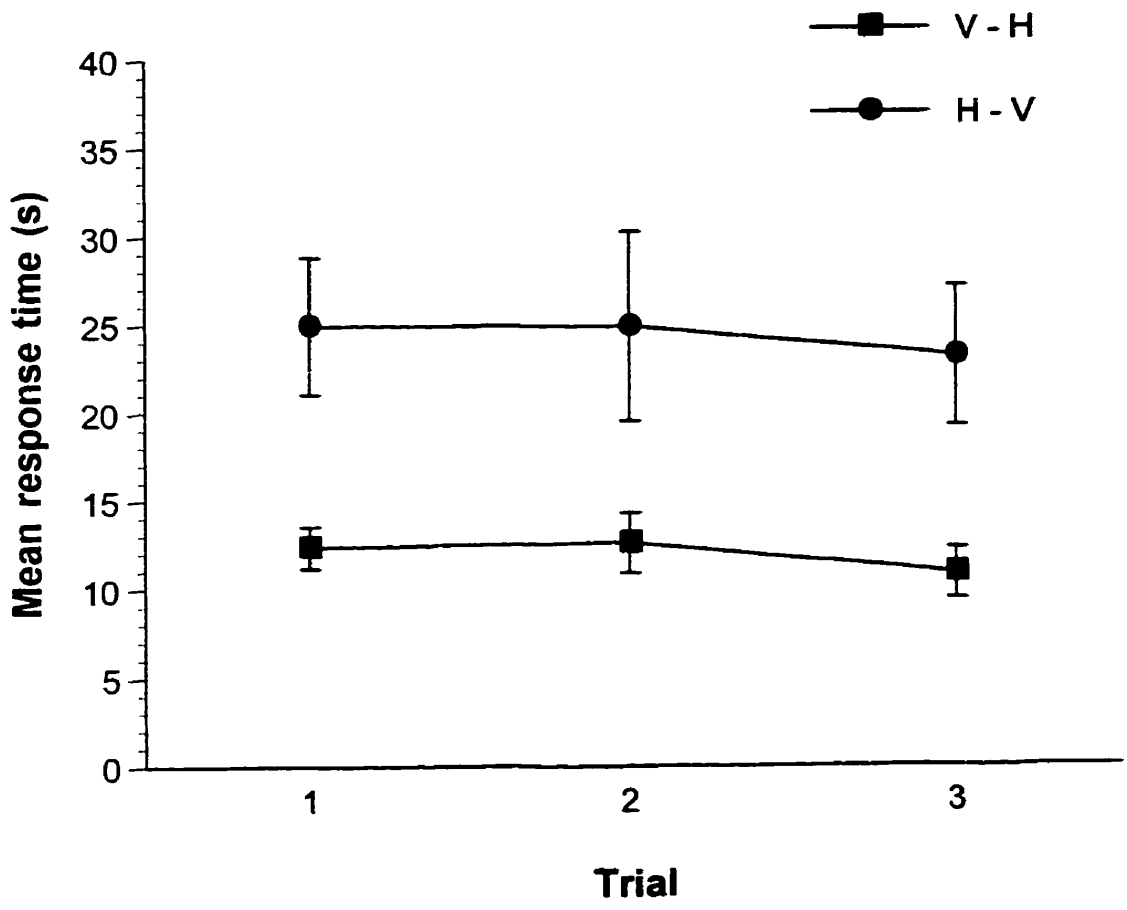
Being positively skewed, these data violated both the assumptions of normality and homogeneity of variance for ANOVA; therefore, the data were subjected to a logarithmic transformation.

Standard RT. The transformed data were entered into a 3 x 2 x 2 ANOVA (Trial x Set x Mode of Exploration). Mean response times of the untransformed data are shown in Figure 7. There was a main effect for trial, $F(2,112) = 3.44$, $p < .05$, such that Trials 1 ($\bar{x}$ = 18.6 s, SD = 16.9) and 2 ($\bar{x}$ = 18.7 s, SD = 22.5) took longer than Trial 3 ($\bar{x}$ = 16.9 s, SD = 17.2).

With respect to the between-subjects factors, there was a main effect of mode of exploration, $F(1,56) = 18.68$, $p < .0001$, but there was no main effect of set, $F(1,56) = .14$, $p > .05$. As expected, time spent exploring the standard face in the V – H mode of exploration was not as long as in the H – V mode of exploration. None of the interactions with trial was significant. The source table for this analysis is found in Appendix N.

Figure 7

Experiment 3: Mean standard RT as a function of trial by mode of exploration (error bars = ± 1 SEM).



Comfort ratings

The overall mean comfort rating for the V –H mode of exploration was 3.4 (*SD* = .93) and 3.7 (*SD* = .97) for the H – V mode of exploration. The scores were out of a possible 5 points, with 5 representing no discomfort with the task. Comfort-rating means were compared with a 2 x 2 ANOVA (Set x Mode of Exploration). Neither the main effect for set, $F(1,56) = 1.64$, $p > .05$, nor the main effect for mode of exploration, $F(1,56) = 2.42$, $p > .05$, was statistically significant. Likewise, the interaction term was not significant, $F(1,56) = .76$, $p > .05$, (see Appendix O for the source table).

Subjective ratings of comfort with the task did not correlate with accuracy in identifying the standard faces, $r = -.13$, $p = .32$. Nor was there a significant correlation between comfort ratings and standard RT, $r = .19$, $p = .14$. These findings indicate that participants' discomfort with the task did not detrimentally affect accuracy of performance.

Discussion

The modes of exploration in this experiment addressed the issue of intersensory transfer. In three of the four cases there was evidence for intersensory transfer: both sets of the V – H mode of exploration and Set 2 of the H – V mode of exploration demonstrated intersensory transfer. Based on previous research (e.g., Jones, 1981; Newman et al., 1990), we predicted that the V – H mode of exploration would produce higher performance than the H – V mode of exploration. This prediction was not fully supported as there was a Set x Mode of Exploration interaction. The results of Set 1 followed the predicted

pattern: identification of the standard face was better in V – H than in H – V. It cannot be said, however, that the H – V mode of exploration was poorer than V – H due to insufficient haptic processing of the standard (Jones, 1981) for two reasons. First, Set 2 did not follow the expected pattern as there was no significant difference between the accuracy scores for the V – H and H – V modes of exploration. Second, the high accuracy obtained in Experiment 1 clearly demonstrated that the haptic system alone is sufficient for processing faces.

On the whole, the three groups of exemplar faces used in Set 2 were rated as more similar to one another than the three groups used in Set 1 (see Appendix B), suggesting that the task in Set 2 was more difficult than that in Set 1. The difficulty in identifying the standard face was shown in the V – H mode of exploration. Where the participants involved in Set 1 were able to identify the standard with 77.8% accuracy, those in Set 2 only achieved 57.8% accuracy. However, this explanation does not hold for the H – V mode of exploration, where accuracy increased by 18% from Set 1 to Set 2. The H – V mode of exploration resulted in 44.4% accuracy in Set 1 (which is not above chance), whereas performance in the same mode of exploration was 62.2% accurate in Set 2. Performance within Set 2 did not differ in accuracy between the two modes of exploration. These findings are difficult to explain. However, an inconsistency in the exemplar selection procedure is possible in research that involves choosing exemplars based on similarity when similarity is difficult to operationalize.

GENERAL DISCUSSION

Until now, research on face processing has focused solely on the visual system. The literature has addressed several critical issues, as briefly described here. One of the issues most frequently considered in the literature is whether faces are processed "featurally" or "holistically", that is, as entire gestalts (e.g., Bartlett & Searcy, 1993; Bruce et al., 1991; Sergent, 1984; Tanaka & Farah, 1993). To address this issue, several operational definitions of "featural" and "configural" have been proposed (e.g., Diamond & Carey, 1986; Rhodes, 1988). Although these definitions differ from one another, the common theme is that faces include two types of information: specific appearance and location of discrete facial features (i.e., nose and eyes) and spatial relations among discrete features.

A second important topic in visual face processing is the neuroanatomical location subsuming visual face processing. Much of the research (e.g., Clark et al., 1997; McCarthy et al., 1997) points to the fusiform gyri (particularly in the right hemisphere) as the significant neural substrate. Based on the current thesis, we will suggest a new direction for further research on the modality specificity of the underlying neural substrate for face processing.

A third critical issues in visual face processing concerns whether face processing is an innate or learned task. Cohen-Levine et al. (1988) argued that, relative to other visuospatial stimuli, humans have developed an expertise through constant exposure to faces and practice in recognizing and differentiating them. Other researchers (e.g., Farah et al., 1998; Johnson et al.,

1991) maintain that visual face recognition is a special, innate ability that is separate from visual processing of other non-face objects.

The relevance of the current study on haptic face processing to all three issues above will be discussed throughout the section on "Future Directions", as appropriate.

The current study has addressed issues that specifically pertain to haptic face processing and to intersensory transfer between vision and haptics. The work therefore extends the study of face processing beyond the visual domain, and examines face processing from several new perspectives.

Accuracy of haptic face processing

The current investigation served as an initial exploratory study of haptic face processing. Live faces could be identified with reasonably high accuracy (78.9%) solely through haptic exploration (H – H, Experiment 1). When rigid masks of the same faces were presented as the exemplars, matching accuracy remained above chance but proved considerably poorer (58.9%) than that obtained with the live-face exemplars (H_{Mask} – H_{Mask}, Experiment 2). Somewhat more surprisingly, when participants were permitted vision during exploration, matching accuracy did not improve (71.1%) relative to Experiment 1, indicating that additional redundant visual inputs were not useful when haptics was used in the comparison phase (VH – H, Experiment 2). Is it possible that participants largely disregarded the visual geometric information because they knew that they would be required to match haptically? Such an interpretation is not supported by the data. The response times for the VH – H mode of exploration dropped to half

those of the haptics-only modes of exploration (H – H and H_{Mask} – H_{Mask}). This decline indicates that participants did not disregard visual input. Furthermore, VH – H participants reported using a higher percentage of geometric cues than did H – H participants, particularly in Set 1.

Previous research has demonstrated that infants are capable of intermodal transfer between the visual and haptic modalities (Meltzoff & Borton, 1979) and therefore, it was reasonable to presume that adults could perform the intermodal face-identification task in Experiment 3. For the most part, intermodal transfer did occur. Overall, the V – H participants were able to match the standard and comparison faces with 67.7% accuracy and participants in both sets were above chance (77.8% and 57.7%, respectively). On average, H – V participants also performed matching above chance levels (53.3%). However, when broken down by set, the Set 1 participants did not match the standard faces above chance (44.4%), whereas the Set 2 participants were above chance (62.2%).

The poor matching performance of the H – V participants in Set 1 cannot be attributed to the haptic input being inadequately processed, as Jones (1981) would have argued. The results of Experiment 1, where participants' matching accuracy was as high as 82.2%, clearly demonstrate that haptic input is more than sufficient for face identification. It is also not the case that intermodal transfer is impossible as the H – V participants in Set 2 performed well above chance.

In fact, the matching performance of V – H and H – V participants in Set 2 did not differ from one another. The expected directional difference, with visual input resulting in better matching accuracy than haptic input, emerged only with Set 1 participants.

Two sets were carried out in each experiment to show that the results obtained were not due to anomalies among the chosen exemplars. This proved true, with the one puzzling exception in Experiment 3.

Haptic face identification was a rather unusual task for participants and required them to intrude on others' personal space. As participants' comfort, or rather discomfort, with the task may have detrimentally influenced matching accuracy, we also assessed their degree of comfort. We were concerned that strong discomfort with the task might decrease identification accuracy. Should this have occurred, participants might then have minimized the extent of haptic exploration and consequently, their level of accuracy. However, such a possibility did not occur. Indeed even when participants did express discomfort with the task, their accuracy remained high. The H – H participants (Experiment 1) achieved an overall accuracy level of 78.9%, which was the highest accuracy documented in the current research. Yet, these same participants also tended to report that they were more uncomfortable with the task. Furthermore, there was no correlation between comfort and response time. Thus, even if participants were uncomfortable with the task, they did not prematurely disengage from exploration.

The nature of face representation: Material/geometric distinction

In general, the vision literature has focused on perceptual face representation in terms of geometric properties only. The issue of featural versus configural processing further highlights this emphasis. The current study extends the examination of face representation by introducing a geometric/material distinction, one that has proved particularly relevant to the nature of haptic processing.

Despite the absence of a visual-translation stage, geometric properties formed an important component of participants' representations of faces, regardless of the mode of exploration. Participants in Experiment 1 reported having used approximately 70% geometric properties and 30% material properties. These percentages indicate that material properties were also very important. When participants were further biased toward encoding faces based on geometric properties -- by reducing (VH – H) and eliminating ($H_{Mask} - H_{Mask}$) material properties -- matching accuracy declined, sometimes dramatically. Experiment 3 showed that again geometric properties were strongly represented, particularly when initial standard exploration was carried out visually. In all cases, the experimental manipulations produced the expected patterns in the data, even if the results were not always significant.

Collectively, the results therefore suggest that although geometric properties are clearly important in encoding faces haptically, material properties play a critical subsidiary role. The current findings are also therefore concordant with those in the literature emphasizing the importance of material properties to

representations of non-face objects from haptically derived inputs (e.g., Klatzky et al., 1987; Lederman et al., 1996).

Processing Issues

Is visual translation present? An important issue investigated in the current research was whether participants with lower VVIQ scores, (i.e., higher ability for visual imagery) would demonstrate higher identification accuracy, therefore providing support for use of a visual-mediation strategy. These results would have been consistent with past research, which demonstrated that participants adopted an image-mediation model when recognizing raised two-dimensional pictures of common objects (Lederman et al., 1990). Lederman et al. (1990) found that participants who have high visual-imagery capability initially translated haptic input into a visual image and used visual processing mechanisms to identify haptically explored raised-line pictures. Like identification of two-dimensional line drawings, the match-to-sample task in the current investigation was difficult for participants. Therefore, participants might have drawn upon any available strategy to successfully complete the task. If this were the case, then VVIQ and matching accuracy scores should have been correlated.

However, the current data did not support the use of an image-mediation model of haptic face processing. This null finding does not appear to be due simply to a lack of power, inasmuch as the Lederman et al. (1990) study included only 20 participants, whereas 30 participants were used in each correlational calculation in the current research.

Speed of processing. The response-time data confirmed the expected differences in RT between visual and haptic search. Generally, when the exploration phase was solely haptic, the time spent on the standard face was twice as long as when the exploration phase included vision. The mean time spent exploring the standard faces was approximately 30 s and 15 s, respectively. This difference in RT provides evidence that the visual, geometric information provided during the VH – H mode of exploration was not disregarded.

Given the relatively homogeneous class of "objects" (faces) under exploration and the complexity of information provided, the current participants did not take an extraordinarily long time when haptic exploration alone was used. Recall that the response times to haptically identify two-dimensional raised-line drawings were on the order of 90 s (participants were permitted a maximum of 120 s), and still matching accuracy was poor (Lederman et al., 1990).

Limitations

The current research was necessarily constrained in two ways. First, the exemplar-selection procedure required operationalization of "similarity." Exemplars were chosen based on their facial similarity to one another. The present study utilized a qualitative rating scale in order to group potential exemplars. This procedure was chosen after initial pilot work revealed that a more quantitatively based scale was too difficult for the raters to use. However, the qualitative scale resulted in a less precise estimate of similarity, and possibly, therefore, the puzzling results of the H – V mode of exploration (Set 2) in Experiment 3.

Second, the experimental design was somewhat constrained by using live peoples' faces as the exemplars. Ideally, each participant would have completed six trials, one with each of the six different exemplar groups. Furthermore, the observed power of the mode of exploration factor in Experiment 2 was only .69, indicating that more than 15 participants in each mode of exploration would be required in order to determine if the other differences were significant. Unfortunately, due to the logistical constraints of using 18 live people as the exemplars, it was not possible to include more participants or to have each participant complete six rather than three trials. Further research focusing on only one mode of exploration at a given time may overcome the power limitation.

Future Directions

The current study has addressed issues regarding haptic face processing as well as intersensory transfer between vision and haptics and thus extends the literature that to date has addressed issues of face processing in the visual domain.

The current exploratory research raises many interesting questions for future research concerning face processing. Experiment 1 confirmed that the haptic system could identify a human face with reasonable accuracy. One fascinating study might involve investigating whether the neuroanatomical substrate underlying face processing is specific to the visual modality. The research might be accomplished by having patients with prosopagnosia (face-processing deficits), who are incapable of match-to-sample tasks, perform the task used in the present research. If such participants are capable of haptically

identifying a standard face from comparisons, it may be concluded that haptic face processing is not carried out in the same manner as visual face processing, neuroanatomically speaking. However, if the performance of patients with prosopagnosia were in line with their visual face-processing abilities, it would suggest that the neural substrate of face processing is responsive to haptic, as well as to visual, input.

It may also be useful to conduct fMRI or PET studies while participants perform a haptic face-identification task. Again, one might expect the neuroanatomical structures responsible for visual face processing to be involved or conversely, involvement may be limited to the neural structures that typically mediate haptic object processing.

As stated earlier, previous research has addressed whether face processing is a learned or innate task. Some researchers (e.g., Cohen-Levine et al., 1988) have argued that humans have developed an expertise in recognizing and differentiating faces. Thus, our ability to recognize faces is not innate, but rather this ability is learned. Other researchers (e.g., Farah et al., 1998; Johnson et al., 1991) maintain that visual face recognition is an innate ability. If haptic face-processing were mediated by the same neural substrate as visual face processing, then this would constitute further evidence that faces are somehow "special".

Unlike the Hollywood depiction of blind individuals who feel strangers' faces in order to "see" them, individuals who are blind from birth are not likely to go about feeling faces, as this represents quite an intimate act. An extensive

scientific survey would be required in order to confirm that blind individuals do not, in fact, feel faces regularly. Nevertheless, blind individuals definitely do not have visual expertise with faces, nor are they as likely to have created as spatially detailed a "face schema" as sighted individuals. To test whether face processing is innate or learned, a cohort of blind individuals could be investigated with respect to their ability to haptically identify unfamiliar faces. These data would be compared to those obtained in the present study. One might argue that if blind individuals demonstrate above-chance accuracy of face identification, similar to that of blindfolded, sighted individuals, face processing is an innate ability independent of learning and expertise.

A different line of research is planned to examine the hand movements (EPs) that participants used to haptically explore faces during the current investigation. We predict that participants would have executed more material-related EPs (i.e., Lateral Motion, Pressure, and Static Contact) during those modes of exploration that provided more material information. We further predict that more "contour following" and "enclosure" EPs would have been used when geometric properties were more accessible. Confirmation of our predictions would serve to support the idea that manual exploration during face exploration is similar to that during common object exploration. An examination of EPs during haptic face exploration may provide converging evidence about how haptically explored faces are represented. As compared to subjective reports of the cues used for face processing, the EPs actually performed during face exploration also serve to reveal the focus of a participant's attention. As such, they would provide

additional strong evidence for the properties that participants treated as most salient in their representations (Klatzky et al., 1987; Lederman et al., 1996).

Examining the EPs may also help to reveal whether faces are haptically processed more "featurally" or "configurally". To date, several different paradigms have been used extensively to study the featural versus configural representation of faces based on visual inputs (e.g., Bradshaw & Wallace, 1971; Bruce et al., 1991; Farah et al., 1998; Tanaka & Farah, 1993). For example, Bradshaw and Wallace (1971) examined participants' reactions times to make a "same" or "different" judgment of sequentially presented pairs of faces. Participants proved to be slower as the number of different features was increased. The researchers concluded that faces were not processed holistically as features were not processed in parallel.

More recent research (e.g., Bartlett & Searcy, 1993; Tanaka & Farah, 1991) has employed inversion paradigms, which use inverted faces as stimuli. These researchers have shown that inverted faces are more difficult to judge (i.e., identification and similarity ratings), and therefore argue that faces are processed more holistically than other visual stimuli, such as houses.

In the current study, if faces were haptically processed more holistically, then we would expect the EPs to reflect more holistic exploration than exploration concentrated on individual features. That is, we would expect more "contour following" and "enclosure" EPs to encompass the entire face as opposed to smaller, individual features.

Summary

The current investigation has extended the face-processing literature, which previously focused solely on vision. We have demonstrated that the haptic system is indeed surprisingly capable, on its own, of processing the complexities of an unfamiliar human face for purposes of identification (Experiment 1). Two modes of exploration were included in Experiment 2 that deliberately biased participants toward processing geometric information. One of these manipulations ($H_{Mask} - H_{Mask}$) was more successful in producing a geometric bias than the other (VH – H) and participants' matching accuracy, relative to H – H, declined in both modes of exploration. However, only the $H_{Mask} - H_{Mask}$ mode of exploration was statistically different from H – H. Both geometric and material information proved important to haptic face processing as indicated by the $H_{Mask} - H_{Mask}$ mode of exploration. However, counterintuitively, redundant visual information (VH – H) did not improve matching accuracy.

Experiment 3 confirmed that bidirectional cross-modal matching performance was indeed possible, although the evidence for greater transfer from vision to haptics (as compared to haptics to vision) was not consistent across both sets. Contrary to prediction, the H – V mode of exploration did not uniformly result in poorer matching performance, although in one set, performance was at chance.

The results of all three experiments provided no support for an image-mediation model of haptic face processing. However, despite the lack of a visual-translation stage, the geometric properties of faces were strongly represented.

Additionally, during haptic-only exploration, material properties were substantially represented. The poor matching performance with the rigid masks particularly highlighted the relative importance of material information for haptic face matching.

References

Ballesteros, S., Manga, D., & Reales, J. M. (1997). Haptic discrimination of bilateral symmetry in 2-diminsional and 3-dimensional unfamiliar displays. Perception & Psychophysics, 59, 37-50.

Bartlett, J. C., & Searcy, J. (1993). Inversion and configuration of faces. Cognitive Psychology, 25, 281-316.

Bradshaw, J. L., & Wallace, G. (1971). Models for the processing and identification of faces. Perception & Psychophysics, 9, 443-448.

Bruce, V., Doyle, T., Dench, N., & Burton, M. (1991). Remembering facial configurations. Cognition, 38, 109-144.

Bryant, P., & Raz, I. (1975). Visual and tactual perception of shape by young children. Developmental Psychology, 11, 525-526.

Cashdan, S. (1968). Visual and haptic form discrimination under conditions of successive stimulation. Journal of Experimental Psychology Monograph, 76(2, Pt. 1).

Clarke, S., Lindemann, A., Maeder, P., Borruat, F. X., Assal, G. (1997). Face recognition and postero-inferior hemisheric lesions. Neuropsychologia, 35, 1555-1563.

Cohen-Levine, S., Banich, M. T., & Koch-Weser, M. P. (1988). Face recognition: A general or specific right hemisphere capacity? Brain and Cognition, 8, 303-325.

Diamond, R., & Carey, S. (1986). Why faces are and are not special: An effect of expertise. Journal of Experimental Psychology: General, 115 107-117.

Dubois, S., Rossion, B., Schiltz, C., Bodart, J. M., Michel, C., Bruyer, R., & Crommelinck, M. (1999). Effect of familiarity on the processing of human faces. NeuroImage, 9, 278-289.

Farah, M. J., Wilson, K. D., Drain, M., & Tanaka, J. N. (1998). What is "special" about face perception? Psychological Review, 105, 482-498.

Foulke, E. (1982). Reading braille. In W. Schiff & E. Foulke (Eds.), Tactual perception: A sourcebook (pp. 168-208). New York: Cambridge University Press.

Heller, M. A. (1985). Tactual perception of embossed Morse code and braille: The alliance of vision and touch. Perception, 14, 563-570.

Heller, M. A. (1986). Active and passive tactile braille recognition. Bulletin of the Psychonomic Society, 24, 201-202.

Heller, M. A., Nesbitt, K. D., Scrofano, D. K., & Daniel, D. (1990). Tactual recognition of embossed Morse code, letters, and braille. Bulletin of the Psychonomic Society, 28, 11-13.

Johnson, M. H., Dziurawiex, S., Ellis, H. D., & Morton, J. (1991). Newborns preferential tracking of faces and its subsequent decline. Cognition, 40, 1-19.

Jones, B. (1981). The developmental significance of cross-modal matching. In R. D. Walk & H. L. Pick Jr. (Eds.). Intersensory perception and sensory integration. New York: Plenum Press.

Kaitz, M. (1992). Recognition of familiar individuals by touch. Physiology and Behavior, 52, 565-567.

Kaitz, M., Lapidot, P., Bronner, R., & Eidelman, A. I. (1992). Parturient women can recognize their infants by touch. Developmental Psychology, 28, 35-39.

Kaitz, M., Meirov, H., & Landman, I. (1993). Infant recognition by tactile cues. Infant Behavior and Development, 16, 333-341

Kaitz, M., Shiri, S., Danzinger, S., Hershko, Z., & Eidelman, A. I. (1994). Fathers can also recognize their newborns by touch. Infant Behavior and Development, 17, 205-207.

Klatzky, R. L., Lederman, S. J. (1987). The intelligent hand. In G. Bower (Ed.), The psychology of learning and motivation (Vol. 21, pp. 121-151). New York: Academic Press.

Klatzky, R. L., Lederman, S. J., & Metzger, V (1985). Identifying objects by touch: An "expert system." Perception & Psychophysics, 37, 299-302.

Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (1987). Hand movements: A window into haptic object recognition. Cognitive Psychology, 19, 342-368.

Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (1990). Haptic classification of common objects: Knowledge-driven exploration. Cognitive Psychology, 22, 421-459.

Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (1997). Relative availability of surface and object properties during early haptic processing. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 23, 1-28.

Lederman, S. J., Klatzky, R. L., & Reed, C. (1987). There's more to touch than meets the eye: The salience of object attributes for haptics with and without vision. Journal of Experimental Psychology: General, 116, 356-369.

Lederman, S. J., Klatzky, R. L., Chataway, C., & Summers, C. D. (1990). Visual mediation and the haptic recognition of two-dimensional pictures of common objects. Perception and Psychophysics, 47, 54-64.

Lederman, S. J., Summers, C., & Klatzky, R. L. (1996). Cognitive salience of haptic object properties: Role of modality-encoding bias. Perception, 25, 983-998.

Loomis, J. M. (1981). On the tangibility of letters and braille. Perception and psychophysics, 29, 37-46.

Loomis, J. M. & Lederman, S. J. (1986). Tactual perception. In K. R. Boff, L. Kauffman, & J. Thomas (Eds.). Handbook of perception and performance, Vol. 2: Cognitive processes and performance (pp. 1-41). New York: John Wiley & Sons.

Marks, D. F. (1973). Visual imagery differences in the recall of pictures. British Journal of Psychology, 64, 17-24.

McCarthy, G., Puce, A., Gore, J. C., Allison, T. (1997). Face-specific processing in the human fusiform gyrus. Journal of Cognitive Neuroscience, 9, 605-610.

McKelvie, S. J., & Gingras, P. P. (1974). Reliability of two measures of visual imagery. Perceptual and Motor Skills, 39, 417-418.

Magee, L. E. & Kennedy, J. M. (1980). Exploring pictures tactually. Nature, 283, 287-288.

Meltzoff, A. N., & Borton, R. W. (1979). Intermodal matching by human neonates. Nature, 282, 403-404.

Nachson, I. (1995). On the modularity of face recognition: The riddle of domain specificity. Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology, 17, 256-275.

Newman, S. E., Sawyer, W. L., Hall, A. D., & Hill, L. G. (1990). Braille learning: One modality is sometimes better than two. Bulletin of the Psychonomic Society, 28, 17-18.

Rhodes, G. (1988). Looking at faces: First-order and second-order features as determinates of facial appearance. Perception, 17, 43-63.

Rosch, E., Mervis, C. Gray, W., Johnson, D., & Boyes-Braem, P. (1976). Basic objects in natural categories. Cognitive Psychology, 8, 382-439.

Rossi, J. S. (1977). Reliability of a measure of visual imagery. Perceptual and Motor Skills, 45, 694.

Sergent, J. (1984). An investigation into component and configural processes underlying face perception. British Journal of Psychology, 75, 221-242.

Tanaka, J. W., & Farah, M. J. (1991). Second-order relational properties and the inversion effect: Testing a theory of face perception. Perception & Psychophysics, 50, 367-372.

Tanaka, J. W., & Farah, M. J. (1993). Parts and wholes in face recognition. The Quarterly Journal of Experimental Psychology, 46A, 225-245.

Footnotes

[1] Based on an a priori power analysis and on previous research, 15 participants in each cell were deemed sufficient for the current investigation.

Appendix A

Vividness of Visual Imagery Questionnaire

FOR ITEMS 1 – 4, THINK OF SOME RELATIVE OR FRIEND WHOM YOU FREQUENTLY SEE (BUT WHO IS NOT WITH YOU AT PRESENT) AND CONSIDER CAREFULLY THE PICTURE THAT COMES BEFORE YOUR MIND'S EYE.

HOW VIVID IS.....

	VERY VIVID				**NOT VIVID**
	1	**2**	**3**	**4**	**5**
1. The exact contour of face, head, shoulders and body?	1	2	3	4	5
2. Characteristic poses of head, attitudes of body etc.?	1	2	3	4	5
3. The precise carriage, length of step, etc. in walking?	1	2	3	4	5
4. The different colours worn in some familiar clothes?	1	2	3	4	5

NOW, VISUALIZE A RISING SUN. CONSIDER CAREFULLY THE PICTURE THAT COMES BEFORE YOUR MIND'S EYE.

HOW VIVID IS.....

	VERY VIVID				**NOT VIVID**
	1	**2**	**3**	**4**	**5**
5. The sun is rising above the horizon into a hazy sky?	1	2	3	4	5
6. The sky clears and surrounds the sun with blueness?	1	2	3	4	5
7. Clouds. A storm blows up, with flashes of lightning?	1	2	3	4	5
8. A rainbow appears.	1	2	3	4	5

NOW, THINK OF THE FRONT OF A SHOP WHICH YOU OFTEN GO TO. CONSIDER THE PICTURE THAT COMES BEFORE YOUR MIND'S EYE.

HOW VIVID IS.....

	VERY VIVID				**NOT VIVID**
	1	**2**	**3**	**4**	**5**
9. The overall appearance of the shop from the opposite side of the road?	1	2	3	4	5
10. A window display including colours, shapes and details of individual items for sale?	1	2	3	4	5
11. You are near the entrance. The colour, shape and details of the door?	1	2	3	4	5
12. You enter the shop and go to the counter. The counter assistant serves you. Money changes hands.	1	2	3	4	5

FINALLY, THINK OF A COUNTRY SCENE WHICH INVOLVES TREES, MOUNTAINS, AND A LAKE. CONSIDER THE PICTURE THAT COMES BEFORE YOUR MIND'S EYE.

HOW VIVID IS.....

	VERY VIVID				**NOT VIVID**
	1	**2**	**3**	**4**	**5**
13. The contours of the landscape?	1	2	3	4	5
14. The colour and shape of the trees?	1	2	3	4	5
15. The colour and shape of the lake?	1	2	3	4	5
16. A strong wind blows on the trees and on the lake causing waves?	1	2	3	4	5

Appendix B

Visual and Tactual Rating Form

VISUAL (All geometric properties):

Shape of Face:	Round	Square	Oval	Heart
Nose:	Wide/Narrow/Ave. Bumpy? Nostrils: wide/ave./narrow	Long/Short	Upturned?	
Chin:	Square	Pointy	Round	
Forehead:	Short/Ave./High	Wide/Narrow		

TACTUAL (Geometric and Material properties):

Shape of Face:	Round	Square	Oval	Heart
Fullness of cheeks*:		Thin/Ave./Full		
Height/Prominence of Cheekbones:		High/Ave.		
Nose:	Wide/Narrow/Ave. Bumpy? * Nostrils: Wide/Ave./Narrow	Long/Short	Upturned?	
Chin:	Square	Pointy	Round	
Texture of Skin*:	Smooth/Soft Scars?	Oily? Moles?	Dry/Flaky Blemishes?	Rough

*** material property**

Appendix C

Final tactual ratings of the exemplar selection process

Potential Groups by Exemplar #		Paired Comparisons	Rater 1	Rater 2	Final Group	Number of VG/E ratings
1.	15	15 - 33:	G	VG		
	23	15 - 23:	P	P		1/0
	33	23 - 33:	G	G		
2.	15	15 - 30:	VG	VG		
	23	15 - 34:	G	G	#15 #30	
	24*	23 - 30:	G	P	#33	4/1
	30	23 - 34:	P	P		
	33	30 - 34:	G	P		
	34	33 - 34:	P	G		
	38*	30 - 33:	VG	E		
	40*					
3.	4	4 – 29:	VG	G		
	6*	4 – 32:	P	P		
	29	4 – 21:	G	P	#21 #29 #32	3/2
	32	29 - 32:	VG	VG		
	21	29 - 21:	G	VG		
		21 - 32:	E	E		
4.	1	1 - 18:	G	G		
	18	1 - 43:	G	P		
	42**	1 - 36:	G	G	#1 #18 #36	0/2
	43	18 - 36:	E	E		
	36	18 - 43:	G	G		
		36 - 43:	P	P		
5.	2	2 - 4:	VG	VG		
	4	2 - 20:	VG	VG	#2 #4 #20	4/0
	20	4 - 20:	G	G		
6.	5	5 - 12:	G	G		
	12	5 - 19:	VG	VG		
	19	5 - 37:	E	E	#5 #19 #37	3/3
	37	19 - 37:	E	VG		
	45*	12 - 19:	G	P		
		12 - 37:	VG	G		

Table cont...

7.	25	25 - 26:	E	E				
	26	25 - 31:	VG	VG	#25	#26	#31	3/3
	31	26 - 31:	E	VG				
8.	4	27 - 39:	G	G				
	11	27 - 11:	P	P				
	27	11 - 39:	P	P	None chosen			1/0
	39	4 - 11:	G	VG				

P = poor
G = good
VG = very good
E = excellent

* All combinations of ratings were classified as poor
** Voluntarily withdrew from the study

Appendix D

Consent Form

I_____ (please print), agree to participate in the study being conducted by Andrea Kilgour, under the supervision of Dr. Susan Lederman. This study is being conducted to fulfil the requirements of a Masters thesis. I have been asked to complete the Visual Vividness Imagery Questionnaire and to participate in one of five conditions. I will either visually or tactually explore a human face or the mask of a human face and then recognize that face from two other faces. The recognition phase is also either visual or tactual. I have been asked to wear headphones, a blindfold and a nose plug during the exploration and the recognition phase of this study.

I have been assured that my participation in this study is completely voluntary and that I may withdraw from this study at any time. I am fully aware that the responses I give will be treated confidentially and anonymously, and that any results will in no way identify me personally as a participant.

In the event that I should have any concerns or complaints related to this study, I have been told that I may address them to Dr. Susan Lederman of the Department of Psychology (545-2878). Should this approach not result in my satisfaction, I may contact Dr. Jane Knox, Acting Head of the Department of Psychology, Queen's University, at 545-2492.

I have read the above statement and freely consent to participate in this study.

Signed_____

Date_____

Witness_____

In the event that you have any complaints, concerns or questions about this research, please feel free to contact me, Andrea Kilgour at 548-3859, or my supervisor, Dr. Susan Lederman at 545-2878.

Should this approach not remove your dissatisfaction, you may contact Dr. Jane Knox, Acting Head of the Department of Psychology, Queen's University, at 545-2492.

Appendix E

Participant Instructions

I am going to take you into the next room to complete the study. Before we go in, I would like you to put on these headphones which will present you with white noise and this blindfold. I will guide you into the room and there is a partition that you can use to guide yourself. I will then place you at a particular spot. The first face which I will ask you to feel (look at and feel or look at) is the standard face. Feel that face until you think that you know that face. Then, you will feel (look at) three faces, one after the other. One of those faces is the standard face – the first one that you felt. I will guide your hands to each face and I would like you to drop your hands when you are finished indicating to me when you don't need to feel the face anymore. I will then ask you which one of the three was the standard face. Please don't give me an answer until you have felt all three faces.

Then, you can take off the blindfold and I will ask you several questions.
We will do this procedure three times. Each time you will be feeling different faces.

Appendix F

DEBRIEFING SHEET

This study is investigating the ability of humans to tactually recognize unfamiliar human faces. Sighted people visually recognize other people on a daily basis, whether it is someone close or familiar to you, or someone that you don't know, but recognize nevertheless. There has been no published research addressing the question of whether humans are able to recognize faces through touch.

The present study, in which you participated, is attempting to demonstrate that humans can identify faces through touch. The task that you performed is formally termed a "match to sample task". That is, you were asked to explore a face either tactually, visually, or tactually and visually, and then identify that face from two other faces that you are not familiar with. The Vividness of Visual Imagery Questionnaire was administered to you because it is hypothesized that those people who have higher imagery ability may perform the identification task better than those who have more difficulty with visual imagery.

Below are listed some related references that may be of interest to those who would like further information on the topics of face recognition and tactual recognition.

Thank-you for your participation. If you have any further questions feel free to contact me at 548-3859, or Dr. Susan Lederman at 545-2878. If this does not result in your satisfaction, please contact Dr. Jane Know, Acting Head of the Department of Psychology, Queen's University at 545-24492.

Kaitz, M. (1992). Recognition of familiar individuals by touch. Physiology & Behavior, 52, 565-567.

Klatzky, R. L., Lederman, S. L., & Metzger, V. A. (1985). Identifying objects by touch: An "expert system." Perception and Psychophysics, 37, 299-302.

Sergent, J. (1994). Cognitive and neural structures in face processing. In A. Kertesz (Ed.). Localization and neuroimaging in neuropsychology. San Diego, CA: Academic Press

Appendix G

ANOVA source table: Standard RT (H - H)

Source	SS	Df	MS	F	p
Within subjects					
Trial (T)	.164	2	8.187E-02	9.146	.000
Error	.501	56	8.952E-02		
Between subjects					
Set (S)	1.254	1	1.254	7.884	.009
T x S	1.805E-02	2	9.023E-02	1.008	.371
Error	4.454	28	.159		

Appendix H

ANOVA source table: Total RT (H - H)

Source	SS	df	MS	F	P
Within subjects					
Trial (T)	.136	2	6.800E-02	11.903	.000
Error	.309	54	5.713E-02		
Between subjects					
Set (S)	.599	1	.599	5.133	.032
T x S	5.589E-02	2	2.795E-02	4.892	.011
Error	3.149	27	.117		

Appendix I

ANOVA source table: Accuracy of Matching (H – H, VH – H, and H_{Mask} – H_{Mask})

Source	SS	df	MS	F	p
Mode of Exploration (E)	6098.264	2	3049.132	3.911	.024
Set (S)	790.104	1	790.104	1.104	.317
E x S	172.852	2	86.426	.111	.895
Error	65483.41	84	779.564		
Total	508893.6	90			

Appendix J

ANOVA source table: Standard RT (VH – H and H_{Mask} – H_{Mask})

Source	SS	df	MS	F	p
Within subjects					
Trial (T)	.387	2	.193	18.411	.000
Error	1.176	112	1.050E-02		
Between subjects					
Mode of Exploration (E)	3.472	1	3.472	20.505	.000
Set (S)	1.812E-02	1	1.812E-02	.107	.745
T x E	2.505E-02	2	1.253E-02	1.193	.307
T x S	5.928E-02	2	2.964E-02	2.822	.064
E x S	2.092E-02	1	2.092E-02	.124	.727
T x E x S	5.300E-02	2	2.650E-02	2.524	.085
Error	9.482	56	.169		

Appendix K

ANOVA source table: Total RT (H – H, VH – H and H_{Mask} – H_{Mask})

Source	SS	df	MS	F	p
Within subjects					
Trial (T)	1.270	2	.635	78.815	.000
Error	1.354	168	8.058E-03		
Between subjects					
Mode of Exploration (E)	.949	2	.475	3.814	.026
Set (S)	9.624E-02	1	9.624E-02	.773	.382
T x E	1.696	4	.424	52.633	.000
T x S	1.138	2	.569	70.608	.000
E x S	2.118	2	1.059	8.508	.000
T x E x S	1.355	4	.339	42.046	.000
Error	10.456	84	.124		

Appendix L

ANOVA source table: Comfort ratings (H – H, VH – H, and H_{Mask} – H_{Mask})

Source	SS	df	MS	F	p
Mode of Exploration (E)	2.687	2	1.344	2.048	.135
Set (S)	.123	1	.123	.187	.666
E x S	4.218	2	2.109	3.215	.045
Error	55.101	84	.656		
Total	1430.978	90			

Appendix M

ANOVA source table: Accuracy of Matching (V – H and H – V)

Source	SS	df	MS	F	p
Mode of Exploration (E)	3129.630	1	3129.630	4.464	.039
Set (S)	18.519	1	18.519	.026	.871
E x S	5351.852	1	5351.852	7.634	.008
Error	39259.26	56	701.058		
Total	267777.8	60			

Appendix N

ANOVA source table: Standard RT (V – H and H – V)

Source	SS	df	MS	F	p
Within subjects					
Trial (T)	.130	2	6.515E-02	3.436	.036
Error	2.123	112	1.896E-02		
Between subjects					
Mode of Exploration (E)	3.488	1	3.488	18.676	.000
Set (S)	2.640E-02	1	2.640E-02	.141	.708
T x E	2.475E-02	2	1.238E-02	.653	.523
T x S	5.373E-02	2	2.687E-02	1.417	.247
E x S	.122	1	.122	.651	.423
T x E x S	4.167E-02	2	2.084E-02	1.099	.337
Error	10.460	56	.187		

Appendix O

ANOVA source table: Comfort ratings (V – H and H - V)

Source	SS	df	MS	F	p
Mode of Exploration (E)	2.141	1	2.141	2.420	.125
Set (S)	1.452	1	1.452	1.641	.205
E x S	.669	1	.669	.756	.388
Error	49.537	56	.885		
Total	829.000	60			

Appendix P

Ethics Face Sheet

I	**Title of Project:**	HAPTIC FACE PROCESSING			
	Date:	JUNE 30/98			
II	**Applicant:**	ANDREA KILGOUR	**Signature:**		
III	**Description of Participants and Method of Recruitment (criteria for inclusion/restrictions):**				
	PSYC. 100 SUBJECT POOL				
IV	**Type of Project: Please check:**				
	Major ERC:	**Faculty:**			**Student:**
	Minor ERC:	**Ph.D.**	**M.A.** ✓	**Honours:**	**Undergraduate Class #**

Minor ERC: *Names and signatures of thesis committee members or course instructor and supervising tutors. (All students involved in a group class project are to sign on reverse side under PART VIII). Comments concerning the proposal should be put in writing.*

Minor ERC	Name	Signature	Approved Yes	Approved No	Date
Supervisor:	J. LEDERMAN		✓		June 30/98
Members: 1	L. Jakobson		✓		June 30/98
2	D. Muir		✓		or
3					

Major ERC	Name	Signature	Yes	No	Date
Members: 1					
2					
3					
4					
5					
6					

VII	**Processed by ERC Representative**	**Signature:**	**Date:**

ANDREA R. KILGOUR
274 Norman Rogers Drive, Kingston, Ontario, K7M 2R6
(613) 548-3859

EDUCATION

Queen's University, Kingston, Ontario — 1997 –Present
MA candidate
Supervisor: Dr. Susan J. Lederman
Areas: Clinical Psychology and Haptic Perception

Queen's University, Kingston, Ontario — Graduated 1996
BScH Psychology, First Class

SCHOLARSHIPS & HONOURS

American Psychological Association Student Travel Award 1999

Canadian Psychological Association Student Travel Award 1999

Natural Science and Engineering Research Council 1998-1999

Queen's Graduate Award 1998

Queen's Graduate Fellowship 1997

Queen's Graduate Award 1997

RESEARCH & PROFESSIONAL EXPERIENCE

Peer Mediation Trainer, Kingston, Ontario
Supervisor: Dr. W. Craig 1999
Duties: Facilitate weekly group meetings with children, grade four to seven inclusive, teaching peer mediation skills.

Program Evaluation, Kingston, Ontario
Supervisor: Dr. W. Craig
Duties: Carry out a program evaluation of a secure-custody, young offender facility including manual evaluation and interviews with residents, staff and management.

Research Assistant, Queen's University, Kingston, Ontario 1996-97
Supervisor: Dr. N. Freedman
Duties: Data collection and analysis on long-term patterns of smoking

TEACHING EXPERIENCE

Teaching Assistant, Queen's University, Kingston, ON

Intoduction to Psychology	1999
Experimental Psychology: Perception	1999
Introduction to Psychology	1998
Experimental Psychology: Perception	1998
History of Psychology	1997-98

Tutor

Statistics	1998 - 1999
Duties: Coaching a group of three undergraduate students and one individual in statistics and research design	
Experimental Psychology: Perception	1997
Duties: Individual tutoring with an undergraduate student identified as a Special Needs student	

Guest Lecturer

Topic: Haptic perception	1999
Topic: Auditory Perception	1998

PUBLICATIONS

Murray, D. J., Kilgour, A. R., & Wasylkiw, L. (1999). Psychology in Europe at the turn of the last century. Manuscript submitted for publication.

Kilgour, A. R., Jacobson, L. S., & Cuddy, L. L. (in press). Music ability and presentation rate affect recall of lyrics. Memory & Cognition .

CONFERENCE PRESENTATIONS

Kilgour, A. R., Jacobson, L. S., & Cuddy, L. L. (1999, August). Music ability and presentation rate affect recall of lyrics. Accepted for poster presentation at the 107th meeting of the American Psychological Association, Boston, USA.

Kilgour, A. R., & Lederman, S. J. (1999, May). Haptic face processing. Paper presented at the 60th annual convention of the Canadian Psychological Association, Halifax, Nova Scotia.

Kilgour, A. R., & Jakobson, L. S. (1997, June). Musical Ability as a mediator of text and song recall. Poster session presented at the 7th meeting of the Canadian Society for Brain, Behaviour, and Cognitive Science, Winnepeg, Manitoba.

NQ

42830

UMI

MICROFILMED 2000

INFORMATION TO USERS

This manuscript has been reproduced from the microfilm master. UMI films the text directly from the original or copy submitted. Thus, some thesis and dissertation copies are in typewriter face, while others may be from any type of computer printer.

The quality of this reproduction is dependent upon the quality of the copy submitted. Broken or indistinct print, colored or poor quality illustrations and photographs, print bleedthrough, substandard margins, and improper alignment can adversely affect reproduction.

In the unlikely event that the author did not send UMI a complete manuscript and there are missing pages, these will be noted. Also, if unauthorized copyright material had to be removed, a note will indicate the deletion.

Oversize materials (e.g., maps, drawings, charts) are reproduced by sectioning the original, beginning at the upper left-hand corner and continuing from left to right in equal sections with small overlaps.

Photographs included in the original manuscript have been reproduced xerographically in this copy. Higher quality 6" x 9" black and white photographic prints are available for any photographs or illustrations appearing in this copy for an additional charge. Contact UMI directly to order.

Bell & Howell Information and Learning
300 North Zeeb Road, Ann Arbor, MI 48106-1346 USA

UMI®
800-521-0600

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ANALYSE DU PROCÉDÉ DE MÉLANGE SOLIDE-LIQUIDE : APPLICATION À LA PRÉPARATION DES SAUCES DE COUCHAGE DU PAPIER

FRANCIS THIBAULT
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIAE DOCTOR (Ph.D.)
(GÉNIE CHIMIQUE)
AVRIL 1999

© Francis Thibault, 1999

National Library of Canada
Acquisitions and Bibliographic Services
395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale du Canada
Acquisitions et services bibliographiques
395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-42830-3

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée :

ANALYSE DU PROCÉDÉ DE MÉLANGE SOLIDE-LIQUIDE : APPLICATION À LA PRÉPARATION DES SAUCES DE COUCHAGE DU PAPIER

présentée par : THIBAULT Francis

en vue de l'obtention du diplôme de : Philosophiae Doctor

a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de :

M. CHAOUKI Jamal, Ph.D., président

M. TANGUY Philippe, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. PERRIER Michel, Ph.D., membre

M. CHOPLIN Lionel, Ph.D., membre

Je dédie cette thèse à mon épouse Chantal,

à mon fils Alexandre,

et finalement,

à Catherine qui n'a pas jugé bon de poursuivre son existence à nos côtés.

- REMERCIEMENTS -

Je voudrais, en tout premier lieu, remercier chaleureusement mon directeur de recherche, Monsieur Philippe Tanguy, pour m'avoir encouragé à amorcer ce travail de recherche. De plus, je le remercie des nombreuses discussions scientifiques que nous avons échangées et de sa grande disponibilité malgré son emploi du temps chargé. Je désire finalement le remercier de ses conseils judicieux pour la rédaction de cette thèse.

Je désire témoigner ma gratitude à plusieurs collègues de l'URPEI qui ont contribué à la réalisation de cet ouvrage, c'est-à-dire François Bertrand pour les nombreuses discussions, sa collaboration et ses jeux de mots colorés, Richard Labrie pour son support informatique et son professionnalisme, Olivier Furling pour son aide et sa très grande disponibilité lors des essais expérimentaux, Sergio Alonso pour son aide lors des tests d'application des suspensions concentrées sur la coucheuse pilote, Damien Rauline pour l'aide concernant l'acquisition de données sur LabView™, Jean-Benoit Ritz pour les nombreuses discussions et sa culture scientifique générale, et finalement Nathalie Tourangeau pour ses services efficaces.

J'ai grandement apprécié la coopération de la compagnie de pâtes et papiers MacMillan Bloedel située à Burnaby, Vancouver. Plus particulièrement, mes remerciements s'adressent à Monsieur Roger Kozak, chef mécanicien, pour la conception et la construction du mélangeur coaxial faisant partie de cette étude. Aussi, je désire remercier Monsieur Mel Paskarup pour m'avoir initié à la préparation des sauces de couchage du papier.

Je désire souligner le support technique de l'institut de recherche canadien sur les pâtes et papiers (Paprican), et principalement, la contribution de Messieurs Terry Murray et Michel Drainville concernant l'instrumentation du mélangeur coaxial, et de Messieurs Bob Stones et

Tim Ticehurst lors des diverses modifications et ajouts apportés à la plate-forme de mélange.

Je désire aussi souligner le support technique et la grande jovialité de Monsieur Carol Painchaud, technicien au département de génie chimique.

J'adresse également mes remerciements au Professeur Pierre Carreau pour avoir mis à ma disposition les rhéomètres du CRASP pour toute la caractérisation rhéologique contenue dans ce travail. Je tiens aussi à souligner la grande disponibilité et la patience de Madame Florence Yziquel qui m'a permis d'apprivoiser davantage la science de l'écoulement et de la déformation de la matière.

Je ne voudrais pas passer sous silence la grande compréhension de mon épouse Chantal tout au long de ce projet de recherche.

Finalement, je remercie le conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), la fondation de l'École Polytechnique, Paprican, la compagnie DuPont, ainsi que Monsieur Philippe Tanguy pour leur support financier.

- RÉSUMÉ -

Bien que de nombreux travaux aient porté sur les défauts d'application et les instabilités d'écoulement lors de la formation de la couche de sauce sur la trame de papier, peu d'études ont été menées afin de caractériser la préparation de la sauce de couchage proprement dite. Afin de pallier cette lacune, nous avons conçu, avec l'aide de la compagnie MacMillan Bloedel, un nouveau type de mélangeur coaxial composé d'un arbre lent (une ancre) et d'un arbre rapide (tiges de mélange et turbine à pales inclinées).

Pour ce nouveau type de mélangeur, nous avons caractérisé, expérimentalement et l'aide de la simulation numérique, la puissance d'agitation en fonction du comportement rhéologique du fluide agité et du rapport de vitesse entre les arbres lent et rapide en régime laminaire. Bien que ce type de mélangeur présente une cinématique complexe de rotation, les résultats numériques obtenus sont en bon accord avec les mesures expérimentales. Ces résultats ont été regroupés sur une courbe maîtresse permettant d'estimer la consommation de puissance pour des fluides non newtoniens de type loi de puissance pour différents rapports de vitesse. Finalement, des essais expérimentaux nous ont permis de caractériser la puissance d'agitation en régime turbulent d'écoulement en fonction du rapport de vitesse.

Une analyse vidéo d'une suspension diluée (1% v/v) de billes de verre rouge nous a permis de caractériser la qualité de la remise en suspension du mélangeur coaxial en fonction des conditions opératoires. Nous avons déterminé que la vitesse de l'ancre et le rapport de vitesse jouent un rôle important sur le mécanisme de remise en suspension. De plus, le mélangeur coaxial proposé nécessite environ 30 fois moins d'énergie qu'un système d'agitation simple pour une remise en suspension complète des particules solides.

Dans un but de comparaison, nous avons préparé, à l'aide du mélangeur coaxial et d'une turbine défloculeuse, des suspensions de pigments de kaolin (68% massique) et des sauces de

couchage. L'énergie de mouillage est de beaucoup conditionnée par le type de kaolin et la cinétique d'alimentation. De plus, le mélangeur coaxial est beaucoup moins énergivore que la turbine défloculeuse pendant la période de mouillage des pigments de kaolin. Cependant, la turbine défloculeuse permet d'obtenir un meilleur mélange dispersif. La simulation numérique n'a pas permis de prédire adéquatement la puissance d'agitation des suspensions concentrées en fonction du rapport de vitesse. Cette mauvaise prédiction est probablement reliée à l'incertitude du modèle rhéologique. Concernant les sauces de couchage, la courbe maîtresse obtenue précédemment nous a permis de prédire une puissance d'agitation comparable aux mesures expérimentales.

Finalement, deux modèles de dispersion de la phase solide ont été proposés et implantés dans le logiciel POLY3D™. Nous avons montré, pour une suspension diluée de bille de verre et le cas d'une hélice marine, que les modèles de Mann et Phillips ont permis de prédire un champ de concentration en matière solide qui est qualitativement en accord avec les images vidéos de la partie expérimentale. Par contre, pour le cas du mélangeur coaxial, seul le modèle de Mann a permis de prédire la position de l'interface solide-liquide à l'équilibre lorsque seule l'ancre est en rotation dans le réservoir et aussi prédire l'absence de remise en suspension lorsque seules les tiges de mélange et la turbine à pales inclinées sont en mouvement. Pour le cas des suspensions concentrées de kaolin, le modèle de Phillips ne s'est pas avéré adéquat afin de prédire une migration des particules par cisaillement dans la cuve de mélange. Nous croyons que les constantes empiriques de ce modèle se sont pas adaptées au cas de suspensions de petites particules tel le kaolin.

- ABSTRACT -

Although several works have been conducted on coating defects and flow instabilities during the thin coat formation on the paper web, very little work has been investigated in order to characterize the coating makedown. To overcome this lack, we have designed, with the help of MacMillan Bloedel Research Center, a new coaxial mixing system composed of a slow shaft (the anchor) and a rapid shaft (the rod impellers and the pitched blade turbine).

For this new mixing system, we have characterized, experimentally and by using numerical simulations, the power consomption in function of rheological behavior of mixed fluid and the speed ratio between the rapid and slow shafts in laminar mixing region. Although this mixer has a very complex kinematics, the numerical results are in good agreement with the experimental measurements. The analysis of the power consumption for non newtonian fluids, when varying the speed ratio between slow and rapid shafts and assuming the power law model, has been represented using a master curve. Finally, in flow turbulent regime, the power consumption has been characterized in term of speed ratio between slow and rapid shafts.

Video analysis of red glass beads diluted suspension (1% vol.) allowed us to analyse qualitatively the off-bottom suspension of coaxial mixer in term of operating conditions. The anchor speed and the speed ratio plays an important role on the off-bottom suspension of solid particles. Moreover, the coaxial mixing system proposed in this work requires about 30 times less energy than a simple mixing system to allow the same off-bottom suspension of solid particles.

For comparison purpose, kaolin concentrated suspensions (68% wt.) and coating colors have been prepared using two different types of mixing system, namely the coaxial impellers proposed in this work and a saw tooth disk impeller ("Cowles" disperser). The wetting energy is strongly conditioned by the kaolin type and the feed kinematics. Also, the coaxial mixer

requires less energy than the Cowles disperser during the wetting of the kaolin dry pigments. However, the Cowles disperser allows a better dispersive mixing. The numerical simulations have failed to predict adequately the power draw of kaolin concentrated suspensions in function of speed ratio between slow and rapid shafts. This results is probably related to the uncertainty of rheological model. Concerning the coating colors, the master curve obtained previously allowed us to predict a power draw very closed to the experimental measurements.

Finally, two solid flow dispersion models have been proposed and implemented in the POLY3D™ commercial code. We have shown, for glass beads diluted suspension and the case of propeller agitator, that both models allowed to predict solid concentration map which is qualitatively in agreement with experiment video tapes. However, for the case of coaxial mixer, only the Mann model has correctly predicted the solid-liquid interface position at steady-state regime when only anchor is in rotation inside the tank and also predicted the non off-bottom suspension when only the mixing rods and pitched blade turbine are in rotation. For the case of kaolin concentrated suspensions, the Phillips model has not been adequate to predict a shear-induced particle migration in the coaxial mixer. We think that the empirical constants of this model are not appropriate for the case of very small particle suspensions such as kaolin.

- TABLE DES MATIÈRES -

Pages

DÉDICACE iv

REMERCIEMENTS v

RÉSUMÉ vii

ABSTRACT ix

TABLE DES MATIÈRES xi

LISTE DES FIGURES xvi

LISTE DES TABLEAUX xxvii

LISTE DES ANNEXES xxix

LISTE DES SYMBOLES xxx

CHAPITRE I - INTRODUCTION 1

1. Le couchage du papier : généralités 1
2. Composition des sauces de couchage 3
3. Préparation des sauces de couchage 6
   - 3.1 Description du procédé de mélange 6
   - 3.2 Problématique du mélange d'une suspension concentrée de pigments 8
4. Objectif du présent travail 13

CHAPITRE II - ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE 14

1. Forces agissant sur les particules 14
2. Propriétés rhéologiques des suspensions de particules 22
   - 2.1 Suspensions newtoniennes 22
   - 2.2 Suspensions non newtoniennes 24
3. Mise en suspension de particules dans une cuve d'agitation 27
   - 3.1 Régimes hydrodynamiques 27
   - 3.2 Vitesse minimale de mise en suspension (N_{js}) 28

3.2.1 Méthodes d'évaluation de N_{js} 28
3.2.2 Corrélations de N_{js} 30
3.2.3 Modèle de prédiction de N_{js} 34
3.3 Puissance d'agitation des suspensions 36
3.4 Critère d'homogénéité 38
3.5 Temps de mélange 41
3.6 Critère d'extrapolation 41
4. Préparation de suspensions concentrées 43
4.1 Préparation de la suspension de pigments 43
4.2 Préparation des sauces de couchage 46
5. Modélisation du mélange solide-liquide 48
5.1 Modèle de dispersion-sédimentation 48
5.2 Modèle de Bakker et Fasano 50
5.3 Modèle de Mann 52
5.4 Modèle de la migration des particules induites par cisaillement 54
5.5 Simulation des écoulements biphasiques par une méthode directe 56
6. Objectifs spécifiques de la thèse 57

CHAPITRE III - MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE 60
1. Montage expérimental 60
2. Stratégie d'expérimentation 65
2.1 Mélange d'un fluide newtonien monophasique 66
2.2 Mélange d'un fluide non newtonien monophasique 67
2.3 Mélange d'une suspension newtonienne (biphasique) 68
2.4 Mélange d'une suspension concentrée de kaolin 69
3. Acquisition de données et mesures 72

CHAPITRE IV - MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES ÉCOULEMENTS MONOPHASIQUE ET BIPHASIQUE 73

1. Équations de Navier-Stokes 73

1.1 Conditions limites 75

1.2 Méthode de résolution 76

1.2.1 Formulation variationnelle 76

1.2.2 Méthode des éléments finis 78

1.2.3 Méthode des éléments finis virtuels (MEFV) 81

2. Équation de conservation de la phase solide 84

2.1 Modèle de Mann 84

2.2 Modèle de Phillips 89

2.2.1 Formulation variationnelle 91

CHAPITRE V - CARACTÉRISATION DE L'HYDRODYNAMIQUE ET DE LA PUISSANCE D'AGITATION : ÉCOULEMENT MONOPHASIQUE 94

1. Système d'agitation simple : ancre 94

1.1 Fluide newtonien 94

1.2 Fluide non newtonien 101

2. Système d'agitation complexe : mélangeur coaxial (ancre+4 tiges de mélange+TPI) 108

2.1 Fluide newtonien 108

2.2 Fluide non newtonien 122

CHAPITRE VI - CARACTÉRISATION DE LA REMISE EN SUSPENSION ET DE LA PRÉPARATION DES SUSPENSIONS CONCENTRÉES 145

1. Caractérisation de la remise en suspension 144
2. Préparation des suspensions concentrées de pigments 154
   - 2.1 Capacité de mouillage 155
   - 2.2 Capacité de dispersion 163
   - 2.3 Machinabilité 171
   - 2.4 Caractérisation de la puissance d'agitation des suspensions concentrées 173

CHAPITRE VII- ÉCOULEMENT BIPHASIQUE : VALIDATION ET ÉTUDE DE CAS 183

1. Validation des modèles de dispersion de la phase solide 183
   - 1.1 Modèle de Mann 183
   - 1.2 Modèle de Phillips 189
2. Étude de cas 194
   - 2.1 Système d'agitation simple : hélice marine 194
   - 2.2 Système d'agitation complexe : mélangeur coaxial 207

CHAPITRE VIII - CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 214

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 219

- LISTE DES FIGURES -

CHAPITRE I - INTRODUCTION

Figure 1.1 Schéma d'un procédé de couchage 2

Figure 1.2 Schéma d'une coucheuse à lame 2

Figure 1.3 Schéma d'une cuisine de couchage typique 6

Figure 1.4 Deux technologies de mouillage des pigments : a) par formation d'un vortex et b) par utilisation de tiges de mélange à la surface libre eau-pigments 9

Figure 1.5 Turbine défloculeuse de type Cowles 10

Figure 1.6 Turbine rotor-stator de type Kady-Mill 10

Figure 1.7 Turbine déliteur de la compagnie Cellier 11

Figure 1.8 Agitateurs coaxiaux 11

CHAPITRE II - REVUE DE LA LITTÉRATURE

Figure 2.1 Diagramme des forces sur une particule sphérique en chute libre 16

Figure 2.2 Vitesse de sédimentation de l'interface solide-liquide (v_ϕ) 19

Figure 2.3 Valeur de l'exposant n dans l'expression de Richardson et Zaki. 19

Figure 2.4 Courbe de viscosité typique d'une suspension de particules 25

Figure 2.5 Régimes hydrodynamiques typiques d'un mélange solide-liquide en fonction de la vitesse de rotation : a) mise en mouvement des particules, b) mise en suspension complète des particules, et c) particules uniformément distribuées 27

Figure 2.6 Critère d'évaluation de N_{js} de Molerus et Latzel 29

Figure 2.7 Variation du critère d'extrapolation (P_g/V) en fonction du diamètre de l'agitateur 42

Figure 2.8 Évolution typique de la puissance d'agitation au cours de l'incorporation du kaolin 44

Figure 2.9 Évolution typique de la viscosité en fonction des conditions opératoires 45

Figure 2.10 Comparaison qualitative de l'interface solide-liquide et des profils de concentration obtenus par simulation (haut) aux valeurs expérimentales (bas) 52

Figure 2.11 Exemple de cellules de sédimentation (à gauche) et de convection-diffusion (à droite) 53

CHAPITRE III - MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE

Figure 3.1 Schéma du montage expérimental et ces composantes 61

Figure 3.2 Schéma du mélangeur coaxial 62

Figure 3.3 Schéma et dimensions du réservoir et des agitateurs (dimensions en cm) 63

Figure 3.4 Courbes de viscosité en fonction de la vitesse de déformation pour une solution de gellane 1% 68

Figure 3.5 Schéma et dimensions géométriques de la turbine à roue dentée (dimensions en cm) 72

CHAPITRE IV - MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES ÉCOULEMENTS MONOPHASIQUE ET BIPHASIQUE

Figure 4.1 Description du repère de calcul Lagrangien (repère de l'ancre) . 75

Figure 4.2 Éléments finis de types :

a) P_1^+-P_0 : - 8 noeuds en vitesse (4 sommets et 4 centres des faces),
- pression constante

b) P_2^+-P_1 : - 15 noeuds en vitesse (4 sommets et 4 centres des faces, 6 arêtes et 1 barycentre),
- pression linéaire 79

Figure 4.3 Illustration du principe de la méthode des éléments finis virtuels . 82

Figure 4.4 Vue éclatée d'une cellule représentée par un élément fini tétraédrique et ses voisins soumis à un champ de vitesse v(x,y,z) et à la sédimentation v_s 85

Figure 4.5 Élément fini de type P_1 92

CHAPITRE V - CARACTÉRISATION DE L'HYDRODYNAMIQUE ET DE LA PUISSANCE D'AGITATION: ÉCOULEMENT MONOPHASIQUE

Figure 5.1 Maillage du réservoir et de l'ancre 97

Figure 5.2 Résultats expérimentaux et numériques de N_p en fonction de Re pour une ancre (fluide newtonien) 97

Figure 5.3 Trajectoires lancées sur un plan x-y à mi-hauteur dans la partie cylindrique du réservoir pour différentes valeurs du nombre de Reynolds (temps de parcours: 40 s) 98

Figure 5.4 Trajectoires lancées dans le fond du réservoir pour différentes valeurs du nombre de Reynolds (temps de parcours: 40 s) 99

Figure 5.5 Vitesse moyenne de pompage vers le haut en fonction de la position axiale pour différentes valeurs de Re pour une ancre (fluide newtonien) 100

Figure 5.6 Résultats expérimentaux et numériques de N_p en fonction de Re_{pl} pour différentes valeurs de l'indice loi de puissance pour une ancre 103

Figure 5.7 Variation de $K_p(n)$ obtenu numériquement en fonction de l'indice de la loi de puissance 103

Figure 5.8 Variation de $K_p(n)$ en fonction (1-n) pour une ancre 104

Figure 5.9 Courbe maîtresse de la consommation de puissance pour des fluides non newtoniens d'après le concept de Metzner-Otto 106

Figure 5.10 Trajectoires sur un plan x-y -a mi-hauteur dans la partie cylindrique du réservoir pour différentes valeurs de l'indice de loi de puissance (4.43 tpm) (temps de parcours: 40 s) 107

Figure 5.11 Maillages surfaciques des agitateurs mobiles : axe, 4 tiges de mélange et TPI 110

Figure 5.12 Exemple de consommation de puissance en fonction du pas de temps pour une vitesse de rotation de l'ancre de 4.43 tpm et un rapport de vitesses R_N=4 111

Figure 5.13 Résultats expérimentaux et numériques de N_p en fonction de Re pour différents rapports de vitesses entre les axes lent et rapide (fluide newtonien) 111

Figure 5.14 Valeur de K_p en fonction du rapport de vitesses entre les axes lent et rapide (fluide newtonien) 113

Figure 5.15 Résultats expérimentaux et numériques de N_p en fonction de Re pour différents rapports de vitesses entre les axes lent et rapide - diamètre et vitesse caractéristiques des tiges de mélange (fluide newtonien) 114

Figure 5.16 Valeur de $K_{p\ tiges}$ en fonction du rapport inverse de vitesse entre les axes lent et rapide - diamètre et vitesse caractéristiques des tiges de mélange (fluide newtonien) 115

Figure 5.17 Valeur de $K_{p\ tiges}$ en fonction du rapport de vitesses entre les axes lent et rapide (fluide newtonien) 117

Figure 5.18 Trajectoires lancées sur un plan x-y à mi-hauteur dans la partie cylindrique du réservoir pour différents rapports de vitesses (N_a=4.43 tpm) (temps de parcours : 40 s) 119

Figure 5.19 Trajectoires lancées dans le fond du réservoir pour différents rapports de vitesses (N_a=4.43 tpm) (temps de parcours : 40 s)... 120

Figure 5.20 Vitesse moyenne de pompage vers le haut en fonction du rapport de vitesses dans le mélangeur coaxial (N_a=4.43 tpm) (fluides newtoniens) 121

Figure 5.21 Résultats expérimentaux et numériques de N_p en fonction de Re_{pl} pour un rapport de vitesses R_N=4 basés sur valeurs caractéristiques de a) l'ancre et b) des tiges de mélange 123

Figure 5.22 Résultats expérimentaux et numériques de N_p en fonction de Re_{pl} pour un rapport de vitesses R_N=8 basés sur valeurs caractéristiques de a) l'ancre et b) des tiges de mélange 124

Figure 5.23 Résultats expérimentaux et numériques de N_p en fonction de Re_{pl} pour un rapport de vitesses R_N=24 basés sur valeurs caractéristiques de a) l'ancre et b) des tiges de mélange 125

Figure 5.24 Variation de $K_{p\ ancre}$ (R_N,n) en fonction du rapport de vitesses R_N et de (1-n) 127

Figure 5.25 Variation de $K_{p\ tiges}$ (R_N,n) en fonction du rapport de vitesses R_N et de (1-n) 128

Figure 5.26 Variation de $K_{s\ ancre}$ et $K_{s\ tiges}$ en fonction du rapport de vitesses R_N 131

Figure 5.27 Courbes maîtresses de la consommation de puissance pour des fluides non newtoniens en fonction du rapports de vitesse d'après le concept de Metzner-Otto 133

Figure 5.28 Variation de $K_{RN\ ancre}$ te $K_{RN\ tiges}$ en fonction du rapport de vitesses 134

Figure 5.29 Courbe maîtresse de la consommation de puissance pour des fluides non newtoniens d'après le concept de Metzner-Otto 136

Figure 5.30 Trajectoires lancées sur un plan x-y à mi-hauteur dans la partie cylindrique du réservoir pour différents rapports de vitesse pour un fluide rhéofluidifiant ayant un indice de loi de puissance n=0.3 (N_a=4.43 tpm, temps de parcours: 40s) 138

Figure 5.31 Trajectoires lancées dans le fond du réservoir pour différents rapports de vitesse pour un fluide rhéofluidifiant ayant un indice de loi de puissance n=0.3 (N_a=4.43 tpm, temps de parcours: 40s) 139

Figure 5.32 Vitesse moyenne de pompage vers le haut pour un fluide rhéofluidifiant ayant un indice de loi de puissance n=0.3 pour différents rapports de vitesse dans le mélangeur coaxial (N_a=4.43 tpm) 140

Figure 5.33 Valeurs expérimentales de N_p en fonction de Re pour différents rapports de vitesse R_N - caractérisation du régime d'écoulement turbulent 141

Figure 5.34 Valeurs expérimentales de $N_{p\ ancre}$ et $N_{p\ tiges}$ en fonction du rapport de vitesses pour un régime d'écoulement turbulent 143

CHAPITRE VI - CARACTÉRISATION DE LA REMISE EN SUSPENSION ET DE LA PRÉPARATION DES SUSPENSIONS CONCENTRÉES

Figure 6.1 Évolution de la distribution des billes de verre rouges en fonction du temps [a) 120 s, b) 300 s et c) à l'équilibre] lorsque seuls les tiges de mélange et la TPI sont en mouvement et possède une vitesse de 160 tpm 147

Figure 6.2 Évolution de la distribution des billes de verre rouges en fonction du temps [a) 82 s, b) 237 s et c) 470 s, d) 639 s, e) 974 s et f) à l'équilibre] pour une vitesse des tiges de mélange et la TPI de 160 tpm et un rapport de vitesse R_N égal à 24 148

Figure 6.3 Évolution de la distribution des billes de verre rouges en fonction du temps [a) 82 s, b) 237 s et c) 470 s, d) 639 s, e) 974 s et f) à l'équilibre] pour une vitesse des tiges de mélange et la TPI de 160 tpm et un rapport de vitesse R_N égal à 8 149

Figure 6.4 Évolution de la distribution des billes de verre rouges en fonction du temps [a) 20 s, b) 30 s et c) 72 s, d) 180 s, e) 190 s et f) à l'équilibre] pour une vitesse des tiges de mélange et la TPI de 160 tpm et un rapport de vitesse R_N égal à 4 150

Figure 6.5 Évolution de la distribution des billes de verre rouges en fonction du temps [a) 28 s, b) 39 s, c) 54 s, d) 77 s, e) 180 s et f) à l'équilibre] lorsque seul l'ancre est en mouvement et possède une vitesse de 160 tpm 151

Figure 6.6 Évolution du couple et du rapport P/V en fonction du temps pendant l'étape du mouillage des pigments (mélangeur coaxial - essai 1) 157

Figure 6.7 Évolution du couple et du rapport P/V en fonction du temps pendant l'étape du mouillage des pigments (mélangeur coaxial et disperseur - essai 2) 158

Figure 6.8 Évolution du couple et du rapport P/V en fonction du temps pendant l'étape du mouillage des pigments (mélangeur coaxial et disperseur - essai 3) 159

Figure 6.9 Évolution du couple et du rapport P/V en fonction du temps pendant l'étape du mouillage des pigments (mélangeur coaxial et disperseur - essai 4) 160

Figure 6.10 Comportement rhéologique typique d'une suspension de kaolin en fonction de la concentration massique (90% de kaolin délaminé et 10% de kaolin calciné) 161

Figure 6.11 Rhéologie de la suspension concentrée de kaolin à la fin de l'étape du mouillage pour le mélangeur coaxial et le disperseur pour les essais a) 1 et 2 et b) 3 et 4 165

Figure 6.12 Évolution du couple en fonction du temps lors de période de mélange post-mouillage pour le mélangeur coaxial 168

Figure 6.13 Rhéologie évolutive de la suspension de kaolin lors de la période de mélange post-mouillage pour les essais 1 (haut) et 2 (bas) du mélangeur coaxial et du disperseur 169

Figure 6.14 Rhéologie évolutive de la suspension de kaolin lors de la période de mélange post-mouillage pour les essais 3 (haut) et 4 (bas) du mélangeur coaxial et du disperseur 170

Figure 6.15 Rhéologie des sauces de couchage obtenue des essais 2 (haut) et 3 (bas) à partir du mélangeur coaxial et le disperseur 172

Figure 6.16 Viscosité de la suspensions concentrées après la période de mélange post-mouillage : comparaison entre les données expérimentales et le modèle rhéologique 174

Figure 6.17 Maillage de réservoir et de l'ancre. Les tiges de mélange et la TPI sont représentés à l'aide de points de contrôle (voir tableau 5.3) 175

Figure 6.18 Résultats expérimentaux et numériques de N_p en fonction de Re_{Gintre} pour différents rapports de vitesse (N_c/N_a) basés sur les dimensions caractéristiques de l'ancre (ρ_s: masse volumique de la suspension égale à 1700 kg/m^3) 176

Figure 6.19 Trajectoires lancées dans la partie inférieure du réservoir pour un rapport de vitesse R_N=8 et pour un fluide rhéofluidifiant-rhéoépaississant (N_a=25 tpm, temps de parcours: 20 s) 179

Figure 6.20 Trajectoires lancées dans la partie inférieure du réservoir pour un rapport de vitesse R_N=8 et pour un fluide rhéofluidifiant-rhéoépaississant (N_a=25 tpm, temps de parcours: 20 s) 180

Figure 6.21 Lissage des données expérimentales de la viscosité de la sauce de couchage correspondant à l'essai No 2 181

Figure 6.22 Comparaison entre les valeurs expérimentales et la prédiction du modèle de N_p en fonction du nombre de Re_{pl} pour différentes valeurs du rapport de vitesse (N_c/N_a) basés sur les valeurs caractéristiques de a) l'ancre et b) des tiges de mélange 182

CHAPITRE VII - ÉCOULEMENT BIPHASIQUE: VALIDATION ET ÉTUDE DE CAS

Figure 7.1 Maillage de la cellule de sédimentation: 472 (gauche), 2222 et 7031 éléments tétraédriques 185

Figure 7.2 Évolution de ϕ dans la direction axiale de la cellule de sédimentation en fonction du temps pour le maillage de 7031 éléments (sédimentation libre) 185

Figure 7.3 Évolution de ϕ en fonction du temps (1,50,100,150,200,265 s) sur un plan médian (plan x-z,y=0) pour le maillage de 7031 éléments (sédimentation libre) 186

Figure 7.4 Coefficient de variation en fonction du temps pour les sédimentations libre et entravée (472 (haut), 2222 et 7031 éléments) 188

Figure 7.5 Maillage (4872 éléments finis) et champ de concentration en particules solides dans l'entrefer d'un système de Couette pour une suspension f=50% (cylindre intérieur tourne à 30 tpm) 192

Figure 7.6 Comparaison entre les résultats analytiques et numériques des profils de a) concentration, b) vitesse et c) viscosité relative de la suspension dans l'entrefer d'un système de Couette pour une suspension f=50% (cylindre intérieur tourne à 30 tpm) 193

Figure 7.7 Caractéristiques géométriques du système d'agitation simple (hélice marine) pour l'étude de la remise en suspension (dimensions en cm) 194

Figure 7.8 Mécanisme de remise en suspension de billes de verre pour une vitesse de rotation de 173 tpm et une concentration moyenne de particules solides de 2.8% vol.: a) t=0 s, b) t = 25 s, c) t=50 s, d) t=90 s, et e) à l'équilibre 196

Figure 7.9 Mécanisme de remise en suspension de billes de verre pour une vitesse de rotation de 230 tpm et une concentration moyenne de particules solides de 7.1% vol.: a) t=0 s, b) t = 25 s, c) t=50 s, d) t=90 s, et e) à l'équilibre 197

Figure 7.10 Mécanisme de remise en suspension de billes de verre pour une vitesse de rotation de 350 tpm et une concentration moyenne de particules solides de 11.9% vol.: a) t=0 s, b) t = 25 s, c) t=50 s, d) t=90 s, et e) à l'équilibre 198

Figure 7.11 Maillage du réservoir (droite) et maillage surfacique de la turbine marine 199

Figure 7.12 Évolution de la fraction volumique pour une vitesse de rotation de 173 tours/min et une fraction volumique moyenne de 2.8% en fonction du temps : a) 0 s, b) 25 s, c) 50 s, d) 90 s et e) à l'équilibre sur un plan médian et f) à l'équilibre à la paroi du réservoir 201

Figure 7.13 Évolution de la fraction volumique pour une vitesse de rotation de 230 tours/min et une fraction volumique moyenne de 7.1% en fonction du temps : a) 0 s, b) 25 s, c) 50 s, d) 90 s et e) à l'équilibre sur un plan médian et f) à l'équilibre à la paroi du réservoir 202

Figure 7.14 Évolution de la fraction volumique pour une vitesse de rotation de 350 tours/min et une fraction volumique moyenne de 11.9% en fonction du temps : a) 0 s, b) 25 s, c) 50 s, d) 90 s et e) à l'équilibre sur un plan médian et f) à l'équilibre à la paroi du réservoir 203

Figure 7.15 Maillage P_2^+-P_1 du réservoir et de la turbine marine (modèle de Phillips) 205

Figure 7.16 Champ de la norme du tenseur des vitesses de déformation (droite) et de la fraction volumique en solide à l'équilibre pour les conditions opératoires suivantes a) 173 tpm, $\overline{\phi}$=2.8%, b) 230 tpm, $\overline{\phi}$=7.1%, et c) 350 tpm, $\overline{\phi}$=11.9% obtenu à l'aide du modèle de Phillips 206

Figure 7.17 Prédiction de la fraction volumique à l'équilibre pour les modèle de a) Mann et de b) Phillips et comparaison à l'expérimentation lorsque seul l'ancre est en animée d'une vitesse de 40 tpm pour une concentration moyenne en particules de 1% 209

Figure 7.18 Prédiction de la fraction volumique à l'équilibre pour le modèle de Mann et comparaison à l'expérimentation lorsque seul les tiges de mélange et la TPI sont en animées d'une vitesse de 160 tpm pour un concentration moyenne en particules de 1% 211

Figure 7.19 Prédiction de la fraction volumique en fonction du nombre de tours des agitateurs centraux : a) 10 tours, b) 20 tours et c) 60 tours pour une vitesse des tiges de mélange et la TPI de 160 tpm et un rapport de vitesse R_N égal à 4 212

- LISTE DES TABLEAUX -

CHAPITRE I - INTRODUCTION

Tableau 1.1 Quelques propriétés des kaolins (Kouris et Kocurek, 1990; Vidal, 1993) 4

CHAPITRE II - REVUE DE LA LITTÉRATURE

Tableau 2.1 Forces agissant sur les particules d'une suspension (Masliyah, 1994) 15

Tableau 2.2 Coefficient de friction en fonction du régime d'écoulement (Bird et al., 1960) 17

Tableau 2.3 Quelques modèles rhéologiques pour les suspensions newtoniennes 23

Tableau 2.4 Fraction volumique maximale (ϕ_m) et viscosité intrinsèque [η] en fonction du type de particules 24

Tableau 2.5 Constantes empiriques (K_w,a_w) en fonction du type d'agitateur .. 32

Tableau 2.6 Valeurs et gamme d'applicabilité des exposants de l'équation [2.22] 32

CHAPITRE III - MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE

Tableau 3.1 Gamme des vitesses des agitateurs rapide et lent 65

Tableau 3.2 Composants de la sauce de couchage à l'étude 71

CHAPITRE V - CARACTÉRISATION DE L'HYDRODYNAMIQUE ET DE LA PUISSANCE D'AGITATION: ÉCOULEMENT MONOPHASIQUE

Tableau 5.1 Valeurs numérique et expérimentale de K_p pour une ancre 96

Tableau 5.2 Comparaison de K_s obtenue numériquement aux différentes valeurs de K_s publiées dans la littérature 105

Tableau 5.3 Caractéristiques numériques des maillages surfaciques 109

Tableau 5.4 Valeurs expérimentales et numériques de K_p en fonction du rapport de vitesses R_N du mélangeur coaxial 113

Tableau 5.5 Valeurs expérimentales et numériques de K_p en fonction du rapport de vitesses R_N du mélangeur coaxial 115

Tableau 5.6 Valeurs expérimentales et numériques de $K_{p\ ancre}$ (R_N,n) en fonction de l'indice de la loi de puissance pour différentes valeurs du rapport de vitesses du mélangeur coaxial 126

Tableau 5.7 Valeurs expérimentales et numériques de $K_{p\ tiges}$ (R_N,n) en fonction de l'indice de la loi de puissance pour différentes valeurs du rapport de vitesses du mélangeur coaxial 127

Tableau 5.8 Valeurs de K_s basées sur les valeurs caractéristiques de l'ancre et des tiges de mélange 130

Tableau 5.9 Valeurs de $K_{RN\ ancre}(R_N)$ et $K_{RN\ tiges}(R_N)$ en fonction du rapport de vitesses 134

Tableau 5.10 Valeurs expérimentales de $N_{p\ ancre}$ et $N_{p\ tiges}$ en fonction du rapport de vitesses pour un régime d'écoulement turbulent 142

CHAPITRE VI - CARACTÉRISATION DE LA REMISE EN SUSPENSION ET DE LA PRÉPARATION DES SUSPENSIONS CONCENTRÉES

Tableau 6.1 Propriétés physiques des phases liquide et solide de la suspension newtonienne 146

Tableau 6.2 Conditions opératoires utilisées lors du mouillage des pigments de kaolin pour le mélangeur coaxial et le disperseur 156

Tableau 6.3 Résultats comparatifs entre le mélangeur coaxial et le disperseur pour l'étape du mouillage des pigments de kaolin 162

Tableau 6.4 Mesures de la concentration massique de la suspension concentrée de kaolin à la fin de l'étape du mouillage pour le mélangeur coaxial et le disperseur 164

Tableau 6.5 Conditions opératoires utilisées lors du mélange post-mouillage des suspensions de kaolin pour le mélangeur coaxial et le disperseur 167

CHAPITRE VII - ÉCOULEMENT BIPHASIQUE: VALIDATION ET ÉTUDE DE CAS

Tableau 7.1 Propriétés physiques des phases liquide et solide pour la validation du modèle de Mann 184

Tableau 7.2 Comparaison entre le temps de sédimentation libre et entravée pour différents maillages (le % d'écart représente l'écart avec la valeur théorique, i.e. 257 s) 187

Tableau 7.3 Propriétés physiques des phases liquide et solide 190

Tableau 7.4 Propriétés physiques des phases liquide et solide pour l'étude de la remise en suspension dans un système d'agitation simple (hélice marine) 194

- LISTE DES ANNEXES -

ANNEXE A - Caractérisation des propriétés physiques des billes de verre rouge #4 234

ANNEXE B - Évaluation des flux de matière par convection et sédimentation sur la face d'un élément fini tétraédrique 236

ANNEXE C - Validation de la résolution de l'équation de transport de la phase solide par convection du modèle de Mann 240

ANNEXE D - Validation de la méthode de SUPG pour la résolution de l'équation de transport du modèle de Phillips 242

ANNEXE E - Concept de Metzner et Otto pour les fluides possédant un comportement rhéologique du type rhéofluidifiant - rhéoépaississant pour un système d'agitation simple (ancre) 247

- LISTE DES SYMBOLES -

Symboles	Définition	Unités
a	Diamètre d'une particule solide dans le modèle de Phillips	m
a_k	Coefficients de la transformée de Fourier rapide	[-]
a_t	Constante du schéma de Gear	[-]
a_z	Constante empirique fonction de l'agitateur (équ. [2.21])	[-]
A	Constante d'Hamaker	J
A_z	Constante géométrique du modèle de prédiction de N_{js}	[-]
A_T	Constante du modèle rhéologique de Thomas	[-]
[A]	Matrice résultant du modèle de Mann	[-]
b	Constante du modèle rhéologique de Eilers	[-]
b_k	Coefficients de la transformée de Fourier rapide	[-]
b_t	Constante du schéma de Gear	[-]
[b]	Vecteur (membre de droite) du modèle de Mann	[-]
B_T	Constante du modèle rhéologique de Thomas	[-]
c_t	Constante du schéma de Gear	[-]
C	Distance entre l'agitateur et le fond de la cuve	m
C_{max}	Couple maximal lors de l'incorporation de la poudre de kaolin	N-m
C_b	Distance entre le fond du réservoir du mélangeur coaxial et la turbine à pales inclinées (TPI)	m
C_b	Concentration moyenne au fond du pot de mélange	kg/m^3
C_c	Concentration des cellules dans le modèle de Mann	kg/m^3
C_d	Coefficient de friction associé aux particules	[-]
C_i	Concentration aux points d'échantillonnage	kg/m^3
C_p	Concentration de la cellule amont du modèle de Mann	kg/m^3

C_w	Entrefer entre la paroi du réservoir du mélangeur coaxial et l'ancre	m
$\overline{C}$	Concentration moyenne dans la cuve d'agitation	kg/m^3
D	Diamètre de l'agitateur	m
D_a	Diamètre de l'ancre du mélangeur coaxial	m
D_c	Diamètre du réservoir du mélangeur coaxial	m
$D_{e,l}$	Coefficient de diffusion turbulente de la phase liquide	m^2/s
$D_{e,p}$	Coefficient de diffusion turbulente des particules	m^2/s
D_p	Diamètre des particules	m
D_{pi}	Diamètre de la turbine à pales inclinées (TPI) du mélangeur coaxial	m
D_s	Coefficient de diffusion turbulente des particules (Équ. [2.48])	m^2/s
D_{st}	Diamètre (section) des tiges de mélange du mélangeur coaxial	m
D_t	Diamètre (longueur) des tiges de mélange du mélangeur coaxial	m
$D(\dot{\gamma},\phi)$	Coefficient de diffusion des particules	m^2/s
$\hat{D}(\phi)$	Constante sans dimension, $D(\dot{\gamma},\phi)/(\phi R_p^2)$	[-]
$e_1,...e_5$	Exposants de l'équation [2.22]	[-]
E_m	Énergie de mouillage des pigments de kaolin	kJ/kg
f	Vecteur force externe dans les équations de Navier-Stokes	N/m^3
F_a	Force d'Archimède agissant sur les particules	N
F_a	Force attractive agissant sur les particules	N
F_b	Force brownienne agissant sur les particules	N
F_e	Force électrique agissant sur les particules	N
F_g	Force gravitationnelle agissant sur les particules	N
F_i	Force inertielle agissant sur les particules	N

F_t	Force de friction visqueuse agissant sur les particules	N
F_v	Force visqueuse agissant sur les particules	N
g	Accélération gravitationnelle terrestre	m/s^2
h_o	Hauteur initiale du lit de particules au repos	m
H_c	Hauteur dans la partie cylindrique du mélangeur coaxial	m
k	Paramètre de structure du modèle rhéologique newtonien de Quémada	[-]
$k(\dot{\gamma})$	Paramètre de structure du modèle rhéologique non newtonien de Quémada	[-]
k_1	Paramètre du modèle de Cross	s
k_2	Paramètre du modèle de Gillespie contrôlant l'amplitude de dilatation	Pa-s
k_3	Paramètre du modèle de Gillespie correspondant à la vitesse de cisaillement critique où apparait l'effet dilatant	1/s
k_o, k_∞, p	Paramètres du modèle rhéologique non newtonien de Quémada (Éq. [2.15])	[-]
k_B	Constante de Boltzmann	J/K
k_t	La densité d'énergie cinétique turbulente	[-]
K	Indice de consistance du modèle loi de puissance	$Pa\text{-}s^n$
K_1	indice de consistance de la partie rhéofluidifiante du modèle rhéofluidifiant-rhéoépaississant	[-]
K_2	indice de consistance de la partie rhéoépaississante du modèle rhéofluidifiant-rhéoépaississant	[-]
K_c	Constante empirique du modèle de Phillips	[-]
K_g	Constante géométrique (Équ. [2.24])	[-]
K_p	Constante caractérisant la puissance d'agitation d'un agitateur	[-]

$K_{p\ ancre}$	Constante de puissance basée sur la vitesse et les dimensions caractéristiques de l'ancre du mélangeur coaxial	[-]
$K_{p\ tiges}$	Constante de puissance basée sur la vitesse et les dimensions caractéristiques des tiges de mélange du mélangeur coaxial	[-]
$K_{RN\ ancre}$	Rapport entre le $K_{p\ ancre}$ (R_N) et le $K_{p\ ancre}$ (0) du mélangeur coaxial	[-]
$K_{RN\ tiges}$	Rapport entre le $K_{p\ tiges}$ (R_N) et le $K_{p\ tiges}$ (0) du mélangeur coaxial	[-]
K_s	Constante de Metzner et Otto	[-]
$K_{s\ ancre}$	Constante de Metzner et Otto basée sur la vitesse et les dimensions caractéristiques de l'ancre du mélangeur coaxial	[-]
$K_{s\ tiges}$	Constante de Metzner et Otto basée sur la vitesse et les dimensions caractéristiques des tiges de mélange du mélangeur coaxial	[-]
K_z	Constante empirique fonction de l'agitateur (Éq. [2.21])	[-]
K_η	Constante empirique du modèle de Phillips	[-]
L	Lagrangien pour le problème de Stokes	[-]
L_{cp}	Longueur caractéristique du procédé	[-]
L_r	Lagrangien augmenté pour le problème de Stokes	[-]
L^*_{rs}	Lagrangien augmenté dans la méthode des éléments finis virtuels	[-]
L_p	Longueur des pales de la turbine à pales inclinées (TPI) du mélangeur coaxial	m
n	Exposant de l'expression de Richardson et Zaki (Équ. [2.8])	[-]
n	Exposant de la loi de puissance	[-]
n	Vecteur normal	[-]
n_p	Volume total occupé par les particules dans le réservoir	m^3

n_1	indice de la loi de puissance de la partie rhéofluidifiante du modèle rhéofluidifiant-rhéoépaississant	[-]
n_2	indice de la loi de puissance de la partie rhéofluidifiante du modèle rhéofluidifiant-rhéoépaississant	[-]
N	Vitesse de rotation	tours/s
N_c	Vitesse de rotation de l'arbre rapide du mélangeur coaxial	tours/s
N_d	Flux de particules dû à la sédimentation	m/s
N_g	Flux de particules dû à la diffusion	m/s
N_{js}	Vitesse minimale de la mise en suspension des particules	tours/s
p	Pression	Pa
P	Puissance d'agitation	W
P_{js}	Puissance nécessaire pour soulever toutes les particules de la suspension lors de mise en suspension minimale	W
P_{tot}	Puissance totale d'agitation pour le mélangeur coaxial	W
Q	Débit de fluide entre les cellules du modèle de Mann	m^3/s
Q_c	Flux de particules solides par convection entrant ou sortant par les faces des éléments finis (modèle de Mann)	m^3/s
Q_{kc}	Débit massique moyen d'incorporation du kaolin calciné	g/s
Q_{kd}	Débit massique moyen d'incorporation du kaolin délaminé	g/s
Q_s	Flux de particules solides par sédimentation entrant ou sortant par les faces des éléments finis (modèle de Mann)	m^3/s
r	Coordonnée cylindrique	[-]
R_p	Rayon des particules	m
S	Surface	m^2
S_i	Surface d'écoulement des cellules de sédimentation du modèle de Mann	m^2

S_z	Facteur géométrique fonction du type d'agitateur dans l'expression de Zwietering (Éq. [2.20])	[-]
t	Temps	s
T	Diamètre du réservoir d'agitation	m
T_a	Température absolue	K
U	Vitesse caractéristique de déplacement d'une particule	m/s
U_{js}	Vitesse d'une particule lors de la mise en suspension minimale	m/s
v, v_c	Vecteur vitesse de la suspension	m/s
v_t	Vitesse de sédimentation des particules à l'équilibre	m/s
$<v_z^+>$	Vitesse moyenne de pompage vers le haut	m/s
v_ϕ	Vitesse de sédimentation entravée des particules	m/s
V	Volume du fluide agité	m^3
V_c	Volume des cellules du modèle de Mann	m^3
V_{cp}	Vitesse caractéristique du procédé	m/s
V_j	Volume de l'élément fini (modèle de Mann)	m^3
W_a	Largeur de l'ancre du mélangeur coaxial	m
W_p	Largeur des pales de la turbine à pales inclinées (TPI) du mélangeur coaxial	m
x,y,z	Coordonnées cartésiennes	[-]
x_i^*	Vecteur de coordonnées des points de contrôle définissant la frontière fictive	m

Nombre adimensionnels

Symboles	Définition
A_S	Nombre adimensionnel de Shields, $9\mu_l\dot{\gamma}/(2g\Delta\rho h_o)$
Ar	Nombre d'Archimède, $(4/3)D_p^3(\rho_s-\rho_l)(\rho_l g/\mu_l^2)$

Gi	Nombre de Gillespie, $(K_2/K_1)\ N^{n_2-n_1}$
Gi_{ancre}	Nombre de Gillespie basée sur la vitesse et les dimensions caractéristiques de l'ancre du mélangeur coaxial, $(K_2/K_1)\ N_a^{n_2-n_1}$
N_p	Nombre de puissance, $P/(\rho N^3 D^5)$
N_p^*	Nombre de puissance pour une suspension, $P/(\rho_s N^3 D^5)$
$N_{p\ ancre}$	Nombre de puissance basée sur la vitesse et les dimensions caractéristiques de l'ancre du mélangeur coaxial, $P_{tot}/(\rho N_a^3 D_a^5)$
$N_{p\ tiges}$	Nombre de puissance basée sur la vitesse et les dimensions caractéristiques des tiges de mélange du mélangeur coaxial, $P_{tot}/(\rho N_c^3 D_t^5)$
Pe_l	Nombre de Péclet de la phase liquide, $v_l \cdot H/D_{e,p}$
Pe_s	Nombre de Péclet des particules solides, $v_t \cdot H/D_{e,p}$
Re	Nombre de Reynolds en agitation, $\rho N D^2/\mu$
Re^*	Nombre de Reynolds en agitation pour les suspensions, $\rho_s N D^2/u_s$
Re_g	Nombre de Reynolds généralisé, $\rho N^{2-n} D^2/(K K_s^{n-1})$
$Re_{g\ ancre}$	Nombre de Reynolds généralisé basée sur la vitesse et les dimensions caractéristiques de l'ancre du mélangeur coaxial, $\rho N_a^{2-n} D_a^{\ 2}/(K K_{s\ ancre}^{n-1})$
$Re_{g\ tiges}$	Nombre de Reynolds généralisé basée sur la vitesse et les dimensions caractéristiques des tiges de mélange du mélangeur coaxial, $\rho N_c^{2-n} D_t^2/(K K_{s\ tiges}^{n-1})$
Re_p	Nombre de Reynolds d'une particule, $D_p v_t \rho_l/\mu_l$
Re_{pl}	Nombre de Reynolds pour un fluide de type loi de puissance, $\rho N^{2-n} D^2/K$
R_D	Rapport de diamètre entre les tiges de mélange et l'ancre du mélangeur coaxial, D_t/D_a
R_N	Rapport de vitesse entre les axes lent et rapide du mélangeur coaxial, N_c/N_a

Symboles Grecques

Symboles	Définition	Unités
α	Paramètre d'ajustement de la diffusion turbulente de la phase liquide du modèle de Mann	[-]
β	Paramètre fonction du nombre de Peclet lors de l'application du la méthode SUPG	[-]
ε	Constante diélectrique	[-]
ε_o	Constante de permittivité du vide	F/m
ε_p	Puissance nécessaire pour soulever une particule lors de la mise en suspension minimale	W
$\Delta\rho$	Différence de masse volumique entre les phases solide et liquide, $(\rho_s-\rho_l)$	[-]
ϕ	Fraction volumique en solide au sein d'une suspension	[-]
$\overline{\phi}$	Fraction volumique moyenne en solide à l'intérieur du réservoir	[-]
ϕ_m	Fraction volumique maximale en solide au sein d'une suspension	[-]
ϕ_v	Fraction volumique en solide au sein d'une suspension	[-]
ϕ_w	Fraction massique en solide au sein d'une suspension	[-]
$\dot{\gamma}$	Vitesse de cisaillement au sein de la suspension	1/s
$\dot{\gamma}_a$	Vitesse de cisaillement apparente au sein du mélangeur	1/s
$\dot{\gamma}_c$	Vitesse de cisaillement critique au sein de la suspension	1/s
Γ	Frontière du domaine Ω	[-]
Γ^*	Frontière du domaine fictif (méthode des éléments finis virtuels)	[-]
$[\eta]$	Viscosité intrinsèque du modèle de Krieger-Dougherty	[-]

η	Viscosité	Pa-s
η_r	Viscosité relative non newtonienne d'une suspension	[-]
η_o	Viscosité de plateau de la suspension à bas cisaillement	Pa-s
η_s	Viscosité non newtonienne de la suspension	Pa-s
η_l	Viscosité du fluide suspendant	Pa-s
η_s	Viscosité de la suspension	Pa-s
η_∞	Viscosité de plateau de la suspension à haut cisaillement	Pa-s
λ	Multiplicateur de lagrange dans la formulation variationnelle de la méthode des éléments finis virtuels	[-]
μ	Viscosité newtonienne	Pa-s
μ_a	Viscosité apparente au sein du mélangeur	Pa-s
μ_l	Viscosité du fluide suspendant	Pa-s
μ_s	Viscosité de la suspension	Pa-s
μ_r	Viscosité relative de la suspension ($\mu_r=\mu_s/\mu_l$)	[-]
ν	Viscosité cinématique du fluide suspendant (μ_l/ρ_l)	μ^2/σ
ρ_l	Masse volumique du fluide suspendant	kg/m^3
ρ_m	Masse volumique de la suspension	kg/m^3
ρ_s	Masse volumique des particules solides	kg/m^3
σ	Degré d'homogénéité basé sur l'estimation de l'écart type	[-]
τ	Tenseur des contraintes	Pa
Ω	Domaine d'étude de la méthode des éléments finis	m^3
Ω_{ancre}	Vitesse de rotation de l'ancre	tours/s
Ω_{fond}	Domaine comprenant les particules solides au fond du réservoir à l'instant initial	m^3
$\Omega_{turbine}$	Vitesse de rotation de la turbine	tours/s
ξ	Fonctions-test pour le calcul de la pression	[-]

ψ	Fonctions-test pour le calcul de la vitesse	[-]
ψ_{BN}	Degré d'homogénéité de Bohnet et Niesmak	[-]
Ψ	Facteur de sphéricité des particules solides	[-]
ζ	Potentiel zêta	V

- CHAPITRE I -

INTRODUCTION

1. Le couchage du papier : généralités

Les forêts du Canada couvrent environ 453 millions d'hectares, soit près de la moitié du territoire. Des milliers d'industries l'exploitent et génèrent par le fait même une pléthore d'emplois directs et indirects. Avec ces 180 usines distribuées d'un océan à l'autre, le Canada est l'un des plus gros producteurs de pâtes et papiers au monde.

Le développement de l'industrie des pâtes et papiers a connu un essor considérable soutenu par une demande importante de pâte et papier journal. Par contre, dans le contexte de la globalisation des échanges commerciaux, les papetières canadiennes se doivent de développer de nouveaux produits à valeur ajoutée tel le papier couché. Ce type de papier est obtenu à l'aide d'un traitement de surface. Ce traitement consiste à déposer sur le papier une très mince couche de pigments dont le rôle est d'améliorer les qualités optiques et d'impression couleur sans toutefois en altérer les propriétés mécaniques. La demande pour ce type de papier connaît une croissance constante (magazines, journaux spécialisés, encarts publicitaires,...).

D'un point de vue procédé, le couchage du papier est principalement composé de quatre opérations fondamentales (figure 1.1):

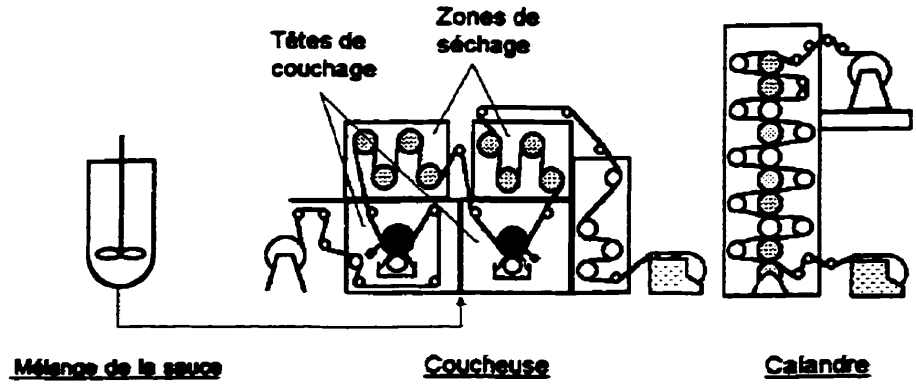


Figure 1.1 Schéma d'un procédé de couchage.

Préparation de la sauce: cette étape consiste à mélanger les différents ingrédients constituant la sauce de couchage. L'objectif de cette opération est d'obtenir une bonne homogénéité de la sauce. La formulation ainsi obtenue conditionne les propriétés physiques et optiques du produit final; elle joue de plus un rôle important en ce qui a trait à la machinabilité lors de l'application de la sauce. Puisque cette étape fait l'objet du présent travail, elle sera traitée plus en détail dans une section ultérieure.

Application de la sauce sur la trame de papier: le couchage consiste essentiellement à déposer une mince couche de sauce (quelques microns d'épaisseur) sur une trame de papier à très grande vitesse (jusqu'à 2000 m/min). Le plus souvent, une lame (figure 1.2) est utilisée pour niveler le dépôt de la sauce à la surface du papier (Kouris et Kocurek, 1990; Vidal, 1992), d'où le nom 'coucheuse à lame".

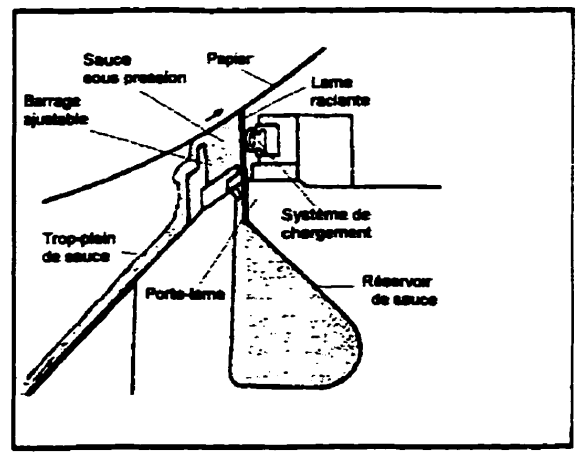


Figure 1.2 Schéma d'une coucheuse à lame.

Afin de bien doser l'épaisseur de la couche, le régleur de la machine peut ajuster la vitesse de

production, la pression exercée par la lame sur le papier et le niveau de viscosité dans la sauce de couchage. Cette étape du procédé est critique car les vitesses de déformation sous la lame sont très élevées (de l'ordre de 10^6 s^{-1}). L'homogénéité de la sauce de couchage devient donc un facteur très important. Une mauvaise homogénéité pourra entraîner des défauts lors de l'application rendant la couche d'enduit non uniforme. Ces défauts peuvent entraîner des déchirures de la trame de papier ("casses") et causer un arrêt de la production.

Séchage de la couche: une fois l'application terminée, l'eau contenue dans la sauce doit être éliminée par séchage. Afin de réduire les coûts et minimiser le gonflement des fibres du papier, les sauces de couchage doivent contenir le moins d'eau possible. Par ailleurs, la quantité de solides doit être maximale afin d'améliorer les qualités optiques du produit final. En pratique, le séchage s'effectue au moyen d'une combinaison de séchoirs à rayonnement infrarouge et de séchoirs par soufflage d'air chaud.

Calandrage: cette dernière étape permet de lisser la couche de pigments déposée à la surface du papier lors du passage de la trame de papier entre les rouleaux de la calandre.

Il est possible d'agir sur le niveau de viscosité de la sauce pour contrôler l'épaisseur de la couche de sauce. Cette dernière possède une rhéologie complexe qui est directement reliée à sa composition. La section suivante décrit les différents ingrédients que l'on peut retrouver dans une sauce de couchage typique.

2. Composition des sauces de couchage

La composition des sauces de couchage varie en fonction du type de papiers fabriqués et des conditions opératoires prévalant sur la ligne de production. Par contre, la majorité des ingrédients retrouvés dans la formulation de ces sauces peuvent être regroupés dans une des catégories suivantes: les pigments, les liants, les additifs et l'eau utilisée comme solvant.

Pigments

Le rôle des pigments dans la sauce de couchage est de favoriser un degré de blancheur élevé du papier, c'est-à-dire réfléchir au maximum la lumière. De plus, puisqu'ils forment une structure poreuse, ils permettent d'obtenir une meilleure opacité du papier. Finalement, plus la granulométrie du pigment déposé à la surface du papier sera fine, meilleure sera la qualité d'impression.

Les deux principaux types de pigments utilisés dans l'industrie papetière sont : le kaolin et le carbonate de calcium. Le kaolin est de loin le plus utilisé en Amérique du Nord. Il est essentiellement composé d'un silicate d'alumine hydraté ou déshydraté ($Al_2O_3 \cdot 3SiO_2 \cdot xH_2O$). Il se caractérise par une forme hexagonale plane d'environ 2 µm de diamètre. Afin d'obtenir la forme déshydratée ou calcinée, le kaolin est chauffé à haute température (800°C). De plus, lorsque les particules de kaolin subissent un cisaillement mécanique sévère, elles sont fragmentées suivant leur épaisseur en unités plus petites. On parle alors de kaolin délaminé. Industriellement, on attribue aux particules de kaolin un nombre de 1 à 4 en fonction de leur distribution de taille (tableau 1.1). Les sauces de couchage sont composées de 50 à 70% massique de kaolin.

Tableau 1.1 Quelques propriétés des kaolins (Kouris et Kocurek, 1990; Walter, 1993).

Kaolin	Description
No. 1 ultra fin	95-100% < 2 µm Blancheur élevée
No. 1	90-94% < 2 µm
No. 2	80-90% < 2 µm
No. 3	70-80% < 2 µm
No. 4	65-70% < 2 µm Agent de remplissage

Remarque: il est courant d'ajouter le suffixe 90 au numéro du pigment afin de spécifier une blancheur supérieure à 90 (ex.: No.1 ultra fin 90).

Le carbonate de calcium ($CaCO_3$) est traditionnellement utilisé en Europe. Il gagne cependant du terrain en Amérique du Nord car il est maintenant disponible à faible coût. De plus, ce pigment possède une meilleure capacité opacifiante que le kaolin. Pour cette raison, son utilisation se fait de paire avec le kaolin. Il peut représenter jusqu'à 20% massique de la sauce de couchage.

De tous les pigments existants, le bioxyde de titane (TiO_2) possède la plus grande capacité opacifiante et confère au papier une grande blancheur. Il est le pigment le plus utilisé après le kaolin et le carbonate de calcium. Cependant, l'emploi de ce pigment est limité à cause de son coût élevé. Pour cette raison, il ne compose qu'environ 1 à 2% massique de la formulation finale. D'autres pigments peuvent être utilisés en faible proportion: l'oxyde d'aluminium hydraté, le satin blanc, la silice amorphe ou précipitée, les particules de plastique, les pigments structurés, le talc... (Walters, 1993)

Liants

Les liants (ou adhésifs) permettent de lier la suspension de pigments et d'assurer l'adhérence entre la couche de sauce et le support papier. On les divise en deux catégories: les liants naturels et synthétiques. Parmi les liants naturels, les plus courants par ordre d'importance sont les amidons (maïs, blé ou pomme de terre), la protéine de soja et la caséine. En fonction des propriétés désirées de la couche, les papetières favorisent l'emploi d'amidon modifié chimiquement. Par exemple, l'amidon hydroxyéthylène (amidon-O-CH_2-CH_2-OH) possède une viscosité stable et une bonne résistance aux graisses. Pour leur part, les latex sont les adhésifs synthétiques les plus utilisés. Le plus commun est sans aucun doute le styrène-butadiène (S/B). Plusieurs autres latex peuvent être employés par exemple l'acétate de polyvinyle (PVAc), les acryliques et leurs dérivés. On peut aussi utiliser l'alcool de polyvinyle (PVA). En fonction du type de latex, on pourra contrôler la porosité et la rigidité de la couche. Contrairement aux liants naturels qui sont hydrosolubles, les liants synthétiques sont des particules qui se retrouvent en suspension dans la sauce de couchage.

Additifs

Une multitude d'additifs peuvent être employés en fonction des caractéristiques désirées de la sauce de couchage. Par exemple, les dispersants permettent d'éviter la formation d'agrégats de pigments dans la suspension. Les modificateurs de viscosité visent à contrôler la viscosité de la sauce et sa capacité à la rétention d'eau. Le carboxyméthylcellulose (CMC) fait partie de cette catégorie. L'ajout d'un lubrifiant tel le stéarate de calcium permet de limiter le phénomène de peluchage ou d'arrachage de fibres à l'étape du calandrage. Pour leur part, les insolubilisants sont ajoutés afin d'améliorer la résistance à l'eau des papiers. D'autres d'additifs peuvent être employés : les biocides, les régulateurs de pH, les agents anti-mousse... (Walters, 1993)

Pour faire suite à cette description sommaire des principaux constituants d'une sauce de couchage, nous nous proposons dans la prochaine section de décrire les principales étapes de préparation de cette sauce.

3. Préparation des sauces de couchage

3.1 Description du procédé de mélange

L'endroit réservé à la préparation de la sauce de couchage dans une usine papetière est appelé cuisine de couchage (figure 1.3). À cet endroit, on procède au mélange des

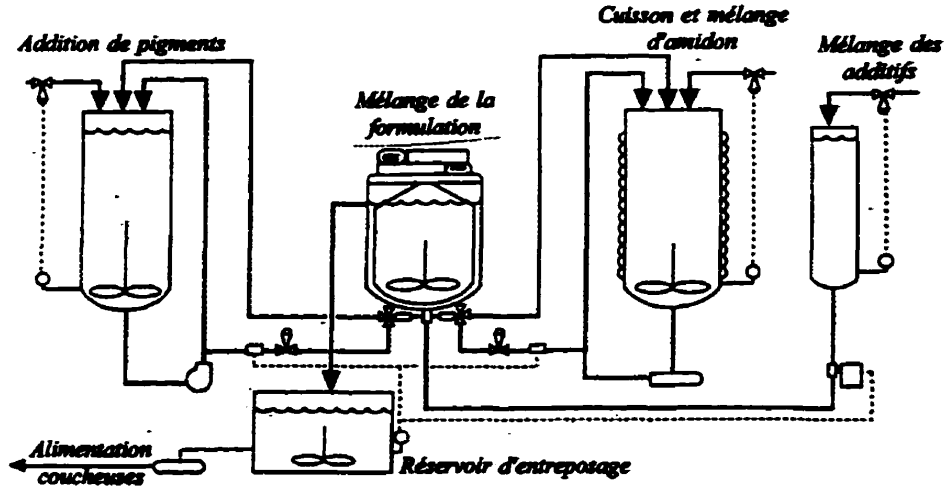


Figure 1.3 Schéma d'une cuisine de couchage typique.

différents ingrédients de la formulation. Avant les années 1970, la majorité de ces étapes étaient effectuées en mode discontinu. Au fil des ans, cette façon de faire perdit en popularité car la préparation d'un seul lot de sauce de couchage nécessite plusieurs heures. De plus, on se doit d'entreposer des quantités importantes de sauces avant que puisse démarrer l'unité de couchage. Avec l'amélioration des méthodes d'asservissement, la majorité des cuisines de couchage fonctionnent maintenant en régime semi-continu. De façon générale, ce procédé peut être décomposé en quatre étapes, à savoir :

1) la cuisson et le mélange de l'amidon,
2) le mélange des additifs,
3) le mélange de la suspension de pigments,
4) le mélange de la formulation.

En ce qui a trait à la première étape, l'amidon subit un traitement en fonction de sa structure chimique. Lorsqu'il est vendu sous une forme modifiée, par exemple l'amidon dextrinisé ou oxydé, le seul traitement nécessaire en usine est le chauffage et le mélange. Par contre, à partir de sa forme brute, il doit subir une dépolymérisation afin d'abaisser sa masse moléculaire et par le fait même sa viscosité. Cette étape peut être effectuée par différentes méthodes. On peut soit chauffer par injection de vapeur dans un serpentin à l'intérieur du réservoir ou une chemise couvrant la paroi du pot de mélange. Ce procédé nécessite une bonne agitation afin d'éviter une cuisson trop sévère sur les parois chauffantes. Par contre, il y a peu de contamination possible car la vapeur n'entre pas en contact avec l'amidon. On peut aussi utiliser la cuisson par insufflation de vapeur vive dans le coeur du réacteur. Cette entrée de vapeur à l'avantage de favoriser un certain degré d'agitation dans la cuve de mélange mais rend possible la contamination du milieu. Dans les deux cas, l'amidon est chauffé à une température de 80-100°C afin de le faire gonfler et éclater. Une cuisson trop longue affecte la viscosité et la résistance mécanique du produit et entraîne un changement de sa couleur (brunissement). Finalement, cette dépolymérisation peut aussi être effectuée par

voie enzymatique à partir de l'enzyme α-amylase. Bien que la rhéologie de l'amidon soit complexe et évolutive en fonction du temps de mélange, très peu d'informations sont disponibles dans la littérature concernant les problèmes d'agitation de ce produit. La situation est identique dans le cas du mélange des additifs. Cela ne signifie pas pour autant que ces problèmes sont inexistants, mais d'autres problèmes jugés plus sérieux sont rencontrés lors de la préparation de la formulation.

La difficulté majeure lors de la préparation de la formulation de la sauce se situe au niveau du mélange de la suspension de pigments. La prochaine section décrit la problématique de mélange d'une suspension concentrée de pigments.

3.2 Problématique de mélange d'une suspension concentrée de pigments

Lors de la préparation d'une suspension concentrée de pigments, il existe deux étapes critiques : le mouillage des pigments et l'homogénéisation de la suspension.

Le mouillage est une étape difficile à réaliser car les pigments (sous forme de poudre) ont tendance à emprisonner de l'air. Par le fait même, les pigments flottent à la surface de l'eau. De plus, à concentration élevée en pigments, la mouillabilité diminue car on approche le degré d'entassement maximal (encombrement stérique limite) des particules dans la suspension. Certains auteurs mentionnent que la mouillabilité des pigments est facilitée par la formation d'un vortex dans la cuve d'agitation, entraînant du même coup les particules dans le solvant (eau) (Makinen et Nordstrom, 1993). Une étude récente (Duquesnoy et al., 1995) mentionne que la mouillabilité est grandement améliorée par l'utilisation des tiges de mélange situées à la surface libre eau-pigments (figure1.4). Ces tiges permettent de fouetter les pigments dans le solvant. On y mentionne que cette configuration permet d'incorporer les pigments très rapidement tout en utilisant une faible puissance d'agitation.

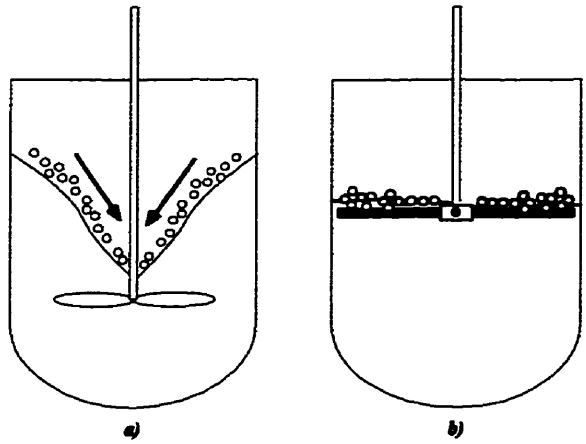


Figure 1.4 Deux technologies de mouillage des pigments: a) par formation d'un vortex et b) par utilisation de tiges de mélange à la surface libre eau-pigments.

Une fois le mouillage complété, la suspension doit être homogénéisée. Pour ce faire, il faut d'abord briser les grumeaux ou les flocs formés lors du mouillage et les distribuer uniformément à l'intérieur du réservoir. Afin de faciliter cette étape, un agent défloculant ou un dispersant est généralement utilisé. Le dispersant a pour objectif de minimiser les forces d'attraction entre les particules de pigments et de stabiliser la suspension une fois l'agitation terminée. Le dosage du dispersant doit être effectué avec précaution car un excès ou un manque de dispersant peut inhiber l'effet désiré (Walters, 1993; Wypych, 1993). De plus, l'agitateur choisi doit être en mesure de minimiser la sédimentation des particules dans le fond de la cuve. Si cette sédimentation se produit, l'agitateur devra permettre la remise en suspension des particules et favoriser leur distribution uniforme dans l'ensemble du réservoir. Une mauvaise dispersion dans la cuve de mélange peut entraîner des problèmes de machinabilité lors du dépôt de la sauce sur le papier. En effet, cette mauvaise dispersion peut causer des fluctuations rhéologiques (ou des instabilités) sous la lame et entraîner différents défauts d'application (Gutoff, 1993).

Plusieurs types d'agitateur sont utilisés dans l'industrie afin de disperser les agrégats de

particules et obtenir le degré d'homogénéisation désiré. Voici une brève description de quelques uns de ces mobiles d'agitation en fonction du type de procédé de fabrication:

Procédés discontinus

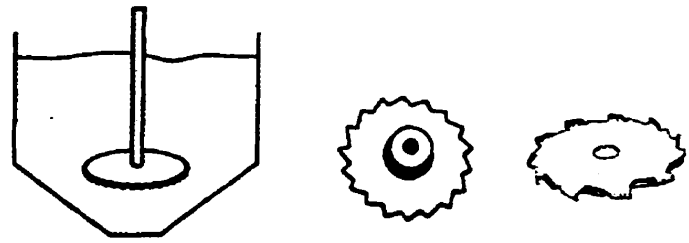


Figure 1.5 Turbine défloculeuse de type Cowles.

a) La turbine Cowles : cette turbine défloculeuse est essentiellement composée d'un disque muni de dents en périphérie. Ce type de mobile fonctionne à une vitesse tangentielle en bout de pales de l'ordre de 20-25 m/s afin de créer une vitesse de déformation élevée dans la suspension. On l'utilise principalement pour ses capacités de défloculation des grumeaux ou des agrégats présents dans le pot de mélange.

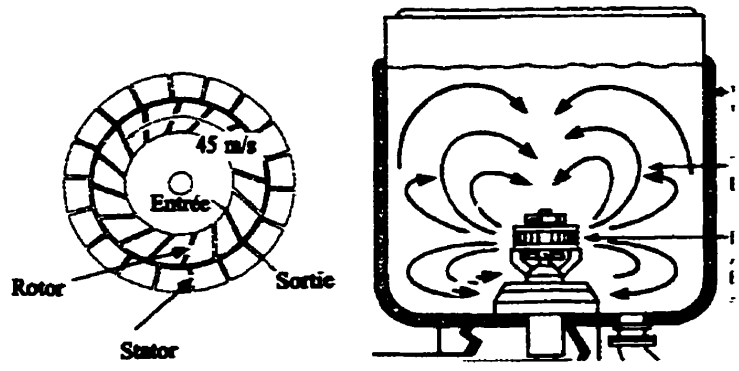


Figure 1.6 Turbine rotor-stator de type Kady-Mill.

b) La turbine rotor-stator : cet agitateur est composé d'une cage immobile possédant de nombreuses fentes (le stator) et d'un rotor, qui comprend lui aussi, une cage munie de fentes

étroites solidaire d'une turbine axiale. Cette turbine, généralement une hélice marine, fonctionne à une vitesse périphérique de l'ordre de 45 m/s. Elle force les agrégats à passer à travers le rotor et puis le stator, favorisant par le fait même la désintégration des agrégats de particules par impact et attrition.

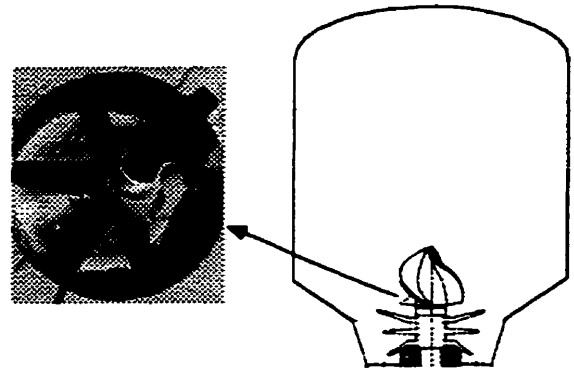


Figure 1.7 Turbine déliteur de la compagnie Cellier.

c) Turbine de type déliteur : ce type d'agitateur est constitué d'une turbine tri-étagée assurant l'effet de cisaillement dans la partie conique de la cuve. De plus, cette turbine est surmontée d'un pulseur, qui de par son profil, permet un pompage axial. Elle fonctionne aussi à des vitesses très élevées.

Procédés discontinus ou continus

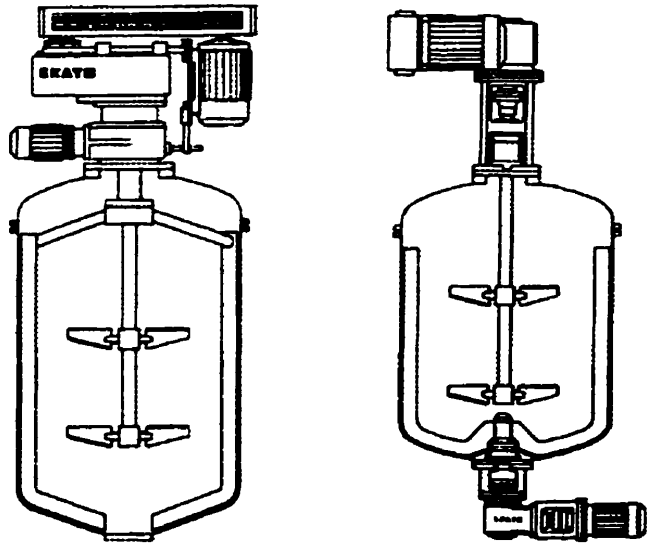


Figure 1.8 Agitateurs coaxiaux.

d) Les agitateurs coaxiaux à double fonctionnalité: ce type d'agitateur gagne en popularité dans l'industrie papetière pour la préparation des suspensions concentrées de pigments. Cette technologie est développée par de nombreux équipementiers, dont les compagnies Cellier et VMI en France, Ekato en Allemagne et DCI aux États-Unis. Ces agitateurs fonctionnent en régimes continu et discontinu, pour des pourcentages massiques de solide variant entre 35 et 70%. Le principe repose sur l'emploi de deux moteurs d'agitation. Les agitateurs centraux de type turbine tournent à haute vitesse et ont pour fonction de mélanger et disperser. En périphérie du pot de mélange, un mobile raclant tournant à basse vitesse permet la remise en suspension et le nettoyage des parois du réservoir. Les deux mobiles d'agitation peuvent soit tourner dans la même direction (Ekato) ou dans des directions opposées (Cellier).

Dans tous les systèmes d'agitation décrits précédemment, on constate que la dispersion ou l'homogénéisation des pigments est effectuée à très grande vitesse et nécessite par le fait même une puissance d'agitation très élevée. De plus, la géométrie et la cinématique des agitateurs sont relativement complexes. La rhéologie des suspensions concentrées de kaolin présentent un comportement complexe, ces conditions opératoires peuvent favoriser la formation de cavernes (zones mortes) dans le pot de mélange (Eklund et Teirfolk, 1981; Salomon et al., 1981). De plus, à très grande vitesse, il risque de se produire un auto-échauffement par dissipation visqueuse.

Dans les systèmes d'agitation coaxiaux, on peut légitimement se demander quelle est l'influence des paramètres suivants sur la puissance d'agitation, l'uniformité de distribution de la suspension de particules (homogénéité) et le patron d'écoulement dans la cuve d'agitation :

- le rapport de vitesses entre les agitateurs centraux et périphérique,
- la géométrie des agitateurs,
- la direction angulaire des mobiles d'agitation centraux et périphérique,
- la rhéologie du fluide agité,...

Bien que ce système d'agitation soit bien adapté à la préparation de suspensions concentrées de pigments, on utilise cependant la force au lieu de la ruse afin de préparer de telles suspensions. Par exemple, la compagnie Cellier mentionne que la préparation de 1 mètre cube d'une sauce de couchage nécessite un moteur de 10 hp pour l'ancre et de 30 hp pour les turbines. Peut-on diminuer la puissance d'agitation tout en préservant la qualité du mélange de la suspension ? De plus, les mesures expérimentales nécessaires à la conception de tels systèmes sont souvent effectuées en laboratoire sur des prototypes de petites tailles. Des lois d'extrapolation sont ensuite utilisées pour la conception des systèmes industriels car les manufacturiers ont aucune connaissance de l'hydrodynamique pour ce type de mélangeur. Par conséquent, l'empirisme et l'apprentissage par essais-erreurs gouvernent actuellement la conception de tels systèmes d'agitation.

4. Objectif du présent travail

Nous nous proposons dans ce travail d'aborder ces questions. Pour ce faire, notre étude portera sur la caractérisation de l'hydrodynamique à l'intérieur du pot de mélange des systèmes d'agitation coaxiaux. Nous essayerons de définir le rôle des agitateurs centraux et périphérique sur des paramètres macroscopiques tels la puissance d'agitation et la qualité de dispersion. Cette caractérisation sera menée de front à l'aide d'essais expérimentaux et numériques.

- CHAPITRE II -

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Dans ce chapitre, nous nous proposons de faire une étude bibliographique des principaux travaux traitant du mélange solide-liquide. Dans un premier temps, nous décrirons les principales forces susceptibles d'influencer le mouvement des particules dans une cuve d'agitation. Par la suite, nous discuterons du comportement rhéologique des suspensions de particules. Dans la seconde partie, nous expliciterons les principaux modèles et mécanismes proposés dans la littérature pour le mélange et la distribution des particules solides dans une cuve agitée. Nous allons aussi présenter les travaux traitant de la problématique de la préparation des sauces de couchage. Finalement, nous présenterons les principaux travaux de modélisation des écoulements biphasiques (solide-liquide) dans des systèmes d'agitation et la remise en suspension de particules dans une conduite horizontale.

1. Forces agissant sur les particules

Une suspension est considérée comme un système colloïdal lorsque les particules qui la composent possèdent un rapport surface/volume très élevé (Masliyah, 1994). De façon générale, une suspension possédant des particules de diamètre inférieur à 1 µm fait partie de cette catégorie. Puisqu'une suspension colloïdale est caractérisée par de petites particules, les forces à faible rayon d'action appelées aussi forces colloïdales pourront exercer une influence significative lorsque la concentration volumique en solide devient élevée (encombrement stérique important). Voici le sommaire des principales forces agissant sur les particules d'une suspension (Tableau 2.1) :

Tableau 2.1 Forces agissant sur les particules d'une suspension (Masliyah, 1994).

Force	Expression	Paramètres
Brownienne (colloïdale)	$F_b = k_B T_a / R_p$	k_B : constante de Boltzmann, T_a: température absolue (K), R_p: rayon de la particule
Électrique (colloïdale)	$F_e = \varepsilon \varepsilon_o \zeta^2$	ε : constante diélectrique, ε_o: permittivité du vide, ζ : potentiel zêta
Attractive ou de Van der Waals (colloïdale)	$F_a = A/R_p$	A: constante d'Hamaker
Visqueuse	$F_v = \mu_f R_p U$	μ_f: viscosité du fluide suspendant U: vitesse de la particule
Inertielle	$F_i = \rho_f R_p^2 U^2$	ρ_f: masse volumique du fluide suspendant
Gravitationnelle	$F_g = R_p^3 \Delta\rho g$	$\Delta\rho$: différence de masse volumique entre la particule et le fluide suspendant g: la force gravitationnelle

a. les forces browniennes : ces forces sont causées par l'agitation thermique des molécules et provoquent une diffusion aléatoire des particules.

b. les forces électriques : si le fluide suspendant contient des ions, il se forme à la surface des particules une double couche ionisée. À l'aide d'une méthode d'électrophorèse, il est possible d'obtenir le potentiel électrique (ζ) à la surface des particules. Ce potentiel est le paramètre fondamental contrôlant les problèmes d'agglomération. En général, les forces électriques sont des forces de répulsion.

c. les forces d'attraction : aussi appelées forces de London-Van der Waals, ces forces sont d'origine électromagnétique et se produisent à l'échelle atomique en raison des dipôles moléculaires permanents. Ces forces sont caractérisées par la constante d'Hamaker (A) qui est directement reliée aux propriétés polarisantes des molécules.

d. les forces visqueuses et inertielles : ces forces sont directement reliées au déplacement des particules au sein du fluide suspendant.

e. les forces de gravité : si la masse volumique de la suspension est supérieure à celle du fluide suspendant, alors les particules sédimentent sous l'effet de la gravité. Afin de bien comprendre les mécanismes de sédimentation, nous décrirons brièvement la sédimentation d'une particule isolée. Par la suite, nous expliciterons le phénomène de la sédimentation en présence de plusieurs particules aussi appelée sédimentation entravée.

e.1 Sédimentation d'une particule isolée

Soit le diagramme des forces mises en jeu lors de la sédimentation d'une particule sphérique de diamètre D_p et de masse volumique ρ_s tombant dans un fluide suspendant de masse volumique ρ_l (figure 2.1).

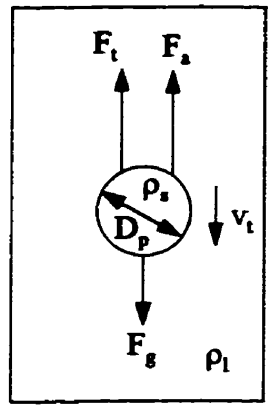


Figure 2.1 Diagramme des forces sur une particule sphérique en chute libre.

F_t représente la force de friction visqueuse, F_a la poussée d'Archimède et F_g la force de gravité. À l'équilibre, la somme de ces forces s'annule et on retrouve, après manipulation, l'expression classique de la vitesse de sédimentation (v_t) en fonction de différents paramètres physiques et géométriques (Bird et al., 1960) :

$$v_t = \left[\frac{4}{3} \frac{g}{C_d} \left(\frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l} \right) D_p \right]^{1/2} \qquad [2.1]$$

Pour une particule sphérique, le coefficient de friction (C_d) est directement relié au nombre de Reynolds, celui-ci exprimant le rapport des forces d'inertie aux forces visqueuses et est défini par

$$\mathbf{Re}_p = \frac{D_p v_t \rho_l}{\mu_l} \qquad [2.2]$$

où μ_l est la viscosité du fluide suspendant. Connaissant l'expression du coefficient de friction pour chaque régime d'écoulement tel que défini au tableau 2.2, on obtient, par substitution dans l'équation [2.1], la vitesse terminale de chute (v_t) pour chacun de ces régimes :

Tableau 2.2 Coefficient de friction en fonction du régime d'écoulement (Bird et al., 1960).

Régime	$\mathbf{Re_p}$	$\mathbf{C_d}$
Stokes	$Re_p < 0.2$	$C_d = 24/Re_p$
Transition	$0.2 < Re_p < 500$	$C_d \cong 18.5/Re_p^{0.6}$
Newton	$Re_p > 500$	$C_d \cong 0.44$

- Régime de Stokes : $$v_t = \frac{D_p^2 g}{18}\left(\frac{\rho_s - \rho_l}{\mu_l}\right) \qquad [2.3]$$

- Régime de transition : $$v_t \cong \left[\frac{4g}{55.5}\left(\frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l}\right)^{5/7}\right]\left[\frac{\rho_l}{\mu_l}\right]^{3/7} D_p^{8/7} \qquad [2.4]$$

- Régime de Newton : $$v_t \cong \left[3 D_p g\left(\frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l}\right)\right]^{1/2} \qquad [2.5]$$

Si les particules ne sont pas sphériques, les expressions précédentes font intervenir la sphéricité (Ψ), c'est-à-dire le rapport de la surface de la sphère équivalente possédant le même volume que la particule par la surface de cette même particule (Browns, 1950). Pour une

particule sphérique, la sphéricité est égale à l'unité. Pour différentes valeurs du paramètre de sphéricité, on construit une famille de courbes du coefficient de friction en fonction du nombre de Reynolds. De façon générale, pour un même nombre de Reynolds, on observe une augmentation du coefficient de friction lorsque la sphéricité diminue.

Il est intéressant de mentionner que la vitesse terminale de chute est souvent évaluée à l'aide du nombre d'Archimède. Ce nombre sans dimension exprime le rapport des forces de traînée sur les forces de viscosité, à savoir

$$Ar = C_d \cdot \mathrm{Re}^2 \neq f(v_t) \qquad [2.6]$$

et ne dépend plus de la vitesse terminale de chute (v_t). Par substitution, on obtient

$$Ar = \frac{4}{3} D_p^3 (\rho_s - \rho_l) \frac{\rho_l g}{\mu_l^2} \qquad [2.7]$$

Dans la littérature, ce nombre sans dimension est corrélé avec le nombre de Reynolds (Coulson et Richardson, 1978). Par conséquent, la connaissance du nombre d'Archimède nous permet de déterminer la vitesse terminale de chute par l'entremise du nombre de Reynolds.

e.2 Sédimentation entravée

Dans le cas d'une suspension à faible concentration en particules, la vitesse de sédimentation peut être évaluée à l'aide des équations précédentes. Par contre, lorsque la concentration est élevée (>2%) (Blanc et Guyon, 1991), les interactions particule-particule deviennent significatives. On définit alors la vitesse de sédimentation non plus par rapport au référentiel de la particule mais par rapport à l'interface solide-liquide tel qu'illustré à la figure 2.2.

Plusieurs auteurs (Richardson et Zaki, 1978; Coulson et Richardson; 1978; Davis et Acrivos, 1985) ont déterminé, pour différentes morphologies de particules et différentes

propriétés physiques, la vitesse de l'interface solide-liquide (v_ϕ) sous l'hypothèse que les

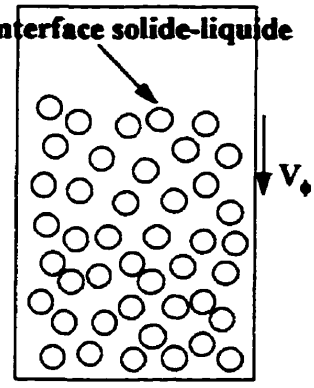


Figure 2.2 Vitesse de sédimentation de l'interface solide-liquide (v_ϕ).

forces colloïdales sont négligeables; celle-ci s'écrit

$$v_\phi = v_t(1-\phi)^n \qquad [2.8]$$

où ϕ représente la fraction volumique en solide de la suspension et n un paramètre empirique relié au nombre de Reynolds de la particule (figure 2.3).

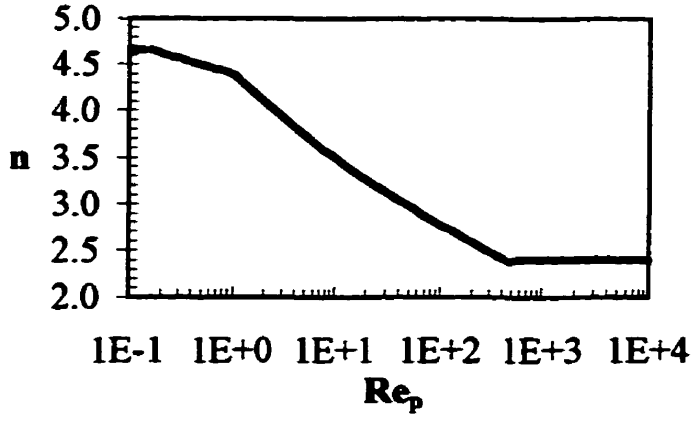


Figure 2.3 Valeur de l'exposant n dans l'expression de Richardson et Zaki.

On constate que les suspensions fortement concentrées possèdent une vitesse de sédimentation faible.

Les développements précédents s'appliquent pour un fluide suspendant de viscosité constante

(fluide Newtonien) et sous l'hypothèse que les forces colloïdales sont négligeables. Lorsque le fluide suspendant est rhéologiquement complexe, aucune théorie ou loi existante permet de quantifier le phénomène de sédimentation de façon exacte. Dans de telles conditions, on a généralement recours à des essais expérimentaux afin de déterminer la vitesse de sédimentation de l'interface solide-liquide (Patton, 1979).

f. les forces induites par cisaillement :

Le phénomène des forces induites par cisaillement a été observé pour la première fois par Gadala-Maria et Acrivos (1980). À l'aide d'un rhéomètre de type Couette, ils ont mesuré la viscosité d'une suspension à 45% volumique de particules de polystyrène (ϕ=0.45) possédant un diamètre de 40-50 µm et une masse volumique de 2300 kg/m^3 dans une huile de silicone. Ils furent surpris de constater que la viscosité de la suspension augmentait dans les premières minutes puis chutait dans les heures suivantes (30-40 heures) pour atteindre une valeur asymptotique. Après maintes expériences et recherches minutieuses de la part de plusieurs chercheurs (Acrivos, 1994; Acrivos et al., 1993; Leighton et Acrivos, 1986, 1987), ce phénomène a été directement relié à la remise en suspension du lit de particules déposées au fond du rhéomètre. Dans des conditions de régime laminaire, les auteurs stipulent que les particules migrent des régions de haut cisaillement vers les régions de bas cisaillement et des régions de haute concentration en particules vers les régions de basse concentration. Afin de quantifier ce mécanisme, ils supposent un équilibre entre le flux de particules dû à la sédimentation (N_g) et le flux de particules remises en suspension par diffusion (N_d). À l'équilibre, le bilan de matière prend la forme suivante (en supposant le régime d'écoulement de Stokes):

$$N_g = N_d \qquad [2.9]$$

$$v_s \phi = -D(\dot{\gamma}, \phi)\frac{d\phi}{dz} \qquad [2.10]$$

$$\frac{D_p^2 g \Delta\rho}{18\mu_l} f(\phi)\phi = -\dot{\gamma} R_p^2 \hat{D}(\phi)\frac{d\phi}{dz} \qquad [2.11]$$

où $\dot{\gamma}$ représente la vitesse de cisaillement au sein de la suspension. Le paramètre f(ϕ) permet de prendre en compte l'encombrement stérique tel que décrit par Richardson et Zaki. Pour sa part, $\hat{D}(\phi)$ représente le coefficient de diffusion des particules. En se basant sur des analyses unidimensionnelles effectuées pour un écoulement entre deux plaques parallèles et dans un appareil de Couette, les auteurs ont déduit les expressions suivantes pour f(ϕ) et $\hat{D}(\phi)$:

$$f(\phi)=\frac{(1-\phi)}{\mu_r(\phi)} \qquad [2.12]$$

$$\hat{D}(\phi)=\frac{1}{3}\phi^2\left(1+\frac{1}{2}e^{8.8\phi}\right) \qquad [2.13]$$

où μ_r représente la viscosité relative de la suspension, c'est-à-dire le rapport entre la viscosité de la suspension (μ_s) et la viscosité du fluide suspendant (μ_f). Plusieurs modèles sont utilisés afin d'estimer la viscosité relative d'une suspension.

La remise en suspension est une fonction unique du nombre de Shields (A_S) qui est le rapport des forces hydrodynamiques sur les forces de gravité (Acrivos et al., 1993) :

$$A_s=\frac{9}{2}\frac{\mu_f\dot{\gamma}}{g\Delta\rho h_o} \qquad [2.14]$$

où h_o est la hauteur initiale du lit de particules au repos. Cette remise en suspension sera d'autant plus grande que le nombre de Shields est élevé.

En régime laminaire et lorsque les forces colloïdales sont négligeables ($D_p > 1\mu m$), l'effet d'un cisaillement produit une remise en suspension du lit de particules et une distribution non uniforme de leur concentration. En régime turbulent, ce phénomène est inhibé par le transport convectif de la matière. Cependant, ce phénomène peut jouer un rôle important dans la sous-couche laminaire près des parois du réservoir.

2. Propriétés rhéologiques des suspensions de particules

La rhéologie des suspensions de particules est un domaine de recherche très actuel. Cet intérêt est motivé par le grand nombre de procédés de fabrication impliquant des suspensions de particules, par exemple, les peintures, les propergols solides, la cristallisation, l'extraction solide-liquide, le traitement des eaux usées, la polymérisation en suspension, et finalement les suspensions concentrées de pigments dans l'industrie papetière. Cette section portera sur les principaux modèles rhéologiques disponibles afin de prédire la viscosité des suspensions de particules. En fonction du type d'interactions rencontrées au sein d'une suspension, on distingue les suspensions newtoniennes et non newtoniennes.

2.1 Suspensions newtoniennes

Les suspensions newtoniennes sont généralement caractérisées par la prédominance des forces hydrodynamiques par rapport aux forces colloïdales. De plus, le fluide suspendant se comporte comme un fluide newtonien, c'est-à-dire que sa viscosité est constante et ne varie pas avec la vitesse de cisaillement. Le tableau 2.3 présente différents modèles de prédiction de la viscosité relative ($\mu_r=\mu_s/\mu_l$) d'une suspension en fonction de sa concentration en particules. Pour de très faibles concentrations (dilution infinie), l'augmentation de la viscosité de la suspension est donnée par la relation d'Einstein. Ce modèle, qui possède un fondement théorique, prédit une augmentation linéaire de la viscosité en fonction de la fraction volumique en particules (ϕ). Pour des concentrations intermédiaires ou semi-diluées, Batchelor introduit dans le modèle d'Einstein un terme du second degré pour la fraction volumique. Ces deux modèles supposent une suspension de particules parfaitement sphériques, rigides et monodisperses. Lorsque l'encombrement stérique en particules devient important, plusieurs modèles empiriques ou phénoménologiques peuvent être utilisés.

Tableau 2.3 Quelques modèles rhéologiques pour des suspensions newtoniennes.

Concentration	Auteurs	Modèle
Dilution infinie	Einstein, 1906	$\mu_r = (1+2.5\phi)$
Semi-diluée	Batchelor, 1972	$\mu_r = (1+2.5\phi+6.2\phi^2)$
Concentrée	Thomas, 1965	$\mu_r = (1+2.5\phi+10.05\phi^2+A_T e^{B\phi_T})$ A_T=0.00273, B_T=16.6
	Chong et al., 1971	$\mu_r = \left[1+0.75\left(\frac{\phi/\phi_m}{1-\phi/\phi_m}\right)\right]^2$
	Eiler, 1941	$\mu_r = \left(1-\frac{2.5\phi}{2(1-b\phi)}\right)^2$ $b=1/\phi_m$
	Krieger et Dougherty, 1959	$\mu_r = \left(1-\phi/\phi_m\right)^{-[\eta]\phi_m}$
	Quémada, 1972	$\mu_r = \left[1-\frac{1}{2}k\phi\right]^2$ k=paramètre de structure

Le modèle phénoménologique de Krieger et Dougherty est très utilisé. Ces auteurs introduisent la viscosité intrinsèque [η] comme paramètre de leur modèle

$$[\eta] = \lim_{[\phi]\to 0}\left[\frac{\mu_s/\mu_l - 1}{\phi}\right] \qquad [2.15]$$

D'autre part, le modèle phénoménologique de Quémada est très intéressant car il s'appuie sur un principe d'optimisation de l'énergie de dissipation visqueuse lors de l'écoulement d'une suspension de particules.

Un des paramètres apparaissant dans ces modèles est la fraction volumique maximale de particules (ϕ_m) que la suspension peut contenir. Ce paramètre est fonction de la forme des particules et de sa granulométrie (polydispersité). Barnes et al. (1989) mettent en relief la variation de la fraction volumique maximale ainsi que la viscosité intrinsèque de quelques suspensions (tableau 2.4).

Tableau 2.4 Fraction volumique maximale (ϕ_m) et viscosité intrinsèque [η] en fonction du type de particules.

Particules	[η]	ϕ_m
Sphères (submicronique)	2.7	0.71
Sphères (40 μm)	3.28	0.61
Fibres de verre :		
- L/D = 7	3.8	0.374
- L/D = 14	5.03	0.26
- L/D = 21	6.0	0.233

2.2 Suspensions non newtoniennes

Lorsque les forces d'interactions particulaires ou colloïdales deviennent importantes au sein de la suspension voire même dominantes par rapport aux forces hydrodynamiques, la rhéologie du milieu devient alors très complexe. Ces interactions engendrent souvent la formation d'agrégats de particules qui sous l'effet d'un cisaillement, peut être amplifiée ou se désagréger. De plus, la formation de ces structures complexes au sein de la suspension de particules peut varier dans le temps et dépendre de la nature des écoulements.

La figure 2.4 présente le comportement typique de la viscosité d'une suspension colloïdale en

fonction de la vitesse de cisaillement et de la fraction volumique des particules en régime permanent (Barnes et al., 1987, 1989; Shamlou, 1993). À faible vitesse de cisaillement, on note un effet rhéofluidifiant, c'est-à-dire une diminution de la viscosité avec l'augmentation de la vitesse de cisaillement. À l'intérieur de cette gamme, l'indice de rhéofluidifiance se situe généralement entre 0,2 et 0,4. On note aussi que l'effet rhéofluidifiant est accentué avec l'augmentation de la fraction volumique. En s'appuyant sur le concept d'unité structurale (les agrégats), Quémada relie la diminution de viscosité due à la désagrégation des flocs avec l'augmentation du cisaillement. À des vitesses de cisaillement élevées, un effet rhéoépaississant ou dilatant apparaît. Gillespie (1966) explique ce phénomène par une augmentation des collisions entre les particules favorisant la formation d'agrégats de plus grandes tailles. De plus, on remarque que l'effet dilatant est beaucoup plus important à fraction volumique élevée. Bien que peu de travaux ont porté sur le comportement des suspensions à très haut cisaillement, il semble que, dans un tel cas, la viscosité chute à nouveau, ce phénomène étant causé par la désagrégation des flocs formés à l'étape du rhéoépaississement.

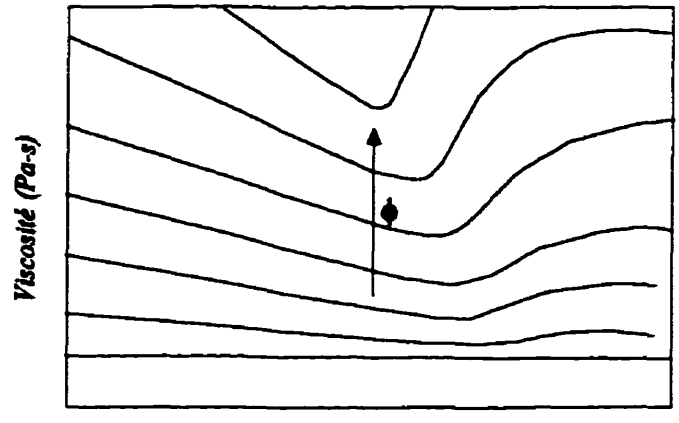


Figure 2.4 Courbe de viscosité typique d'une suspension de particules.

La partie rhéofluidifiante de la courbe de viscosité peut être représentée à l'aide de plusieurs modèles existants dans la littérature, par exemple les modèle de Carreau, de Cross ou

d'Ostwald-De-Waele (loi de puissance) (Tanner, 1985). Ces modèles possèdent de 2 à 4 paramètres mais ne prennent pas en compte la variation de la viscosité avec la fraction volumique en solide. Afin de pallier ce problème, Quémada (Garin et al., 1994; Quemada, 1978) a développé un modèle semi-empirique à 4 paramètres dérivé de la forme newtonienne:

$$\eta_r(\phi,\dot{\gamma}) = \left[1 - \frac{1}{2}k(\dot{\gamma})\phi\right]^2 \qquad [2.16]$$

où k($\dot{\gamma}$) est défini comme la viscosité intrinsèque de la suspension. Quémada a démontré que ce paramètre est relié à la cinétique d'agrégation et de désagrégation des particules en fonction du cisaillement. Il s'exprime par la relation

$$k(\dot{\gamma}) = k_\infty + \frac{k_0 - k_\infty}{1 + \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c}\right)^p} \qquad [2.17]$$

où k_o, k_∞, $\dot{\gamma}_c$ et p représentent des paramètres de structures. Ce modèle rhéologique à l'avantage de très bien approcher les données expérimentales (Lapasin, 1985). Par contre, il ne peut représenter à la fois un effet rhéofluidifiant et rhéoépaississant.

Pour ce faire, Roper et Attal (1993) ont introduit un modèle à 6 paramètres permettant de prendre en compte ces deux phénomènes. Ce modèle est en fait la combinaison des modèles de Cross et de Gillespie:

$$\eta_s = \eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{\left(1 + k_1\dot{\gamma}^n\right)} + \frac{k_2\dot{\gamma}}{\left(k_3 + \dot{\gamma}\right)^2} \qquad [2.18]$$

où k_1 et n sont les paramètres de la loi de puissance classique, η_o et η_∞ les viscosités de plateau à bas et haut cisaillement respectivement, k_2 un facteur pour l'amplitude du rhéoépaississement et k_3 la vitesse de cisaillement critique à partir duquel débute l'effet rhéoépaississant.

Finalement, plusieurs autres effets rhéologiques sont attribués aux suspensions colloïdales

concentrées. Par exemple, Alessandrini et al. (1982) mentionnent que les suspensions de kaolin en milieu aqueux présentent des effets thixotropes. Ces suspensions forment des structures délicates qui sont affectées par la vitesse de cisaillement. Cette modification de structure s'opère de façon graduelle dans le temps. Aussi, ces auteurs démontrent que ces suspensions possèdent un seuil de contrainte en dessous duquel elles ne s'écoulent pas. Ces suspensions réagissent alors comme un solide. Engström et Rigdahl (1987) ont mis en évidence le comportement viscoélastique d'une suspension de carbonate de calcium et d'un ajout de CMC. Carreau et Lavoie (1993) ont testé plusieurs formulations de sauces de couchage et mentionnent qu'elles présentent un comportement viscoélastique à basse vitesse de cisaillement.

3. Mise en suspension de particules dans une cuve d'agitation

3.1 Régimes hydrodynamiques

La majorité sinon la presque totalité des travaux de la littérature mettent l'accent sur les mélanges solide-liquide pour lesquelles les particules de la phase solide possèdent une masse volumique supérieure à celle de la phase liquide. Généralement, lors du mélange de ces suspensions pour lesquelles les forces colloïdales sont négligeables, trois régimes hydrodynamiques peuvent être identifiés en fonction de la vitesse de rotation de l'agitateur (figure 2.5).

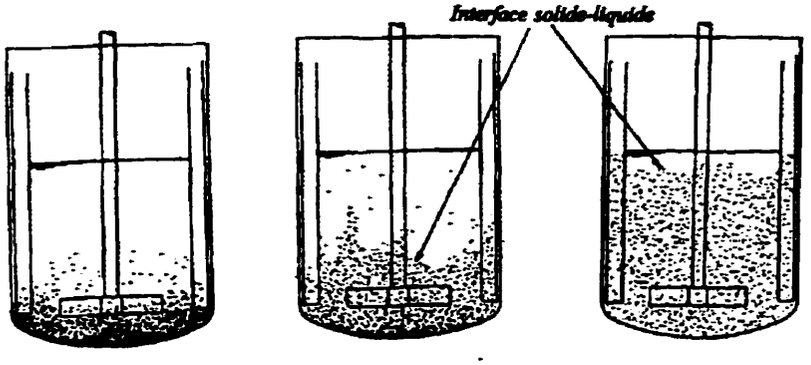


Figure 2.5 Régimes hydrodynamiques typiques d'un mélange solide-liquide en fonction de la vitesse de rotation : a) mise en mouvement des particules, b) mise en suspension complète des particules et c) particules uniformément distribuées.

À faible vitesse de rotation, les particules solides commencent à se mettre en mouvement, à glisser les unes par rapport aux autres. Avec l'augmentation de la vitesse de rotation, on atteint la vitesse minimale de mise en suspension des particules (N_{js})[1]. À cet instant, aucune particule ne demeure au fond de la cuve pour une période de temps supérieure à 1-2 sec (Zwietering, 1958). Par la suite, une augmentation progressive de la vitesse d'agitation permet une élévation de l'interface solide-liquide dans le pot de mélange. L'homogénéisation complète est atteinte lorsque l'interface solide-liquide s'approche de la surface libre du réservoir.

3.2 Vitesse minimale de mise en suspension (N_{js})

La majorité des travaux dans la littérature porte sur la détermination de la vitesse minimale de mise en suspension des particules. Cette vitesse caractérise le degré minimal de dispersion des particules dans la cuve d'agitation. Il est par conséquent important de comprendre les mécanismes gouvernant cette mise en suspension afin de s'assurer que notre procédé de mélange fonctionne à une vitesse de rotation égale ou supérieure à N_{js}.

3.2.1 Méthodes d'évaluation de N_{js}

Quatre méthodes d'évaluation ont été développées afin d'estimer la vitesse minimale de mise en suspension : l'observation visuelle et les mesures de la vitesse des particules en fond de cuve, de la conductivité de la suspension et de la concentration de la phase solide.

Zwietering (1958) a été le premier à proposer une méthode simple d'évaluation de N_{js}. À partir de l'observation visuelle, il stipule que la vitesse minimale de mise en suspension correspond à l'instant où les particules ne séjournent pas plus de 1-2 secondes au fond de la

---

[1]. Indice js vient de l'anglais "just-suspended"

cuve. Comme il nécessite peu de moyens expérimentaux, ce critère est très utilisé dans la littérature. Cependant, il est soumis à la subjectivité de l'expérimentateur. De plus, cette méthode n'est applicable que pour une suspension transparente, ce qui implique une faible concentration en solide au sein de la suspension.

À partir d'essais expérimentaux effectués dans une cuve en acier inoxydable pour lesquels le critère de Zwietering ne peut être appliqué, Buurman et al. (1986) ont testé un détecteur d'ultrasons à effet Doppler afin de mesurer N_{js}. Cet appareil, placé sous le réservoir, permet de détecter le mouvement des particules au fond de la cuve. Lorsque les particules se mettent en mouvement, une transition abrupte est observée lors de la mesure et correspond au début de la mise en suspension. Bien que ce critère soit très objectif, les auteurs mentionnent qu'il ne fonctionne bien que pour une faible épaisseur du lit solide déposé en fond de cuve.

Pour leur part, Molerus et Latzel (1987a) ont proposé d'estimer la mise en suspension minimale par une mesure de la conductivité de la suspension. Cette méthode consiste à placer deux rangées de cinq cellules de conductivité disposées en forme de croix au fond de la cuve. De cette façon, la surface totale du fond du réservoir est soumise à la mesure de la concentration en solide. Avec l'augmentation de la vitesse de rotation, la mesure de conductivité de la suspension (particules non conductrices) augmente et atteint une valeur limite. La figure 2.6 illustre la méthode d'estimation de N_{js}. Cette méthode est très objective,

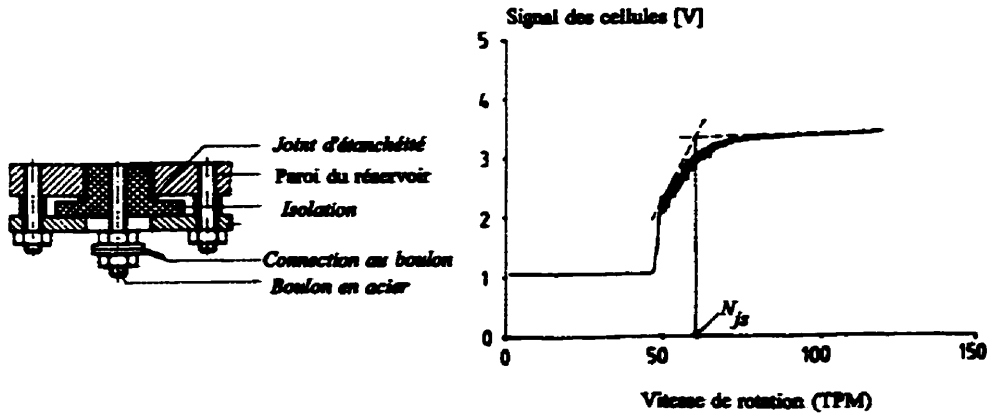


Figure 2.6 Critère d'évaluation de N_{js} de Molerus et Latzel.

reproductible et fonctionne correctement pour des concentrations massiques ne dépassant pas 30%. Par contre, sa mise en application est complexe, raison majeure pour laquelle elle n'est pas très employée.

Finalement, un dernier critère a été introduit par Shamlou et Koutsakos (1989). Ces auteurs mesurent la concentration à quelques centimètres au dessus du lit solide au fond du pot de mélange. En augmentant la vitesse de rotation de l'agitateur, ils ont réalisé que la mise en suspension minimale correspond au moment où la concentration atteint une valeur maximale au point de mesure. Cette concentration maximale correspond au début de l'expansion du lit de particules. Ces auteurs mentionnent que cette méthode fonctionne correctement pour des concentrations massiques inférieures à 4%. Toutefois, cette méthode a l'avantage d'être très objective et sa précision est directement reliée à la technique de mesure employée pour la détermination de la concentration en solide.

3.2.2 Corrélations de N_{js}

De nombreux travaux ont permis de quantifier la vitesse minimale de mise en suspension des particules en fonction des différentes variables du procédé, à savoir :

- le diamètre du réservoir (T),
- le diamètre de l'agitateur (D),
- la distance entre l'agitateur et le fond de la cuve (C),
- la vitesse de rotation du mobile d'agitation (N),
- la masse volumique de la phase liquide (ρ_l),
- la masse volumique de la phase solide (ρ_s),
- la viscosité de la phase liquide (fluide suspendant) (μ_l),
- la taille des particules (D_p),
- la fraction massique (ϕ_w) ou volumique (ϕ_v) de la phase solide.

Zwietering (1958) a été le pionnier dans ce domaine. À partir d'une analyse adimensionnelle et d'un grand nombre d'expériences, il a établi une corrélation empirique permettant d'évaluer la vitesse minimale de mise en suspension en fonction des différentes variables du procédé pour des fluides newtoniens de faible viscosité. La forme adimensionnelle de l'équation s'écrit

$$S_z \phi_w^{0.13} = \left(\frac{\rho_l N_{js} D^2}{\mu_l}\right)^{0.1} \left(\frac{\rho_l N_{js}^2 D}{g\Delta\rho}\right)^{0.45} \left(\frac{D}{D_p}\right)^{0.2} \qquad [2.19]$$

où S_z est un facteur géométrique fonction du type d'agitateur employé et $\Delta\rho$ la différence de masse volumique entre les phases solide et liquide. Le premier terme de droite représente le nombre de Reynolds de l'agitateur et le second terme le nombre de Froude modifié (rapport des forces d'inertie sur la force gravitationnelle). Il est peu fréquent de présenter l'équation régissant la détermination de N_{js} sous cette forme. La forme généralement utilisée dans la littérature s'écrit comme suit :

$$N_{js} = S_z \nu^{0.10} \left(\frac{g\Delta\rho}{\rho_l}\right)^{0.45} \frac{D_p^{0.2} \phi_w^{0.13}}{D^{0.85}} \qquad [2.20]$$

où ν représente la viscosité cinématique du fluide suspendant (μ_l/ρ_l). Dans le cadre de ses expériences, Zwietering a montré que le facteur géométrique S_z est directement relié à la géométrie du réservoir et de l'agitateur par l'expression suivante :

$$S_z = K_z \left(\frac{D}{T}\right)^{a_z} \qquad [2.21]$$

où K_z et a_z sont des constantes déterminées empiriquement (tableau 2.5). De plus, il mentionne que ce facteur varie peu avec la profondeur de l'agitateur (C) dans le réservoir. Cependant, Nienow (1968) a observé le contraire avec l'utilisation d'une turbine Rushton.

Plusieurs études ont été effectuées par la suite afin d'améliorer la qualité de prédiction de N_{js}. Récemment, Shamlou (1993) a dressé un bilan de ces études qui ont pour but d'estimer

Tableau 2.5 Constantes empiriques (K_z, a_z) en fonction du type d'agitateur.

Agitateur	K_z	a_z
Turbine bipale	1.8	1.4
Turbine Rushton	1.45	1.5
Hélice marine	2-3	0.85

empiriquement (tableau 2.6) la valeur des exposants (e_1 à e_5) dans l'expression suivante:

$$N_{js} = S_z \nu^{e_1} \left(\frac{g\Delta\rho}{\rho_l} \right)^{e_2} \frac{D_p^{e_3} \phi_w^{e_4}}{D^{e_5}} \qquad [2.22]$$

Tableau 2.6 Valeurs et gamme d'applicabilité des exposants de l'équation [2.22].

Valeur des exposants	Gamme d'applicabilité
$0 < e_1 < 0.17$	$0.001 < \mu < 0.2$ Pa-s
$0.4 < e_2 < 0.5$	$0.05 < \Delta\rho/\rho_l < 10.1$
$0.14 < e_3 < 0.67$	$100 < D_p < 1000$ µm
$0.10 < e_4 < 0.30$	$0.08 < \phi_w < 36$ %
$-0.50 < e_5 < -1.0$	$0.17 < D/T < 0.7$

Quelques auteurs (Einenkel, 1980; Molerus et Latzel, 1987a) mentionnent que cette grande variabilité dans la détermination des exposants empiriques est directement attribuable à la difficulté de mesurer précisément la valeur de N_{js} basée sur le critère de Zwietering. Toutefois, Geisler et al. (1993) évoquent que la complexité avec laquelle les phases solide et liquide interagissent peut être à l'origine de cette disparité dans les résultats. Ces derniers mettent en doute la simplicité de l'équation de Zwietering devant la complexité du phénomène. Finalement, mentionnons que la prédiction de N_{js} est seulement valide pour des suspensions non colloïdales et newtoniennes.

Basé sur un critère plus objectif, Shamlou et Koutsakos (1989) ont étudié la vitesse de mise en suspension minimale pour différentes conditions opératoires. Cette étude a permis de constater que l'équation de Zwietering surestime la valeur de N_{js} dans une fourchette de 4 à 28%. Toutefois, ces auteurs ne proposent pas de nouvelle corrélation pour la prédiction de N_{js} étant donné le faible nombre d'expériences effectuées. De plus, la méthode optique utilisée pour la mesure de la concentration en solide limite leurs essais de mise en suspension à des faibles concentrations massiques (< 4%).

Dans le but de valider l'équation de Zwietering, Ibrahim et Nienow (1994) ont effectué des essais de mise en suspension avec des fluides suspendants visqueux. Ils ont estimé la valeur de N_{js} à l'aide du critère de Zwietering. La comparaison entre les valeurs expérimentales et celles prédites par l'équation de Zwietering montre une déviation inférieure à 10% pour des fluides dont la viscosité est de 0.01 Pa-s. Lorsque la viscosité atteint 0.1 Pa-s, ils obtiennent des erreurs d'environ 10%. Par contre, une déviation de 90% est observée lorsque la viscosité du fluide suspendant est de l'ordre de 1 Pa-s. Par conséquent, ces auteurs suggèrent l'utilisation de l'équation de Zwietering lorsque la viscosité du fluide suspendant est inférieure 0.1 Pa-s.

Peu d'informations sont disponibles dans la littérature concernant le mélange de suspensions concentrées. Drewer et al. (1994) ont étudié le mélange de suspensions non colloïdales pour des concentrations volumiques variant entre 4 et 50%. Ces auteurs mentionnent que le comportement de telles suspensions est peu prévisible car la présence de la phase solide et la rhéologie complexe du milieu influencent significativement le patron d'écoulement dans la cuve d'agitation. En utilisant des billes de verre, cette étude montre une augmentation abrupte de la puissance minimale de mise en suspension (P_{js}) lorsque la concentration volumique dépasse 30%. Les corrélations de la forme $N_{js} \alpha \phi_v^a$ (équation de Zwietering) ne peuvent prédire adéquatement cette augmentation soudaine de la puissance d'agitation. Buurman (1990) a étudié le mélange des suspensions concentrées de sable, de polystyrène et

de charbon. Tout comme Drewer et al., Buurman a observé le même comportement pour des concentrations volumiques dépassant 30%. De plus, il propose un modèle semi-empirique de prédiction N_{js}. Par contre, si l'on se fie aux résultats expérimentaux de Drewer et al., la validation du modèle proposé n'a pas donné de résultats satisfaisants.

3.2.3 Modèle de prédiction de N_{js}

Afin de mieux comprendre le mécanisme de mise en suspension des particules lors du mélange, nous allons présenter le modèle de prédiction de N_{js} de Shamlou (1993). Bien que plusieurs autres modèles aient été développés dans la littérature, nous avons décidé de présenter ce modèle à cause de sa simplicité et la relation étroite qui existe avec l'équation de Zwietering.

La condition nécessaire à la mise en suspension d'une particule au sein de la suspension s'exprime par la relation suivante :

$$\frac{F_t}{F_g - F_a} \geq 1 \qquad [2.23]$$

où F_t représente la force de friction visqueuse et F_g-F_a le poids apparent de la particule. Cette inégalité est valide lorsque l'on atteint la vitesse minimale de mise en suspension. Par substitution, on obtient la vitesse de la particule à l'état minimale de mise en suspension :

$$U_{js} = K_g \frac{\left\{ g D_p \Delta\rho / \rho_l \right\}^{1/2}}{C_d^{1/2}} \qquad [2.24]$$

où K_g représente le facteur géométrique de la particule. Puisque l'énergie nécessaire pour entraîner une particule est définie par l'expression

$$\varepsilon_p = F_t U_{js} \qquad [2.25]$$

l'énergie totale nécessaire pour soulever les n_p particules dans la suspension s'écrit alors

$$P_{js} = n_p \varepsilon_p \qquad [2.26]$$

Considérons une suspension monodisperse de particules sphériques, si on suppose que la hauteur de fluide dans le réservoir est égale à son diamètre, alors le nombre total de particules n_p est proportionnel à $\phi_v T^3/D_p^3$. Par substitution, on obtient l'expression permettant d'évaluer la puissance minimale de mise en suspension pour toutes les particules

$$P_{js} \propto \frac{T \rho_l}{C_d^{1/2}} \left[\frac{g \Delta\rho}{\rho_l} \right]^{1/2} \phi_v D_p^{1/2} \qquad [2.27]$$

D'autre part, en régime turbulent d'agitation (défini plus en détail à la prochaine section), on peut montrer que la puissance d'agitation s'exprime aussi par la relation

$$P_{js} = N_p \rho_l N_{js}^3 D^5 \qquad [2.28]$$

où N_p représente le nombre de puissance de l'agitateur. On tire des équations [2.27] et [2.28] une expression pour la vitesse minimale de mise en suspension des particules (N_{js}) :

$$N_{js} = A_z \frac{T^{1/3}}{N_p^{1/3} C_d^{1/2}} \left[\frac{g \Delta\rho}{\rho_l} \right] \frac{\phi^{1/3} D_p^{1/6}}{D^{5/3}} \qquad [2.29]$$

où A_z est une constante empirique.

Comme on peut le constater, cette expression de N_{js} possède une forme semblable à l'équation de Zwietering (équ. [2.22]). La valeur des exposants est comparable à celle du tableau 2.6, mis à part l'exposant relié au diamètre du réservoir. Contrairement à l'équation de Zwietering, l'expression de Shamlou n'est pas une fonction de la viscosité car ce dernier suppose que les forces visqueuses sont négligeables devant les forces inertielles en régime turbulent. Par une série d'expériences, Shamlou montre que la prédiction de N_{js} proposé par son modèle donne des résultats satisfaisants pour différents systèmes d'agitation, et différents diamètres et masses volumiques de particules. Encore une fois, la validation a été effectuée pour des faibles concentrations en solide (<1%).

Il existe d'autres modèles de prédiction de N_{js} dans la littérature. Cependant, il ne nous semble pas pertinent d'illustrer leur contenu ici. Le lecteur intéressé peut se référer aux articles suivants : Baldi et al. (1978); Buurman (1990); Buurman et al. (1993), Molerus et Latzel, (1987a et 1987b), Wichterle (1988).

3.3 Puissance d'agitation des suspensions

De façon générale, les quantités macroscopiques intervenant dans la conception de systèmes de mélange sont exprimées à l'aide de nombres sans dimension qui prennent en compte la géométrie du système d'agitation, la rhéologie du milieu et la dynamique de l'écoulement (Holland et Chapman, 1966). Les deux nombres adimensionnels utilisés sont le nombre de puissance (N_p) et le nombre de Reynolds (Re) :

$$N_p = \frac{P}{\rho_f N^3 D^5} \qquad [2.30]$$

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho_f N D^2}{\mu} \qquad [2.31]$$

où P représente la puissance consommée par l'agitateur, N la vitesse de rotation en tours par seconde, D le diamètre de l'agitateur, ρ_f la masse volumique de fluide et μ sa viscosité. En régime laminaire (Re < 10), le nombre de puissance est inversement proportionnel au nombre de Reynolds, $N_p = K_p/\mathrm{Re}$ où K_p est une constante qui ne dépend que de la géométrie du système d'agitation. En régime turbulent (Re > 300), N_p est constant et ne dépend que de la géométrie.

Très peu de travaux ont porté sur la caractérisation de N_p et Re pour des suspensions. Mentionnons les travaux de Pasquali et al. (1983) et Yamazaki et al. (1991) qui suggèrent, dans un premier temps, d'estimer la courbe de puissance (N_p vs Re) pour la phase liquide (fluide suspendant) seulement. Ce type d'information est très abondant dans la littérature.

Par la suite, lors du mélange de la suspension (phase liquide et particules), ils introduisent les nombres de puissance et de Reynolds modifiés comme suit :

$$N_p^* = \frac{P}{\rho_s N^3 D^5} \qquad [2.32]$$

$$\mathrm{Re}^* = \frac{\rho_s N D^2}{\mu_s} \qquad [2.33]$$

où ρ_s est la masse volumique et μ_s la viscosité de la suspension, telles que définies par les relations suivantes :

$$\rho_s = \phi_v \rho_s + (1-\phi_v)\rho_l \qquad [2.34]$$

$$\mu_s = \mu_l(1+2.5\phi_v+10.05\phi_v^2+0.00273\exp(16.6\phi_v)) \qquad [2.35]$$

Même si la viscosité de la suspension n'est pas uniforme dans le réservoir, ces auteurs suggèrent d'estimer la viscosité apparente du milieu à l'aide de l'équation rhéologique de Thomas (tableau 2.2). De cette façon, ils observent que la courbe de puissance modifiée (N_p^* vs Re^*) se superpose à la courbe de puissance monophasique (N_p vs Re). Par conséquent, la seule connaissance de la courbe de puissance monophasique, de la masse volumique et la fraction volumique de la suspension nous permet d'estimer la puissance d'agitation de la suspension de particules. Toutefois, ces études ont été effectuées pour des faibles concentrations en solide et pour des suspensions non colloïdales et newtoniennes.

Finalement, Drewer et al. (1994) soulignent que le fait de ne travailler qu'avec la vitesse minimale de mise en suspension lors de l'étude du mélange solide-liquide présente deux inconvénients majeurs, à savoir: a) la difficulté de comparer l'efficacité énergétique entre les différentes études et b) l'estimation de la puissance d'agitation à partir de la seule variable N_{js} peut introduire des erreurs de 20% car cette puissance peut être fonction de la concentration.

3.4 Critère d'homogénéité

Afin d'évaluer le degré d'homogénéité des particules solides à l'intérieur du réservoir, la majorité des auteurs (Barresi et al., 1994; Rieger et Ditl, 1994 et Mak et Ruszkowski, 1990) emploie le concept de l'écart type du profil de concentration en solide aux différents points d'échantillonnage. Ce degré d'homogénéité, aussi appelé indice de mélange, s'exprime par la relation

$$\sigma = \frac{1}{\overline{C}}\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(C_i - \overline{C}\right)^2\right]^{1/2} \qquad [2.36]$$

où C_i est la concentration en solide aux points d'échantillonnage, $\overline{C}$ la concentration moyenne dans la cuve d'agitation et n le nombre d'échantillonnage. Ce paramètre exprime la variation de l'écart type par rapport à la moyenne; il est souvent appelé coefficient de variation (CV). Plus la valeur de l'écart type est petite, meilleure est la qualité de dispersion des particules dans l'ensemble du réservoir. On obtient une homogénéisation complète lorsque l'écart type s'annule.

Pour leur part, Bohnet et Niesmak (1980) ont modifié le concept de l'écart type afin de prendre en compte les particules solides qui sont demeurées au fond de la cuve de mélange. Ils suggèrent d'estimer la qualité de dispersion comme suit :

$$\psi_{BN} = \sigma\sqrt{\frac{\overline{C}}{C_b - \overline{C}}} \qquad [2.37]$$

où C_b est la concentration en solide au fond du réservoir. Toutefois, cette valeur de concentration n'est pas toujours facile à évaluer.

La qualité de prédiction du degré d'homogénéité est conditionnée par la précision de la technique de mesure de la concentration. Deux méthodes sont généralement utilisées: les

méthodes dites intrusives et non intrusives.

a. *Les méthodes intrusives* : ces méthodes de mesure perturbent et modifient l'hydrodynamique (le profil d'écoulement) aux points d'échantillonnage. Les deux techniques utilisées sont le soutirage à la paroi ou dans le volume du réservoir (Barresi et al., 1994; Barresi et Baldi, 1987; Buurman et al., 1986; MacTaggart et al., 1993a) et la mesure de la conductivité de la suspension dans l'ensemble du réservoir (MacTaggart et al., 1993b; Mak et Ruszkowski, 1990; Rieger et al., 1988). L'avantage de la méthode de soutirage est sa facilité à mettre en oeuvre. Par contre, MacTaggart et al. (1993) montrent qu'il est difficile d'obtenir une mesure fiable car cette méthode est fonction de plusieurs paramètres, comme par exemple les effets d'inertie des particules, la vitesse de soutirage et le type de buses utilisées. Cependant, ces auteurs mentionnent que l'erreur d'échantillonnage peut être minimisée par l'utilisation de particules fines et d'une vitesse d'échantillonnage la plus élevée possible. Concernant la mesure de la conductivité, divers types de sonde ont été développés. Le BHR Group en Grande-Bretagne (Mak et Ruszkowski, 1990) a développé une sonde permettant de mesurer des concentrations volumiques en solide jusqu'à 50%. L'inconvénient majeur de cette sonde est sa grande taille (62 x 62 x 15 mm). Récemment, MacTaggart et al. (1993) ont développé une sonde de très petite taille (4.8 mm de diamètre x 610 mm de long). Cette sonde semble très prometteuse car elle nécessite aucune courbe de calibration et la valeur de la concentration est directement reliée à la mesure de la conductivité grâce aux équations de Maxwell.

b. *Les méthodes non intrusives* : ces méthodes de mesure de la concentration ont l'avantage de ne pas modifier localement le profil d'écoulement de la suspension. Les techniques de mesure utilisées sont les méthodes tomographiques et optiques. McKee et al. (1994, 1995) utilisent des méthodes tomographiques à résistivité électrique (ERT) et à émission de positrons (rayons-γ) (PET). Le fondement de ces méthodes repose sur les techniques radiologiques semblables à celles utilisées dans les hôpitaux. Mentionnons simplement que

ces méthodes sont très coûteuses et difficiles à mettre en oeuvre. Par contre, elles permettent une reconstruction du champ de concentration en solide tridimensionnel lors de la mise en suspension des particules. Pour leur part, Bohnet et Niesmak (1980), Fajner et al. (1985), Ferreira et al. (1994) et Shamlou et Koutsakos (1989) favorisent l'utilisation d'un rayon laser pour mesurer la concentration en solide dans le réservoir. Ces auteurs mesurent la concentration à différentes positions axiales dans le réservoir. Le rayon laser est introduit perpendiculairement à la cuve et une cellule photosensible mesure l'intensité de la lumière transmise dans la direction diamétralement opposée. Le principe de cette méthode repose sur l'absorption du faisceau de lumière lors de son passage à travers la suspension. Cette méthode fonctionne très bien pour des milieux transparents, ce qui implique des suspensions à faibles concentrations (< 10%). Cependant, la mesure obtenue n'est pas une valeur ponctuelle de la concentration mais bien une valeur moyennée le long du trajet lumineux. Il existe d'autres méthodes non instrusives dans la littérature afin de mesurer des profils de concentrations en matière solide. Ces dernières ne seront pas décrites ici, mais le lecteur intéressé peut se référer à la bibliographie suivante : Chaouki et al. (1997).

Pour une vitesse d'agitation donnée, la concentration en solide varie avec la position axiale dans le réservoir. De façon générale, la concentration est élevée près de l'agitateur et diminue lorsque l'on s'approche de la surface libre. Barresi et Baldi (1987) et Magelli et al. (1990) suggèrent une expression empirique afin d'estimer le degré d'homogénéité en fonction des conditions opératoires. Cette expression s'écrit

$$\log\sigma \propto \log\left(\frac{v_t \phi_w^{0.13}}{N_p^{1/3} N D}\right) \qquad [2.38]$$

Puisque le nombre de puissance est constant en régime turbulent, le degré d'homogénéité augmente avec la vitesse de rotation et le diamètre de l'agitateur ou encore avec une diminution de la concentration massique en particules ou de la vitesse de sédimentation. L'équation [2.38] s'applique au mélange de suspensions à faibles concentrations et ne tient pas compte par le fait même des interactions particule-particule.

3.5 Temps de mélange

Le temps de mélange est le temps nécessaire afin d'atteindre un certain degré d'homogénéité à l'intérieur du réservoir. Lors du mélange d'une seule phase, le temps de mélange est inversement proportionnel à la vitesse de rotation. La présence de la phase solide modifie cette relation. En effet, Kraume (1992) démontre, à l'aide d'une technique de décoloration (Hiby, 1981), une augmentation du temps de mélange avec la vitesse de rotation, et cela avant d'atteindre l'état minimal de mise en suspension des particules. Une fois les particules mises en suspension, il observe un comportement semblable à celui d'un système à phase unique.

3.6 Critère d'extrapolation

La notion de critère d'extrapolation dans le domaine du mélange solide-liquide fait l'objet de nombreux débats dans la communauté scientifique. De façon générale, on cherche à extrapoler le rapport de la puissance d'agitation par unité de volume à l'état minimale de mise en suspension (P_{js}/V). La majorité des travaux estiment ce rapport à partir de la vitesse minimale de mise en suspension des particules (N_{js}), donnée très abondante dans la littérature. Pour une suspension donnée, l'équation de Zwietering peut être écrite sous la forme suivante:

$$N_{js} D^a = cte \qquad [2.39]$$

Puisque la mise en suspension s'effectue généralement à grande vitesse, la puissance d'agitation (en régime turbulent) vérifie la relation suivante

$$P_{js} \propto N_{js}^3 D^5 \qquad [2.40]$$

Par substitution, on obtient la puissance d'agitation en fonction du diamètre de l'agitateur

$$P_{js} \propto D^{5-3a} \qquad [2.41]$$

Sachant que le volume du fluide dans le réservoir est proportionnel au diamètre de l'agitateur,

on en tire que

$$\frac{P_{js}}{V} \propto D^{2-3\alpha} \qquad [2.42]$$

On remarque que le rapport de la puissance par unité de volume est directement relié à l'exposant empirique de D. Puisque l'on observe une grande variabilité de cet exposant dans les nombreuses études de la littérature (tableau 2.6), alors il en va de même pour le rapport P_{js}/V. La figure 2.7 montre la variation de ce rapport pour différentes études.

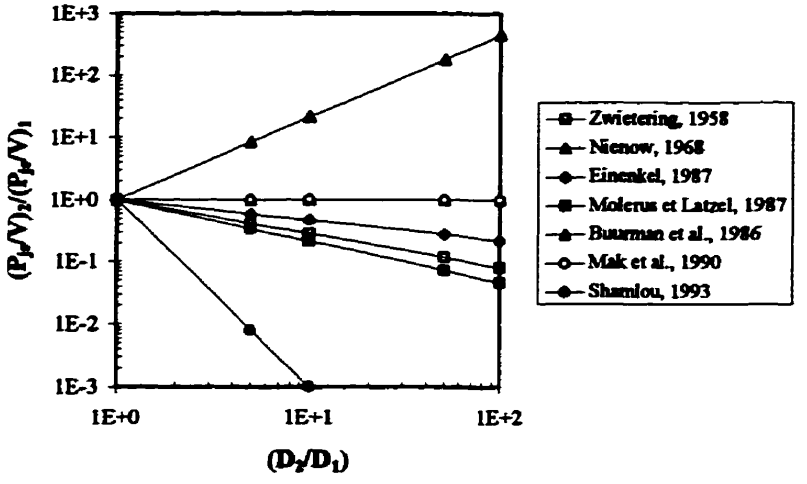


Figure 2.7 Variation du critère d'extrapolation (P_{js}/V) en fonction du diamètre de l'agitateur.

De façon presque unanime, le critère d'extrapolation P_{js}/V semble diminuer avec l'augmentation du diamètre de l'agitateur, ce qui indique une plus grande facilité à remettre les particules en suspension dans des systèmes de grande taille. Par ailleurs, en se basant sur un critère plus objectif pour la détermination de N_{js}, Buurman et al. (1986) constatent que le rapport P_{js}/V doit demeurer constant avec une augmentation du diamètre de l'agitateur. Pour leur part, Mak et Ruszkowski (1990) mentionnent que la puissance par unité de volume doit être constante afin d'assurer le même degré d'homogénéité à des échelles différentes. Finalement, Geisler et al. (1993) stipulent, après avoir effectué une série d'expériences de mise en suspension, qu'il n'existe pas de règle générale d'extrapolation du critère P_{js}/V.

4. Préparation de suspensions concentrées

Dans le domaine du traitement de surface du papier, la préparation des sauces de couchage nécessite deux étapes distinctes, c'est-à-dire la préparation de la suspension de kaolin d'une part et l'ajout des différents ingrédients constituant la sauce de couchage d'autre part. La première étape a comme objectif d'obtenir une dispersion ou une taille de particules (agrégats) la plus petite possible, alors que pour la seconde, la sauce de couchage doit posséder un comportement rhéologique adéquat afin d'être couchée sur le papier à très haute vitesse. Dans les prochaines sections, nous allons décrire les différents travaux scientifiques traitant de ces deux étapes.

4.1 Préparation de la suspension de pigments

Avant de débuter la revue bibliographique sur la préparation des suspensions concentrées de pigments, nous discuterons brièvement des mécanismes de dispersion de fines particules dans un liquide (Parfitt et Barnes, 1992). Trois étapes doivent être prises en compte lors de l'incorporation de poudre dans un solvant, c'est-à-dire l'adhésion, l'immersion et le recouvrement. L'étape de l'adhésion correspond à la mise en contact des particules solides avec le milieu liquide. Lorsque ces particules commencent à s'enfoncer dans le liquide, débute alors l'étape de l'immersion. Cette étape consiste essentiellement à éliminer l'air emprisonné à la surface des particules afin de favoriser la diffusion du liquide dans les interstices des agglomérats. Finalement, la dernière étape correspond au recouvrement finale de l'agglomérat par le liquide. Une fois ces étapes terminées, le mélangeur doit être en mesure de fragmenter ces agglomérats afin d'obtenir la plus petite taille possible. Néanmoins, ces petites particules peuvent reformer des agglomérats si les forces d'attraction dominent par rapport aux forces de répulsion. La fragmentation peut s'effectuer suivant deux modes: la rupture et l'érosion. La rupture d'un agglomérat produit des fragements de tailles comparables alors que l'érosion correspond un détachement graduel de fines particules de la surface. Le principal différence

entre ces deux processus est l'énergie mise en jeu; elle est faible pour le phénomène d'érosion alors que la rupture nécessite une énergie relativement importante.

Peu de travaux ont été publiés dans la littérature concernant la préparation des suspensions concentrées de pigments. Mäkinen et Nordström (1993) ont été les pionniers dans ce domaine. Ces auteurs ont étudié le rôle des conditions opératoires et l'influence des paramètres géométriques de l'agitateur et de la cuve de mélange sur la consommation de puissance pour la réalisation de suspensions de pigment (kaolin) à 70% massique. Tous les tests ont été réalisés avec une turbine à pales inclinées et un réservoir possédant un volume total de 3 litres.

Mäkinen et Nordström ont constaté une croissance exponentielle de la puissance instantanée du mélangeur avec l'incorporation de la poudre (figure 2.8). Cette croissance énergétique est directement reliée à la difficulté de mouiller la poudre de kaolin vers la fin de l'incorporation étant donné le pourcentage de solide de plus en plus élevé. Une fois cette incorporation terminée, il s'ensuit une phase de désagglomération où la puissance chute et semble atteindre une valeur asymptotique. La capacité maximale de dispersion de l'agitateur est alors atteinte.

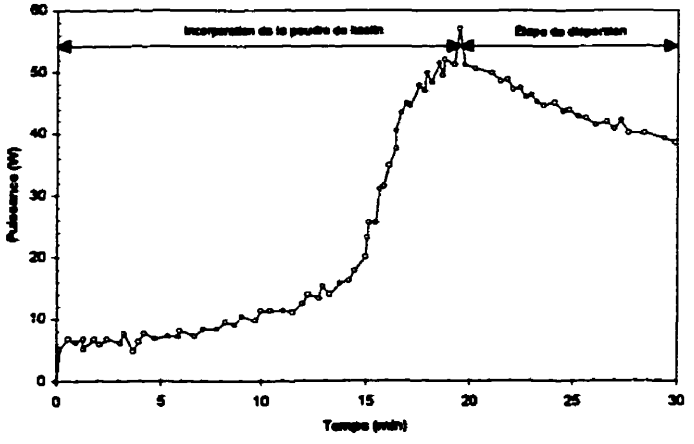


Figure 2.8 Évolution typique de la puissance d'agitation au cours de l'incorporation du kaolin.

Les travaux de Mäkinen et Nordström ont permis d'obtenir les renseignements suivants:

- la création d'un vortex par l'agitateur est essentiel afin d'obtenir une bonne qualité de dispersion. Un vortex trop faible a tendance à produire une croûte à la surface libre de la suspension alors qu'un vortex trop important favorise un entraînement d'air au sein de la suspension et la formation de bulles;
- pour une même vitesse périphérique, un agitateur de diamètre élevé produit un vortex plus important par rapport à un agitateur de plus petit diamètre, ce qui permet de réduire le temps d'incorporation;
- le débit d'alimentation de la poudre de kaolin peut être très élevé au début de l'incorporation sans produire de grumeaux en surface du réservoir. Vers la fin de l'incorporation, la viscosité de la suspension devient élevée, et par le fait même, le débit d'alimentation doit être diminuée afin de prévenir la formation de grumeaux. Ces auteurs démontrent que la consommation énergétique est très sensible à la cinétique d'alimentation;
- la viscosité de la suspension ainsi produite semble être indépendante de la cinétique d'alimentation. Ces auteurs concluent que le temps d'incorporation peut être réduit considérablement sans altérer la suspension;
- si le temps d'incorporation est trop élevé, l'eau contenue dans la suspension s'évapore et favorise l'augmentation du pourcentage massique en solide;
- pour un même diamètre d'agitateur, l'augmentation de la vitesse périphérique engendre une meilleure dispersion (figure 2.9).

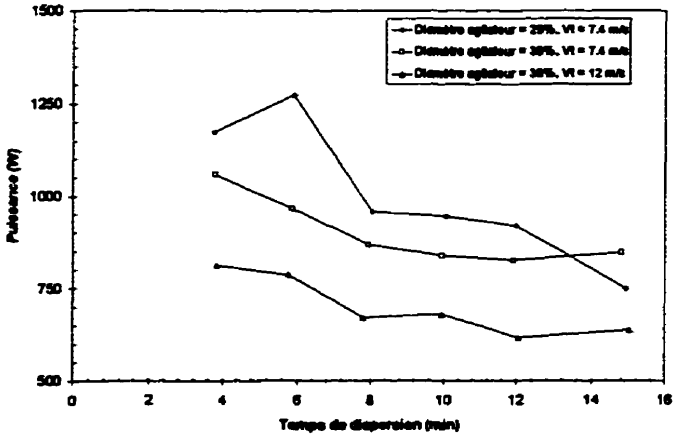


Figure 2.9 Évolution typique de la viscosité en fonction des conditions opératoires.

Plus récemment, Duquesnoy et al. (1995) ont étudié l'influence du type d'agitateurs lors de l'incorporation de la poudre de kaolin. Ces auteurs ont montré l'inefficacité du ruban hélicoïdal à mouiller efficacement la poudre et cela peu importe la vitesse d'agitation. En effet, ce type d'agitateur, généralement utilisé à basses vitesses de rotation, favorise l'apparition d'une épaisse croûte de kaolin en surface du réservoir étant donné que la surface libre possède une vitesse de pompage axial très faible. D'autres essais avec une turbine à pales inclinées ont provoqué une accumulation de poudre dans le vortex. Ces auteurs ont aussi testé un nouveau type d'agitateur formé des tiges de mélanges. Ces tiges situées à la surface libre permettent une mouillabilité améliorée et rapide en fouettant la surface de l'eau. La puissance d'agitation est très faible comparativement aux autres agitateurs. En effet, les suspensions concentrées de kaolin présentent un rhéoépaississement non négligeable lorsque le taux de solide dépasse 65% en masse. Il est donc préférable de fonctionner à un cisaillement minimum afin de prévenir toute surconsommation du système d'agitation. Ils ont de plus étudié deux différents types d'alimentation, c'est-à-dire l'alimentation à débit volumétrique constant et l'alimentation par échelon. Le premier type d'alimentation produit une augmentation régulière de la puissance alors qu'une alimentation par échelon provoque une consommation de puissance instantanée très élevée, ce qui correspond à une sur-concentration locale de poudre à la surface libre du réservoir. Un débit constant favorise alors une consommation énergétique régulière, élimine les pics et réduit ainsi la puissance du moteur requise.

4.2 Préparation des sauces de couchage

La deuxième étape consiste à ajouter à la suspension de kaolin précédente les différents ingrédients afin d'obtenir la sauce de couchage. Quelques travaux rendent compte de certains problèmes reliés à l'ordre d'incorporation des ingrédients et les propriétés de la couche ainsi obtenue.

Les caractéristiques de mélange des ingrédients des sauces de couchage proviennent des

interactions entre les différents composants, c'est-à-dire les pigments, les liants, les co-liants et les additifs. Le résultat est une forte augmentation de la viscosité et la création de réactions chimiques. Le choc kaolin-PVA (alcool de polyvinyle) est l'exemple le plus classique (Schempp et al., 1975; Margotta, 1980). Ce choc est dû à la forte absorption des particules de PVA sur le kaolin, engendrant un pontage entre les particules. Ces structures sont difficiles à détruire. Ce choc peut être diminué ou atténué en changeant la composition des différents ingrédients. La puissance d'incorporation au cours du temps va donc varier de façon significative.

Mäkinen et Järvensivu (1992) mettent en évidence que la rhéologie finale de la sauce est influencée par le choix des différents ingrédients et leur ordre de mélange. Une consommation d'énergie importante provient de la non-optimisation de l'ordre de mélange. En effet, ils observent, pour une même formulation, que l'ordre de mélange permet d'obtenir des rhéologies très variées, ce qui rend compte de la nature des interactions complexes entre les composants et les différentes structures. La modification de l'ordre de mélange peut affecter le mélange lui même en favorisant une augmentation de la viscosité, conduisant même à des chocs. Ce dernier phénomène entraîne une augmentation considérable de la consommation de puissance et une élévation de température non négligeable lors de la préparation.

Mäkinen et Järvensivu obtiennent un ordre de mélange optimal en réalisant plus d'une vingtaine de préparation de sauces dans des ordres bien définis. Les chocs peuvent être sévères, notamment pour le mélange PVA/kaolin. Apparemment, il est nécessaire d'introduire le PVA avant la CMC pour réduire les chocs et donc la consommation de puissance. En ajoutant le kaolin comme dernier ingrédient, on arrive à une forte viscosité à bas cisaillement, une faible rétention d'eau ainsi qu'une élasticité importante. Une forte viscosité à haut gradient de cisaillement apparaît lorsque la CMC est ajoutée à la fin. Dans leur étude, l'incorporation d'un additif (agent blanchissant) élimine le choc PVA/kaolin du fait de la compétition d'absorption sur les particules.

Persson et al. (1995) ont étudié non seulement l'ordre de mélange et la rhéologie associée à la préparation des sauces de couchage, mais aussi la qualité de la couche obtenue sur une coucheuse pilote à très haute vitesse. Le liant utilisé est soit de la CMC, soit du PVA. L'ordre de mélange donne également lieu à une augmentation de la viscosité mais aucune présence de pic caractéristique de consommation de puissance n'a été décelée. Seul l'ajout du PVA favorise l'apparition de courts pics de consommation de puissance résultant de l'absorption du PVA sur les particules. Par contre, la dispersion de kaolin dans une phase aqueuse contenant déjà le PVA ne provoque aucun choc. En ce qui concerne la qualité de la couche, l'ordre d'introduction des ingrédients dans la formulation ne génère que de très faibles variations entre les différentes préparations. Cependant, le lustré est légèrement meilleur après le calandrage pour les sauces les plus floculées.

5. Modélisation du mélange solide-liquide

Différentes stratégies de modélisation ont été développées dans la littérature afin de modéliser les écoulements biphasiques dans une cuve d'agitation ou procédés connexes en fonction des conditions opératoires. Cette section présente les différents modèles proposés ainsi que les hypothèses simplificatrices sous-jacentes.

5.1 Modèle de dispersion-sédimentation

Le modèle phénoménologique de dispersion-sédimentation est le modèle le plus couramment employé dans la littérature. Ce modèle suppose un équilibre entre le flux des particules dû à la sédimentation et le flux de particules remises en suspension par la diffusion turbulente créée par le mouvement de l'agitateur. En se basant sur ce concept, Fajner et al. (1985), Magelli et al. (1990), Nocentini et Magelli (1992) et Cumby et Slater (1990) supposent une distribution unidimensionnelle des particules dans la direction axiale du réservoir et proposent de résoudre, en régime permanent, l'équation de diffusion-

sédimentation pour la phase solide. Cette expression s'écrit

$$D_{c,p}\frac{\partial^2\phi}{\partial z^2} = -v_t\frac{\partial\phi}{\partial z} \qquad [2.43]$$

où v_t représente la vitesse de sédimentation des particules, $D_{c,p}$ le coefficient de la diffusion turbulente de la phase solide et ϕ la fraction volumique des particules. De plus, le coefficient de diffusion turbulente $D_{c,p}$ est supposé égal au coefficient de dispersion de la phase liquide ($D_{c,l}$), ce dernier étant une fonction unique du nombre de Reynolds ($Re = \rho_l N D^2/\mu_l$).

Après imposition des conditions aux limites appropriées, le profil de concentration dans la direction axiale est obtenu analytiquement en fonction des différents paramètres du procédé:

$$\frac{\phi}{\bar{\phi}} = \frac{Pe_s}{1-\exp(-Pe_s)}\exp\left(-Pe_s\, z/H\right) \qquad [2.44]$$

où $\bar{\phi}$ représente la fraction volumique moyenne de la suspension, H la hauteur de fluide dans le réservoir et Pe_s le nombre de Péclet des particules solides défini comme $Pe_s = v_t \cdot H/D_{c,p}$. Ce nombre sans dimension sert de paramètre d'ajustement au modèle et est généralement corrélé en fonction des conditions opératoires et des propriétés physiques de la suspension (Magelli et al., 1990). Cette équation prédit donc la variation de la concentration autour de la valeur moyenne.

Magelli et al. (1990) et Fajner et al. (1985) ont effectué une série d'expériences de mise en suspension pour différents types de particules dans un réservoir possédant quatre agitateurs à refoulement radial (Rushton). Sur le plan qualitatif, ce modèle permet d'obtenir une bonne prédiction des profils de concentration. La même qualité de prédiction a été obtenue par Cumby et Slater (1990) lors de la mise en suspension du purin de porc dans une fosse de 10.8 m^3 en utilisant le même type de turbine. Par contre, ces résultats ont été obtenus pour des suspensions de faible concentration.

Diverses variantes de cette méthode sont proposées dans la littérature. Par exemple, Ferreira et al. (1994) améliorent le modèle précédent en prenant en compte la variation de la concentration des particules dans la direction radiale du réservoir. Il suggère de résoudre l'équation de diffusion-sédimentation en coordonnées cylindriques par une technique de différences finies. La relation obtenue s'écrit :

$$-D_{e,p}\frac{\partial^2\phi}{\partial r^2}-\frac{D_{e,p}}{r}\frac{\partial\phi}{\partial r}-D_{e,p}\frac{\partial^2\phi}{\partial y^2}+\left(v_l+v_t\right)\frac{\partial\phi}{\partial y}=0 \qquad [2.45]$$

où v_l représente la vitesse de la phase liquide dans le réservoir. Par le fait même, le transport convectif des particules est assuré par le mouvement de la phase liquide combiné à la vitesse de sédimentation. Tout comme le modèle précédent, aucune force d'interaction particule-particule n'est considérée lors de la sédimentation.

Pour leur part, Rasteiro et al. (1994) suggèrent de modéliser la vitesse de sédimentation des particules à l'aide de l'expression de Richardson et Zaki puisque cette vitesse est fortement dépendante de la fraction volumique en solide au sein de la suspension. Toutefois, cette amélioration du modèle introduit une forte non-linéarité dans l'équation de dispersion-sédimentation. De plus, la prédiction de ces deux modèles est conditionnée par l'estimation de deux paramètres d'ajustement, c'est-à-dire le nombre de Péclet des phases solide ($Pe_t = v_t \cdot H/D_{e,p}$) et liquide ($Pe_l = v_l \cdot H/D_{e,p}$). Finalement, la dépendance de la fraction volumique sur la vitesse de sédimentation permet d'obtenir une meilleure prédiction du profil de concentration expérimentale.

5.2 Modèle de Bakker et Fasano

Récemment, Bakker et al. (1994) ont développé une méthode de calcul bidimensionnelle pour l'estimation du champ de concentration des particules dans une cuve d'agitation. Dans un premier temps, le champ de vitesse de la phase liquide est estimé à l'aide

d'un modèle de turbulence. Par la suite, à l'aide d'une méthode de volumes finis (logiciel FLUENT™), ils résolvent l'équation de diffusion-sédimentation suivante en coordonnées cylindriques :

$$\nabla \cdot (\phi \cdot \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\nabla (D_s \phi)) = 0 \qquad [2.46]$$

où ∇ représente l'opérateur gradient, v_s le champ de vitesse de la suspension et D_s le coefficient de diffusion turbulente des particules obtenu par analogie de la théorie cinétique des gaz. Ces deux expressions sont définies comme suit :

$$\vec{v}_s = \vec{v}_l + \vec{v}_t \qquad [2.47]$$

$$D_s = \frac{\sqrt{k_t}}{3\pi n_p D_p^2} \qquad [2.48]$$

où v_l représente la vitesse de la phase liquide, v_t la vitesse de sédimentation des particules, n_p le volume total des particules, d_p leur diamètre et k_t la densité d'énergie cinétique turbulente extraite du modèle de turbulence. Ce modèle permet de prendre en compte le transport convectif et la diffusion des particules à l'intérieur du réservoir.

Bakker et Fasano ont étudié le phénomène de la mise en suspension de particules de 20 µm pour différentes turbines à décharge axiale. Sur le plan qualitatif, leur modèle permet de bien prédire l'interface solide-liquide dans la cuve d'agitation en fonction des conditions opératoires (figure 2.10). De plus, ils démontrent que la position et le nombre d'agitateurs influencent grandement la distribution des particules dans le réservoir. Toutefois, la prédiction du profil de concentration en solide n'a pas été validée expérimentalement.

Finalement, comme on peut le constater, les interactions particule-particule ne sont pas considérées dans l'estimation de la vitesse de sédimentation et la présence de la phase solide n'influence pas la dynamique d'écoulement dans le réservoir. Par conséquent, ce modèle n'est valide que pour des faibles concentrations en solide.

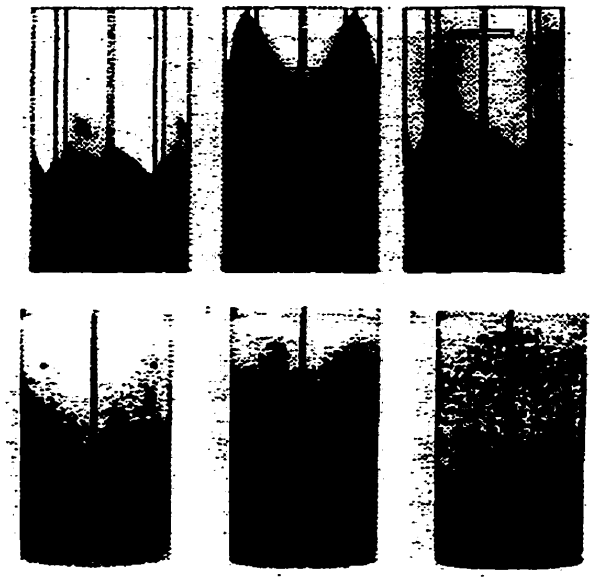


Figure 2.10 Comparaison qualitative de l'interface solide-liquide et des profils de concentration obtenus par simulation (haut) aux valeurs expérimentales (bas).

5.3 Modèle de Mann

Au début des années 1980, Mann (1988) et Mann et Hackett (1988) a proposé une représentation bidimensionnelle de l'écoulement dans un réservoir agité pour des mélanges liquide-liquide et gaz-liquide. Ce dernier divise le domaine d'écoulement en petites cellules dans lesquelles il suppose un mélange parfait. Toutes ces cellules sont inter-reliées par des écoulements convectif et diffusif[2]. Cette idée a été reprise par la suite par Brucato et Rizzuti (1988) et Brucato et al. (1990) afin de modéliser le mélange solide-liquide. Ces auteurs proposent d'estimer la répartition des particules dans le réservoir par la résolution d'un bilan de matière instationnaire sur les particules. Ce bilan prend la forme suivante :

$$V_c \frac{dC_c}{dt} = Q(C_p - C_c) + \sum_{i=1}^{2} \alpha Q(C_i - C_c) + \sum_{i=3}^{5} (v_t S_i C_i - v_t S_c C_c) \qquad [2.49]$$

où les indices 'c' dénotent la cellule sur laquelle le bilan est effectué, 'i' les cellules limitrophes

---

[2]. En anglais, cette méthode est dénommée "network-of-zones"

et 'p' la cellule d'où provient l'écoulement convectif. V représente le volume de la cellule, C sa concentration, S la surface des cellules par lesquelles les particules sédimentent, Q le débit volumétrique de fluide entrant dans la cellule, α le paramètre d'ajustement de la diffusion turbulente et v_t la vitesse de sédimentation des particules. La figure 2.11 présente un exemple d'une cellule convection-diffusion-sédimentation tel que proposé par Brucato et al.

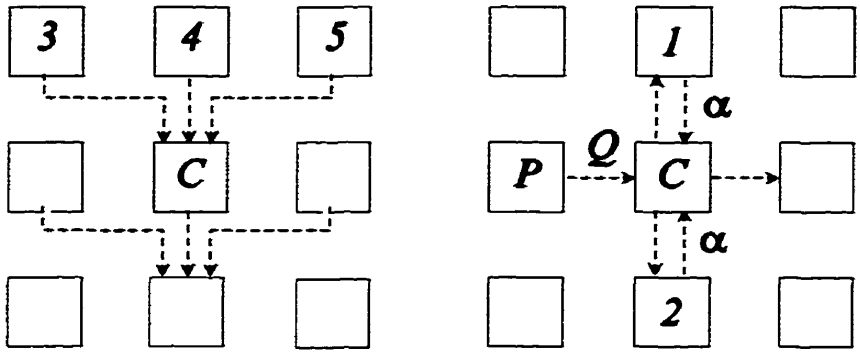


Figure 2.11 Exemple de cellules de sédimentation (à gauche) et de convection-diffusion (à droite).

Dans leur modèle, la sédimentation se produit dans la direction axiale du réservoir alors que les écoulements convectif et diffusif ont lieu dans les directions radiale et axiale respectivement. Cette hypothèse est justifiée par l'emploi d'une turbine à décharge radiale (Rushton). Puisque ces chercheurs ne connaissaient pas a priori le champ de vitesse de la phase liquide dans le réservoir, cette estimation a été faite à l'aide du concept du nombre de pompage, concept bien établi pour le type de turbine étudiée (Nagata, 1975)

Brucato et al. (1990) ont confronté la prédiction du modèle avec les données expérimentales de Fajner et al. (1985) et Magelli et al. (1990) obtenues dans un mélangeur muni de quatre turbines Rushton. Bien que leur modèle possède un paramètre d'ajustement (diffusion turbulente des particules (α)), la prédiction du profil de concentration en solide dans la direction axiale du réservoir donne de très bons résultats. Cependant, l'emploi d'une méthode optique lors des mesures de concentration en solide limite la validation du modèle aux

systèmes faiblement concentrés.

5.4 Modèle de la migration des particules induites par cisaillement

À partir des premières observations de Gadala-Maria (cf. 1f), plusieurs travaux scientifiques ont permis de mieux comprendre le phénomène de la diffusion des particules induites par cisaillement (Gadala-Maria et Acrivos, 1980; Leighton et Acrivos, 1986, 1987a, 1987b; Altobelli et al., 1991) pour des suspensions concentrées. Suite à ces travaux, Phillips et al. (1992) ont développé une équation de conservation de la phase solide permettant de prendre en compte le transport convectif, la diffusion due à la fréquence d'interaction des particules et à la variation de la viscosité au sein de la suspension. Cette équation s'exprime par la relation

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + v \cdot \nabla \phi = \underbrace{\nabla \cdot \left(K_c a^2 \phi \nabla (\dot{\gamma} \phi) \right)}_{\text{Flux dû aux collisions}} + \underbrace{\nabla \cdot \left(K_\eta \frac{a^2}{\eta} \dot{\gamma} \phi^2 \frac{\partial \eta}{\partial \phi} \nabla \phi \right)}_{\text{Flux dû aux forces de viscosité}} \qquad [2.50]$$

où ϕ est la fraction volumique, v la vitesse de la suspension, a le rayon des particules, $\dot{\gamma}$ la norme du tenseur vitesse de déformation, η la viscosité de la suspension, et finalement K_c et K_η des constantes empiriques généralement égales à 0.41 et 0.62 respectivement. Ces auteurs utilisent l'expression de Krieger et Dougherty afin de prédire la variation de la viscosité de la suspension en fonction de la fraction volumique. Cette équation de continuité de la phase solide est couplée avec l'équation de conservation de la quantité de mouvement (Navier-Stokes).

Ces auteurs ont étudié la diffusion de suspensions de particules de polyméthyle méthacrylate monodisperses (D_p = 675 µm) très concentrées (ϕ > 45%) dans une huile de silicone (fluide newtonien). Deux types de géométries ont été testés, i.e. l'écoulement dans un système de Couette et un tube. Pour ces deux types d'écoulement, la concentration varie dans la

direction radiale seulement, ce qui leur a permis d'en déduire diverses expressions analytiques pour la détermination de la fraction volumique et du profil de vitesse de la suspension. Les résultats de ce modèle ont été confrontés aux valeurs expérimentales de la concentration en particules mesurées par résonance magnétique nucléaire (RMN). On note une très bonne concordance entre les valeurs expérimentales et la prédiction du modèle. Par contre, cette équation constitutive n'a été validée que pour des suspensions concentrées non-colloïdales.

D'autres études ont été effectuées afin de modéliser et caractériser la migration de particules par cisaillement dans diverses applications. Par exemple, Zhang et Acrivos (1994) ont étudié le phénomène de mise en suspension de particules lors d'écoulement en régime laminaire et transitoire dans des conduites horizontales. Ces auteurs ont comparé la mesure de la concentration mesurée par RMN aux valeurs prédites par le modèle de Phillips et al. Puisque la sédimentation joue un rôle important, ils ont ajouté le flux de particules dû à la sédimentation dans l'équation de continuité [2.50]. La résolution des équations de Navier-Stokes pour la phase liquide et de Phillips pour la phase solide a été effectuée à l'aide d'une méthode par éléments finis sur une section bidimensionnelle perpendiculaire à l'écoulement. Cependant, la résolution de ces équations nécessite un effort de simulation important étant donné la non-linéarité des équations à résoudre.

Zhang et Acrivos ont comparé la prédiction de la concentration en solide obtenue à l'aide de leur modèle aux données expérimentales de Altobelli et al. (1991). Cette étude montre la sensibilité du nombre de Reynolds ($5 < Re < 20$) et de la concentration de la suspension ($10\% < \phi_v < 30\%$) sur la qualité de remise en suspension. Sur le plan qualitatif, leur modèle permet de bien prédire l'interface solide-liquide dans la conduite horizontale.

Finalement, Fang et Phan-Thien (1995) ont modélisé la migration de particules de suspensions concentrées pour un écoulement entre deux plaques parallèles et à l'intérieur de cylindres excentriques. Ces auteurs utilisent une méthode de volume finis bidimensionnelle afin

d'assurer le couplage entre les équations de Navier-Stokes et de Phillips. Plusieurs cas tests ont été présentés afin d'assurer la validation des résultats numériques. La prédiction du modèle est en très bon accord avec les valeurs analytiques pour l'écoulement entre deux plaques parallèles. Par contre, la prédiction de la fraction volumique à l'intérieur des cylindres excentriques n'a pas été confrontée aux valeurs expérimentales.

5.5 Simulation des écoulements biphasiques par une méthode directe

Dans tous les modèles présentés précédemment, l'hypothèse majeure est de considérer la phase solide comme une phase continue. Par contre, l'approche numérique de type simulation directe consiste à décrire le mouvement de chacune des particules au sein de la phase liquide. La stratégie est de résoudre les équations de Navier-Stokes pour la phase liquide étant donné la présence des particules solides et les équations de Newton pour chacune des particules. Plusieurs groupes de recherche (Glowinski et al., 1994; Hu, 1996; Hu et al., 1992; Maury et Glowinski, 1997) travaillent sur cette méthode puisque qu'elle permet de prendre en compte les interactions particule-particule et particule-fluide au sein de la suspension de façon exacte. Tous ces travaux cherchent à élucider les mécanismes complexes de la sédimentation de plusieurs particules (2-500 particules). L'inconvénient majeur de cette méthode réside dans le fait qu'elle demande un effort de simulation élevé lorsque le nombre de particules augmente. Par exemple, à l'aide d'une méthode de volume finis tridimensionnelle (grille de 320 000 noeuds et 960 000 inconnues), Ritz (1997) mentionne que le temps de calcul pour décrire le mouvement de 50 particules en sédimentation est de l'ordre de 9 jours sur un CRAY J916. Finalement, lors de la préparation d'une sauce de couchage contenant un taux de solide de 60% massique, on estime à 10^{17} le nombre de particules de kaolin, ce qui rend cette méthode inutilisable en pratique.

6. Objectifs spécifiques de la thèse

À la lecture de ce chapitre, on constate que le mélange solide-liquide fait intervenir deux phases qui interagissent de façon complexe. Pour cette raison, depuis de nombreuses années, les chercheurs essaient de comprendre les principaux mécanismes gouvernant le mélange des phases liquide (fluide suspendant) et solide. De plus, la majorité des études ont porté sur la détermination des principaux paramètres influençant la vitesse minimale de mise en suspension des particules (N_{js}). Cependant, la détermination de N_{js} possède des limites d'applicabilité. Aussi, la connaissance de N_{js} ne permet pas de déterminer la puissance d'agitation de façon précise. Toutefois, quelques études ont permis de mettre en lumière, pour des suspensions diluées, newtoniennes et non colloïdales, la relation existant entre la puissance d'agitation, le temps de mélange et le degré d'homogénéité des suspensions, et les propriétés physiques et les conditions opératoires d'agitation. En ce qui concerne la préparation de suspensions concentrées, les études disponibles ont été réalisées à petites échelles et ne correspondent pas aux situations classiquement rencontrées dans l'industrie.

Du point de vue de la modélisation, quelques outils sont disponibles afin de prédire la distribution des particules lors du mélange d'une suspension à faibles concentrations. Ces outils comprennent les modèles de dispersion-sédimentation de Bakker et Fasano, et le bilan de matière instationnaire de Mann. Puisque le bilan instationnaire de Mann s'effectue sur un réseau de cellules représentant le domaine d'écoulement, cette méthode s'avère une extension directe de la méthode des éléments finis permettant de résoudre la dynamique d'écoulement dans le mélangeur pour des suspensions diluées. Pour cette raison majeure et sa simplicité, nous proposons d'implanter cette méthode afin de prédire le champ de concentration en matière solide dans l'ensemble du réservoir (méthode tridimensionnelle) en fonction des conditions opératoires. Concernant le mélange de suspensions concentrées, nous implanterons le modèle de Phillips basé sur le principe de la migration des particules induites par cisaillement en 3D afin d'en tester sa validité.

À notre connaissance, aucune étude n'a été publiée quant à la caractérisation des mélanges mono- ou biphasique d'un système d'agitation coaxial de type Cellier. Cette situation s'explique par la cinématique complexe des agitateurs et le comportement rhéologique particulier des suspensions de pigments dans un tel mélangeur. Puisque ce système d'agitation est très employé dans l'industrie papetière, nous désirons apporter une contribution importante au domaine des mélanges mono- et biphasique pour un tel système. Pour ce faire, nous proposons d'atteindre les objectifs spécifiques suivants :

- Caractérisation expérimentale de la puissance d'agitation pour un fluide newtonien et un fluide modèle ayant un comportement rhéologique se rapprochant de celui d'une suspension concentrée de pigments. Nous étudierons en particulier l'influence du rapport de vitesse entre les agitateurs centraux et périphérique sur la puissance d'agitation. Nous utiliserons également la simulation numérique afin de décrire les profils d'écoulement à l'intérieur du pot de mélange. Dans un but de validation, nous comparerons la puissance d'agitation obtenue numériquement aux valeurs expérimentales.

- Caractérisation expérimentale de la remise en suspension des particules solides pour une suspension newtonienne diluée. Pour ce faire, on ajoutera au fluide newtonien de l'étape précédente des billes de verres et on étudiera l'influence des conditions opératoires sur la qualité de dispersion.

- Caractérisation de la capacité de mouillage, de dispersion et de la puissance d'agitation nécessaires lors de la préparation de suspensions concentrées de kaolin et de sauces de couchage. Nous comparerons les résultats obtenus à un système d'agitation couramment utilisé dans l'industrie, c'est-à-dire une turbine défloculeuse de type Cowles. L'objectif ultime est de pouvoir préparer des suspensions concentrées à moindre coût énergétique.

- Développement d'un code de calcul permettant de prédire la puissance d'agitation et la

distribution des particules solides dans un tel système d'agitation à partir du code de calcul POLY3D (Rhéotek Inc.).

Les prochains chapitres expliquent en détail la méthodologie proposée afin d'atteindre ces objectifs et présentent les résultats de cette thèse :

- chapitre 3 : méthodologie expérimentale,
- chapitre 4 : modélisation numérique des écoulements monophasique et biphasique,
- chapitre 5 : caractérisation de l'hydrodynamique et de la puissance d'agitation : écoulement monophasique,
- chapitre 6 : caractérisation de la remise en suspension et de la préparation de suspensions concentrées,
- chapitre 7 : écoulement biphasique : validation et étude de cas,
- chapitre 8 : conclusions.

- CHAPITRE III -

MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE

1. Montage expérimental

Le montage expérimental consiste en une plate-forme de mélange doté d'un mélangeur coaxial (figure 3.1, photo du montage et figure 3.2, schéma). Il a été réalisé en collaboration avec la compagnie McMillan Bloedel Research située à Burnaby en Colombie-Britannique. Il possède les composantes suivantes :

- moteur à courant alternatif (3 hp, triphasé 220 V) possédant une vitesse nominale de 1760 tours par minute,
- un réducteur de vitesse 3,53:1 diminuant la vitesse nominale à environ 500 tours par minutes,
- un couplemètre de la compagnie Himmelstein de 22,6 N-m (précision de ±0,1% pleine échelle),
- une première courroie actionnant l'arbre rapide (rapport 1:1),
- un tachymètre optique (précision ±1.0 tpm) mesurant la vitesse de l'arbre rapide,
- un axe parallèle de réduction muni d'un inverseur de vitesse (rapport -8:1) et trois poulies donnant la possibilité d'obtenir un rapport de vitesse totale de -4:1, -8:1 et -24:1 entre les arbres rapide et lent,
- une trémie d'alimentation pour l'incorporation des pigments de kaolin et un convoyeur vibrant de la compagnie B.E.S.T. d'une capacité de 1 tonne par heure.

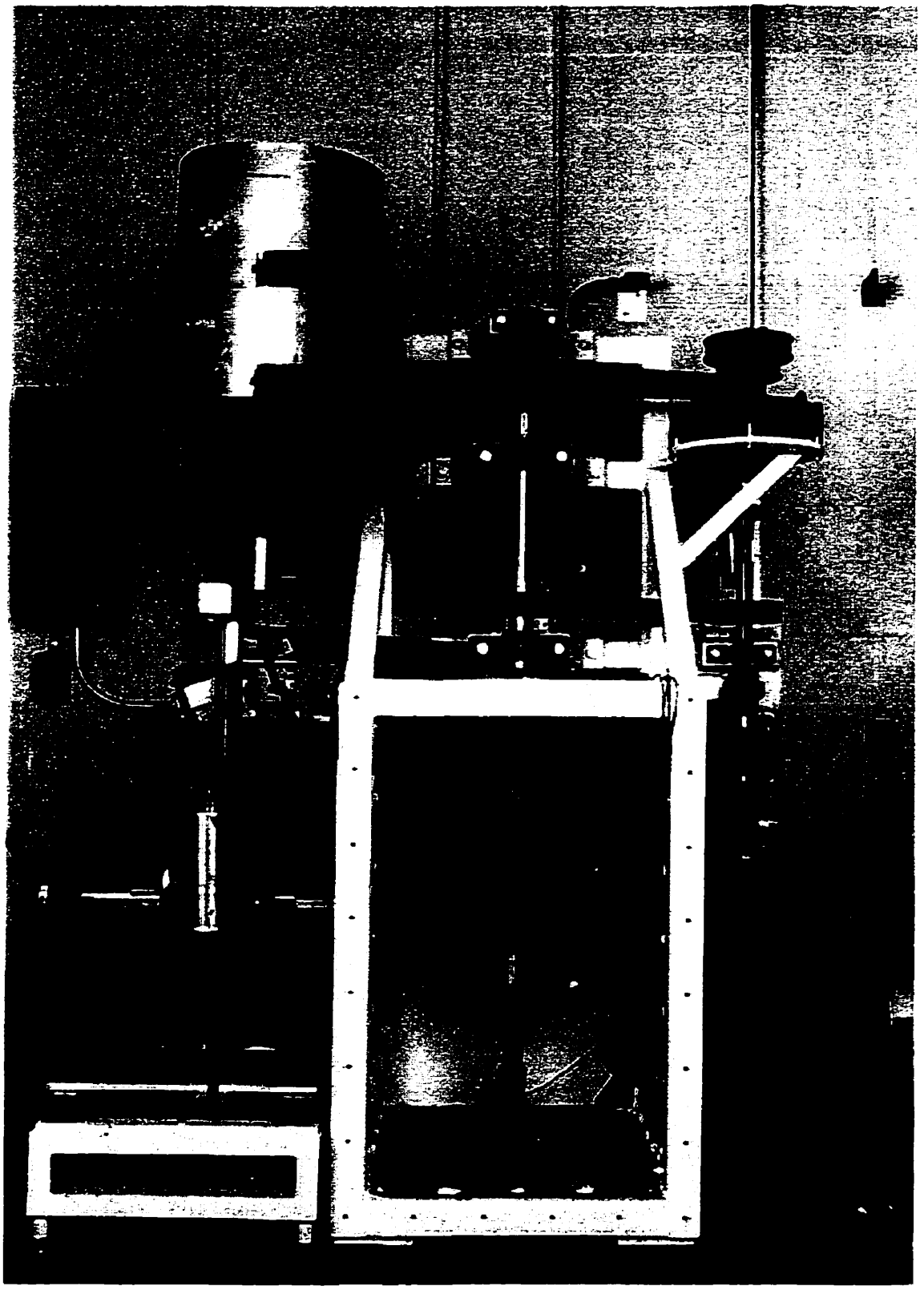


Figure 3.1 Photo du montage expérimental et ces composantes.

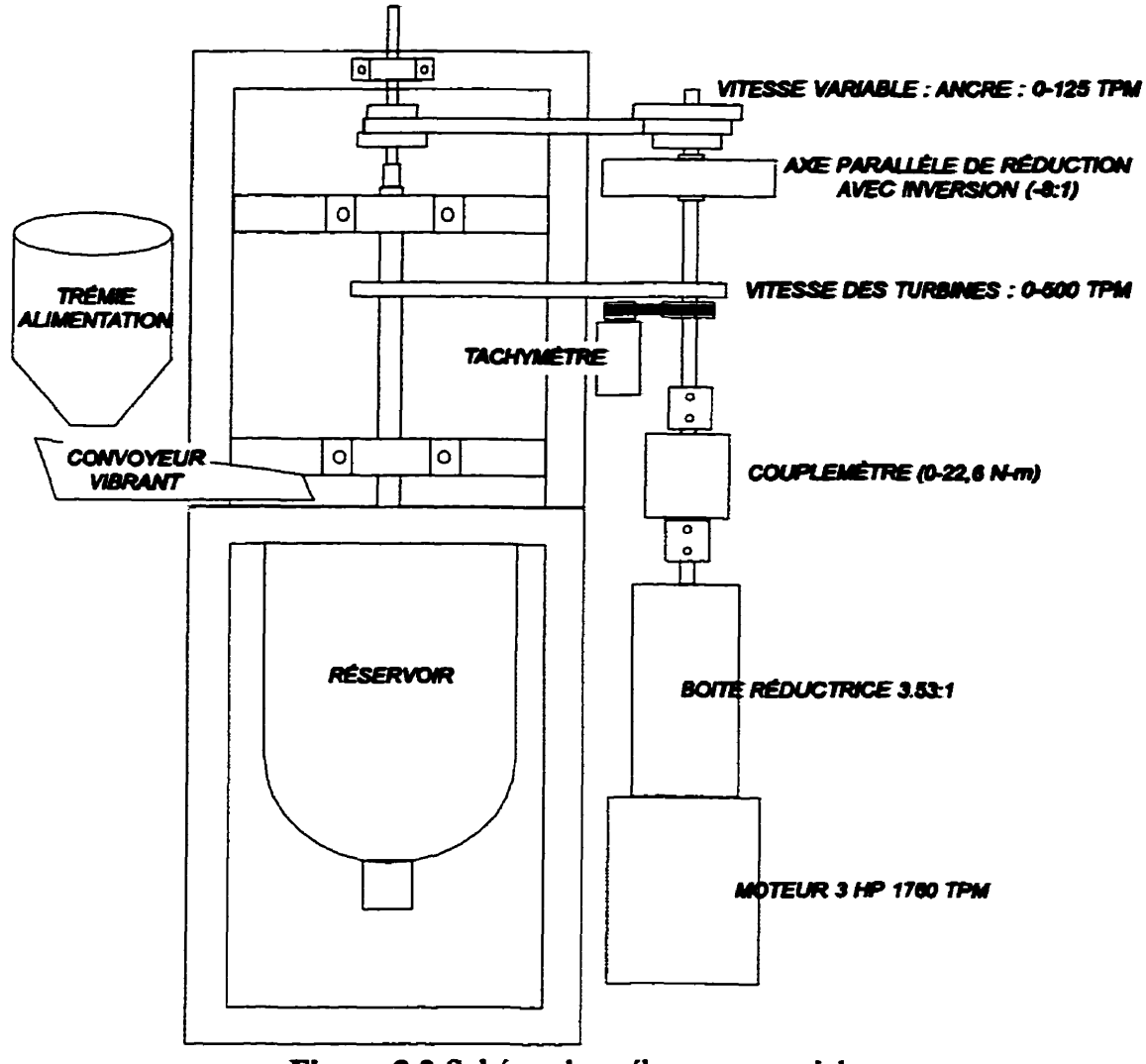


Figure 3.2 Schéma du mélangeur coaxial.

Les caractéristiques géométriques du réservoir et des agitateurs sont illustrées à la figure 3.3. Le réservoir, en acier inoxydable, possède un diamètre (D_c) de 40,64 cm (16 po), une partie hémisphérique en fond de cuve et une section cylindrique de hauteur (H_c) égale au diamètre (D), lui conférant une capacité d'environ 60 litres. Les agitateurs possèdent les caractéristiques suivantes :

- Ancre : - Diamètre $D_a = 36,83$ cm, Largeur $W_a = 3,81$ cm, Entrefer $C_w = 1,9$ cm,

  $\therefore$ $C_w/D_c = 0,047$, $D_a/D_c = 0,906$, $W_a/D_a = 0,103$

- 4 tiges de mélange : - Diamètre (longueur) D_t = 23,77 cm, Diamètre (section) D_{st} = 0,95 cm, alternées de 90°, ∴ $D_t/D_c = 0,585$,

- Turbine à 2 pales inclinées à 45° : - Diamètre D_{pi} = 20,2 cm, largeur W_p = 5 cm, longueur L_p = 7cm, distance du fond C_b = 20,32 cm, ∴ $D_{pi}/D_c = 0,5$, $C_b/D_c = 0,5$

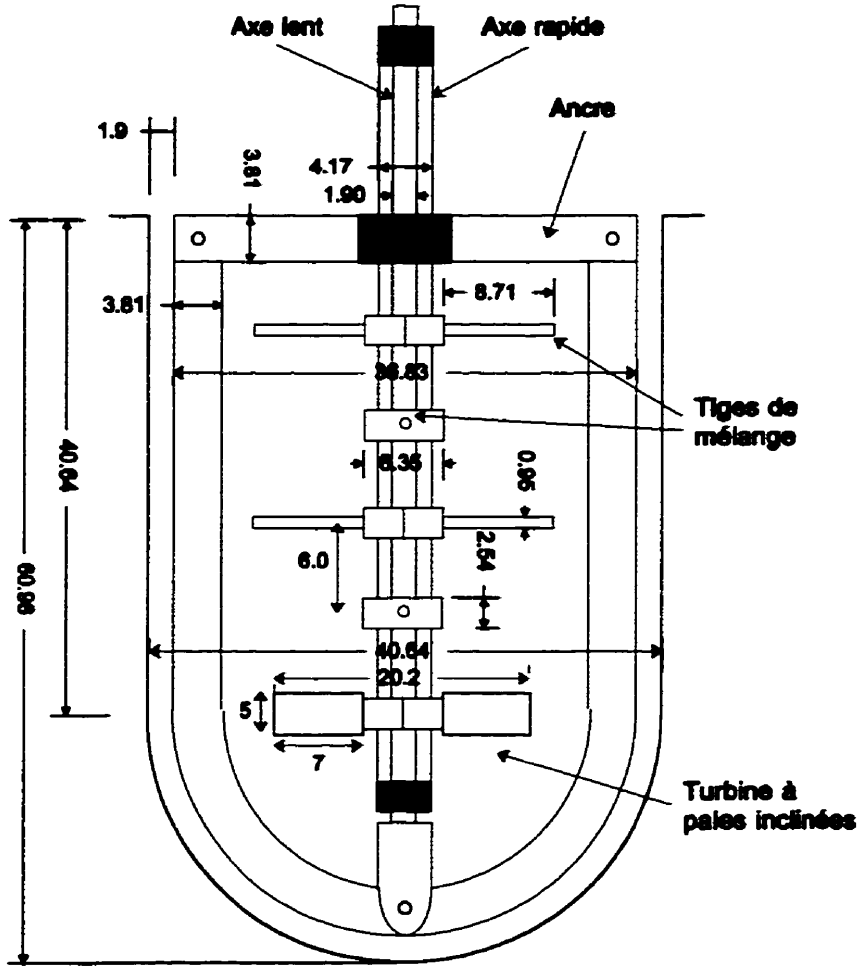


Figure 3.3 Schéma et dimensions du réservoir et des agitateurs (dimensions en cm)

L'arbre rapide entraîne les quatre tiges de mélange et la turbine à pales inclinées situées dans la partie centrale du réservoir dans la direction anti-horaire alors que l'arbre lent, imbriqué à

l'intérieur de l'axe rapide, entraîne l'ancre située en périphérie du réservoir dans la direction opposée. Le rôle de ces agitateurs est le suivant :

- l'ancre permet de remettre en suspension les particules en fond de cuve et de ramener les particules de la périphérie vers la partie centrale du pot de mélange. De plus, elle agit comme une contrepale, empêchant ainsi la formation d'un vortex et favorisant par le fait même la qualité du mélange.
- la turbine à pales inclinées (TPI) favorise un pompage axial vers le haut afin d'assurer la remise en suspension des particules dans la partie supérieure. Elle est positionnée au début de la partie cylindrique,
- les tiges de mélange facilitent le mouillage des pigments se déposant à la surface libre de la suspension tout en consommant peu d'énergie car elles offrent une faible résistance à l'écoulement (Duquesnoy et al., 1997). Pour ces raisons, nous avons jugé bon de tester cette nouvelle idée dans une situation réelle. Dans cette thèse, nous étudierons la préparation de pigments de kaolin selon un procédé discontinu, ce qui implique une évolution de la surface libre de la suspension avec l'incorporation de pigments dans le réservoir. Afin d'assurer un mouillage adéquat des pigments pendant toute l'incorporation, ces tiges de mélange ont été également espacées ($\Delta h = 6$ cm) et alternées de 90° entre la TPI et la surface libre du fluide à l'étude. Une fois l'incorporation terminée, elles permettront d'obtenir une bonne homogénéité des particules dans la partie supérieure.

À notre connaissance, aucune configuration de ce type n'a été étudiée. La majorité des manufacturiers (Cellier-France, Ekato-Allemagne, DCI-États-Unis) utilisent des turbines à pales inclinées dans la partie centrale du pot de mélange car le mouillage est généralement effectué dans une étape antérieure.

De plus, nous avons la possibilité d'opérer avec l'ancre seulement car les tiges de mélange et la TPI sont fixées à l'arbre rapide à l'aide de collets de serrage et peuvent être amovibles. De plus, en enlevant la courroie entraînant l'axe lent (ancre), nous avons aussi la possibilité de

travailler avec les tiges de mélange et la TPI seulement. La gamme de vitesses entre les agitateurs rapide et lent est montrée au tableau 3.1.

Tableau 3.1 Gamme des vitesses des agitateurs rapide et lent.

Rapport de vitesses N_c/N_a	Gamme de vitesse axe lent N_a (tours/min)	Gamme de vitesse axe rapide N_c (tours/min)†
0 (ancre seulement)	[0-125]	0
4	[0 - 125]	[0-500]
8	[0 - 62.5]	[0-500]
24	[0 - 20.8]	[0-500]
∞ (tiges+TPI seulement)	0	[0-500]

† Afin d'alléger le texte, les unités de tours/min seront aussi dénotés tpm.

Afin de visualiser les mécanismes de mélange, la cuve de mélange est immergée dans un bassin rectangulaire rempli d'eau, diminuant par le fait même les effets de réfraction près des parois. L'enregistrement vidéo est effectué à l'aide d'une caméra CCD (Hitachi, modèle VCK 370).

2. Stratégie d'expérimentation

La phase expérimentale nous permettra d'acquérir une base de connaissance sur la puissance d'agitation et le degré d'homogénéité d'une suspension à l'intérieur d'un mélangeur coaxial en fonction des conditions opératoires. Plus spécifiquement, les valeurs expérimentales ainsi obtenues serviront de base de comparaison pour la validation de l'approche numérique proposée dans cet ouvrage. Compte-tenu de la cinématique complexe du système d'agitation (agitateurs tournant dans des directions opposées et possédant des vitesses de rotation différentes) et la rhéologie non newtonienne des suspensions de pigments, il ne serait pas réaliste d'attaquer de plein front ce problème. Pour ce faire, nous proposons l'approche suivante par ordre croissant de complexité :

a) Caractérisation de la puissance d'agitation pour un fluide newtonien monophasique,

b) Caractérisation de la puissance d'agitation pour un fluide modèle non-newtonien monophasique. De plus, ce fluide devra posséder un caractère rhéofluidifiant, comportement typique des suspensions de pigments de kaolin à faibles vitesses de déformation,

c) Caractérisation de la remise en suspension d'une suspension newtonienne dilué, i.e. le fluide newtonien de la section a) auquel nous ajouterons des billes de verre rouge afin de visualiser leur mouvement et leur répartition dans l'ensemble du réservoir,

d) Caractérisation de l'énergie de mouillage, du degré de dispersion et de la puissance d'agitation lors de la préparation de suspensions concentrées des pigments de kaolin. De plus, nous comparerons l'efficacité du mélangeur coaxial à l'étude avec un mélangeur à turbine défloculeuse (Cowles) (figure 1.5).

2.1 Mélange d'un fluide newtonien monophasique

Pour ce faire, nous avons utilisé un sirop de maïs (Enzose glucose #1630) de la compagnie CASCO (division de Canada Starch Company Inc.). Ce type de fluide, tout en étant transparent, possède une viscosité constante égale à 21,5 Pa-s et une masse volumique de 1360 kg/m^3. Afin de caractériser la puissance d'agitation en fonction des conditions opératoires, la phase expérimentale consiste à imposer une rampe de vitesse tout en mesurant la valeur de la vitesse de rotation des agitateurs et du couple total s'exerçant sur ces derniers. Puisqu'il existe un couple résiduel causé par la friction des roulements à bille et des réducteurs de vitesse lorsque le mélangeur coaxial fonctionne à vide, nous avons pris soin d'étalonner sa variation en fonction des conditions opératoires et de le soustraire du couple total mesuré afin d'obtenir le couple net s'exerçant sur les mobiles d'agitation.

Plusieurs expériences ont été réalisées afin de caractériser la puissance d'agitation pour diverses configurations telles que :

- Cas No 1 : - Cinématique simple de rotation :
  a) ancre seulement,
  b) tiges de mélange + TPI seulement,
- Cas No 2 : - Cinématique complexe de rotation :
  a) mélangeur coaxial : caractérisation de la puissance d'agitation en fonction des différents rapports de vitesse ($R_N = 4, 8, 24$).

2.2 Mélange d'un fluide non newtonien monophasique

Le fluide non newtonien employé est une solution aqueuse de gellane (Kelcogel™, Kelco division de la compagnie Monsanto) 1% massique. La gomme de gellane, obtenu sous forme de poudre est un polysaccharide de haute masse moléculaire. La préparation de cette solution aqueuse est délicate car la poudre de gellane est très difficile à dissoudre dans l'eau. On se doit de l'alimenter très lentement au sein du mélangeur à l'aide du convoyeur vibrant afin d'obtenir un bon mouillage. On doit aussi prendre soin de le stabiliser par l'ajout de 2 g/l de citrate de sodium. Mentionnons que la concentration en citrate de sodium modifie grandement la viscosité de la solution. Finalement, afin d'éviter la prolifération de bactéries qui pourrait entraîner une modification du comportement rhéologique, 200 ppm de nitrure de sodium NaN_3 (agent bactéricide) a été ajouté.

Une caractérisation rhéologique de cette solution a été menée à l'aide d'un rhéomètre Bohlin CVO afin d'obtenir la courbe d'écoulement, i.e. la variation de la viscosité en fonction de la vitesse de déformation (figure 3.4). Comme on peut le constater, le gellane possède un plateau newtonien à basse vitesse de déformation et un comportement rhéofluidifiant lorsque la vitesse de déformation devient supérieure à 1 s^{-1}. Puisque la vitesse de déformation moyenne dans le mélangeur coaxial est généralement supérieure à 1 s^{-1}, nous avons décidé de lisser les données expérimentales en utilisant un modèle loi de puissance

$$\eta = K|\dot{\gamma}|^{n-1} \qquad [3.1]$$

où K est l'indice de consistance et n l'indice de loi de puissance. Après lissage, nous obtenons les valeurs suivantes : K = 10 Pa-s^n et n = 0.3. Tout comme les suspensions de pigments et les sauces de couchage, cette solution de gellane est fortement rhéofluidifiante et possède un indice de loi de puissance sensiblement identique.

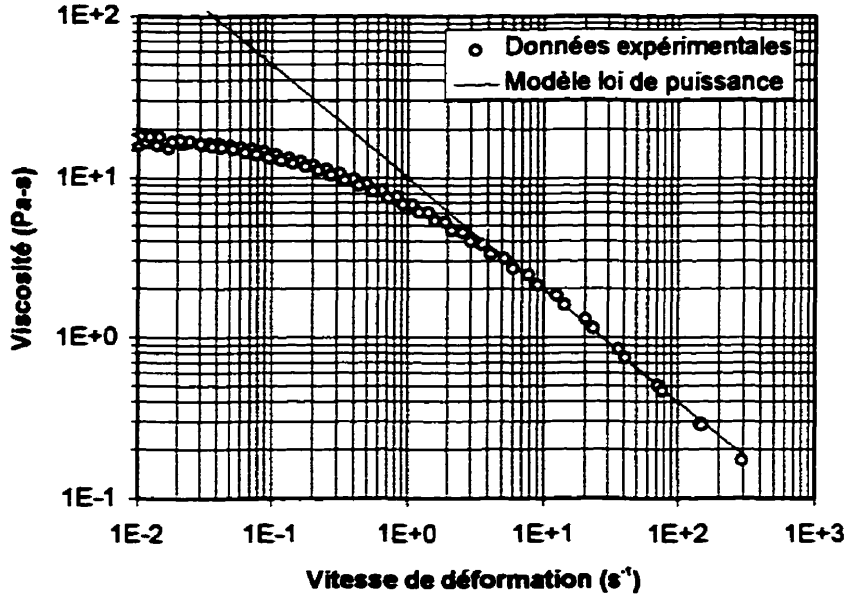


Figure 3.4 Courbes de viscosité en fonction de la vitesse de déformation pour une solution de gellane 1%.

Pour ce type de fluide, la caractérisation de la puissance d'agitation a été effectuée sur le mélangeur coaxial seulement en fonction des différents rapports de vitesse (R_N = 4, 8, 24).

2.3 Mélange d'une suspension newtonienne (biphasique) diluée

Afin de visualiser le mouvement de particules à l'intérieur du réservoir, nous avons préalablement dilué le sirop de maïs transparent de la section 2.1 à 1 Pa-s et ajouté des billes de verre rouges #4 (JB Company, USA) possédant un diamètre moyen de 1 mm, une masse

volumique de 2500 kg/m^3 et une fraction volumique maximale ϕ_m de 0,6 (voir annexe A pour la caractérisation des propriétés physiques). En ce qui concerne le comportement rhéologique, nous faisons l'hypothèse que la viscosité de la suspension suit l'équation de Krieger-Dougherty suivante

$$\eta_r = \frac{\eta_s}{\eta_l} = \left(1 - \phi/\phi_m\right)^{-1.82} \qquad [3.2]$$

Les expériences suivantes ont été menées afin de valider l'approche numérique proposée dans cette thèse d'une part et de caractériser la capacité de dispersion du mélange coaxial d'autre part :

- Cas No 1 : - Cinématique simple de rotation :
  hélice marine : visualisation de la distribution des particules solides en fonction de la vitesse de rotation et de la concentration massique moyenne dans le réservoir à l'aide d'un enregistrement vidéo.

- Cas No 2 : - Cinématique complexe de rotation :
  mélangeur coaxial : visualisation de la distribution des particules solides en fonction du rapport de vitesse (R_N = 4, 8, 24) pour une concentration massique moyenne de 1% à l'aide d'un enregistrement vidéo.

2.4 Mélange de suspensions concentrées de kaolin

Pour ce qui est de la sauce de couchage, nous avons utilisé une formulation commerciale de MacMillan Bloedel Research. Pour des raisons évidentes de confidentialité, nous nous limiterons à une description sommaire des ingrédients de la formulation et de la procédure de préparation.

La préparation de la suspension débute avec le remplissage de la cuve avec de l'eau (solvant) et un dispersant anionique (dispex N40). Par la suite, nous ajoutons les pigments de kaolin à

l'aide du convoyeur vibrant jusqu'à l'obtention d'une concentration massique de 68%. Ces pigments sont constitués de 90% en kaolin délaminé (Astraplate SD) et de 10% en koalin calciné (Alphatex) de la compagnie ECC International. Le débit d'incorporation des deux argiles est d'environ 10 g/s et 1 g/s respectivement. Pendant l'incorporation des pigments, nous prenons soin de mesurer le couple s'exerçant sur les mobiles d'agitation et leur vitesse de rotation. Ceci nous permettra d'estimer l'énergie de mouillage. Une fois l'incorporation terminée, nous effectuons les mesures suivantes :

- la masse volumique de la suspension de kaolin et la valeur du pH,
- le pourcentage massique de la suspension en prélevant trois échantillons à différents endroits au niveau de la surface libre. Cette mesure nous donne une indication du degré d'homogénéité au sein du réservoir,
- le comportement rhéologique de la suspension.

Afin d'assurer une bonne dispersion des pigments (réduction de taille des agrégats), nous agitons cette suspension pendant une heure et échantillonnons à intervalle régulier. Ces échantillons seront soumis à une analyse rhéologique afin de caractériser indirectement la réduction de taille des particules. Finalement, nous effectuons des rampes de vitesse pour caractériser la puissance d'agitation de cette suspension en fonction des différents rapports de vitesse ($R_N = 4, 8, 24$).

Une fois ces étapes terminées, nous ajoutons les différents additifs (dans le même ordre d'incorporation que présenté au tableau 3.2) afin de compléter la préparation de la sauce de couchage. Le pH de la sauce de couchage est ajusté entre 7,4 et 8,0 par l'ajout de soude caustique. Une fois la sauce de couchage terminée, nous effectuons les mêmes mesures que pour la suspension concentrée ci-avant mentionnées.

Les résultats ainsi obtenus seront comparés à ceux obtenus à l'aide d'un mélangeur de type Cowles afin de vérifier l'efficacité du mélangeur coaxial présenté dans cette thèse. Les

Tableau 3.2 Composants de la sauce de couchage à l'étude.

Composants	Nom commercial	Poids (base sèche) kg/100 kg pigments	Poids solution kg
Eau	-	-	21,33
Dispersant	Dispex N40	0,10	0,15
Kaolin délaminé	Astraplate SD	10,0	40,88
Kaolin calciné	Alphatex	90,0	4,54
Amidon	I1	6,0	2,73
Latex	I2	10,0	4,54
Insolubilisant	I3	0,18	0,08
Lubrifiant	I4	0,50	0,23
Modificateur de viscosité	I5	0,30	0,14
Agent de brillance	I6	0,20	0,09
Modificateur de pH	Hydroxide de sodium	-	-
		Total	88,7

caractéristiques de ce disperseur sont illustrées à la figure 3.5. Lors des essais, nous avons utilisé deux disperseurs différents possédant un diamètre de 15 et 17 cm.

Finalement, mentionnons que les suspensions concentrées de koalin et les sauces de couchage ont l'inconvénient d'être opaques. Pour cette raison, nous ne pourrons visualiser la dispersion des pigments dans la cuve de mélange. Bien qu'une méthode de soutirage puisse en principe être utilisée afin d'évaluer cette dispersion, l'incertitude de cette méthode, telle que mentionnée dans la revue de la littérature, nous force à l'abandonner.

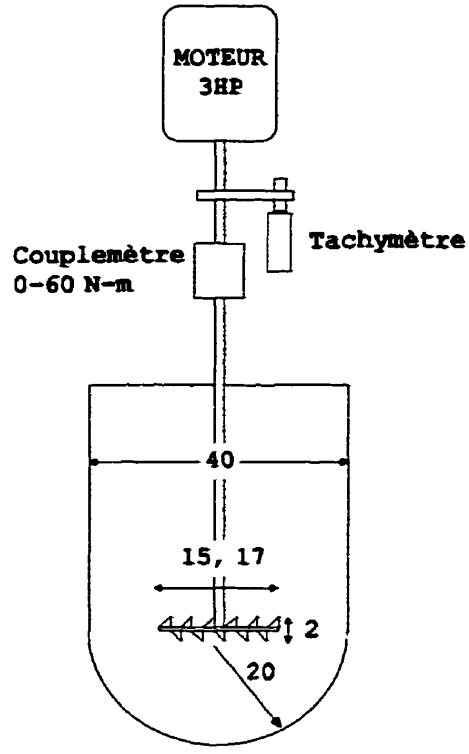


Figure 3.5 Schéma et dimensions géométriques de la turbine à roue dentée (dimensions en cm).

3. Acquisition de données et mesures

L'acquisition de données est effectuée à l'aide du logiciel LabVIEW® de National Instruments. Ce logiciel permet de contrôler la vitesse du moteur et le débit du convoyeur vibrant. De plus, nous avons automatisé l'imposition de la rampe de vitesse et les mesures de la vitesse de rotation de l'arbre rapide et du couple s'exerçant sur les mobiles d'agitation. L'acquisition de données est effectuée à une fréquence de 500 Hz pour chacun des canaux échantillonnés. Nous avons pris soin de vérifier temporellement les lois d'étalonnage du tachymètre et du couplemètre.

- CHAPITRE IV -

MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES ÉCOULEMENTS MONOPHASIQUE ET BIPHASIQUE

Dans ce chapitre, nous nous proposons de décrire la modélisation par éléments finis des écoulements de type monophasique et biphasique dans un mélangeur coaxial. À cette fin, nous présenterons les équations d'échange et de conservation des phases liquide et solide décrivant la dynamique d'écoulement. En ce qui concerne la phase solide, deux approches sont proposées, à savoir la résolution de l'équation convection-sédimentation du modèle de Mann à l'aide d'une méthode aux volumes finis 3D d'une part et la résolution de l'équation de migration des particules induites par cisaillement du modèle de Phillips à l'aide d'une méthode d'éléments finis 3D d'autre part. Une comparaison entre les deux approches pourra alors être effectuée.

1. Équations de Navier-Stokes

Considérons le mouvement d'une suspension incompressible isotherme dans le domaine Ω à l'étude. L'écoulement est alors décrit par les équations de Navier-Stokes qui caractérisent la conservation de la quantité de mouvement et de la matière

$$\rho_m\left(\frac{\partial v}{\partial t}+v\cdot grad\, v\right)+grad\, p+div\,\tau=\rho_m g, \quad \text{dans } \Omega \qquad [4.1]$$

$$div\, v=0, \quad \text{dans } \Omega \qquad [4.2]$$

où *v, p, g et* ρ_m représentent respectivement le vecteur vitesse, la pression, l'accélération gravitationnelle et la masse volumique du milieu étudié.

· Pour un écoulement monophasique : $\rho_m = \rho_l$ [4.3]

· Pour un écoulement biphasique : $\rho_m = \rho_l (1-\phi) + \rho_s \phi$ [4.4]

où ρ_l et ρ_s représentent respectivement la masse volumique des phases liquide et solide.

Dans l'équation [4.1], nous allons supposer que le tenseur des contraintes τ est relié au tenseur des vitesses de déformation $\dot{\gamma}$ par une équation d'état rhéologique de la forme

$$\tau = -2\,\eta_s(|\dot{\gamma}|,\phi)\,\dot{\gamma} \qquad [4.5]$$

où le tenseur des vitesses de déformation est défini par $\dot{\gamma} = ½ [\text{grad } v + (\text{grad } v)^T]$ et où $|\dot{\gamma}| = (\dot{\gamma}:\dot{\gamma})^{½}$. La viscosité de la suspension (η_s) peut être fonction de la norme de la vitesse $|\dot{\gamma}|$ et de la fraction volumique en particules solides (ϕ). Dans ce travail, les modèles de viscosité suivants seront utilisés en fonction du type d'écoulement :

· Écoulement monophasique :

- modèle newtonien : $\eta_s(|\dot{\gamma}|,\phi) = \mu$ [4.6]

- modèle de la loi de puissance : $\eta_s(|\dot{\gamma}|,\phi) = K\,|\dot{\gamma}|^{n-1}$ [4.7]

· Écoulement biphasique :

- modèle de Krieger-Dougherty (suspension newtonienne) :

$$\eta_s(|\dot{\gamma}|,\phi) = \eta_l\,(1-\phi/\phi_m)^{-1,82} \qquad [4.8]$$

- double loi de puissance (suspension non newtonienne) :

$$\eta_s(|\dot{\gamma}|,\phi) = K_1(\phi)\,|\dot{\gamma}|^{n_1(\phi)-1} + K_2(\phi)\,|\dot{\gamma}|^{n_2(\phi)-1} \qquad [4.9]$$

Dans ces modèles rhéologiques, μ représente la viscosité newtonienne, K et n les indices de consistance et de la loi de puissance, η_l la viscosité de la phase liquide (fluide suspendant), K_2 et n_2 des constantes empiriques permettant de prendre en compte le comportement rhéoépaississant des suspensions de pigments.

1.1 Conditions limites

Pour que le problème soit bien posé, les équations de conservation de la quantité de mouvement (équ. [4.1]) et de la matière (équ. [4.2]) doivent être complétées par l'imposition de conditions limites et de conditions initiales. Dans le mélangeur coaxial, deux différents types d'agitateur tournent à des vitesses différentes dans des directions opposées, ce qui implique une cinématique complexe de rotation. Pour des raisons de simplicité, nous avons décidé de limiter à un seul le nombre d'agitateur en mouvement au sein du réservoir. En ce qui nous concerne, notre choix s'est arrêté sur l'ancre. Si dans le repère du laboratoire, l'ancre est animée d'une vitesse Ω_{ancre}, alors dans le repère dit lagrangien, l'ancre est fixe et la paroi du réservoir tourne dans la direction opposé à la même vitesse. Par contre, cette vitesse Ω_{ancre} vient s'ajouter à la vitesse de l'agitateur central $\Omega_{turbines}$ (figure 4.1).

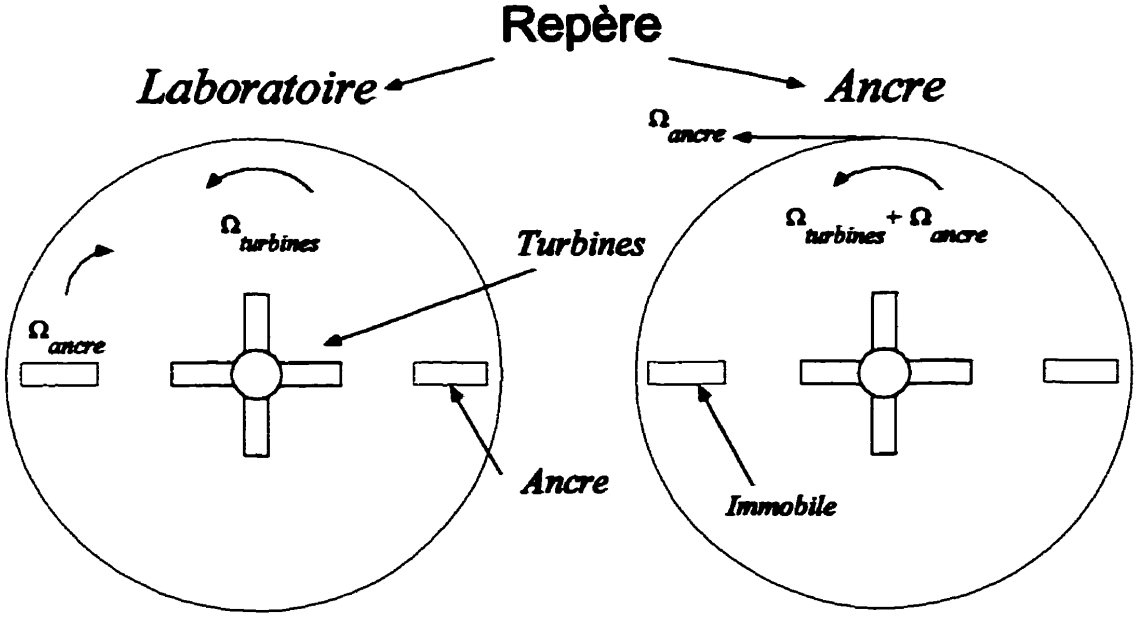


Figure 4.1 Description du repère de calcul Lagrangien (repère de l'ancre).

Dans un tel repère, le fluide est soumis à une accélération constante et l'équation de conservation de quantité de mouvement [4.1] doit être modifiée afin de prendre en compte les forces centrifuges et de Coriolis (Tritton, 1988) :

$$\rho_m\left(\frac{\partial v}{\partial t}+v\cdot grad\,v+\Omega_{mcre}\times(\Omega_{mcre}\times r)+2\Omega_{mcre}\times v\right)+grad\,p+div\,\tau=\rho_m g \qquad [4.10]$$

La résolution des écoulements dans un tel repère ne peut donc être que transitoire car la position de l'agitateur central évolue temporellement, et la solution du problème est au plus périodique en régime laminaire.

Nous avons choisi de résoudre les équations différentielles partielles précédentes par la méthode des éléments finis (MEF) qui s'appuie sur l'utilisation du calcul variationnel. Cette méthode permet de reformuler le problème en un système d'équations algébriques.

1.2 Méthode de résolution

1.2.1 Formulation variationnelle

Dans un premier temps, nous allons développer le principe variationnel associé aux équations de Navier-Stokes stationnaire sans terme convectif pour un fluide newtonien incompressible (équations de Stokes). Par la suite, ces termes seront réintroduits dans la formulation variationnelle de manière formelle.

Soit l'équation de Stokes

$$\mu\nabla^2 v+grad\,p=f \qquad [4.11]$$

sous la contrainte

$$div\,v=0 \qquad [4.12]$$

La formulation faible de ce problème, en supposant des conditions aux limites homogènes de Dirichlet sur la frontière Γ, s'obtient en multipliant les équations [4.11] et [4.12] par les fonctions-tests ψ et ϕ (appartenant aux espaces de Sobolev appropriés) et en intégrant par partie à l'aide du théorème de Green

$$\mu \int_{\Omega} grad\, v\, grad\, \psi\, d\Omega - \int_{\Omega} p\, div\, \psi\, d\Omega = \int_{\Omega} f \cdot \psi\, d\Omega, \quad \forall \psi \in \left[H_0^1(\Omega)\right]^3 \qquad [4.13]$$

$$\int_{\Omega} \xi\, div\, v\, d\Omega = 0, \quad \forall \xi \in L^2(\Omega) \qquad [4.14]$$

On peut montrer que ce problème est équivalent (Fortin et Glowinski, 1982) à celui de la minimisation de la fonctionnelle d'énergie L(v,p) suivante dans laquelle la contrainte d'incompressibilité est traitée en utilisant la pression comme multiplicateur de Lagrange;

$$\underset{v \in \left[H_0^1(\Omega)\right]^3}{Inf}\ \underset{p \in L^2(\Omega)}{Sup}\, L(v,p) \qquad [4.15]$$

dans lequel

$$\underset{v \in \left[H_0^1(\Omega)\right]^3,\ p \in L^2(\Omega)}{L(v,p)} = \frac{\mu}{2} \int_{\Omega} |grad\, v|^2 d\Omega - \int_{\Omega} p \cdot div\, v\, d\Omega - \int_{\Omega} f \cdot v\, d\Omega \qquad [4.16]$$

Afin d'améliorer la convergence, Fortin et Glowinski proposent d'introduire un terme de pénalité dans le lagrangien [4.16] (méthode du lagrangien augmenté) :

$$L_r(v,p) = L(v,p) + \frac{r}{2} \int_{\Omega} |div\ v|^2 d\Omega \qquad [4.17]$$

où r est un paramètre de pénalisation.

On est donc amené à résoudre un problème de point-selle caractérisé par les équations d'Euler, c'est-à-dire $\partial L_r(v,p)/\partial v = 0$ et $\partial L_r(v,p)/\partial p = 0$; on obtient alors les équations de Stokes (équ. [4.13] et [4.14]). L'algorithme approprié pour la recherche du point-selle de l'équation [4.15] est l'algorithme d'Uzawa suivant :

1. Soit $p^{(0)}$ arbitrairement donné,
2. Pour n=0,1,2,..., jusqu'à convergence,
   - 2.1 Résoudre, $p^{(n)}$ étant connu

$$\mu\int_{\Omega} grad\, v^{(n+1)} grad\, \psi\, d\Omega + r\int_{\Omega} div\, v^{(n+1)} div\, \psi\, d\Omega = \int_{\Omega} f\, \psi\, d\Omega + \int_{\Omega} p^{(n)}\, div\, \psi\, d\Omega, \forall \psi \in \left[H_0^1(\Omega)\right]^3 \qquad [4.18]$$

2.2 Calculer $p^{(n+1)}$

$$\int_{\Omega} \xi\, p^{(n+1)} d\Omega = \int_{\Omega} \xi\, p^{(n)} d\Omega + r\int_{\Omega} \xi\, div\, v^{(n+1)} d\Omega, \forall \xi \in L^2(\Omega) \qquad [4.19]$$

On constate que l'algorithme d'Uzawa permet la décomposition d'un problème contraint en une suite de problèmes non contraints.

Lorsque le comportement rhéologique est non newtonien, la résolution du problème de point-selle devient non-linéaire. Afin de pallier ce problème, Fortin et Glowinski (1982) et Tanguy et al. (1984) ont développé un algorithme de décomposition-coordination par lagrangien augmenté pour traiter cette non-linéarité.

Finalement, il a été démontré qu'il est possible de généraliser l'algorithme d'Uzawa précédent afin d'obtenir la solution des équations de Navier-Stokes pour notre problème (équ. [4.2] et [4.10]). Le lecteur intéressé peut se référer par exemple à la bibliographie de Fortin et Fortin (1985). Mentionnons simplement qu'il s'agit d'ajouter formellement à l'équation [4.18] les termes associés aux forces d'inertie, de Coriolis et d'accélération reliées au repère lagrangien et finalement le terme d'accumulation de la quantité de mouvement.

1.2.2 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est utilisée afin de discrétiser le système d'équations de Navier-Stokes. Cette méthode s'appuie sur l'utilisation de bases d'approximation polynomiales (polynômes d'interpolation de Lagrange) pour la vitesse et la pression. Les fonctions-tests sont en général identiques aux bases d'approximation (méthode de Ritz-Galerkin). Le choix du type d'élément fini est un aspect très important car il existe une

restriction sur le choix des bases d'approximation en vitesse et pression. Pour garantir la précision des calculs, en particulier l'évaluation de la pression, la condition de compatibilité de Brezzi-Babuska [6, 22] doit être satisfaite. Une fois la discrétisation terminée, le système matriciel ainsi obtenu peut être résolu à l'aide d'une méthode directe de type LU ou par une méthode itérative (Robichaud et al., 1990; Bertrand et Tanguy, 1999).

Dans cette étude, des éléments finis tétraédriques ont été choisis en raison de la flexibilité de génération de maillage. Les deux types d'élément choisis, qui respectent la condition de Brezzi-Babuska et permettent de conserver la matière localement, sont les éléments P_1^+-P_0 et P_2^+-P_1 (figure 4.2) (Bertrand et al., 1992). Les éléments P_1^+-P_0 possèdent des bases d'approximation linéaires enrichies en vitesse et à pression discontinue constante par élément. Pour leur part, les éléments P_2^+-P_1 sont quadratiques enrichis en vitesse et à pression discontinue linéaire par élément.

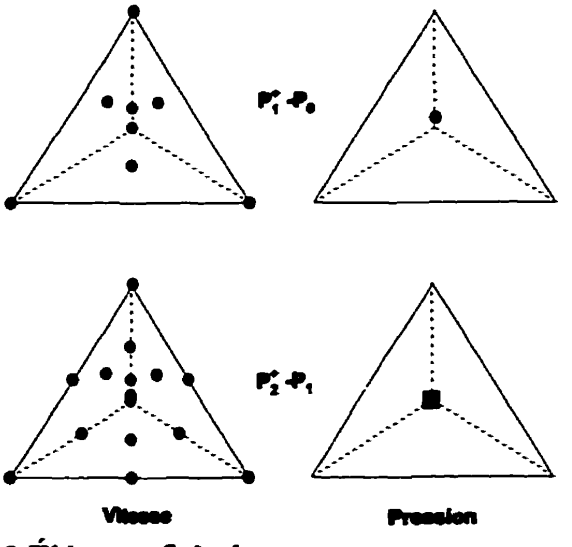


Figure 4.2 Éléments finis de types
a) P_1^+-P_0 : - 8 noeuds en vitesse (4 sommets et 4 centres des faces),
- pression constante
b) P_2^+-P_1 : - 15 noeuds en vitesses (4 sommets, 4 centres des faces, 6 arêtes et 1 barycentre),
- pression linéaire.

Comme mentionné auparavant, la résolution des équation de Navier-Stokes demeure cependant instationnaire car la position de l'agitateur central évolue dans le temps. Il ne serait pas réaliste de traiter le problème d'éléments finis de manière traditionnelle car cela nécessiterait un remaillage pour chaque pas de temps. Puisque le nombre de pas de temps nécessaire afin de décrire correctement la cinématique des agitateurs est important, cette stratégie demeure inaccessible pour le moment. Afin de pallier ce problème, plusieurs alternatives ont été proposées dans la littérature, à savoir :

- la représentation des agitateurs à l'aide de sources ou puits de quantité de mouvement à l'intérieur du domaine à l'étude (Pelletier et Schetz, 1986). Cette méthode ne peut être utilisée que pour des géométries simples. D'un point de vue pratique, l'inconvénient majeur est la difficulté d'évaluer la force équivalente représentant les objets en rotation;
- une méthode de Lagrangien avec relocalisation des noeuds du maillage en fonction du temps (Demirdzic et Peric, 1990). Bien que cette méthode permet de simuler l'écoulement de géométries complexes (objets mobiles et fixes), par contre, après quelques pas de temps, le maillage devient irrégulier et nécessite un remaillage;
- une stratégie de décomposition du domaine d'écoulement avec maillages glissants ("sliding meshes") (Perng et Murty, 1993). Cette stratégie est très populaire dans la littérature et employée par exemple dans le code commercial Fluent™. Elle consiste à mailler le domaine d'écoulement en plusieurs maillages de formes annulaires et cylindriques afin de permettre le glissement des uns par rapport aux autres. La continuité de la solution entre deux maillages adjacents est assurée par interpolation. Bien qu'elle soit populaire, cette méthode est limitée à des agitateurs centrés dans le pot de mélange et aucune analyse d'erreur n'a été publiée dans la littérature;
- une technique de superposition de maillages utilisée par les logiciels commerciaux tels FIDAP et PolyFlow. Cette méthode consiste à générer un maillage volumique sans les objets mobiles et un maillage surfacique pour chacun de ces objets. À chaque pas de temps, la technique consiste à positionner le maillage de chaque objet mobile dans le maillage volumique et à déterminer si les noeuds du maillage volumique sont situés à l'intérieur du

maillage des objets mobiles. Si c'est le cas, ces noeuds sont imposés en vitesse connaissant la cinématique de rotation des objets mobiles. Cette technique a l'avantage d'être simple, robuste et nécessite aucun remaillage. Par contre, une attention particulière doit être portée à la taille de maille du maillage volumique et des maillages surfaciques des objets mobiles car cette stratégie ne permet pas d'obtenir une bonne représentation géométrique des objets mobiles.

- la méthode des éléments virtuels (MEFV) (Bertrand et al., 1997) qui s'inscrit dans le cadre plus global de la méthode des domaines fictifs à multiplicateurs de Lagrange (Glowinski et al., 1994). Cette méthode permet la simulation d'écoulement dans des géométries comprenant des parties mobiles dont la cinématique peut être des plus complexes. La description de cette méthode est présentée dans la section suivante.

1.2.3 Méthode des éléments finis virtuels (MEFV)

La méthode des éléments finis virtuels ou domaine fictif a été mise au point afin de simuler le mouvement d'un ou plusieurs objets mobiles à l'intérieur d'un domaine à l'étude. Elle permet donc d'éviter le remaillage, qui demeure une tâche fastidieuse en 3D, et ainsi de prédire la dynamique d'écoulement pour des systèmes possédant une cinématique complexe. Par exemple, Bertrand (1995) a modélisé la dynamique d'écoulement dans un mélangeur planétaire alors que Tanguy et al. (1997) ont caractérisé un système d'agitation coaxial muni d'un ruban hélicoïdal et d'une turbine à pales droites (Rushton).

Le principe de la méthode consiste premièrement à générer un maillage volumique pour le réservoir et les objets fixes (dans notre cas, l'ancre seulement). Dans un deuxième temps, la surface des objets mobiles est discrétisée et les noeuds ainsi générés deviennent des points de contrôle. Connaissant la cinématique des objets mobiles, il s'agira par la suite de contraindre le vecteur vitesse sur ces points de contrôle à l'intérieur du domaine, et cela en fonction du temps. Pour ce faire, nous utiliserons une technique d'optimisation avec contraintes à l'aide

de multiplicateurs de Lagrange et d'une stratégie de pénalisation de manière semblable à ce qui est fait pour le traitement de l'incompressibilité dans les équations de Navier-Stokes. De plus, il n'est pas nécessaire que les points de contrôle coïncident avec les noeuds du maillage volumique contrairement à la technique de superposition de maillages de FIDAP et Polyflow; ces derniers sont localisés à l'intérieur des éléments finis et sont traités comme des contraintes d'optimisation. La figure 4.3 illustre le déplacement des objets mobiles et des noeuds de contrôle sur une section du réservoir.

D'un point de vue mathématique, dénotons par x_i^* les points de contrôle définissant la frontière fictive Γ^* sur laquelle sera imposée la contrainte $v|_{\Gamma^*} = v^*$ point par point, c'est-à-dire

$$v(x_i) = v^*(x_i),\ i=1,2,\ldots,N \qquad [4.20]$$

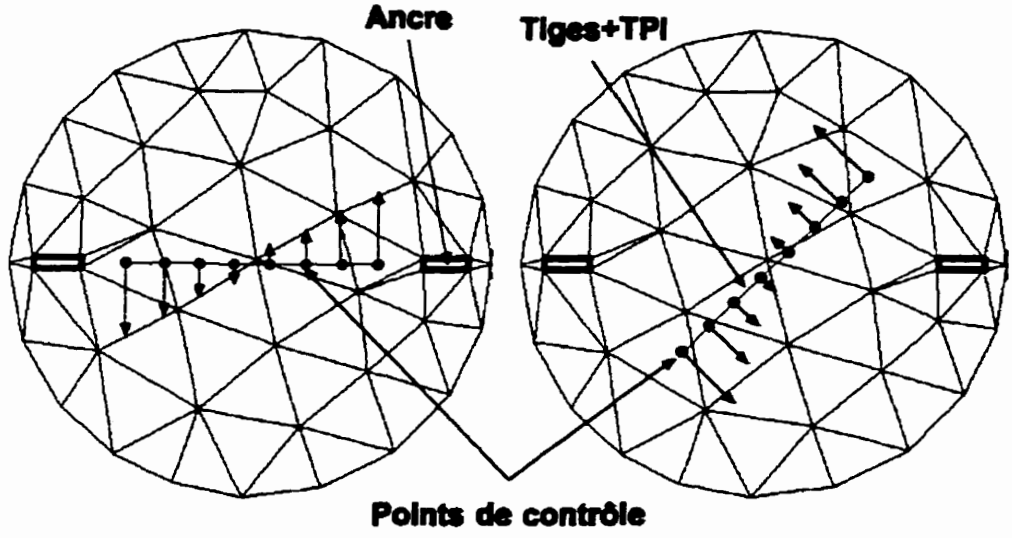


Figure 4.3 Illustration du principe de la méthode des éléments finis virtuels.

Cette contrainte peut être traitée en introduisant un multiplicateur de Lagrange λ et s'ajoute à l'expression du lagrangien augmenté (équ. [4.17]). On est alors amené à résoudre le nouveau problème de point-selle suivant

$$\underset{v\in[H_0^1(\Omega)]^3}{Inf}\ \underset{p\in L^2(\Omega)}{Sup}\ \underset{\lambda\in[L^2(\Gamma^*)]^3}{Sup}\ L_{rs}^*(v,p,\lambda) \qquad [4.21]$$

dans lequel

$$\underset{\lambda\in\left[L^2(\Gamma^*)\right]^3}{L^*_{rs}(v,p,\lambda)} = L_r(v,p) - \int_{\Gamma^*} \lambda\cdot(v-v^*)\,d\Gamma + \tfrac{s}{2}\int_{\Gamma^*}|v-v^*|^2\,d\Gamma \qquad [4.22]$$

où s est un paramètre qui améliore la convergence de la méthode de résolution. Comme auparavant, ce problème peut être résolu à l'aide de l'algorithme d'Uzawa.

Une mise en garde doit être faite concernant le nombre de points de contrôle pouvant être contraints dans un élément fini 3D. En effet, Bertrand et al. (1997) mentionne qu'un trop grand nombre de contraintes cinématiques dans un même élément fini peut entraîner un phénomène de verrouillage ("locking") car le nombre de degrés de liberté disponibles est insuffisant pour satisfaire ces contraintes. Pour les deux types d'éléments utilisés dans cette thèse, nous avons déterminé empiriquement que le nombre maximal de points de contrôle imposés par élément est de 3.

Sur le plan pratique, la stratégie de résolution est la suivante :

Étapes préliminaires :

1. Maillage volumique du réservoir et des objets fixes (ancre seulement);
2. Maillages surfaciques des objets mobiles (4 tiges de mélange et TPI) définissant les points de contrôle.

Résolution du problème de point-selle (équ. [4.21]) en régime transitoire :

3. Pour chaque pas de temps, on exécute :
   - 3.1 Recherche de la localisation des points de contrôle dans le maillage volumique avec la contrainte qu'au plus 3 points de contrôle peuvent être imposés par élément;
   - 3.2 Définir la grandeur et l'orientation du vecteur vitesse sur chacun des points de contrôle imposés connaissant la cinématique de rotation;
   - 3.3 Résoudre le problème [4.21] à l'aide de l'algorithme d'Uzawa. La discrétisation en temps est effectuée par un schéma d'Euler pour le premier pas de temps et un schéma de Gear pour les pas subséquents.

Finalement, la méthode des éléments finis virtuels nous permet d'obtenir le vecteur vitesse sur chacun des noeuds du maillage volumique sous les contraintes de la conservation de la matière (div v=0) et l'imposition de la vitesse sur chacun des points de contrôle ($v(x_i) = v^*(x_i)$, $\forall i$).

2. Équation de conservation de la phase solide

Pour un écoulement biphasique, une équation supplémentaire doit être résolue afin de prédire la dispersion de la phase solide dans le mélangeur. Deux modèles ont été implantés et comparés dans cette thèse, i.e. les modèles de Mann et de Phillips.

2.1 Modèle de Mann

Le modèle de Mann consiste à effectuer un bilan de matière instationnaire par rapport à la phase solide sur un ensemble de cellules décrivant le domaine à l'étude. De façon unanime dans la littérature, les bilans de matière sont effectués sur des cellules (ou volumes finis) représentés par des quadrangles en 2D et des hexaèdres en 3D car les auteurs utilisent des maillages structurés. En ce qui nous concerne, les bilans de matière seront réalisés sur des volumes finis représentés par les mêmes éléments finis tétraédriques 3D que ceux utilisés pour la résolution de l'écoulement de la phase liquide. Par le fait même, nous utiliserons une méthode de volumes finis sur une grille non-structurée. À notre connaissance, cette approche est nouvelle et n'a pas été proposée dans la littérature.

Soit le bilan de matière de la phase solide sur un élément fini tétraédrique soumis à un champ de vitesse v(x,y,z) de la suspension (obtenu de la résolution des équations de Navier-Stokes) et à la vitesse de sédimentation (figure 4.4), alors le bilan de matière prend la forme suivante

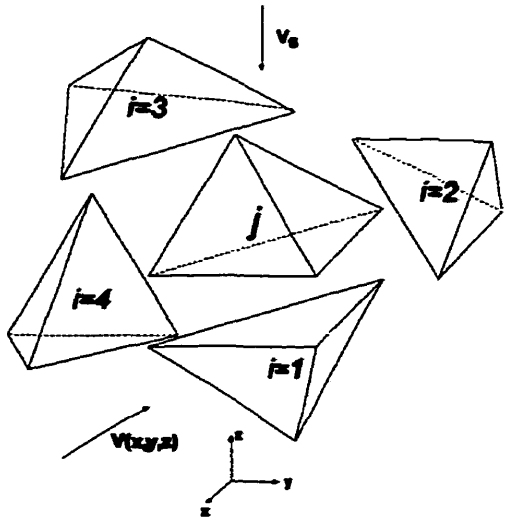


Figure 4.4 Vue éclatée d'une cellule représentée par un élément fini tétraédrique et ses voisins soumis à un champ de vitesse v(x,y,z) et à la sédimentation v_s.

Accumulation de particules solides dans l'élément fini j = Entrée - Sortie

$$V_j \frac{d\phi_j}{dt} = \sum_i Q_{cj,i}\,\phi^*_{cj,i} + Q_{sj,i}\,\phi^*_{sj,i} \qquad [4.23]$$

où

i : indice représentant les éléments finis voisins via les 4 faces de l'élément fini j,

V_j : volume de l'élément fini j (m^3),

$Q_{cj,i}$: flux de particules solides par convection traversant la face commune entre l'élément voisin i et l'élément j (m^3/s),

$Q_{sj,i}$: flux de particules solides par sédimentation traversant la face commune entre l'élément voisin i et l'élément j (m^3/s),

et $\phi^*_{cj,i}$ et $\phi^*_{sj,i}$ la fraction volumique de particules solides définie comme suit :

$$-\dot{\phi}_{c\,j,i} = \begin{cases} \phi_i & \text{si } Q_{c\,j,i} > 0, \\ \phi_j & \text{si } Q_{c\,j,i} < 0, \end{cases}$$

ϕ_i si $Q_{c\,j,i} > 0$, flux de particules par convection sortant de l'élément voisin i et entrant dans l'élément j,

ϕ_j si $Q_{c\,j,i} < 0$, flux de particules par convection sortant de l'élément j et entrant dans l'élément voisin i

$$-\dot{\phi}_{s\,j,i} = \begin{cases} \phi_i & \text{si } Q_{s\,j,i} > 0, \\ \phi_j & \text{si } Q_{s\,j,i} < 0, \end{cases}$$

ϕ_i si $Q_{s\,j,i} > 0$, flux de particules par sédimentation sortant de l'élément voisin i et entrant dans l'élément j,

ϕ_j si $Q_{s\,j,i} < 0$, flux de particules par sédimentation sortant de l'élément j et entrant dans l'élément voisin i.

Dans le modèle de Mann, ce développement suppose un mélange parfait au niveau de l'élément fini sur lequel est effectué le bilan car les particules solides entrent au travers des faces avec des concentrations différentes mais en ressortent avec une concentration homogène. De plus, ce modèle néglige l'inertie des particules et le glissement entre les phases liquide et solide.

Puisque nous travaillons sur une grille non-structurée, la difficulté majeure se situe au niveau de l'évaluation des flux de matière sur chacune des faces de l'élément fini j. Ces flux s'expriment par

$$Q_{cj,i} = \int_{S_{j,i}} \left(v_{cj,i}(x,y,z) \cdot \vec{n}_{j,i} \right) dS \qquad [4.24]$$

$$Q_{sj,i} = \int_{S_{j,i}} \left(v_{sj,i} \cdot \vec{n}_{j,i} \right) dS \qquad [4.25]$$

où $\vec{n}$ représente le vecteur unitaire sur chacune des faces pointant vers l'intérieur de l'élément j, S l'aire de la face, v_c la vitesse de la suspension (égale au champ de vitesse v(x,y,z) obtenue de la résolution des équations de Navier-Stokes), et v_s la vitesse de sédimentation des particules déterminée à l'aide des relations suivantes (Coulson et Richardson, 1978)

$$Ar = 24\ Re_p \qquad (Ar < 4{,}8) \qquad [4.26]$$

$$Ar = 24\ Re_p + 3{,}6\ Re_p^{1.687} \qquad (4{,}8 < Ar < 10^5) \qquad [4.27]$$

$$Ar = 4/9\ Re_p^2 \qquad (Ar > 10^5) \qquad [4.28]$$

où Ar est le nombre d'Archimède (équ. [2.7]) et Re_p le nombre de Reynolds de la particule (équ. [2.2]). Ces intégrales peuvent être déterminées analytiquement en fonction du type d'éléments finis choisis (voir annexe B).

Afin de traiter le terme non-stationnaire $d\phi/dt$, nous utilisons l'expression

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{a_t \phi^{t+1} + b_t \phi^t + c_t \phi^{t-1}}{\Delta t} \qquad [4.29]$$

où a_t, b_t et c_t prennent les valeurs suivantes en fonction du pas de temps :

- 1er pas de temps : $a_t = 1$, $b_t = -1$, $c_t = 0$ (schéma d'Euler implicite),
- pas de temps suivants : $a_t = 3/2$, $b_t = -2$, $c_t = 1/2$ (schéma de Gear d'ordre 2).

qui, lorsque substitué dans l'équation [4.23] nous conduit au schéma implicite :

$$V_j \left[\frac{a_t \phi_j^{t+1} + b_t \phi_j^t + c_t \phi_j^{t-1}}{\Delta t} \right] = \sum_i Q_{c\,j,i}\ \phi^{*\,t+1}_{c\,j,i} + Q_{s\,j,i} \phi^{*\,t+1}_{s\,j,i} \qquad [4.30]$$

En régime transitoire, une condition initiale est nécessaire pour que le problème soit bien posé. Dans ce travail, deux types de conditions initiales ont été étudiées :

a) les particules solides sont uniformément distribuées dans l'ensemble de réservoir

$$\phi_j^0 = \overline{\phi} \qquad [4.31]$$

où $\overline{\phi}$ est la fraction volumique moyenne.

b) toutes les particules sont déposées au fond du réservoir et la fraction volumique en solide correspond à la fraction volumique maximale (ϕ_m)

$$\begin{aligned} \phi_j^0 &= \phi_m & \Omega_{fond} \\ \phi_j^0 &= 0 & \Omega - \Omega_{fond} \end{aligned} \qquad [4.32]$$

Dans ce dernier cas, la condition de conservation de la matière solide dans l'ensemble du réservoir Ω doit être respectée

$$\overline{\phi} = \sum_{j=1}^{nelt} \frac{V_j}{V_t} \phi_j^0 \qquad [4.33]$$

où V_t représente le volume total du réservoir, et nelt le nombre total d'éléments définissant le domaine étudié. Par le fait même, une procédure itérative doit être implantée afin de déterminer l'épaisseur de la couche solide au fond du réservoir permettant de respecter cette condition.

En régime stationnaire, on constate que le membre de gauche de l'équation [4.30] est nul, ce qui signifie qu'il existe une infinité de solutions correspondant à une infinité de fractions volumiques possibles dans le réservoir. Parmi celles-ci, on choisit celle qui satisfait l'équation [4.33].

La discrétisation de l'équation [4.30] nous permet d'obtenir un système d'équations algébriques sous la forme

$$[A][\phi^{t+1}] = [b] \qquad [4.34]$$

où A est la matrice de transformation et b le vecteur de droite. Afin de résoudre ce système matricielle, nous avons utilisé une méthode directe (LU) pour les petits systèmes. Pour les systèmes de grande taille et par souci de diminuer la capacité mémoire nécessaire à la résolution, une méthode itérative Bi-CGSTAB (Van der Vorst, 1992) a été implantée car A est une matrice non-symétrique.

Jusqu'à présent, nous avons supposé que l'interaction particule-particule n'était pas prise en compte. Lorsque ces interactions sont prises en compte, la vitesse de sédimentation est alors représentée par l'équation de Richardson et Zaki (équ. [2.8]) qui est fonction de la fraction volumique. Par conséquent, le système matriciel précédent devient non-linéaire; une méthode de point-fixe de type Picard a donc été programmée afin de permettre la convergence.

Finalement, puisque la viscosité est une fonction de la fraction volumique, une méthode de couplage est nécessaire entre les équations de Navier-Stokes pour la détermination du champ de vitesse de la suspension et l'équation de conservation de la phase solide. Ce modèle a été implanté dans le logiciel de simulation par éléments finis POLY3D™. La validation et l'étude de ce modèle seront présentées au chapitre VII.

2.2 Modèle de Phillips

L'équation de conservation de la matière solide du modèle de Phillips permet de prendre en compte le transport convectif des particules, la diffusion due à la fréquence de collisions et à la variation de la viscosité au sein de la suspension. Cette équation s'écrit

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + v \cdot \nabla \phi = \nabla \cdot \left(K_c a^2 \phi \nabla (\dot{\gamma} \phi) \right) + \nabla \cdot \left(K_\eta \frac{a^2}{\eta} \dot{\gamma} \phi^2 \frac{\partial \eta}{\partial \phi} \nabla \phi \right) \qquad [4.35]$$

où v est la vitesse de la suspension, a le rayon des particules, $\dot{\gamma}$ la norme du tenseur des vitesses de déformation, K_c et K_η des constantes empiriques généralement égales à 0,41 et 0,62 respectivement, et finalement η la viscosité de la suspension décrit par le modèle de Krieger et Dougherty

$$\eta = \frac{\mu_l}{\left(1 - \phi / \phi_m\right)^\alpha} \qquad [4.36]$$

ou μ_l est la viscosité de la phase liquide et α une constante empirique.

Dans ce modèle, deux mécanismes permettent aux particules solides de migrer ou de diffuser, à savoir le gradient de cisaillement et le gradient de concentration. Tout comme Zhang et Acrivos (1994), nous avons décidé d'ajouter le flux de particules causé par la sédimentation dans la direction axiale. Puisque ce modèle est généralement utilisé pour des suspensions concentrées, le flux de particules par sédimentation s'exprime par

$$N_s = v_\phi \phi = v_s (1-\phi)^n \phi \qquad [4.37]$$

où v_ϕ est la vitesse de sédimentation entravée telle que définie par Richardson et Zaki. Par contre, la résolution de l'équation de conservation devient plus difficile car nous avons conservé l'exposant "n" dans l'expression de Richardson et Zaki, ce qui n'est pas le cas pour les travaux de Zhang et Acrivos (1994). L'équation [4.35] se réécrit

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + v \cdot \nabla \phi = \nabla \cdot \left(K_c a^2 \phi \nabla (\dot{\gamma} \phi) \right) + \nabla \cdot \left(K_\eta \frac{a^2}{\eta} \dot{\gamma} \phi^2 \frac{\partial \eta}{\partial \phi} \nabla \phi \right) + \nabla \cdot \left(v_s \phi (1-\phi)^n \right) \qquad [4.38]$$

Après manipulation, cette équation peut être réécrite sous la forme

$$\frac{D\phi}{Dt} = \nabla \cdot \left[\left(K_c a^2 \phi \dot{\gamma} + K_\eta a^2 \alpha \dot{\gamma} \frac{\phi^2}{(\phi_m - \phi)} \right) \nabla \phi \right] + \nabla \cdot \left(v_s \phi (1-\phi)^n \right) + \nabla \cdot \left(K_c a^2 \phi^2 \nabla \dot{\gamma} \right) \qquad [4.39]$$

où $\frac{D\phi}{Dt} = \frac{\partial \phi}{\partial t} + v \cdot \nabla \phi$ est la dérivée matérielle.

Pour que le problème soit bien posé, on se doit de définir les conditions limites associées à la résolution de l'équation précédente. Puisqu'aucune particule ne quitte le domaine étudié, la somme des flux doit s'annuler sur les parois et la surface libre du réservoir. Cette condition s'écrit

$$n \cdot \left[\left(K_c a^2 \phi \dot{\gamma} + K_\eta a^2 \alpha \dot{\gamma} \frac{\phi^2}{(\phi_m - \phi)} \right) \nabla \phi + v_s \phi (1-\phi)^n + K_c a^2 \phi^2 \nabla \dot{\gamma} \right] = 0 \qquad [4.40]$$

En régime instationnaire, une condition initiale est nécessaire pour la fraction volumique. Les

mêmes conditions limites que pour le modèle de Mann ont été utilisées (équ. [4.31-33]).

2.2.1 Formulation variationnelle

La formulation faible du problème précédent s'obtient en multipliant l'équation [4.39] par une fonction-test $\psi \in H^1(\Omega)$ définie dans le domaine Ω et en utilisant la formule de Green

$$\int_\Omega \frac{D\phi}{Dt}\psi d\Omega = \int_\Omega \left[\left(K_c a^2 \phi\dot{\gamma} + K_\eta a^2 \alpha\dot{\gamma}\frac{\phi^2}{(\phi_m-\phi)}\right)\nabla\phi\right]\nabla\psi d\Omega + \int_\Omega \left(v_s\phi(1-\phi)^r\right)\nabla\psi d\Omega + \int_\Omega \left(K_c a^2\phi^2\nabla\dot{\gamma}\right)\nabla\psi d\Omega$$

$$+\int_\Gamma \vec{n}\cdot\left[\left(K_c a^2\phi\dot{\gamma} + K_\eta a^2\alpha\dot{\gamma}\frac{\phi^2}{(\phi_m-\phi)}\right)\nabla\phi + \left(v_s\phi(1-\phi)^r\right) + \left(K_c a^2\phi^2\nabla\dot{\gamma}\right)\right]\psi d\Gamma \qquad [4.41]$$

Selon l'équation [4.40], l'intégration sur la frontière Γ est nulle (condition naturelle). On obtient donc

$$\int_\Omega \frac{D\phi}{Dt}\psi d\Omega = \int_\Omega \left[\left(K_c a^2\phi\dot{\gamma} + K_\eta a^2\alpha\dot{\gamma}\frac{\phi^2}{(\phi_m-\phi)}\right)\nabla\phi + \left(v_s\phi(1-\phi)^n\right) + \left(K_c a^2\phi^2\nabla\dot{\gamma}\right)\right]\nabla\psi d\Omega \qquad [4.42]$$

Ce problème peut être résolu à l'aide de la méthode des éléments finis de type Galerkin. Cette méthode permet de discrétiser la formulation faible (équ. [4.42]) de l'équation de conservation de la matière solide et suppose que les fonctions-test sont identiques aux bases d'approximation polynomiales de type Lagrange pour ϕ. Nous utilisons le même maillage que pour le problème de Navier-Stokes. Par contre, la base d'approximation est linéaire, c'est-à-dire de type P_1 (figure 4.5). De plus, il faut mentionner que l'évaluation de $\nabla\dot{\gamma}$ nécessite au moins une base d'approximation quadratique en vitesse (P_2^+-P_1) lors de la résolution des équations de Navier-Stokes. À notre connaissance, ce modèle n'a jamais été utilisé pour la simulation d'un problème 3D.

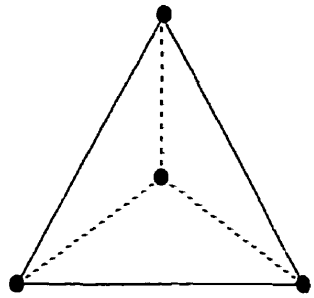


Figure 4.5 Élément fini de type P_1.

Une fois la discrétisation terminée, nous obtenons un système fortement non-linéaire de la forme

$$[A_\phi][\phi^{t+1}]=[b_\phi] \qquad [4.43]$$

où la matrice A_ϕ et le vecteur b_ϕ sont eux-mêmes fonctions de ϕ. Pour résoudre un tel système, nous avons choisi d'utiliser l'algorithme GMRES qui a tout d'abord été développé pour la résolution de systèmes linéaires (Saad et Schultz, 1983) puis étendu au cas non-linéaire (Wigton et Young, 1988).

En terminant, mentionnons que l'équation de continuité de la phase solide (équ. [4.42]) contient un terme convectif et un terme diffusif. Le nombre adimensionnel de Péclet, qui représente le rapport entre le transfert de matière de la phase solide par convection sur le transfert de matière par diffusion, permet de caractériser l'importance de ces deux phénomènes :

$$Pe=\frac{L_{cp}V_{cp}}{\left(K_c a^2 \phi\dot{\gamma}+K_\eta a^2 \alpha\dot{\gamma}\frac{\phi^2}{(\phi_m-\phi)}\right)} \qquad [4.44]$$

où L_{cp} et V_{cp} représentent une longueur et une vitesse caractéristiques du procédé.

Lorsque le transfert de matière solide par diffusion est important, le problème devient elliptique et la méthode de Galerkin s'avère adéquate pour la résolution de l'équation de

conservation. Par contre, lorsque le nombre de Péclet est élevé, le transfert de matière est dominé par la convection et l'équation de conservation devient hyperbolique. Dans une telle situation, la méthode de Galerkin génère généralement des solutions oscillatoires. Afin de pallier ce problème, les méthodes numériques suivantes peuvent être envisagées : les méthodes de caractéristiques, de Galerkin discontinu, d'upwinding de type SU ou SUPG. Le lecteur intéressé par ces méthodes peut se référer par exemple à la bibliographie de Johnson (1992). Pour notre part, nous avons choisi d'utiliser une méthode d'upwinding consistante de type SUPG (Grygiel et Tanguy, 1991). Cette méthode consiste à modifier les fonctions-test de la façon suivante

$$\psi_{SU} = \psi + \beta v \cdot \nabla \psi \qquad [4.45]$$

où β est un paramètre qui varie proportionnellement avec la valeur du nombre de Péclet local. Cette correction a pour effet de générer une diffusion numérique contrôlée dans le sens de l'écoulement et ainsi de régulariser la solution.

Tout comme pour le modèle de Mann, la validation et l'étude de ce modèle font partis du chapitre VII.

- CHAPITRE V -

CARACTÉRISATION DE L'HYDRODYNAMIQUE ET DE LA PUISSANCE D'AGITATION : ÉCOULEMENT MONOPHASIQUE

Dans ce chapitre, nous nous proposons de caractériser l'hydrodynamique et la puissance d'agitation pour des écoulements de type monophasique dans le mélangeur coaxial. Pour ce faire, nous utiliserons l'approche numérique proposée dans cette thèse et nous confronterons les résultats obtenus aux valeurs expérimentales.

Puisque le mélangeur coaxial possède une cinématique complexe de rotation, nous débuterons notre analyse par la caractérisation de la puissance d'agitation lorsque seul l'agitateur situé en périphérie est en rotation (ancre). Par la suite, nous mettrons l'accent sur la caractérisation du mélangeur coaxial (ancre+4 tiges+TPI). Cette caractérisation sera réalisée pour les deux types de fluides suivants : newtonien et non newtonien.

1. Système d'agitation simple : ancre

1.1 Fluide newtonien

Tel que mentionné à la section 3.3 du chapitre 2, les nombres adimensionnels suivants sont généralement utilisés afin de caractériser la dynamique d'écoulement dans un système d'agitation

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D^5} \qquad [5.1]$$

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho N D^2}{\mu} \qquad [5.2]$$

où N_p et Re sont les nombres de puissance et de Reynolds respectivement, P la puissance d'agitation, N et D la vitesse de rotation (en tours/s) et le diamètre de l'agitateur, μ et ρ la viscosité et la masse volumique du fluide. En régime laminaire et turbulent, nous avons les relations suivantes

$$K_p = N_p \mathrm{Re} = \frac{P}{\mu N^2 D^3}, \qquad \text{laminaire,} \quad \mathrm{Re} < 10 \qquad [5.3]$$

$$N_p = C \qquad \text{turbulent,} \quad \mathrm{Re} > 300 \qquad [5.4]$$

où K_p et C sont des paramètres seulement fonction de la géométrie du système d'agitation pour un fluide donné. Dans la suite de cette thèse, la majorité des résultats présentés porteront sur la caractérisation de la puissance d'agitation pour un régime d'écoulement laminaire et quelques résultats dans les régimes transitoire et turbulent.

À l'aide de la simulation numérique, nous avons cherché à déterminer la valeur de K_p. Les simulations ont été effectuées à l'aide de la méthode des éléments finis classique dans un repère lagrangien. Le maillage utilisé pour les calculs (généré à l'aide du logiciel IDEAS™ de SDRC) est composé de 17 083 éléments finis de type P_1^+-P_0, ce qui implique la résolution d'un système linéaire de 106 295 équations en vitesse (figure 5.1). Le fluide newtonien utilisé est un sirop de maïs ayant une masse volumique de 1500 kg/m^3 et une viscosité de 15 Pa-s. Afin de balayer une gamme de Re, nous avons effectué une série de simulations en faisant varier la vitesse de rotation de l'agitateur. Pour chaque simulation, la connaissance du champ de vitesse nous permet de calculer l'énergie dissipée au sein du fluide par un bilan d'énergie macroscopique :

$$P = -\iiint_{\Omega} \tau : \nabla v \, d\Omega \qquad [5.5]$$

Nous présentons à la figure 5.2 les valeurs numériques et expérimentales de la variation de N_p en fonction de Re. Les valeurs de K_p sont montrées au tableau 5.1 et comparées aux différentes valeurs publiées dans la littérature pour une ancre à fond plat (Tanguy et al., 1996). On peut voir que la valeur de K_p obtenue numériquement est en très bon accord avec la valeur expérimentale. De plus, la pente de la droite en régime laminaire (Re<10) est égale à -1, ce qui est conforme à la théorie. On note aussi que la valeur de K_p obtenue est supérieure aux valeurs de K_p publiées dans la littérature. Cette différence provient du fait que le volume de fluide soumis à l'action de l'agitateur est plus important avec une ancre à fond hémisphérique. Ce résultat nous assure que la méthode des éléments finis classique permet de bien reproduire la dynamique d'écoulement dans un système d'agitation simple.

Tableau 5.1 Valeurs numérique et expérimentale de K_p pour une ancre.

Auteur(s)	K_p (-)	
	Numérique	**Expérimentale**
Cette thèse	256	253
Tanguy et al., 1996 [119]	206	199
Ho et Kwong, 1973 [55]	-	215
Rieger et Novak, 1973 [107]	-	206

La connaissance du champ de vitesse dans le réservoir nous permet de calculer des trajectoires par intégration de ce champ dans le temps à l'aide d'un algorithme de Runge-Kutta à pas variable d'ordre 4 qui garantit une précision suffisante. Nous montrons aux figures 5.3 et 5.4 des trajectoires lancées sur un plan x-y à mi-hauteur dans la partie cylindrique et dans le fond du réservoir pour différentes valeurs du nombre de Reynolds. À faible valeur de Re, on remarque un écoulement tangentiel primaire puis un écoulement secondaire correspondant aux deux zones de recirculation. De plus, le pompage dans la direction axiale est très faible.

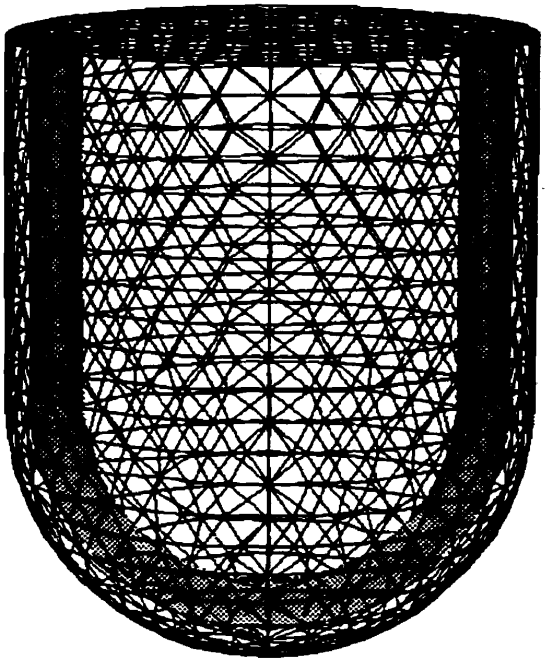


Figure 5.1 Maillage du réservoir et de l'ancre.

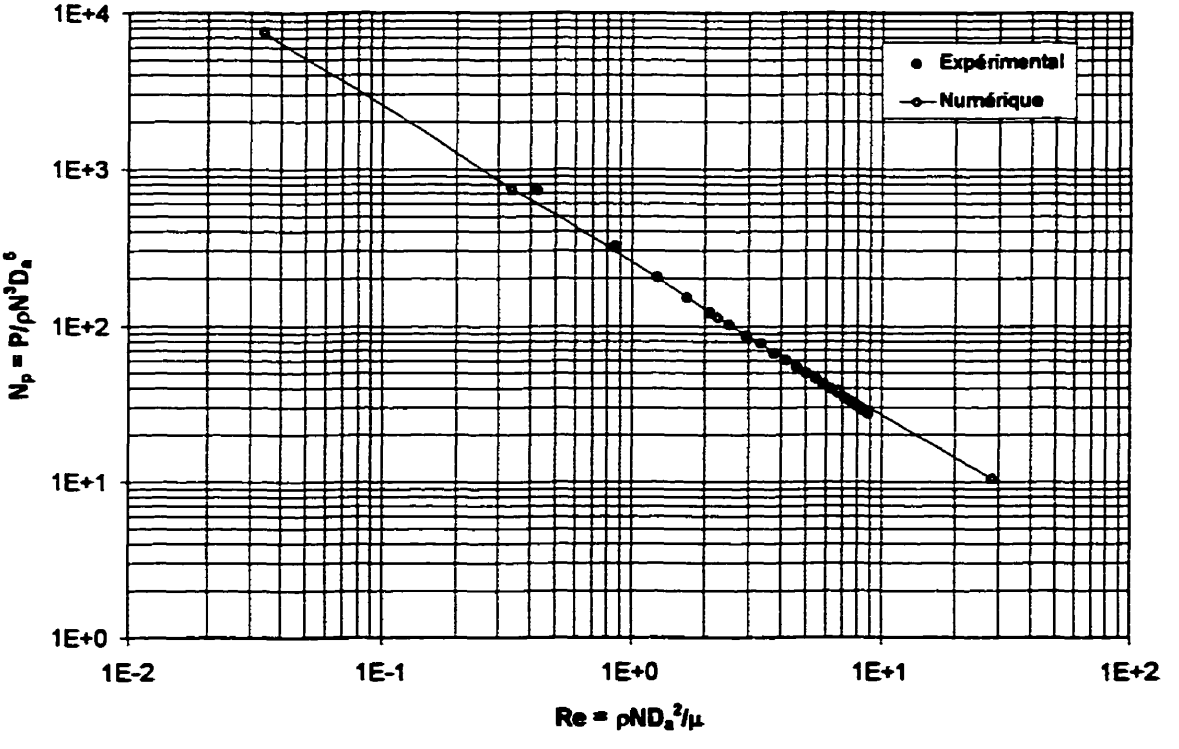


Figure 5.2 Résultats expérimentaux et numériques de N_p en fonction de Re pour une ancre (fluide newtonien).

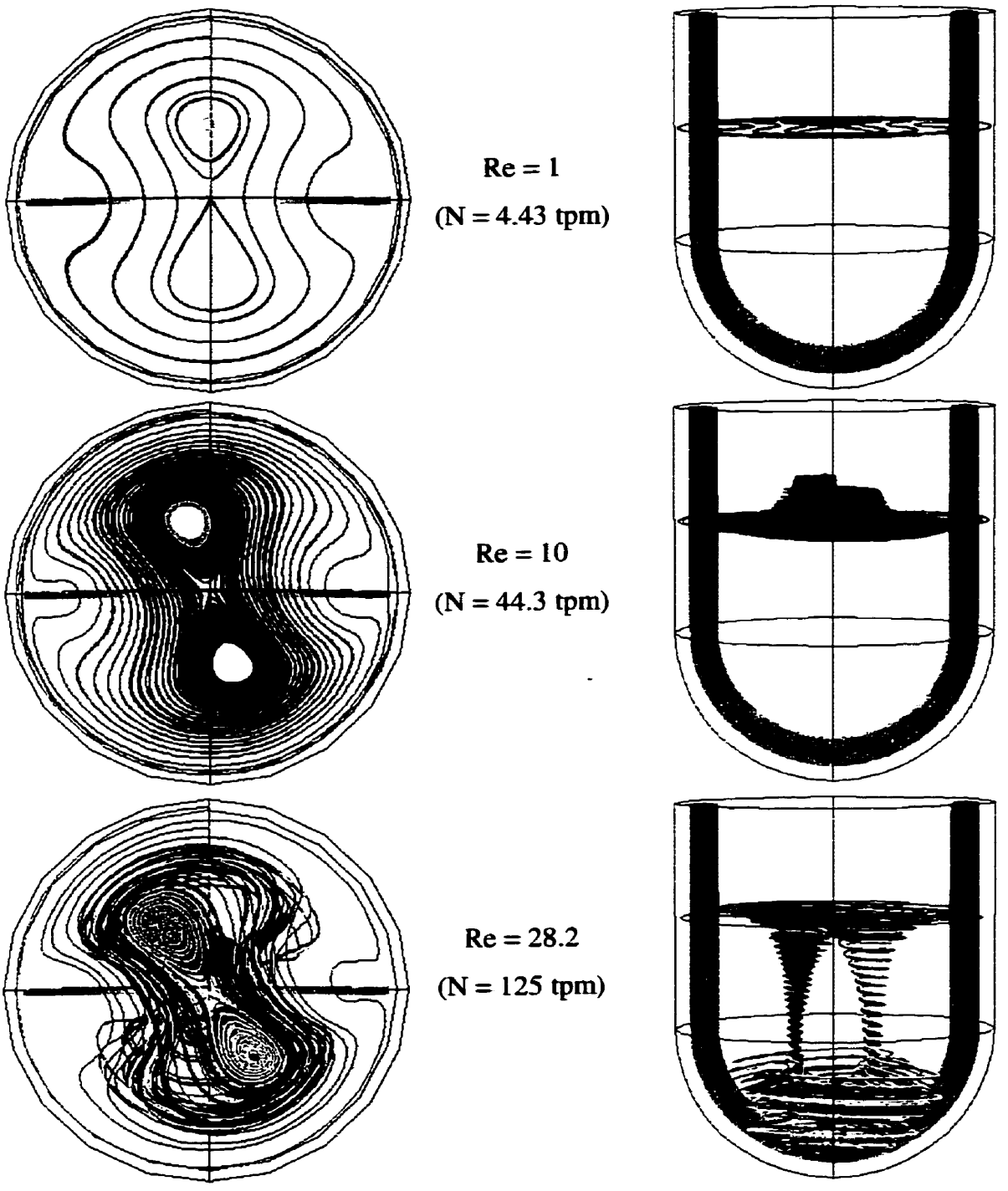


Figure 5.3 Trajectoires lancées sur un plan x-y à mi-hauteur dans la partie cylindrique du réservoir pour différentes valeurs du nombre de Reynolds (temps de parcours: 40 s).

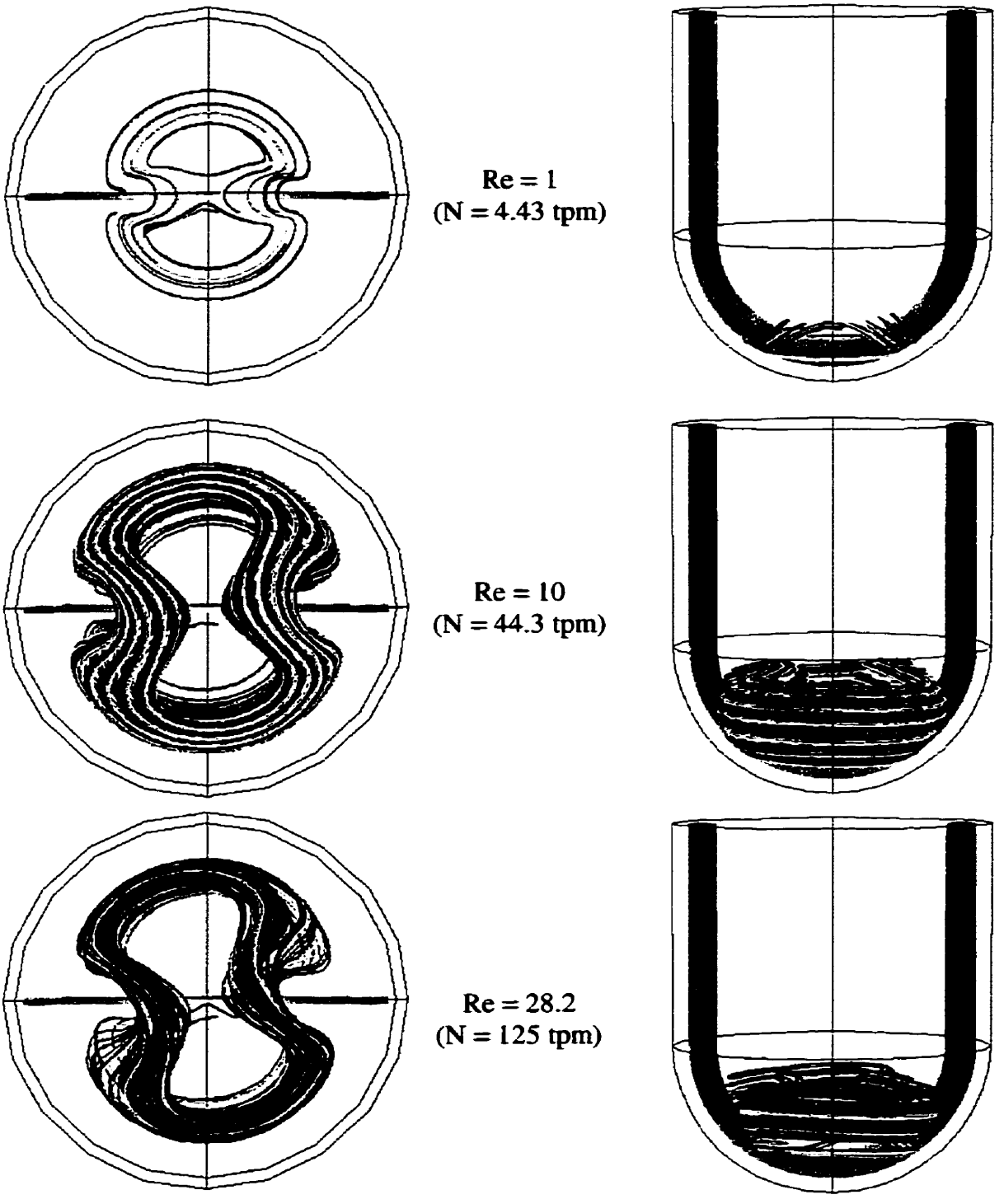


Figure 5.4 Trajectoires lancées dans le fond du réservoir pour différentes valeurs du nombre de Reynolds (temps de parcours: 40 s).

Lorsque Re augmente, ces zones de recirculation se déplacent car les forces d'inertie deviennent prédominantes. On note également que le pompage axial devient plus important. Puisque le pompage axial joue un rôle majeur lors de la remise en suspension des particules, il est important de caractériser ce phénomène. Pour ce faire, nous avons calculé la vitesse moyenne de pompage $\langle v_z^+ \rangle$ vers le haut sur différents plans x-y définie par l'expression suivante

$$\langle v_z^+ \rangle = \int_S v_z^+ dS \Big/ \int_S dS \qquad [5.6]$$

où v_z^+ correspond à la composante axiale de la vitesse définie positive et S la surface de la section. On remarque à la figure 5.5 que la vitesse moyenne de pompage est d'autant plus grande que la vitesse de rotation de l'agitateur est importante. De plus, la vitesse axiale de pompage est maximale au fond du réservoir, ce qui nous permettra d'obtenir la remise en suspension des particules. Par contre, la faible vitesse de pompage dans la partie supérieure limitera la distribution des particules dans cette région.

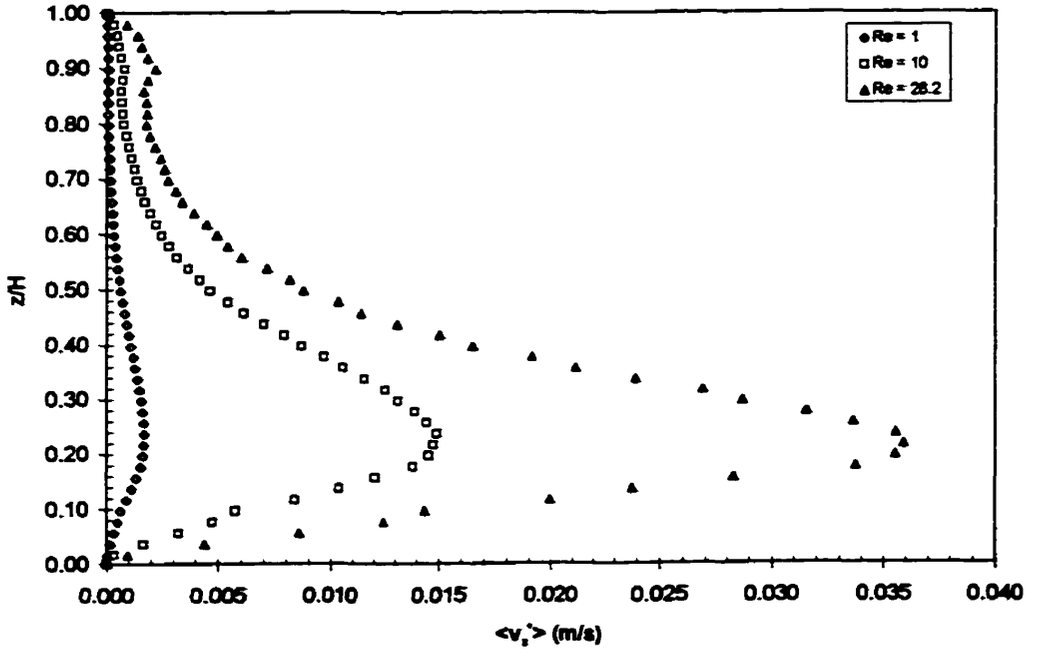


Figure 5.5 Vitesse moyenne de pompage vers le haut en fonction de la position axiale pour différentes valeurs de Re pour une ancre (fluide newtonien).

1.2 Fluide non newtonien

Dans cette section, nous nous intéressons au mélange d'un fluide obéissant au modèle rhéologique de type loi de puissance, $\eta=K|\dot{\gamma}|^{n-1}$. À partir d'une analyse adimensionnelle, Rieger et Novak (1973) ont montré que le nombre de Reynolds appliqué à ce type de fluide s'écrit

$$\mathrm{Re}_{pl} = \frac{\rho N^{2-n} D^2}{K} \qquad [5.7]$$

et la valeur de K_p de l'agitateur est alors fonction de la géométrie et de la rhéologie

$$K_p(n) = N_p \cdot \mathrm{Re}_{pl} = \frac{P}{K N^{1+n} D^3} \qquad [5.8]$$

L'équation [5.8] permet d'obtenir, sur un graphe logarithmique de N_p en fonction de Re_{pl}, une famille de courbes parallèles de pente -1 en régime laminaire et où la position de chacune des courbes est directement reliée à l'indice de la loi de puissance. Ces familles de courbe nous permettent donc d'estimer la puissance d'agitation connaissant la géométrie de l'agitateur et l'indice de la loi de puissance du fluide agité.

Pour leur part, Metzner et Otto (1957) ont proposé une autre approche basée sur la courbe de puissance N_p vs Re pour un fluide newtonien. Ces derniers proposent de substituer la viscosité μ dans l'expression de Re par une viscosité apparente μ_a (ou équivalente) évaluée à la vitesse de déformation apparente du procédé par la relation

$$\gamma_a = K_s N \qquad [5.9]$$

où K_s est une constante qui dépend de la géométrie du système d'agitation et N la vitesse de rotation de l'agitateur. Ils ont proposé l'approche graphique suivante pour déterminer la valeur de K_s :

a) pour une vitesse de rotation donnée (N), déterminer la puissance d'agitation (P) et le

nombre de puissance (N_p) pour le fluide non newtonien;

b) à partir de la courbe de puissance newtonienne (N_p vs Re), calculer la valeur de la viscosité apparente (μ_a) du fluide non newtonien à partir du nombre de Reynolds (Re);

c) connaissant la viscosité apparente, la vitesse de déformation apparente (γ_a) est évaluée à partir de la courbe rhéologique;

d) et finalement tracer le graphe de γ_a en fonction de N. La pente de ce graphe détermine la valeur de K_s.

La valeur de K_s peut aussi être déterminée par manipulation algébrique. Il s'agit simplement de substituer la viscosité (μ) par la viscosité apparente (μ_a) dans l'expression de K_p (équ. [5.3]) pour un fluide newtonien; on obtient alors :

$$N_p = \frac{K_p}{\mathrm{Re}} = \frac{K_p K (K_s N)^{n-1}}{\rho N D^2} = \frac{K_p K_s^{n-1}}{\mathrm{Re}_{pl}} \qquad [5.10]$$

À la lumière des équations [5.8] et [5.10], on constate que $K_p(n)$ et K_s sont reliés par l'expression suivante

$$K_p(n) = K_p K_s^{n-1} \qquad [5.11]$$

Par conséquent, la valeur de K_s est directement conditionnée par les valeurs de K_p et $K_p(n)$. Une façon de déterminer K_s consiste à tracer le graphe de log $K_p(n)$ en fonction de (1-n). Si la courbe du graphe est linéaire, cela signifie que la valeur de K_s est constante et peut être obtenue par la pente du graphique, c'est-à-dire -log K_s. La valeur de K_s n'est alors plus une fonction de la rhéologie et le concept de Metzner et Otto est valide.

Nous avons caractérisé, à l'aide d'une série de simulations numériques (17), la variation de N_p en fonction Re_{pl} pour différentes valeurs de l'indice de la loi de puissance pour l'ancre (figure 5.6). Ces courbes nous permettent de déterminer la variation de $K_p(n)$ (équ. [5.8]) en

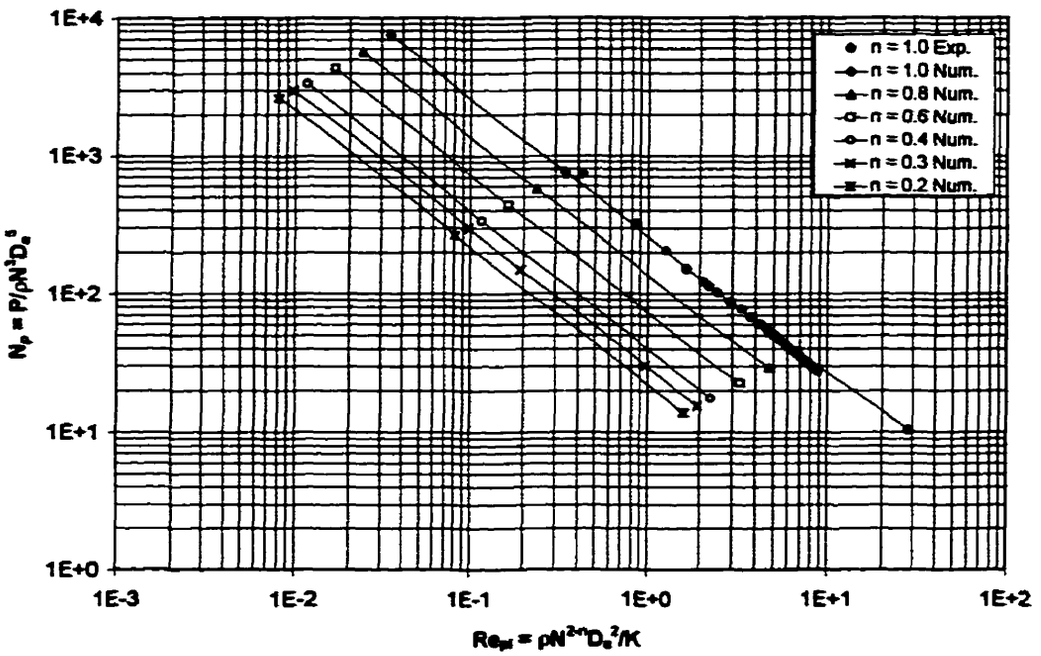


Figure 5.6 Résultats expérimentaux et numériques de N_p en fonction de Re_{pl} pour différentes valeurs de l'indice loi de puissance pour une ancre.

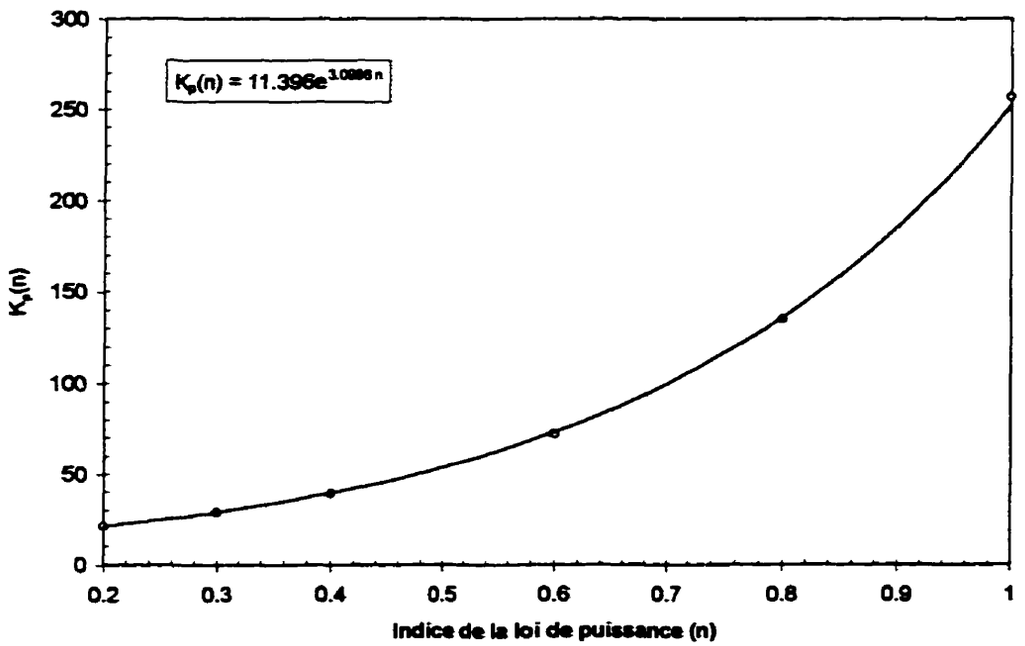


Figure 5.7 Variation de $K_p(n)$ obtenu numériquement en fonction de l'indice de la loi de puissance.

en fonction de l'indice de la loi de puissance (figure 5.7). On remarque que la variation de $K_p(n)$ augmente de façon exponentielle avec indice de la loi de puissance. Après lissage, nous obtenons la relation suivante :

$$K_p(n) = 11.396e^{3.0986n} \qquad [5.12]$$

Afin de déterminer la valeur de K_s, nous avons tracé la variation de log $K_p(n)$ en fonction de (1-n) (figure 5.8). Nous obtenons l'expression suivante :

$$K_p(n) = 256e^{-3.12(1-n)} \qquad [5.13]$$

Comme on peut le constater, nous obtenons une ligne droite, signifiant que la valeur de K_s est constante et donnée par la valeur de la pente (m=-log K_s). Aussi, K_s peut être obtenue par simple comparaison des équations [5.11] et [5.13], c'est-à-dire $K_s=e^{3.12}$. Nous comparons au tableau 5.2 la valeur de K_s ainsi obtenue aux différentes valeurs publiées dans la littérature.

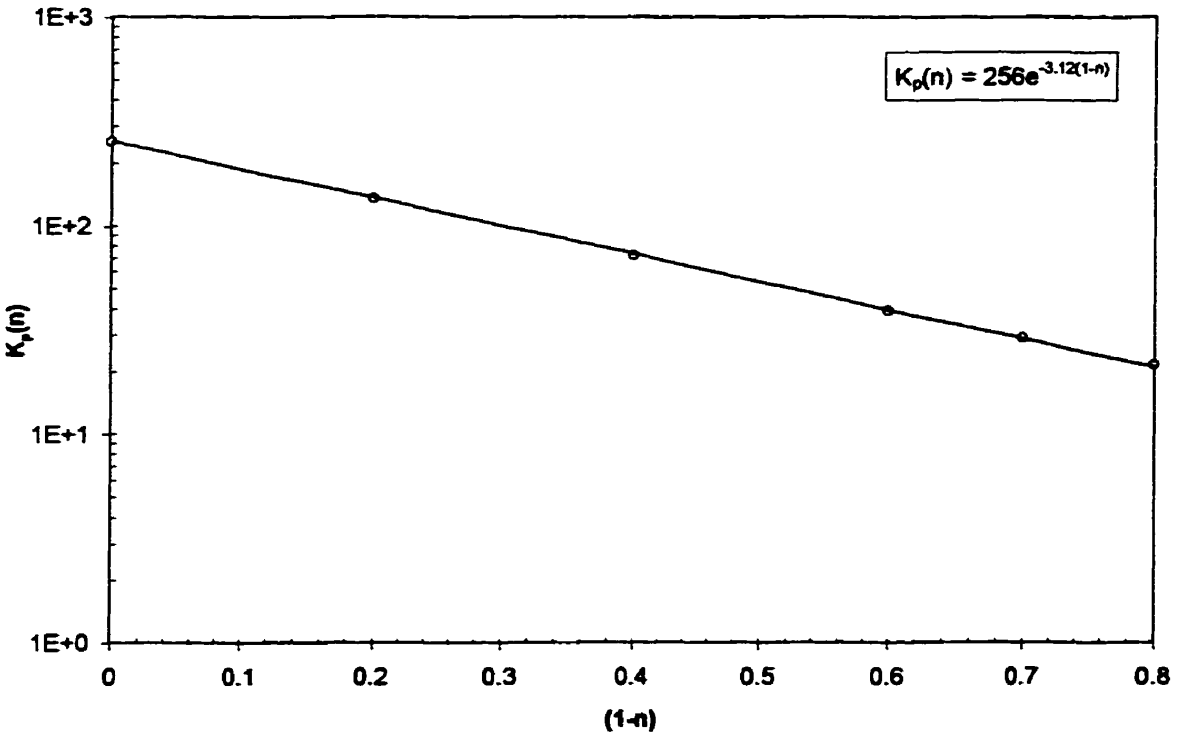


Figure 5.8 Variation de $K_p(n)$ en fonction (1-n) pour une ancre.

Tableau 5.2 Comparaison de K_s obtenue numériquement aux différentes valeurs de K_s publiées dans la littérature.

Auteur(s)	Type d'ancre	D_a/D_c	K_s
Cette thèse	fond hémisphérique	0,906	22,65
Nagata et al., 1972	fond plat	0,952	25
Schilo, 1969	fond plat	0,9	22,4-28,4
Rieger et Novak, 1973	fond plat	0,9	11-44

La valeur de K_s obtenue numériquement concorde bien avec les données de la littérature. La connaissance de K_s nous permet donc d'estimer la viscosité apparente ou viscosité de procédé (μ_a) pour le mélange de fluides non newtoniens obéissant au modèle rhéologique de type loi de puissance. Par le fait même, le nombre de Reynolds généralisé s'écrit

$$\mathrm{Re}_g = \frac{\rho N D^2}{\mu_a} = \frac{\rho N D^2}{K(K_s N)^{n-1}} = \frac{\rho N^{2-n} D^2}{K K_s^{n-1}} \qquad [5.14]$$

Cette définition du nombre de Reynolds nous permet d'obtenir une courbe maîtresse de la consommation de puissance pour des fluides non newtonien de type loi de puissance pour une ancre en supposant valide le concept de Metzner et Otto (figure 5.9).

Finalement, nous montrons à la figure 5.10 l'influence de la rhéofluidifiance sur les patrons d'écoulement pour une vitesse de rotation de l'ancre de 4.43 tours/min. Comme on peut le constater, la diminution de l'indice de la loi de puissance a une très faible incidence sur les patrons d'écoulement et par le fait même sur la vitesse de pompage vers le haut.

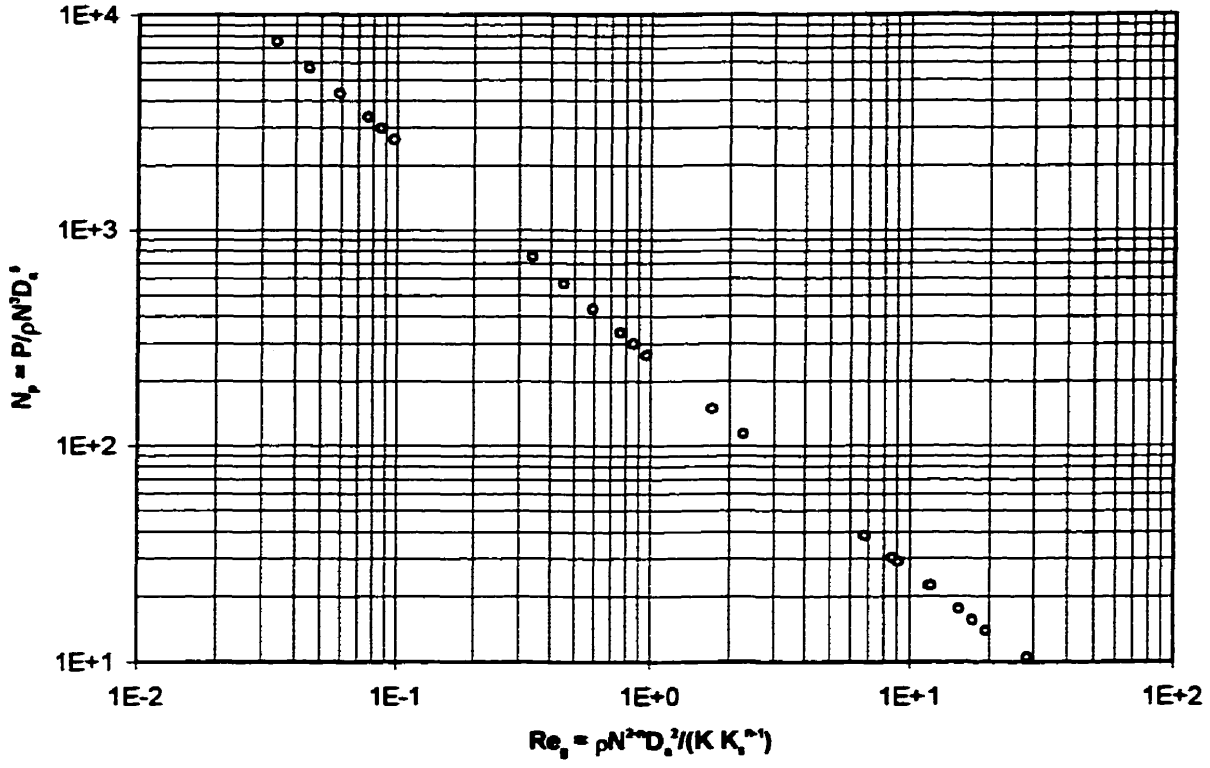
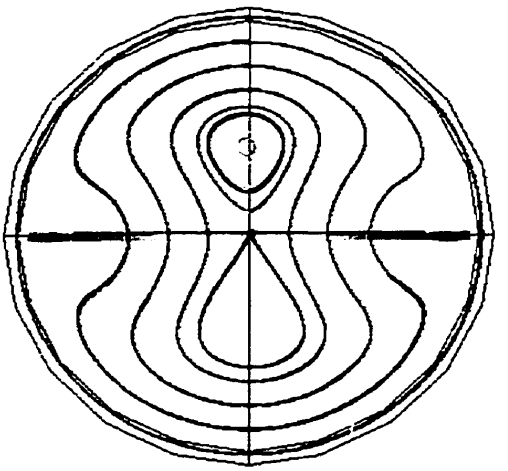


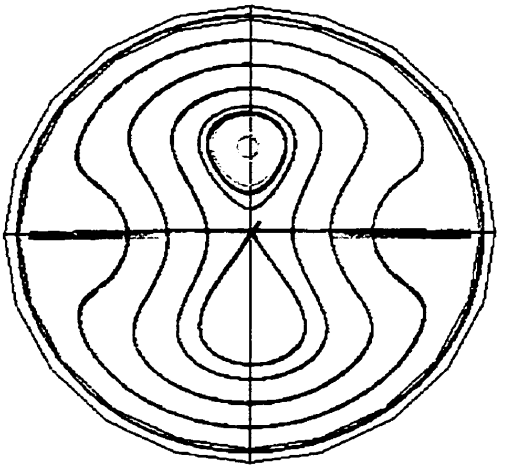
Figure 5.9 Courbe maîtresse de la consommation de puissance pour des fluides non newtoniens d'après le concept de Metzner-Otto (1957).

Bien que cette section nous a permis d'introduire les différents concepts gouvernant le mélange de fluides newtoniens et non newtoniens pour un système d'agitation simple, nous pouvons constater que l'ancre seule ne pourra assurer une remise en suspension complète des particules car la vitesse axiale de pompage vers le haut est très faible dans la partie supérieure du réservoir. Par le fait même, l'ajout de tiges de mélange et d'une TPI dans la partie supérieure du réservoir nous permettra d'améliorer le pompage et de favoriser une meilleure remise en suspension.

$Re_{pl} = 0.595$
$n = 0.8$



$Re_{pl} = 0.353$
$n = 0.6$



$Re_{pl} = 0.21$
$n = 0.4$

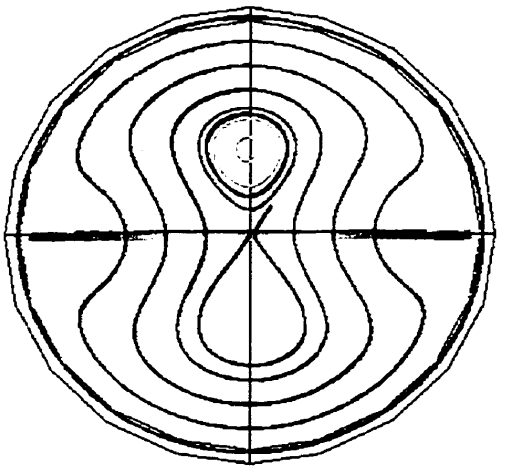


Figure 5.10 Trajectoires sur un plan x-y à mi-hauteur dans la partie cylindrique du réservoir pour différentes valeurs de l'indice de loi de puissance (4.43 tpm)(temps de parcours: 40 s).

2. Système d'agitation complexe : mélangeur coaxial (ancre+4 tiges+TPI)

2.1 Fluide newtonien

Nous rappelons ici que le mélangeur coaxial possède un axe lent et un axe rapide. L'axe lent entraîne une ancre située en périphérie du pot de mélange dans la direction horaire alors que l'axe rapide entraîne les tiges de mélange et la TPI dans la partie centrale du réservoir dans la direction opposée. Dans cette section, nous nous intéresserons à la caractérisation de la puissance d'agitation et des patrons d'écoulement à l'intérieur du mélangeur coaxial en fonction de 3 rapports de vitesses ($R_N=N_c/N_a$=4,8 et 24) entre les axes lent et rapide.

Dans un tel système d'agitation, le choix des longueur et vitesse caractéristiques nécessaires à l'évaluation de N_p et Re devient problématique. En effet, le mélangeur coaxial possède trois différents types d'agitateur et deux vitesses de rotation différentes. Dans un premier temps, nous avons décidé de choisir le diamètre (D_a) et la vitesse caractéristiques (N_a) de l'ancre afin de pouvoir comparer avec les résultats obtenus à la section précédente.

Le fluide newtonien utilisé pour la partie expérimentale et les simulations numériques est identique à celui employé précédemment, c'est-à-dire $\mu = 15$ Pa-s et $\rho = 1500$ kg/m^3.

Tel que défini auparavant (section 1.1 chapitre 4), les simulations seront effectuées dans le repère lagrangien de l'ancre. Dans un tel repère, la position des tiges de mélange et la TPI (agitateurs mobiles) changent en fonction du temps. Nous avons donc employé la méthode des éléments finis virtuels afin de résoudre les équations de Navier-Stokes non stationnaires. Nous avons décidé de décrire le mouvement des agitateurs mobiles en effectuant une rotation de 18° par pas de temps (Δt). Avec ce choix, l'écoulement est simulé pour 20 positions différentes des agitateurs mobiles. Le pas de temps sera donc une fonction de la vitesse de

rotation de l'ancre et du rapport de vitesses entre l'ancre et les agitateurs mobiles, c'est-à-dire

$$\Delta t = \frac{1 \text{ tour}}{20 \text{ pas de temps}} \times \frac{\text{min}}{(N_a+N_c) \text{ tours}} \times \frac{60 \text{ s}}{\text{min}}$$

$$= \frac{1 \text{ tour}}{20 \text{ pas de temps}} \times \frac{\text{min}}{(N_a+N_a x R_N) \text{ tours}} \times \frac{60 \text{ s}}{\text{min}}$$

$$= \frac{1 \text{ tour}}{20 \text{ pas de temps}} \times \frac{\text{min}}{N_a(1+R_N) \text{ tours}} \times \frac{60 \text{ s}}{\text{min}} \qquad [5.15]$$

Typiquement, le pas de temps utilisé, lors des simulations, variait entre 0.03 à 0.135 s. À chaque pas de temps, les points de contrôle, situés sur les maillages surfaciques des agitateurs mobiles, doivent être déplacés pour tenir compte du mouvement. Aussi, nous devons imposer une condition cinématique sur chacun des points de contrôle qui seront contraints. Un seul maillage volumique est nécessaire pour toutes les simulations, soit celui du réservoir et de l'ancre présenté à la figure 5.1. En ce qui concerne les maillages surfaciques, ils sont illustrés à la figure 5.11 et le nombre de points de contrôle les définissant présentés au tableau 5.3.

Tableau 5.3 Caractéristiques numériques des maillages surfaciques

Maillages surfaciques	Nombre d'éléments	Nombre de points de contrôle
Axe	400	208
Tiges de mélange	5022	2279
TPI	1968	884

La simulation de l'écoulement sur plusieurs tours a démontré que la solution était périodique. De plus, on a observé qu'un seul tour était nécessaire lorsque la valeur du nombre de Reynolds était très faible. Ceci signifie que la mise en mouvement est quasi instantanée. Finalement, mentionnons que chaque simulation a nécessité entre 12 et 24 heures de temps calcul sur une station de travail IBM RISC6000/550.

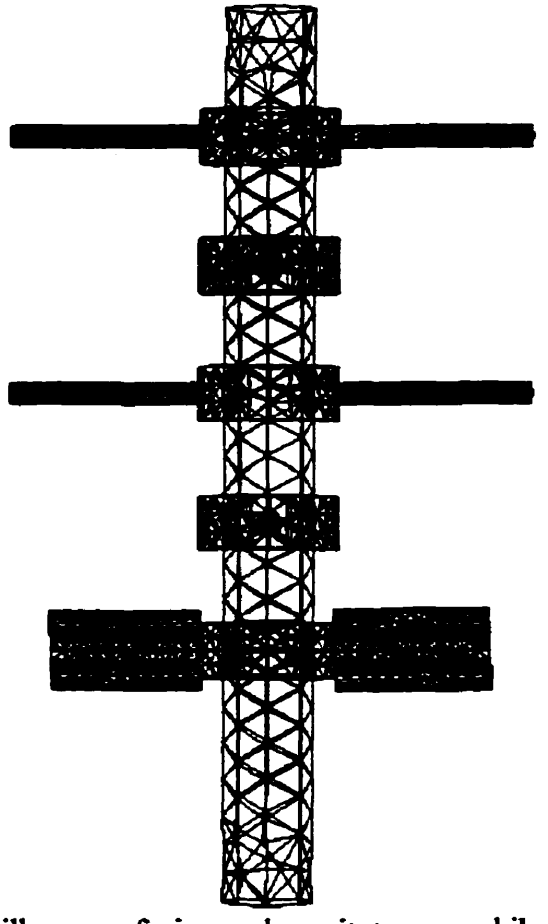


Figure 5.11 Maillages surfaciques des agitateurs mobiles : axe, 4 tiges de mélange et TPI.

La figure 5.12 présente un exemple de consommation de puissance obtenue numériquement au cours d'un tour des tiges de mélange et la TPI. La variation de la puissance est attribuable au changement de la position des agitateurs en fonction du temps. Nous avons donc décidé d'évaluer la puissance moyenne sur un tour et d'utiliser cette valeur dans l'expression du nombre de puissance (N_p).

Nous présentons à la figure 5.13 les valeurs expérimentales et numériques de la variation de N_p en fonction de Re pour différents rapports de vitesses (N_c/N_a) entres les axes lent et rapide.

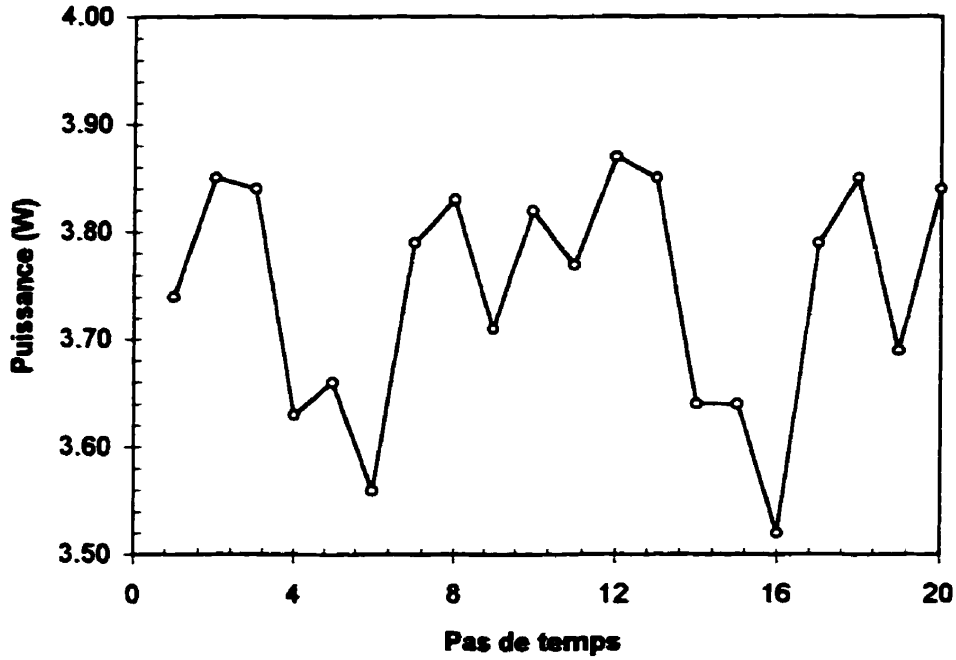


Figure 5.12 Exemple de consommation de puissance en fonction du pas de temps pour une vitesse de rotation de l'ancre de 4.43 tpm et un rapport de vitesses R_N=4.

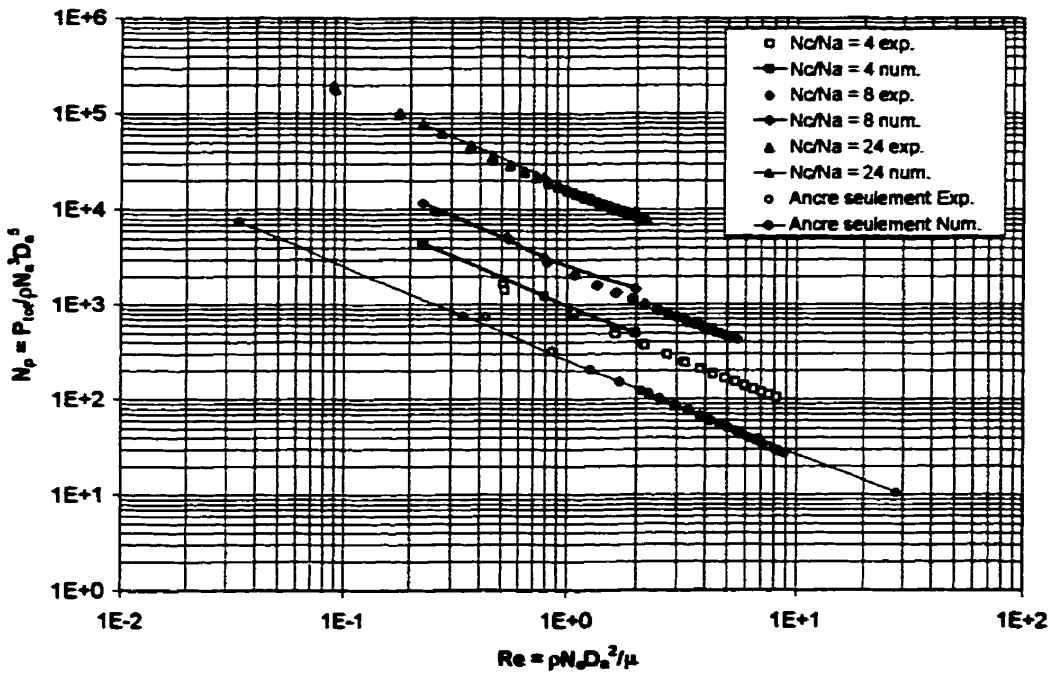


Figure 5.13 Résultats expérimentaux et numériques de N_p en fonction de Re pour différents rapports de vitesses entre les axes lent et rapide (fluide newtonien).

On peut voir qu'il existe une très bonne concordance entre les valeurs numériques et expérimentales. De plus, on remarque que, pour une valeur donnée de Re, le nombre de puissance croît avec l'augmentation du rapport de vitesses (R_N). En effet, pour une valeur donnée de Reynolds, la vitesse de l'ancre demeure constante alors que la vitesse des agitateurs mobiles (axe+4 tiges de mélange+TPI) augmente avec le rapport de vitesses. Cette augmentation de la vitesse de rotation des agitateurs mobiles favorise donc une augmentation du cisaillement moyen dans le mélangeur coaxial, ce qui entraîne un accroissement de la puissance d'agitation. Conformément à la théorie, la valeur de la pente de chacune des courbes est égale à -1 pour les faibles valeurs de Re. Par contre, on note un changement de pente, c'est-à-dire l'apparition d'un régime de transition, pour une valeur de Re inférieure à 10. Ce phénomène est d'autant plus accentué que R_N est élevé. Ceci provient du fait que le nombre de Reynolds est défini par rapport à l'ancre alors que les agitateurs de l'axe rapide atteignent le régime transitoire plus rapidement. La méthode des éléments finis virtuels s'avère donc une méthode numérique adéquate afin de prédire les écoulements pour des systèmes d'agitation complexe.

Comme à la section précédente, nous pouvons évaluer la valeur de la constante K_p du mélangeur coaxial en fonction du rapport de vitesses R_N. Les valeurs de K_p expérimentales et numériques sont présentées au tableau 5.4 et à la figure 5.14. On observe que les valeurs numériques permettent de bien approcher les valeurs expérimentales. Après lissage des valeurs numériques, nous obtenons la relation suivante

$$K_p(R_N) = 26.09R_N^2 + 88.663R_N + 256, \quad 0 \le R_N \le 24 \qquad [5.16]$$

Comme on peut le constater, lorsque le rapport de vitesses est égale à zéro, on obtient alors la valeur de K_p obtenue à la section précédente où seule l'ancre est en rotation dans le réservoir. La relation [5.16] nous permet donc d'évaluer la consommation de puissance requise pour l'agitation de fluides newtoniens en fonction du rapport de vitesses dans le mélangeur coaxial.

Tableau 5.4 Valeurs expérimentales et numériques de K_p en fonction du rapport de vitesses R_N du mélangeur coaxial.

Rapport de vitesses	K_p		Écart
R_N	Numérique	Expérimental	(%)
0	256	253	1.2
4	1003	817	22.7
8	2651	2284	16.1
24	17411	16486	5.6

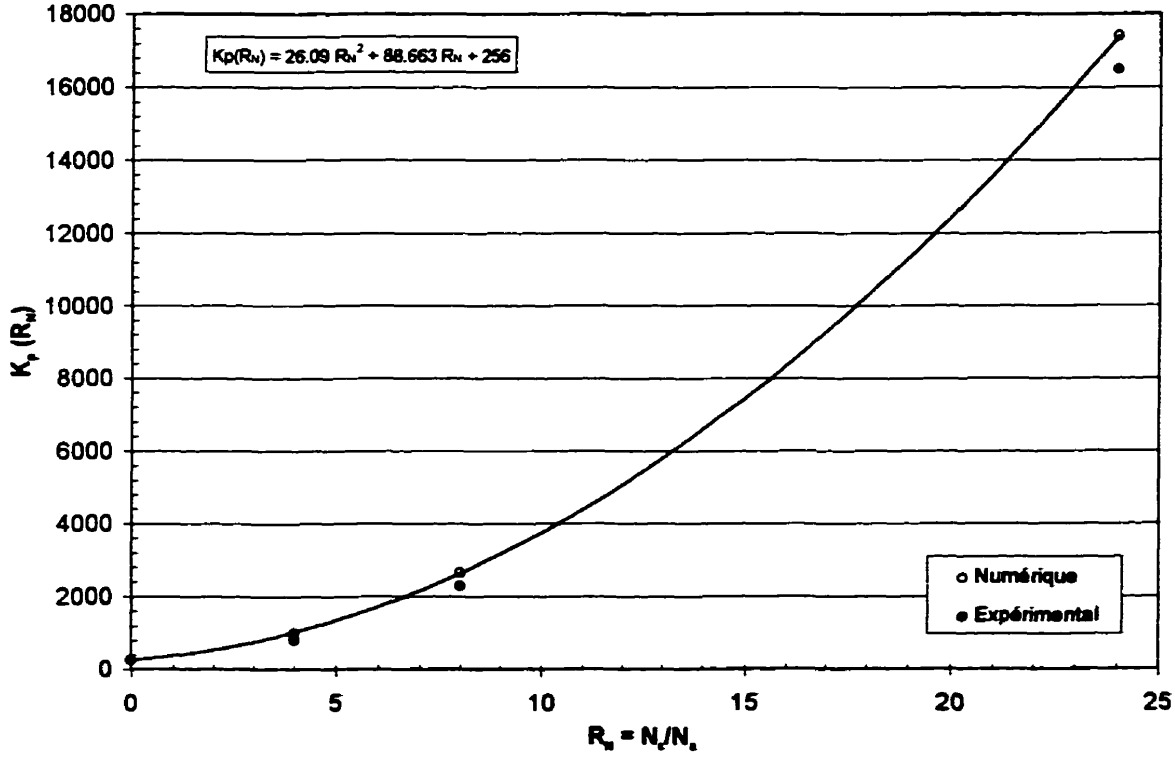


Figure 5.14 Valeur de K_p en fonction du rapport de vitesses entre les axes lent et rapide (fluide newtonien).

Par contre, si nous avions choisi de définir le nombre de Reynolds à partir des valeurs caractéristiques des tiges de mélange, les données de la figure 5.13, exception faite des données concernant l'ancre seulement, prendrait la forme suivante

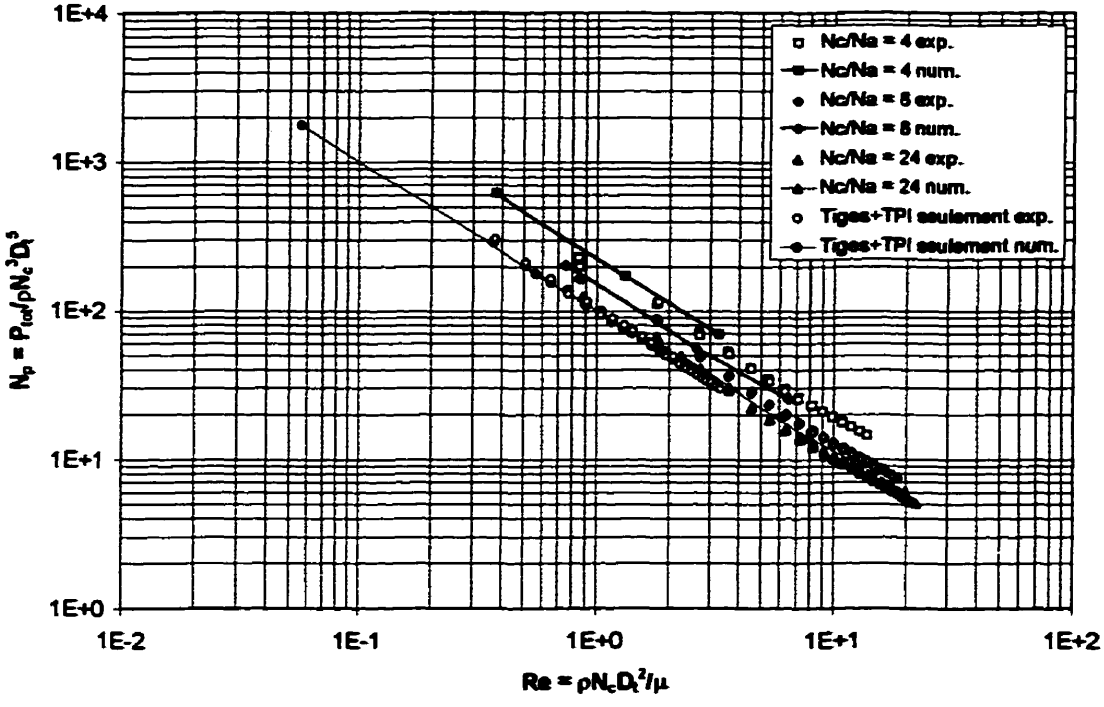


Figure 5.15 Résultats expérimentaux et numériques de N_p en fonction de Re pour différents rapports de vitesses entre les axes lent et rapide - diamètre et vitesse caractéristiques des tiges de mélange (fluide newtonien).

De plus, sur ce graphique, nous avons ajouté les données de consommation de puissance, obtenues expérimentalement et numériquement, lorsque seules les tiges de mélange et la TPI sont en rotation. On remarque à la figure 5.15 que, pour une valeur donnée de Re, le nombre de puissance N_p diminue avec l'augmentation du rapport de vitesses R_N contrairement aux données de la figure 5.13. En effet, pour une valeur donnée de Re, la vitesse des tiges de mélange demeure constante alors que la vitesse de l'ancre diminue avec une augmentation du rapport de vitesses, ce qui favorise une diminution de la puissance d'agitation. Contrairement à la figure 5.13, on remarque que le régime laminaire couvre une plus grande gamme de Re.

À l'aide de la figure 5.15, nous pouvons évaluer les constantes K_p en fonction du rapport de vitesses. Les valeurs de K_p expérimentales et numériques sont présentées au tableau 5.5 et à la figure 5.16.

Tableau 5.5 Valeurs expérimentales et numériques de K_p en fonction du rapport de vitesses R_N du mélangeur coaxial.

Rapport de vitesses	$K_{p\ tiges}$		Écart
R_N	Numérique	Expérimental	(%)
4	233	190	22.6
8	154	133	15.8
24	113	107	5.6
∞	99	98	1.0

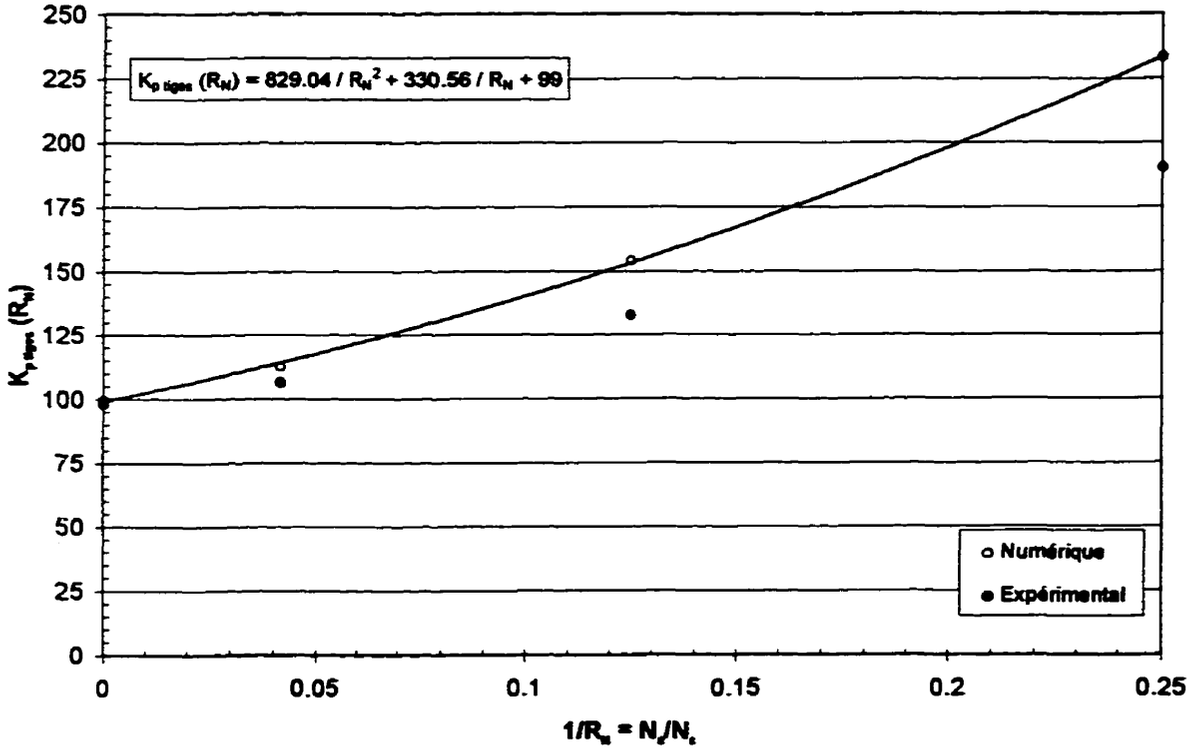


Figure 5.16 Valeur de $K_{p\ tiges}$ en fonction du rapport inverse de vitesse entre les axes lent et rapide - diamètre et vitesse caractéristiques des tiges de mélange (fluide newtonien).

Après lissage des valeurs numériques, nous obtenons la relation suivante

$$K_{p\,tiges}(R_N) = 829.04/R_N^2 + 330.56/R_N + 99, \quad 4 \leq R_N \leq \infty \qquad [5.17]$$

Comme on peut le constater, lorsque le rapport de vitesses est infini, on obtient alors la valeur de K_p correspondant à la situation où seules les tiges de mélange et la TPI sont en rotation. L'équation [5.17] est très importante car elle nous permet, par exemple, d'estimer la consommation de puissance du mélangeur coaxial lorsque le rapport de vitesses R_N est supérieur à 24, chose qui n'est pas possible à l'aide de l'équation [5.16]. Dans la suite de ce travail, nous dénoterons les valeurs de K_p basées sur les caractéristiques des tiges de mélange ou de l'ancre de la façon suivante : $K_{p\,tiges}$ et $K_{p\,ancre}$.

Il est facile de relier les valeurs de $K_{p\,ancre}$ et $K_{p\,tiges}$ des tableaux 5.3 et 5.4. En effet, sachant que la valeur de $K_{p\,tiges}$ s'écrit

$$K_{p\,tiges} = \frac{P_{tot}}{\mu N_c^2 D_t^3} \qquad [5.17]$$

et que les rapports de vitesses et de diamètre entre les tiges de mélange et l'ancre sont définis par

$$R_N = \frac{N_c}{N_a}, \qquad R_D = \frac{D_t}{D_a} \qquad [5.18]$$

alors la substitution des relations [5.18] dans [5.17] nous permet d'obtenir la relation suivante:

$$K_{p\,tiges} = \frac{P_{tot}}{\mu N_c^2 D_t^3} = \frac{P_{tot}}{\mu N_a^2 D_a^3} \frac{1}{R_N^2} \frac{1}{R_D^3} = K_{p\,ancre} \frac{1}{R_N^2} \frac{1}{R_D^3} \qquad [5.19]$$

La relation [5.19] s'applique seulement si les axes lent et rapide sont en rotation, c'est-à-dire pour les rapports de vitesses 4, 8 et 24.

On remarque au tableau 5.5 que la valeur de K_p des tiges de mélange et la TPI (K_p=99) est

nettement inférieure à la valeur de K_p (tableau 5.3) de l'ancre (K_p=256). C'est donc dire que, pour une même valeur de Re, l'ancre consomme beaucoup plus d'énergie. Par contre, puisque les tiges de mélange et la TPI tournent plus rapidement que l'ancre, on peut noter qu'en traçant le graphe de $K_{p\ tiges}$ et fonction de R_N(figure 5.17), la valeur de $K_{p\ tiges}$ atteint une valeur asymptotique correspondant à la situation où seules les tiges de mélange et la TPI sont en rotation. De plus, pour une valeur de R_N supérieure ou égale à 24, une augmentation du rapport de vitesses n'a qu'une faible incidence sur la valeur de $K_{p\ tiges}$. Ceci signifie que la majorité de la consommation d'énergie est attribuable aux tiges de mélange et à la TPI.

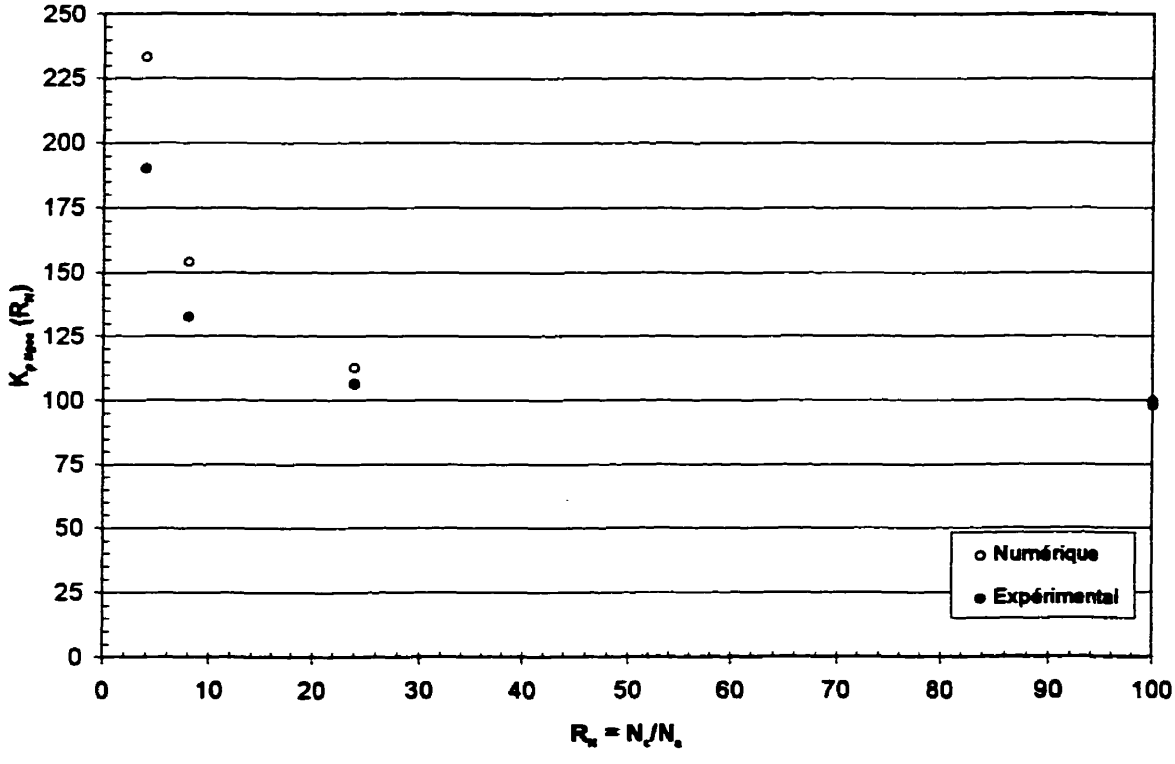


Figure 5.17 Valeur de $K_{p\ tiges}$ en fonction du rapport de vitesses entre les axes lent et rapide (fluide newtonien).

Il a été nécessaire de mettre au point une stratégie de calcul afin de calculer les trajectoires dans le mélangeur coaxial car le champ de vitesse sur chaque noeud du maillage est connu pour 20 positions différentes des agitateurs dans le repère lagrangien. Puisque la solution est périodique, une interpolation noeud par noeud à l'aide d'un algorithme de transformée de Fourier rapide (par exemple, Burden et Faires, 1989) a permis d'évaluer le champ de vitesse de manière continue dans le temps. En d'autres termes, la vitesse au noeud i est approchée par une série de Fourier de la forme

$$v^i = a_0^i + a_n^i \cos nt + \sum_{k=1}^{n-1} (a_k^i \cos kt + b_k^i \sin kt) \qquad [5.20]$$

où n repésente le nombre d'harmoniques et où les coefficients a_k^i, k=1,2,...,n-1, et b_k^i, k=1,2,...,n-1 sont calculés à partir de l'ensemble des valeurs prises par la vitesse en ce noeud au cours d'un tour complet des tiges de mélange et la TPI dans le repère lagrangien. Dans ce travail, des interpolations à 10 harmoniques ont été effectuées (conformément au théorème d'échantillonnage de Shannon, (Ljung, 1987)).

Nous montrons aux figures 5.18 et 5.19 l'influence du rapport de vitesses sur les profils d'écoulement pour une vitesse de rotation de l'ancre de 4.43 tours/min. On s'aperçoit à la figure 5.18 que les deux zones de recirculation au centre du réservoir ont disparu à cause du mouvement des tiges de mélange et de la TPI dans la partie centrale. De plus, on note, à la figure 5.19, une amélioration du pompage axial avec une augmentation du rapport de vitesses.

Afin de caractériser ce pompage, nous présentons à la figure 5.20 la vitesse de pompage axiale vers le haut ($\langle v_z^+ \rangle$) dans la direction axiale du mélangeur coaxial en fonction des différents rapports de vitesse.

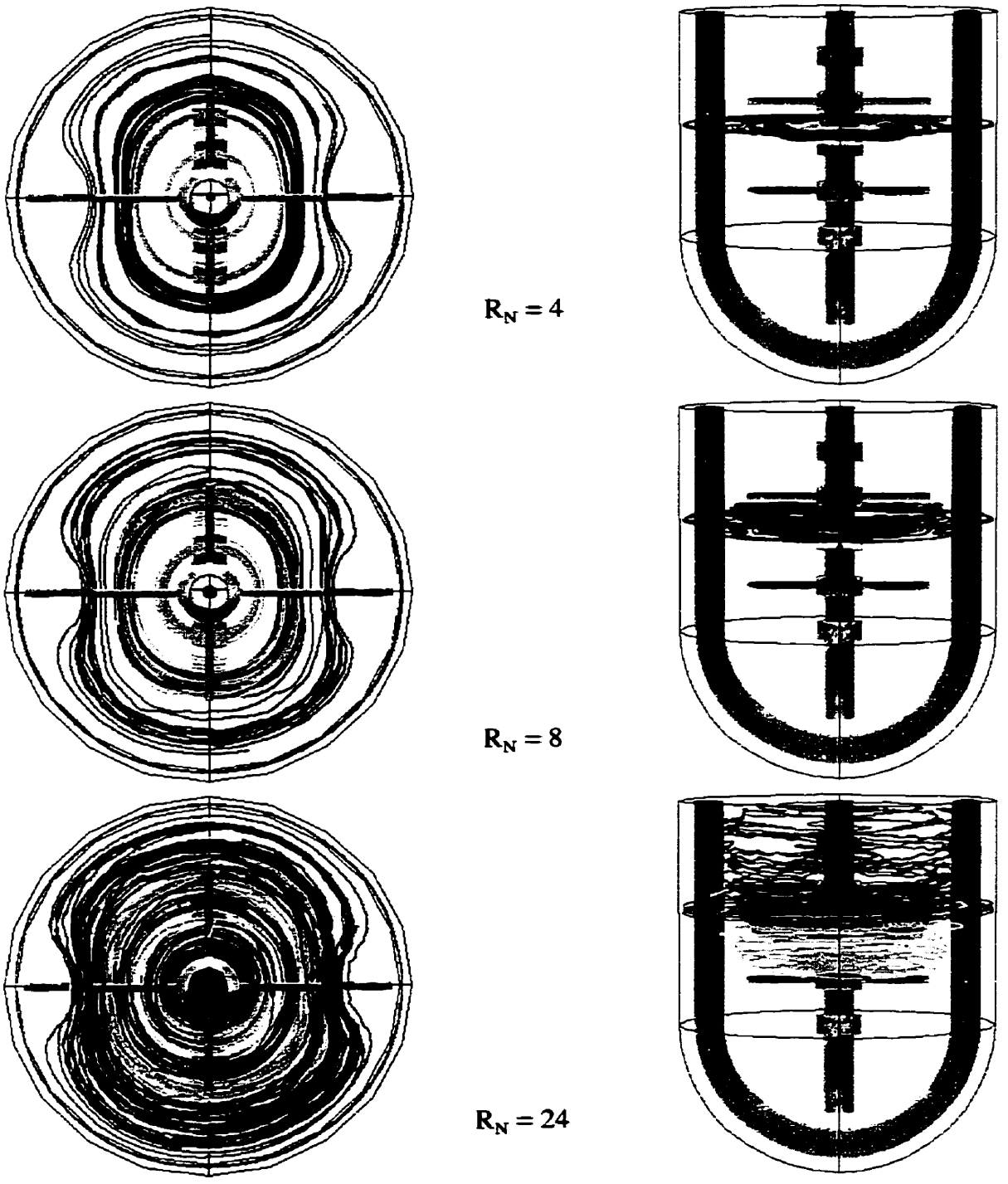


Figure 5.18 Trajectoires lancées sur un plan x-y à mi-hauteur dans la partie cylindrique du réservoir pour différents rapports de vitesses (N_a=4.43 tpm) (temps de parcours : 40 s).

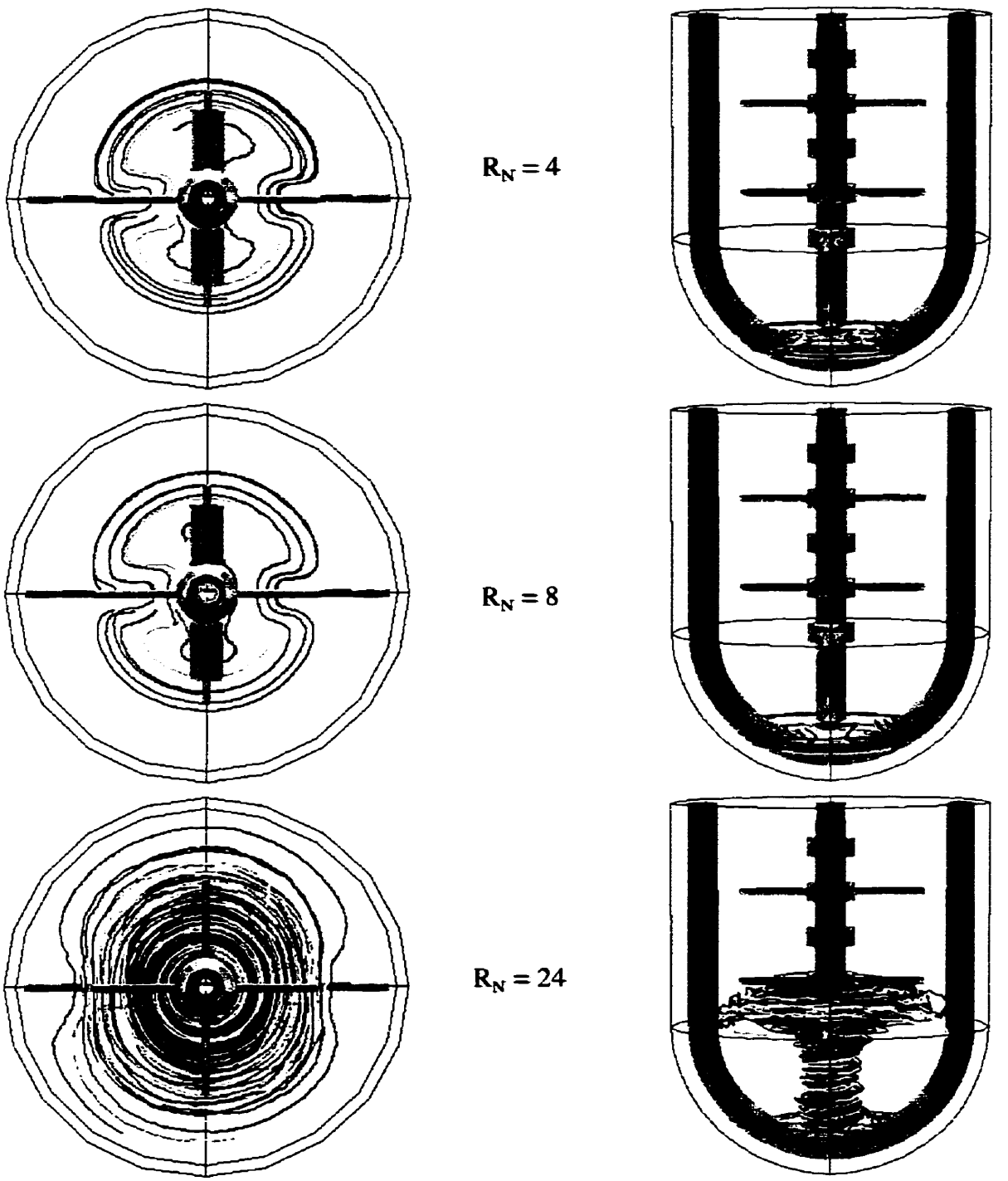


Figure 5.19 Trajectoires lancées dans le fond du réservoir pour différents rapports de vitesses (N_a=4.43 tpm) (temps de parcours : 40 s).

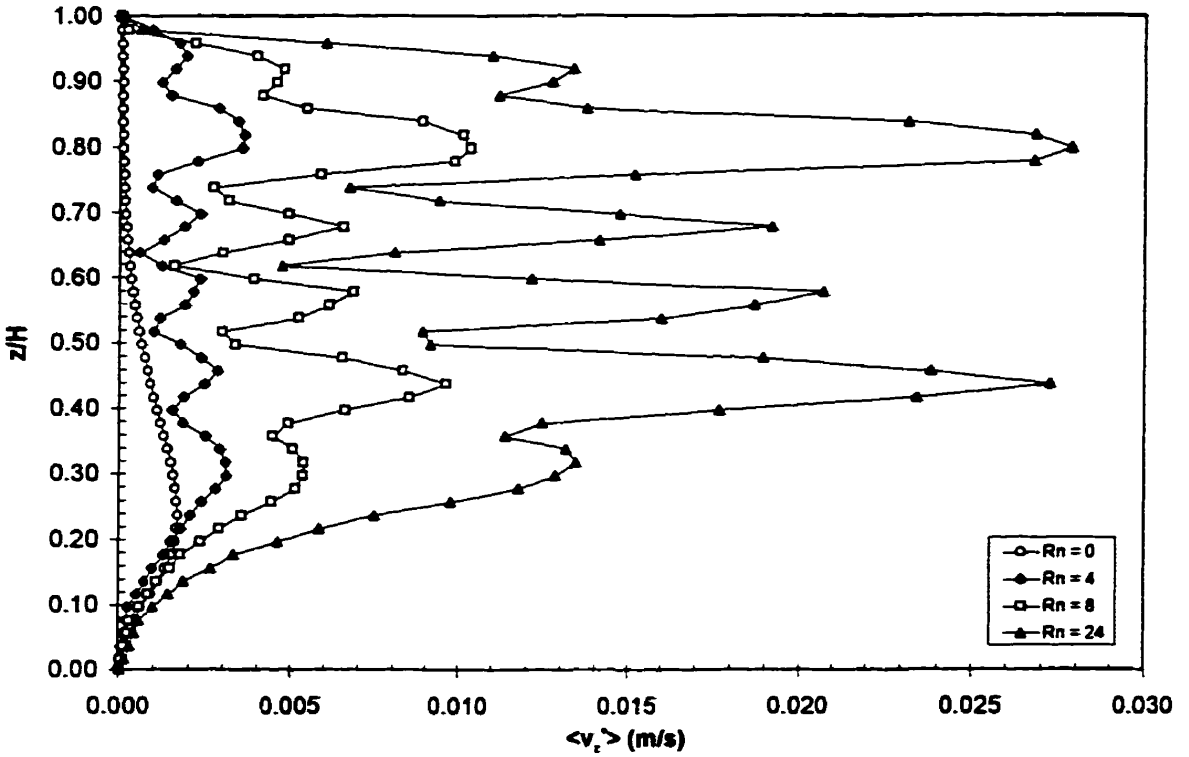


Figure 5.20 Vitesse moyenne de pompage vers le haut en fonction du rapport de vitesses dans le mélangeur coaxial (N_s=4.43 tpm) (fluides newtoniens).

Comme prévu, on observe, à la figure 5.20, une amélioration significative du pompage axial vers le haut avec l'augmentation du rapport de vitesses R_N. De plus, on discerne facilement l'influence des 4 tiges de mélange et la TPI sur le pompage axial dans la partie supérieure du mélangeur coaxial, ce qui favorisera une meilleure homogénéisation ou remise en suspension des particules.

2.2 Fluide non newtonien

Dans cette section, nous nous intéressons au mélange d'un fluide obéissant au modèle rhéologique de type loi de puissance, $\mu = K|\dot{\gamma}|^{n-1}$.

À l'aide de méthode des éléments finis virtuels, nous avons effectué un série de simulations numériques (21) en faisant varier la vitesse de l'ancre et le rapport de vitesses entre les axes lent et rapide ainsi que l'indice de loi de puissance. Puisque la résolution des équations de Navier-Stokes devient de plus en plus non-linéaire avec la diminution de l'indice loi de puissance, le temps de calcul moyen pour chacune des simulations se situait entre 24 et 36 heures sur une station IBM RISC6000/590.

Afin de valider les résultats des simulations numériques, le fluide non newtonien utilisé pour la partie expérimentale est une gomme de gellane possédant une masse volumique de 1000 kg/m^3 et un indice de consistance (K) de 10 Pa-s^n et un indice de loi de puissance (n) de 0.3.

Nous présentons aux figures 5.21 à 5.23 la variation de N_p en fonction Re_{pl} pour différentes valeurs de l'indice de la loi de puissance et différents rapports de vitesses R_N. On remarque une très bonne concordance entre les valeurs expérimentales et numériques lorsque l'indice de la loi de puissance est égale à 0.3. Les courbes pour lesquelles l'indice de la loi de puissance est égal à l'unité correspondent aux valeurs obtenues à la section précédente lorsque le fluide est newtonien. À l'aide des figures 5.21 à 5.23, nous pouvons évaluer la variation des constantes $K_{p\ ancre}$ (R_{Nb}n) et $K_{p\ tige}$ (R_{Nb}n) du mélangeur coaxial. Les valeurs ainsi obtenues sont présentées aux tableaux 5.6 et 5.7 et aux figures 5.24 à 5.25.

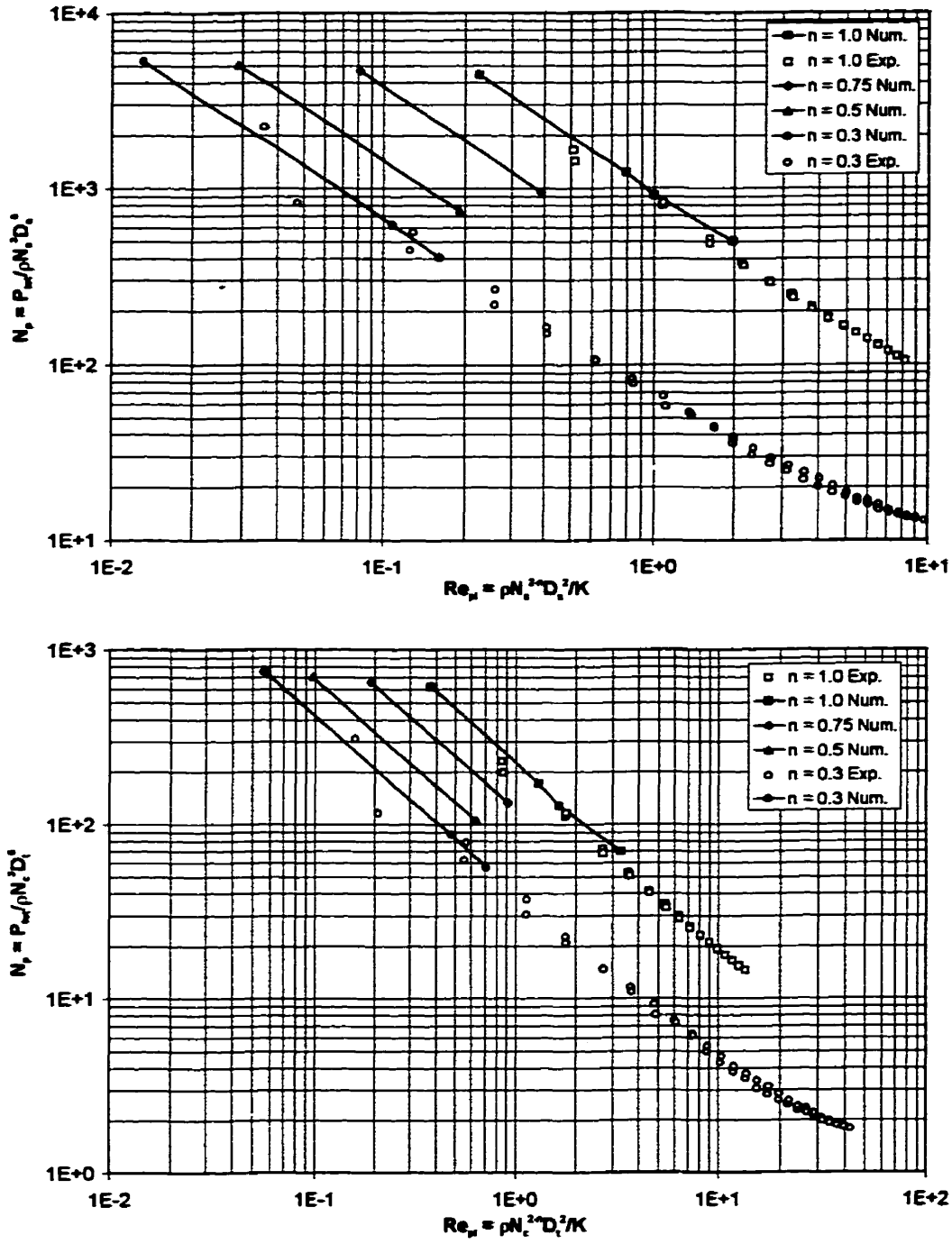


Figure 5.21 Résultats expérimentaux et numériques de N_p en fonction de Re_{pl} pour un rapport de vitesses R_N=4 basés sur valeurs caractéristiques de a) l'ancre et b) des tiges de mélange.

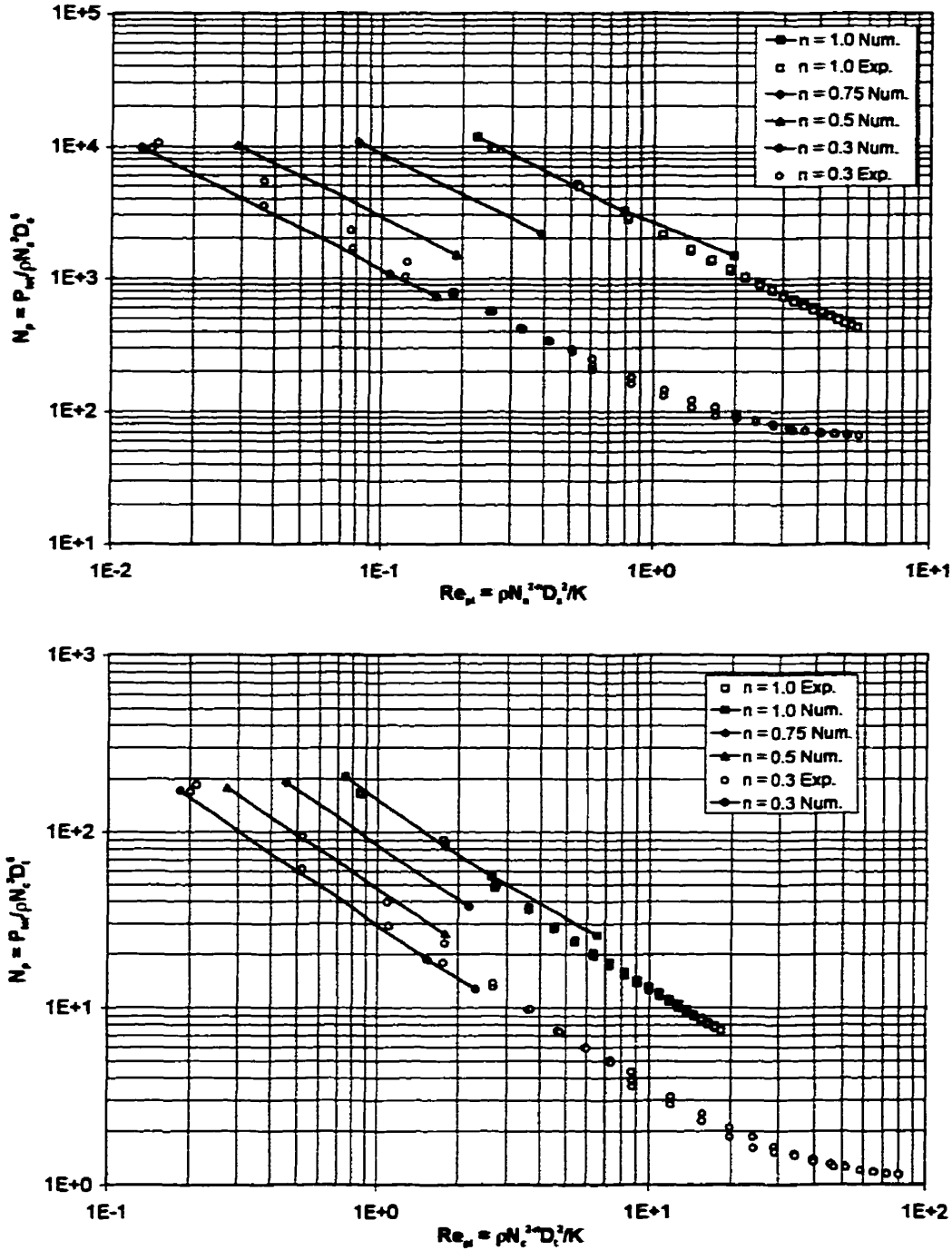


Figure 5.22 Résultats expérimentaux et numériques de N_p en fonction de Re_{pl} pour un rapport de vitesses R_N=8 basés sur valeurs caractéristiques de a) l'ancre et b) des tiges de mélange.

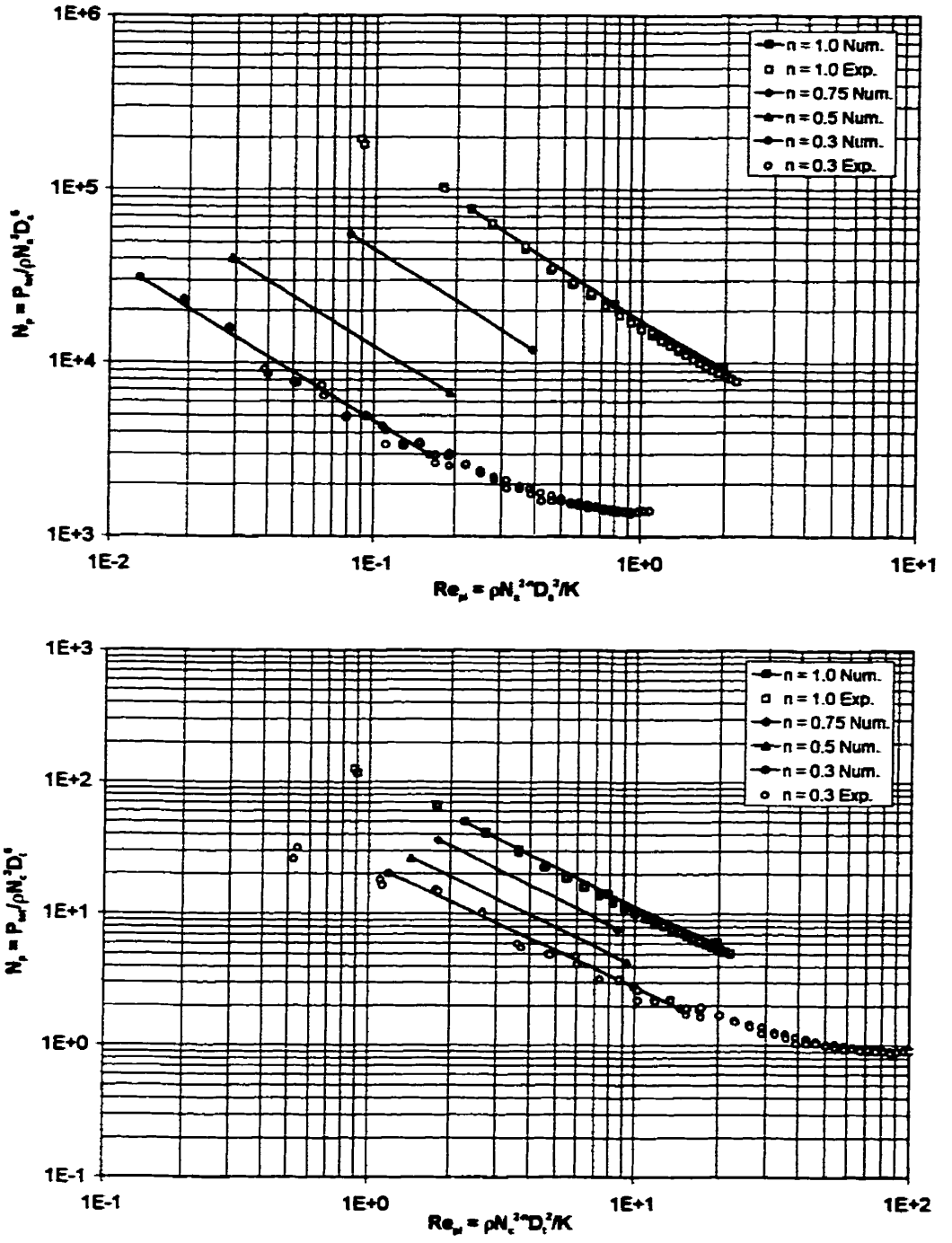


Figure 5.23 Résultats expérimentaux et numériques de N_p en fonction de Re_{pl} pour un rapport de vitesses R_N=24 basés sur valeurs caractéristiques de a) l'ancre et b) des tiges de mélange.

Tableau 5.6 Valeurs expérimentales et numériques de $K_{p\ ancre}$ (R_N,n) en fonction de l'indice de la loi de puissance pour différentes valeurs du rapport de vitesses du mélangeur coaxial.

	Num.				Exp.			
n	R_N				R_N			
(-)	0	4	8	24	0	4	8	24
1.0	256	1003	2651	17411	253	817	2284	16486
0.75	116	382	882	4530	-	-	-	-
0.5	53.7	148	298	1185	-	-	-	-
0.3	28.9	69	126	398	27	70	141	394

Tableau 5.7 Valeurs expérimentales et numériques de $K_{p\ tiges}$ (R_N,n) en fonction de l'indice de la loi de puissance pour différentes valeurs du rapport de vitesses du mélangeur coaxial.

	Num.				Exp.			
n	R_N				R_N			
(-)	4	8	24	∞	4	8	24	∞
1.0	233	154	113	99	190	133	107	98
0.75	126	86.3	65	58	-	-	-	-
0.5	68.7	49.1	37.5	33.3	-	-	-	-
0.3	42.3	31.4	23.8	21.4	42.8	35	23.5	22

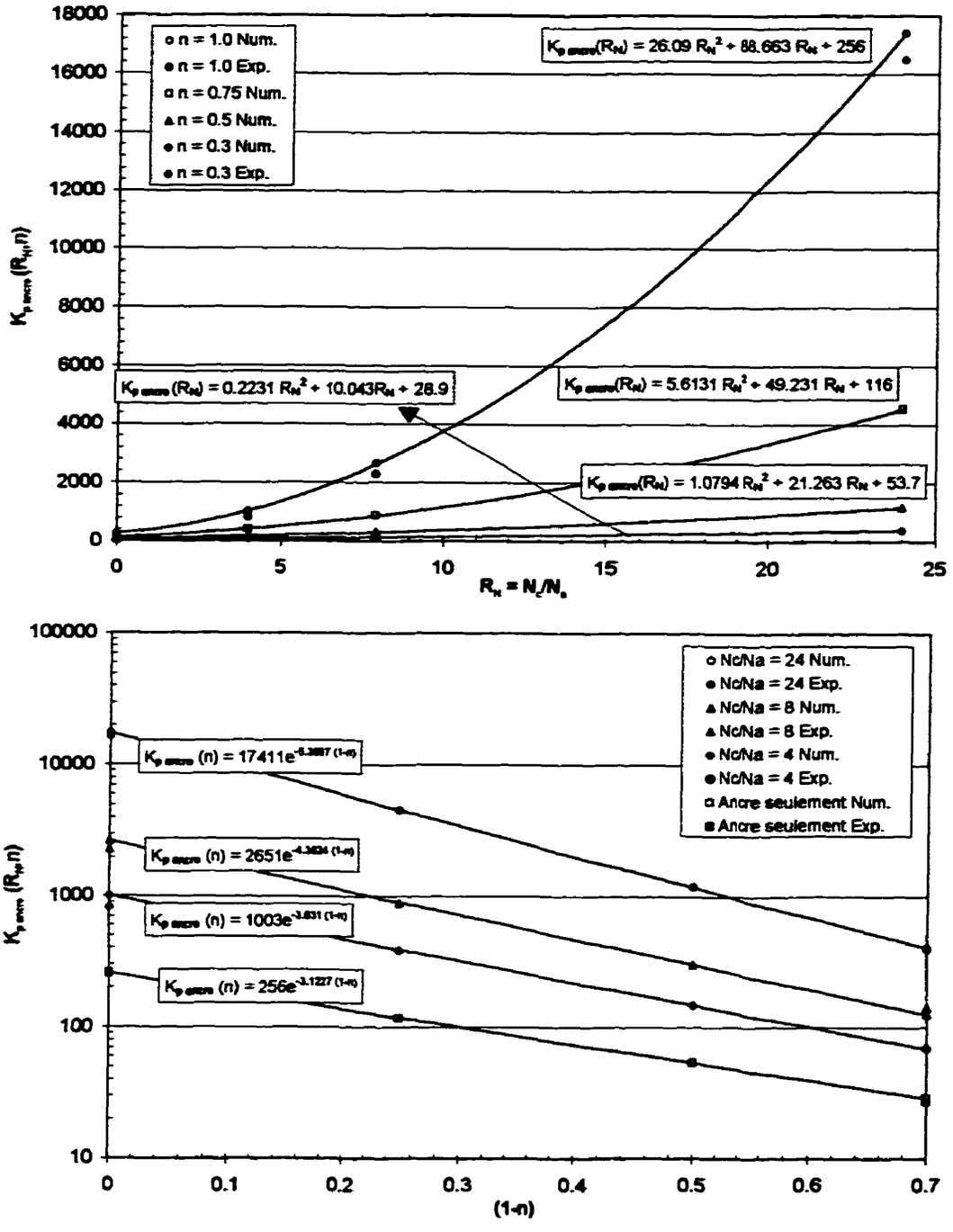


Figure 5.24 Variation de $K_{p\ ancre}$ (R_N,n) en fonction du rapport de vitesses R_N et de (1-n).

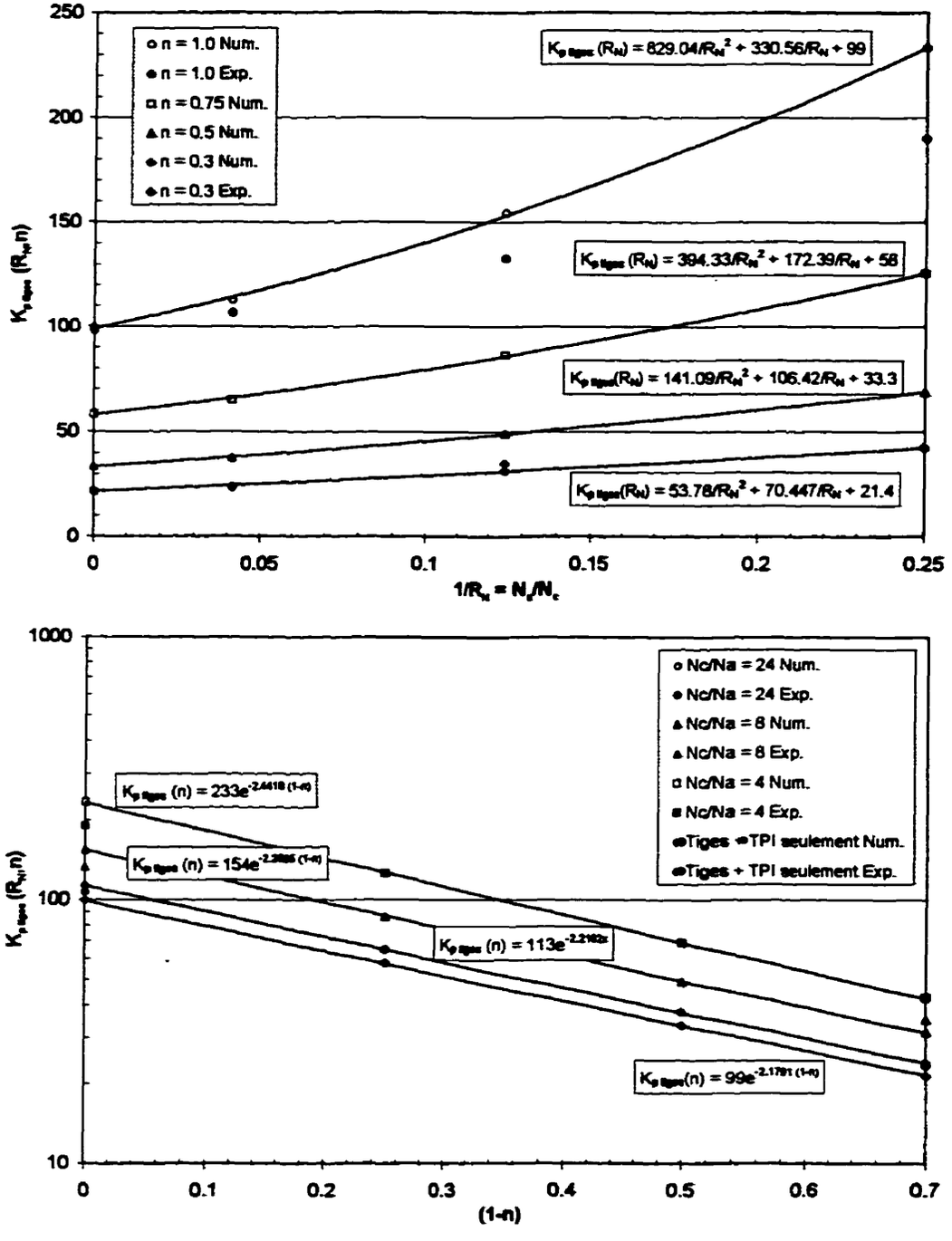


Figure 5.25 Variation de $K_{p\ tiges}(R_N,n)$ en fonction du rapport de vitesses R_N et de (1-n).

Comme on peut le constater à la figure 5.24, la valeur de $K_{p\ ancre}$ (R_N,n) varie de façon parabolique avec le rapport de vitesses R_N et de façon exponentielle avec (1-n). Après lissage des valeurs numériques, nous obtenons la relation permettant de calculer la puissance d'agitation en fonction du rapport de vitesses et de l'indice de la loi de puissance du mélangeur coaxial pour un rapport de vitesse R_N compris entre 0 et 24 :

$$K_{pancre}(R_N,n)=\frac{P_{tot}}{KN_a^{1+n}D_a^3}=256e^{-3.1227(1-n)}+88.663e^{-2.9727(1-n)}R_N+26.09e^{-6.6167(1-n)}R_N^2 \qquad 0\leq R_N\leq 24 \qquad [5.21]$$

De la même façon, nous obtenons, après lissage des valeurs numériques de $K_{p\ tiges}$ (R_N,n) de la figure 5.25, la relation suivante :

$$K_{ptiges}(R_N,n)=\frac{P_{tot}}{KN_c^{1+n}D_t^3}=99e^{-2.1815(1-n)}+\frac{330.56e^{-2.2575(1-n)}}{R_N}+\frac{829.04e^{-3.7208(1-n)}}{R_N^2} \qquad 4\leq R_N\leq\infty \qquad [5.22]$$

À l'aide des équations [5.18], on peut montrer qu'il existe la relation suivante entre les équations [5.21] et [5.22] :

$$K_{ptiges}(R_N,n)=K_{pancre}(R_N,n)\frac{1}{R_N^{1+n}}\frac{1}{R_D^3} \qquad [5.23]$$

En ce qui concerne la détermination de K_s, on constate aux figures 5.24b et 5.25b que les graphiques de log $K_{p\ ancre}$(R_N,n) et log $K_{p\ tiges}$(R_N,n) en fonction (1-n) sont linéaires, signifiant que la valeur de K_s n'est pas fonction de la rhéologie et que le concept de Metzner-Otto est toujours valide même dans un système d'agitation complexe tel un mélangeur coaxial. Par contre, la valeur de K_s varie avec le rapport de vitesses tel que montré au tableau 5.8 et à la figure 5.26.

Sachant que la vitesse de déformation apparente basée sur les caractéristiques de l'ancre ou des tiges de mélange et la TPI s'écrit

Tableau 5.8 Valeurs de K_s basées sur les valeurs caractéristiques de l'ancre et des tiges de mélange.

R_N	$K_{s\ ancre}$	$K_{s\ tiges}$
0	22.7	-
4	46.1	11.5
8	78.5	9.8
24	218.9	9.2
∞	-	8.84

$$\gamma_a = K_{s\,ancre}(R_N)\,N_a = \frac{K_{s\,ancre}(R_N)\,N_c}{R_N} \qquad [5.24]$$

ou bien

$$\gamma_a = K_{s\,tiges}(R_N)\,N_c \qquad [5.25]$$

alors, on obtient la relation suivante entre $K_{s\ ancre}(R_N)$ et $K_{s\ tiges}(R_N)$:

$$K_{s\,ancre}(R_N) = R_N \cdot K_{s\,tiges}(R_N) \qquad [5.26]$$

On note au tableau 5.8 que la valeur de $K_{s\ ancre}$ augmente fortement avec le rapport de vitesses. En effet, lorsque le rapport de vitesses augmente, le niveau de cisaillement moyen dans le mélangeur augmente pour une vitesse donnée de l'ancre. En ce qui concerne $K_{s\ tiges}$, on note une diminution avec une augmentation du rapport de vitesses. En effet, pour une vitesse donnée des tiges de mélange et la TPI, la vitesse de l'ancre diminue avec une augmentation du rapport de vitesses, créant par le fait même un abaissement du cisaillement moyen dans le réservoir.

Après lissage des valeurs de $K_{s\ ancre}(R_N)$ et $K_{s\ tiges}(R_N)$, on obtient les relations suivantes :

$$K_{s\,ancre}(R_N) = 0.0868\,R_N^2 + 6.0932\,R_N + 22.7, \qquad 0 \le R_N \le 24 \qquad [5.27]$$

$$K_{s\,tiges}(R_N) = 20.061/R_N^2 + 5.5836/R_N + 8.84, \qquad 4 \le R_N \le \infty \qquad [5.28]$$

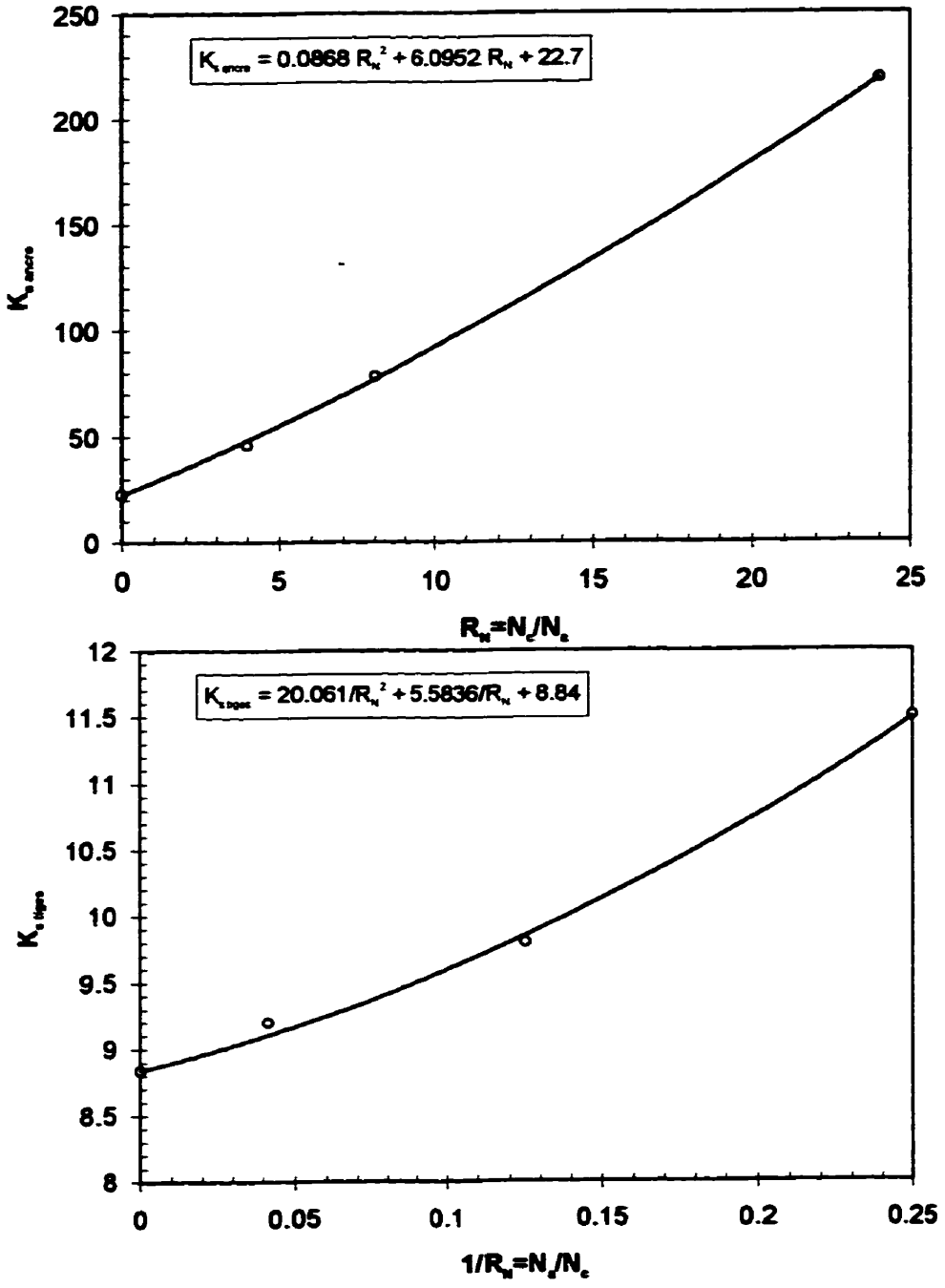


Figure 5.26 Variation de $K_{s\ ancre}$ et $K_{s\ tiges}$ en fonction du rapport de vitesses R_N.

La connaissance de $K_{s\ ancre}(R_N)$ et $K_{s\ tiges}(R_N)$ nous permet de définir un nombre de Reynolds généralisé pour chacun des rapports de vitesses de la façon suivante :

$$\mathrm{Re}_{g\,ancre} = \frac{\rho N_a D_a^2}{\mu_a} = \frac{\rho N_a^{2-n} D_a^2}{K K_{s\,ancre}^{n-1}(R_N)} \qquad [5.29]$$

$$\mathrm{Re}_{g\,tiges} = \frac{\rho N_c D_t^2}{\mu_a} = \frac{\rho N_c^{2-n} D_t^2}{K K_{s\,tiges}^{n-1}(R_N)} \qquad [5.30]$$

Cette définition du nombre de Reynolds nous permet d'obtenir des courbes maîtresse de la consommation de puissance pour des fluides non newtoniens de type loi de puissance pour différents rapports de vitesse entre les axes lent et rapide dans le mélangeur coaxial en supposant le concept de Metzner et Otto (figure 5.27).

Nous désirons simplifier la réprésentation graphique de la figure 5.27 afin d'obtenir une seule courbe maîtresse de N_p vs Re_g. Pour ce faire, nous introduisons les constantes $K_{RN\ ancre}$ et $K_{RN\ tiges}$, fonctions du rapport de vitesses, dans les relations [5.29] et [5.30] de la façon suivante:

$$\mathrm{Re}_{g\,ancre} = \frac{\rho N_a D_a^2}{\mu_a} = \frac{\rho N_a^{2-n} D_a^2}{K K_{R_N\,ancre}(R_N) K_{s\,ancre}^{n-1}(R_N)} \qquad [5.31]$$

$$\mathrm{Re}_{g\,tiges} = \frac{\rho N_c D_t^2}{\mu_a} = \frac{\rho N_c^{2-n} D_t^2}{K K_{R_N\,tiges}(R_N) K_{s\,tiges}^{n-1}(R_N)} \qquad [5.32]$$

où $K_{RN\ ancre}(R_N)$ et $K_{RN\ tiges}(R_N)$ sont définis par

$$K_{R_N\,ancre}(R_N) = \frac{K_{p\,ancre}(R_N)}{K_{p\,ancre}(0)} \qquad [5.33]$$

$$K_{R_N\,tiges}(R_N) = \frac{K_{p\,tiges}(R_N)}{K_{p\,tiges}(\infty)} \qquad [5.34]$$

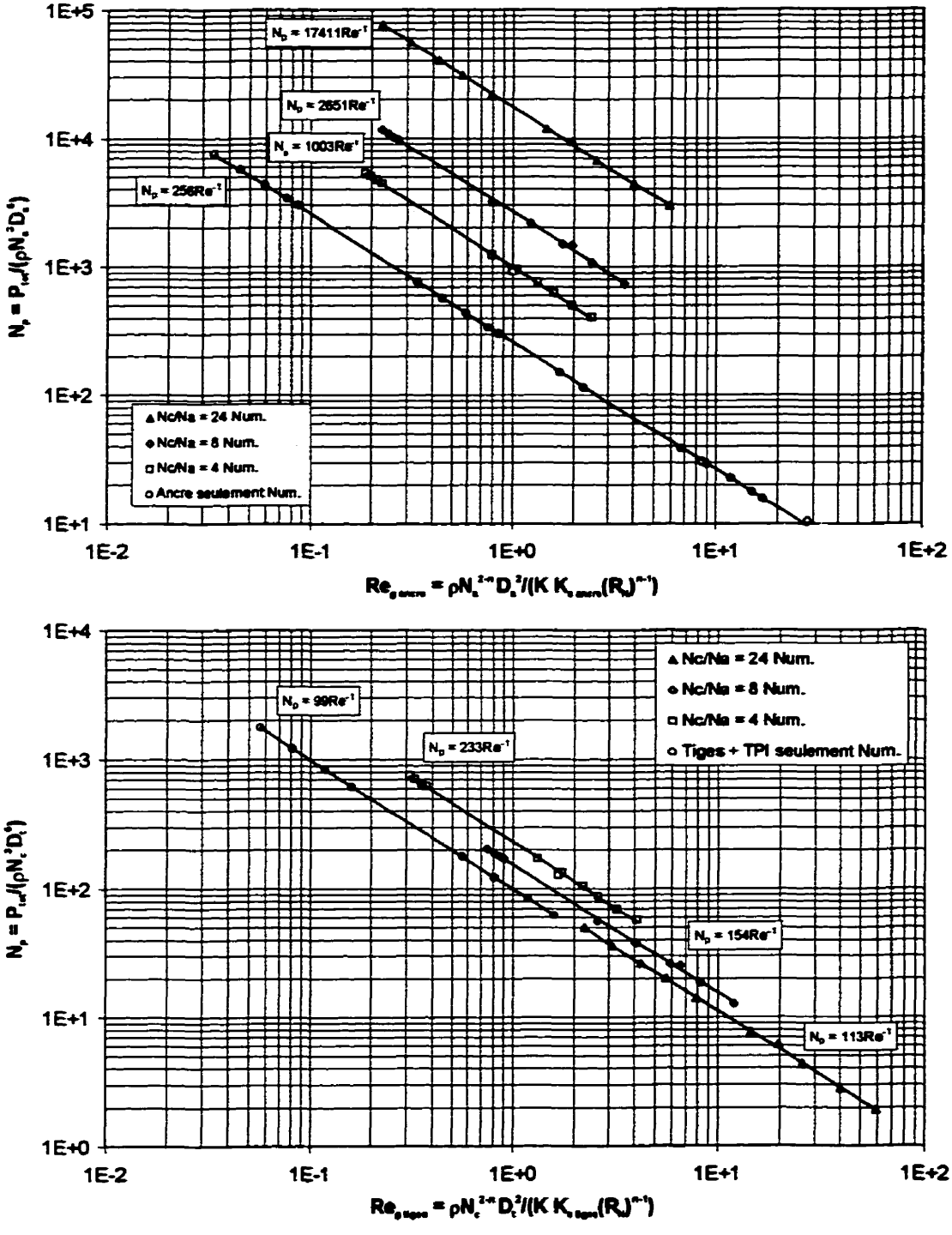


Figure 5.27 Courbes maîtresses de la consommation de puissance pour des fluides non newtoniens en fonction du rapports de vitesse d'après le concept de Metzner-Otto.

Nous présentons au tableau 5.9 et à la figure 5.28 les valeurs de $K_{RN\ ancre}(R_N)$ et $K_{RN\ tiges}(R_N)$ ainsi obtenues.

Tableau 5.9 Valeurs de $K_{RN\ ancre}(R_N)$ et $K_{RN\ tiges}(R_N)$ en fonction du rapport de vitesses.

R_N	$K_{RN\ ancre}$	$K_{RN\ tiges}$
0	1	-
4	3.9	2.3
8	10.3	1.6
24	67.8	1.1
∞	-	1

Après lissages des valeurs du tableau 5.9, nous obtenons :

$$K_{RN\ ancre}(R_N) = 0.1017\ R_N^2 + 0.345\ R_N + 1, \qquad 0 \le R_N \le 24 \qquad [5.35]$$

$$K_{RN\ tiges}(R_N) = 8.5546/R_N^2 + 3.2522/R_N + 1, \qquad 4 \le R_N \le \infty \qquad [5.36]$$

Connaissant la variation de $K_{RN\ ancre}(R_N)$ et $K_{RN\ tiges}(R_N)$, il s'agit donc de représenter les données de la figure 5.27 à partir de la définition du nombre Reynolds généralisé des équations [5.31] et [5.32]. Nous obtenons donc une courbe maîtresse de la consommation de puissance pour des fluides non newtoniens (figure 5.29).

Voici, en résumé, les étapes à suivre afin d'estimer la puissance d'agitation du mélangeur coaxial pour des fluides non newtoniens de type loi de puissance :

1. Pour un rapport de vitesses R_N compris entre 0 et 24, calculer la valeur de $K_{s\ ancre}(R_N)$ (équ.[5.27]) et de $K_{RN\ ancre}(R_N)$ (équ.[5.35]). Si le rapport de vitesses est supérieur à 24, calculer plutôt la valeur de $K_{s\ tiges}(R_N)$ (équ.[5.28]) et de $K_{RN\ tiges}(R_N)$ (équ.[5.36]);
2. Calculer la valeur du nombre de Reynolds généralisé (équ.[5.31] ou [5.32]). À l'aide des graphiques de la figure 5.29, on estime N_p et par le fait même la puissance d'agitation.

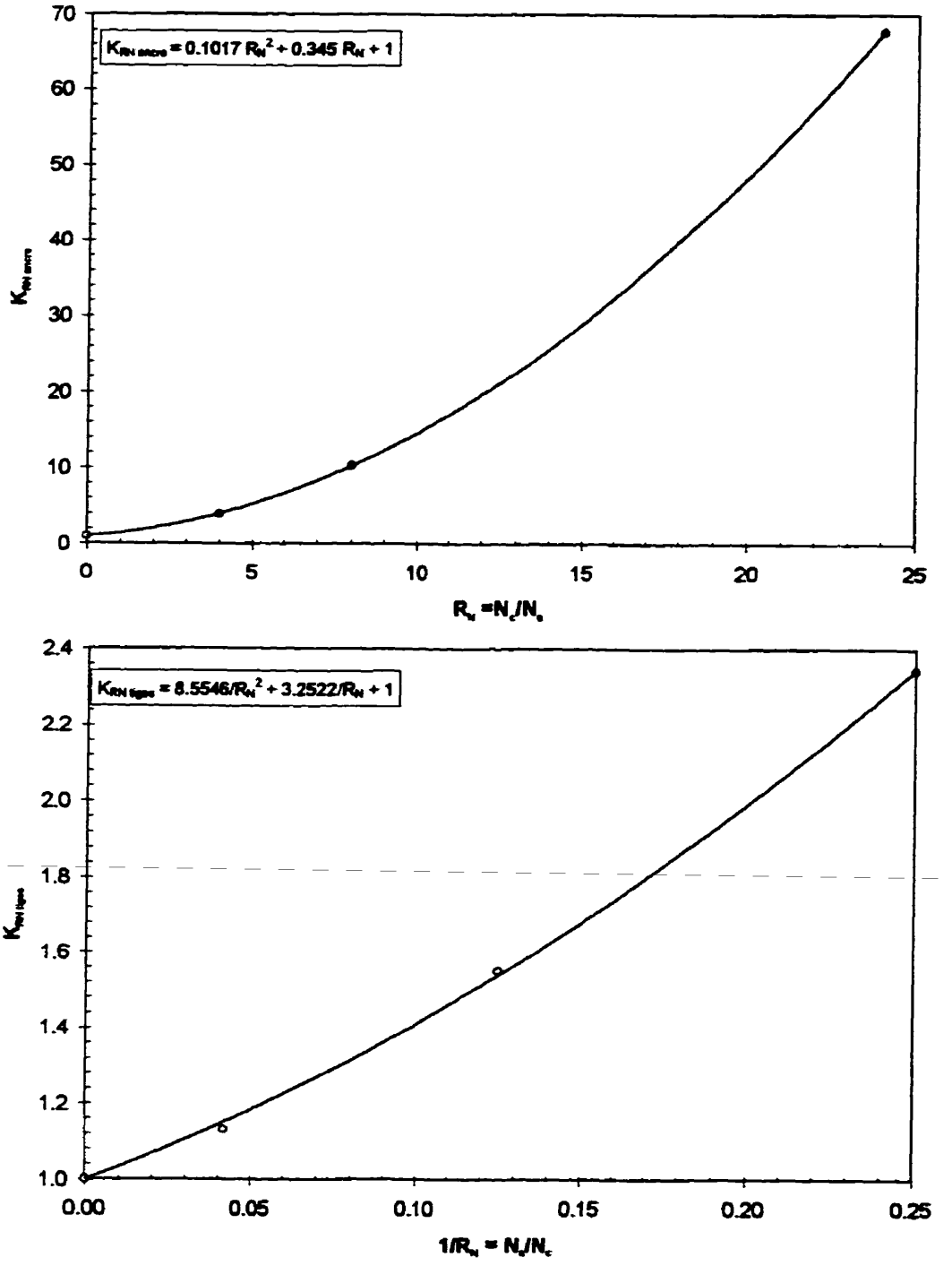


Figure 5.28 Variation de $K_{RN\ ancre}$ et $K_{RN\ tiges}$ en fonction du rapport de vitesses.

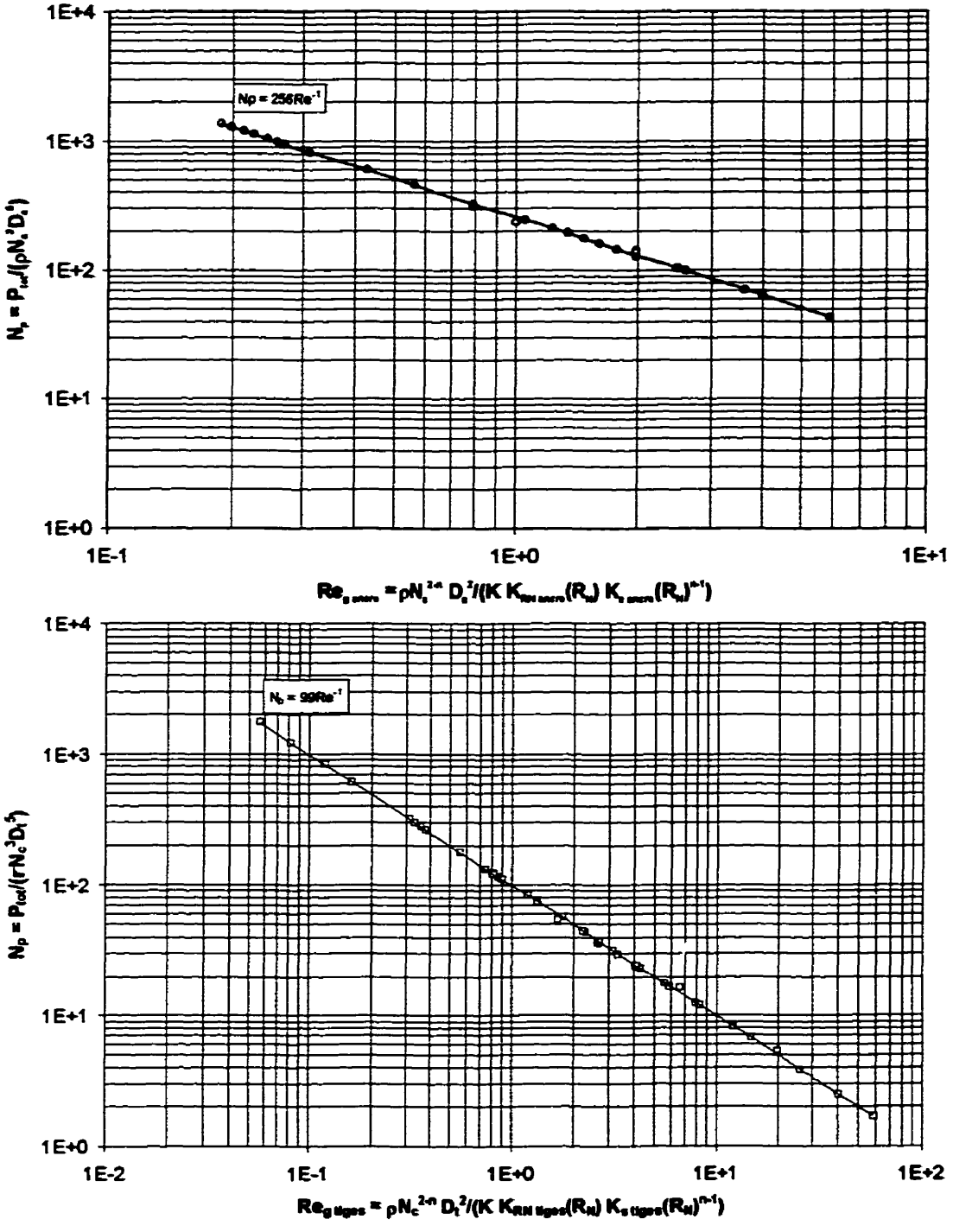


Figure 5.29 Courbe maîtresse de la consommation de puissance pour des fluides non newtoniens d'après le concept de Metzner-Otto.

Nous présentons aux figures 5.30 et 5.31 l'influence du rapport de vitesses sur le patron d'écoulement pour un fluide rhéofluidifiant possédant un indice de loi de puissance n=0.3 pour une vitesse de rotation de l'ancre de 4.43 tpm. Comparé au cas newtonien (figures 5.18 et 5.19), le pompage axial semble plus faible dans la partie cylindrique du mélangeur coaxial. Par contre, les trajectoires lancées au fond du réservoir pour un rapport de vitesses égale à 24 indique une meilleure dispersion dans la direction axiale.

Pour sa part, la figure 5.32 illustre la vitesse de pompage vers le haut pour différents rapports de vitesse dans la direction axiale. Comparé au cas newtonien (figure 5.20), on constate, en général, une vitesse axiale de pompage plus faible. De plus, on note une diminution significative de la vitesse de pompage lorsque le rapport de vitesses est égale à 8.

Nous allons terminer cette section par la caractérisation de la puissance d'agitation dans le mélangeur coaxial lorsque le régime d'écoulement est turbulent.

Régime d'écoulement turbulent

En régime d'écoulement turbulent, les forces visqueuses deviennent négligeables devant les forces d'inertie. Par conséquent, la puissance d'agitation n'est plus fonction du comportement rhéologique du fluide agité, contrairement au régime d'écoulement laminaire.

Afin de caractériser la puissance d'agitation dans ce régime, nous avons dilué successivement un fluide newtonien (sirop de maïs) initialement très visqueux jusqu'à l'obtention d'un fluide possédant une viscosité voisine de celle de l'eau. Pour chaque dilution, nous avons caractérisé la variation de N_p en fonction de Re. Seuls les résultats expérimentaux sont montrés ici car le logiciel POLY3D™ n'est pas adapté à la résolution des équations de Navier-Stokes pour des valeurs du nombre de Reynolds aussi élevé.

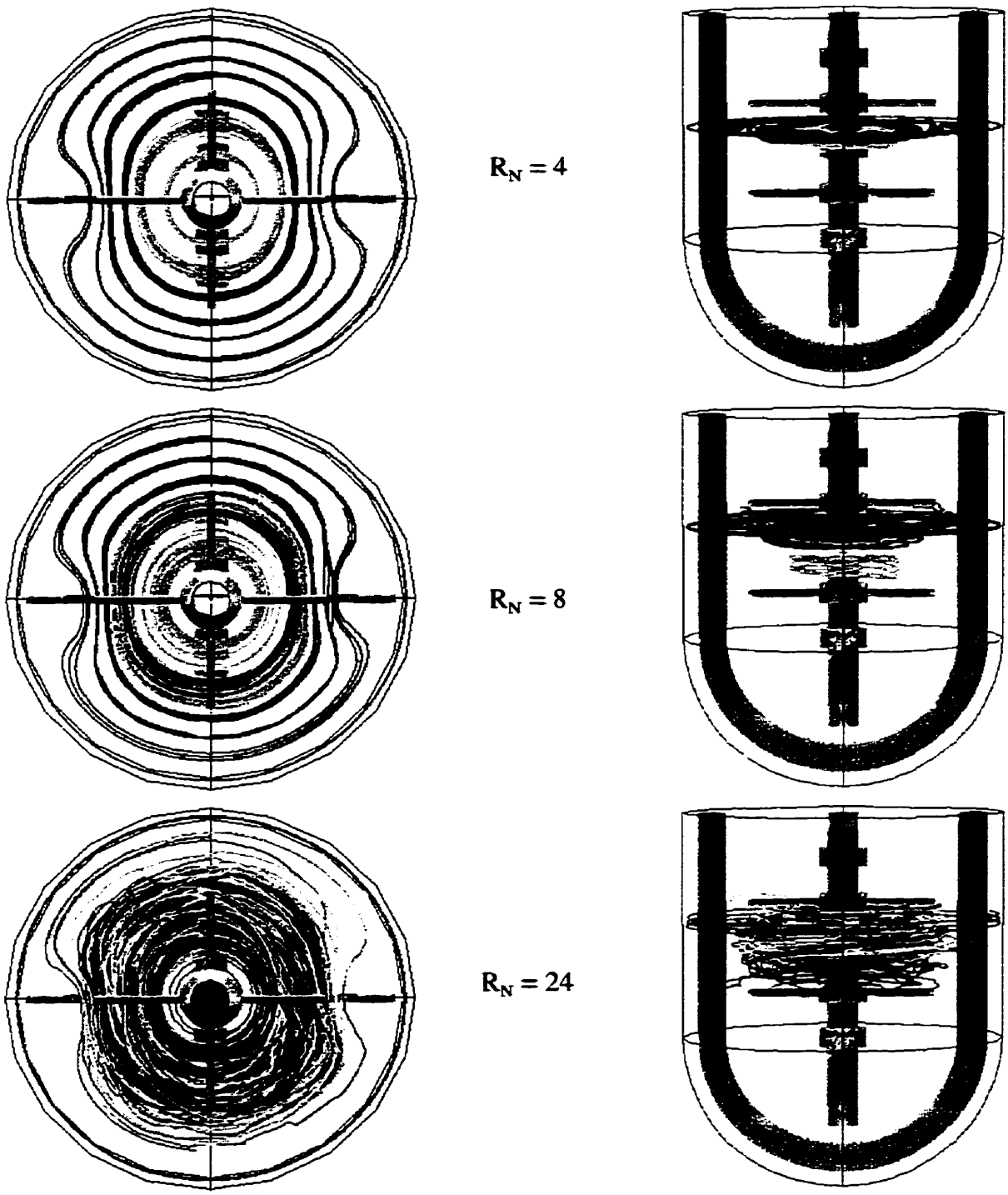


Figure 5.30 Trajectoires lancées sur un plan x-y à mi-hauteur dans la partie cylindrique du réservoir pour différents rapports de vitesse pour un fluide rhéofluidifiant ayant un indice de loi de puissance n=0.3 (N_a=4.43 tpm, temps de parcours: 40s).

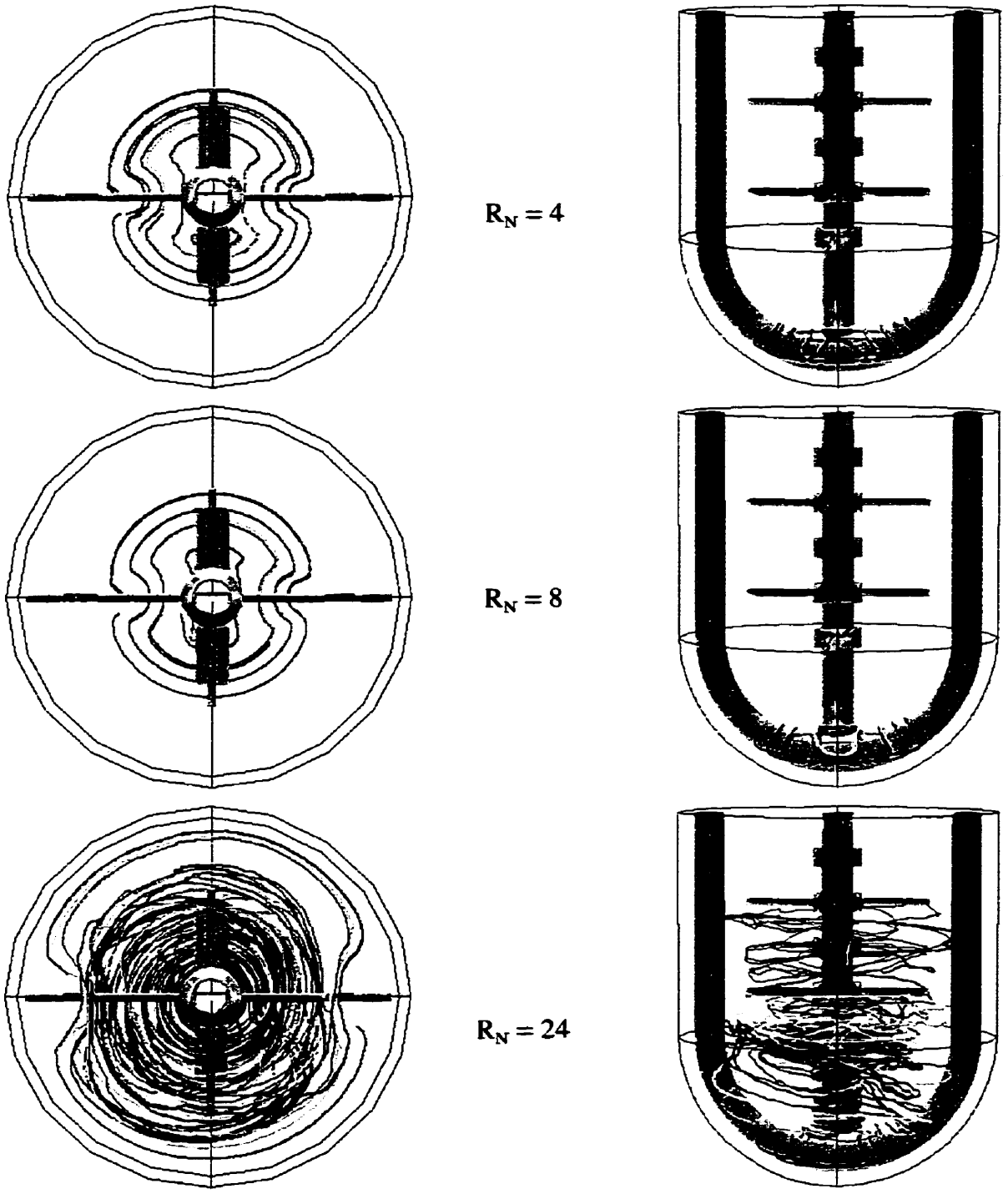


Figure 5.31 Trajectoires lancées dans le fond du réservoir pour différents rapports de vitesse pour un fluide rhéofluidifiant ayant un indice de loi de puissance n=0.3 (N_a=4.43 tpm, temps de parcours: 40s).

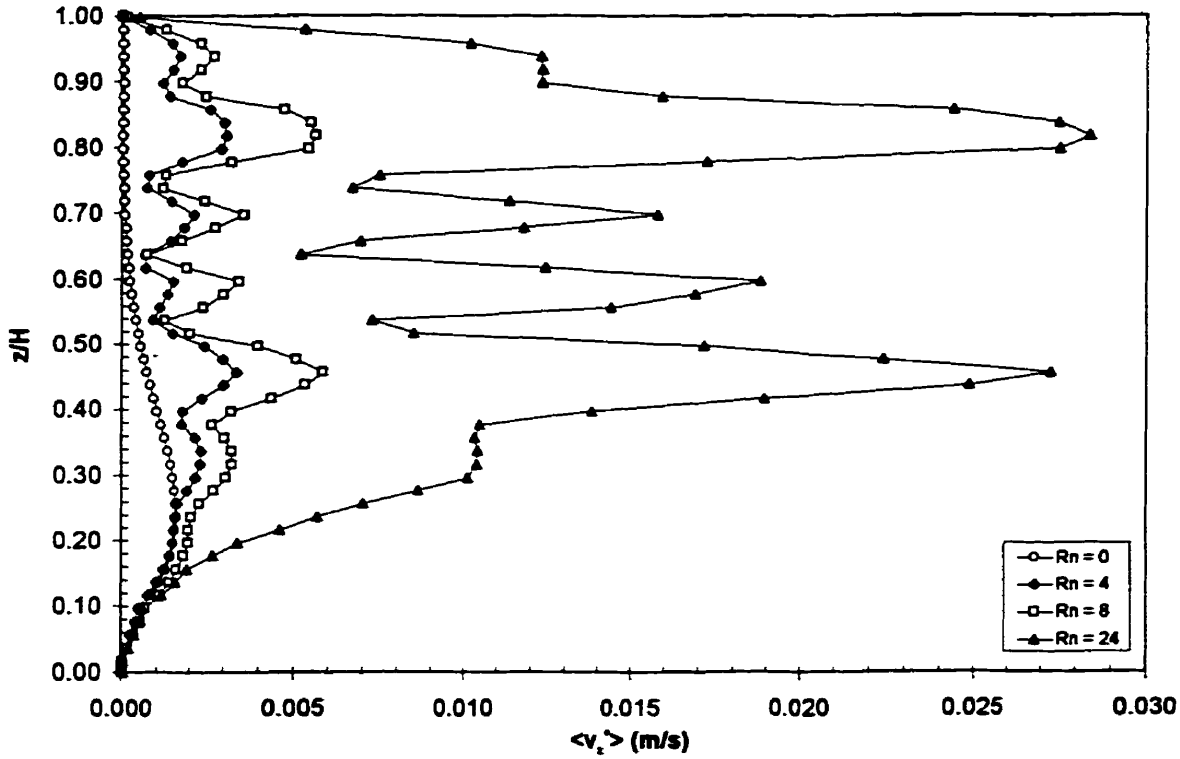


Figure 5.32 Vitesse moyenne de pompage vers le haut pour un fluide rhéofluidifiant ayant un indice de loi de puissance n=0.3 pour différents rapports de vitesse dans le mélangeur coaxial (N_a=4.43 tpm).

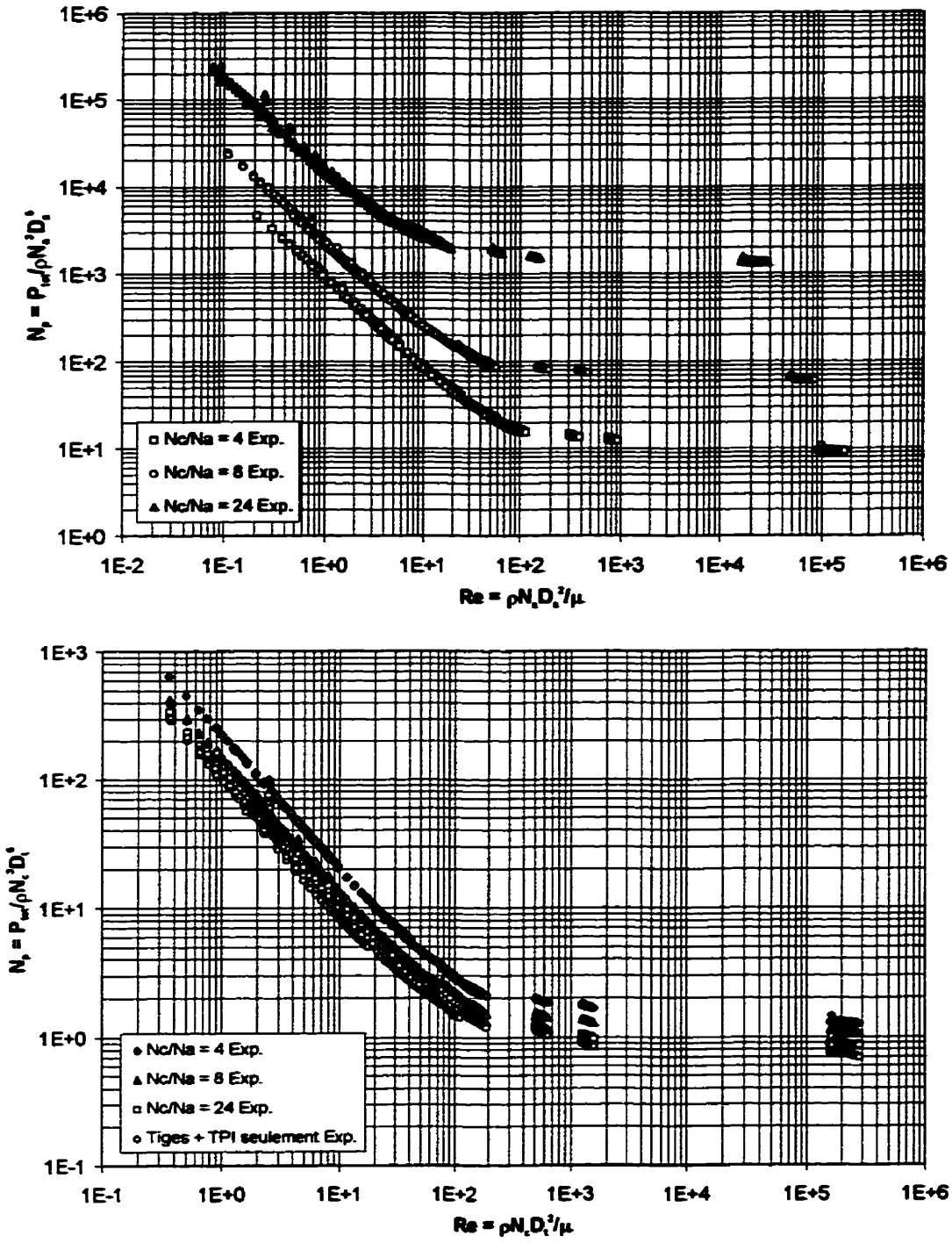


Figure 5.33 Valeurs expérimentales de N_p en fonction de Re pour différents rapports de vitesse R_N - caractérisation du régime d'écoulement turbulent.

Tel que prédite par l'équation [5.4], le nombre de puissance (N_p) est constant en régime turbulent, c'est-à-dire pour une valeur du nombre de Reynolds supérieure à 10^4 environ. Le tableau 5.10 et la figure 5.34 illustrent la variation de $N_{p\ ancre}$ et $N_{p\ tiges}$ en fonction du rapport de vitesses.

Tableau 5.10 Valeurs expérimentales de $N_{p\ ancre}$ et $N_{p\ tiges}$ en fonction du rapport de vitesses pour un régime d'écoulement turbulent.

R_N	$N_{p\ ancre}$	$N_{p\ tiges}$
0	-	-
4	9.3	1.3
8	62	1.1
24	1355	0.9
∞	-	0.74

À l'aide des équations [5.18], on peut montrer qu'il existe la relation suivante entre $N_{p\ ancre}$ et $N_{p\ tiges}$ en régime turbulent d'écoulement :

$$N_{p\ tiges} = N_{p\ ancre} \frac{1}{R_N^3} \frac{1}{R_D^5} \qquad [5.34]$$

Comme on peut le voir au tableau 5.10, nous avons omis de caractériser le nombre de puissance lorsque seule l'ancre est en rotation car cette situation favorisait la formation d'un vortex et l'expulsion du fluide hors de la cuve de mélange. Après lissage des valeurs expérimentales, nous obtenons les relations suivantes :

$$N_{p\ ancre}(R_N) = 0.1936 R_N^{2.7838}, \qquad 4 \le R_N \le 24 \qquad [5.35]$$

$$N_{p\ ancre}(R_N) = \frac{-4.4238}{R_N^2} + \frac{3.3176}{R_N} + 0.74, \qquad 4 \le R_N \le \infty \qquad [5.36]$$

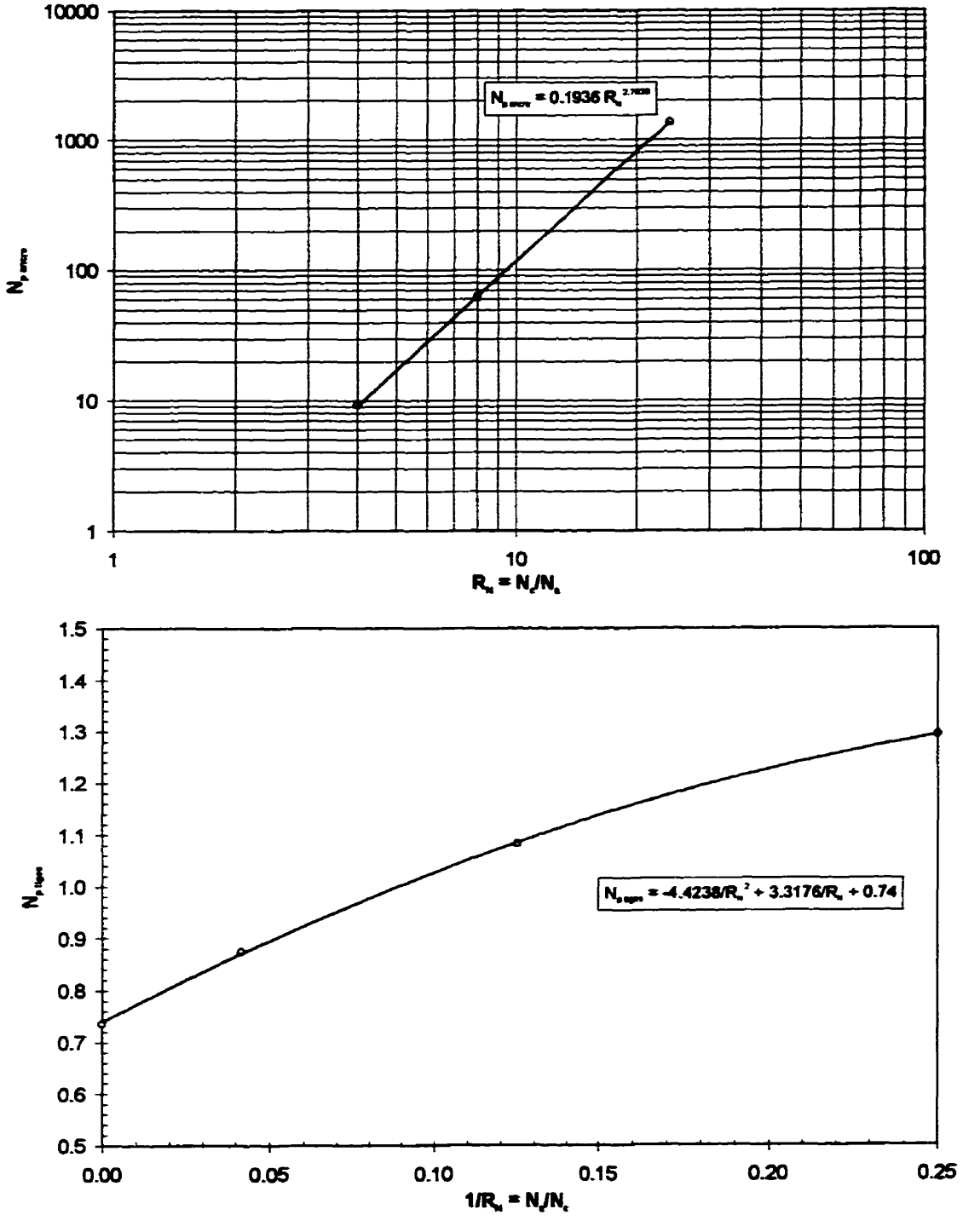


Figure 5.34 Valeurs expérimentales de $N_{p\ encre}$ et $N_{p\ tiges}$ en fonction du rapport de vitesses pour un régime d'écoulement turbulent.

Les équations [5.35] et [5.36] nous permettent donc d'estimer la puissance d'agitation pour différents rapports de vitesse entre les axes lent et rapide dans un régime d'écoulement turbulent.

- CHAPITRE VI -

CARACTÉRISATION DE LA REMISE EN SUSPENSION ET DE LA PRÉPARATION DES SUSPENSIONS CONCENTRÉES

Dans ce chapitre, nous nous proposons de caractériser le mécanisme de remise en suspension à l'intérieur du mélangeur coaxial pour une suspension newtonienne diluée modèle. Dans un deuxième temps, nous discuterons de la capacité de mouillage, de dispersion ainsi que la puissance d'agitation nécessaire lors de la préparation des suspensions concentrées dans le mélangeur coaxial et nous comparerons les résultats obtenus avec les turbines défloculeuses.

1. Caractérisation de la remise en suspension

Dans cette section, nous allons caractériser l'influence des conditions opératoires telles le rapport de vitesse R_N sur la remise en suspension des particules solides initialement déposées au fond du réservoir pour un système modèle. La phase liquide est un sirop de maïs transparent et la phase solide est constituée de billes de verre rouges. Les propriétés physiques de ces deux phases sont présentées au tableau 6.1.

Tableau 6.1 Propriétés physiques des phases liquide et solide de la suspension newtonienne.

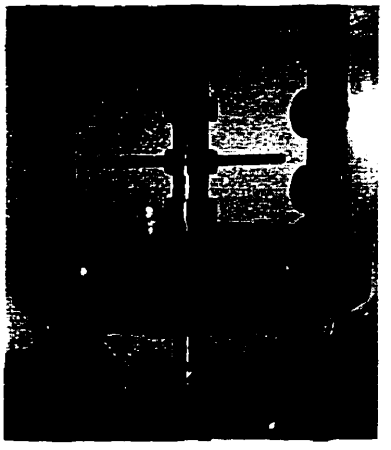
Propriétés physiques	Phase liquide	Phase solide
Masse volumique, ρ (kg/m^3)	1360	2500
Viscosité, μ (Pa-s)	1	-
Diamètre des particules, D_p (m)	-	$1x10^{-3}$
Fraction volumique maximale, ϕ_m (-)	-	0,60

Comme nous le verrons dans la deuxième section de ce chapitre, la viscosité du fluide suspendant (phase liquide) a été choisie de façon à reproduire approximativement la viscosité d'une suspension concentrée de pigments de kaolin. De plus, la masse volumique des billes de verre est approximativement égale à celle de l'argile, c'est-à-dire 2600 kg/m^3 (Hagemayer, 1997). Par contre, le diamètre des billes de verre est de beaucoup supérieure à celle des particules de kaolin, favorisant par le fait même une vitesse de sédimentation plus élevée. Par comparaison, la vitesse de sédimentation d'une bille de verre est environ 10^6 fois plus élevée qu'une particule de kaolin pour un même fluide suspendant.

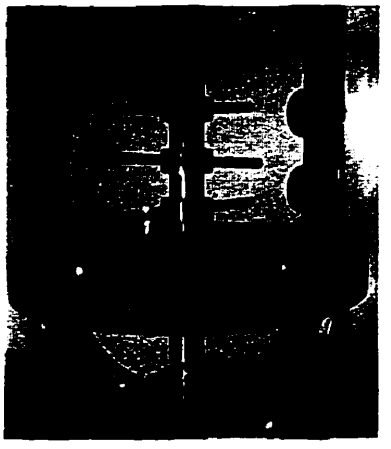
Afin de caractériser l'influence de l'ancre, des tiges de mélange et la TPI sur le mécanisme de remise en suspension des particules, nous avons fixé la vitesse des tiges de mélange et la TPI à 160 tpm et fait varier le rapport de vitesse R_N de 4 à 24. La vitesse des tiges de mélange et la TPI est gardée constante à 160 tpm car elle correspond à la vitesse minimale nécessaire pour garantir un mouillage adéquat des pigments de kaolin comme nous le verrons à la section suivante. De plus, nous avons étudié la remise en suspension pour les deux situations suivantes : a) seule l'ancre est en mouvement et sa vitesse de rotation est de 40 tpm et b) les tiges de mélange et la TPI sont en rotation à vitesse de 160 tpm.

Les prochaines pages présentent la distribution des particules dans le réservoir en fonction du temps pour chacune des conditions opératoires étudiées.

a)



b)



c)

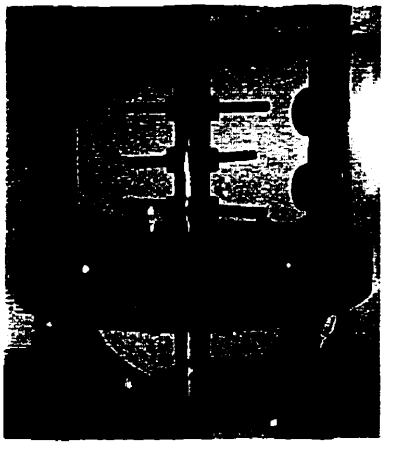


Figure 6.1 Évolution de la distribution des billes de verre rouges en fonction du temps [a) 120 s, b) 300 s et c) à l'équilibre] lorsque seules les tiges de mélange et la TPI sont en mouvement et possèdent une vitesse de 160 tpm.

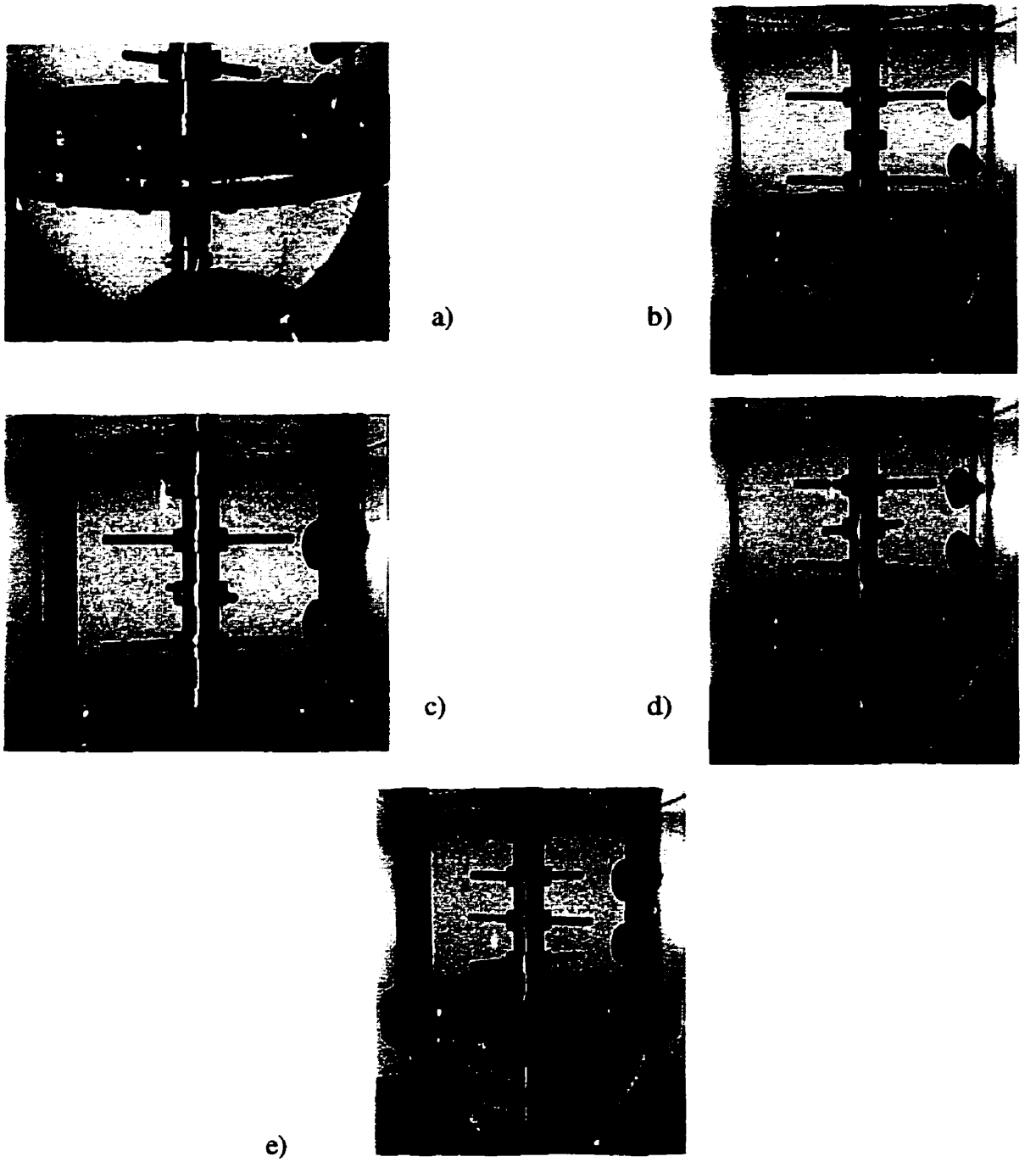


Figure 6.2 Évolution de la distribution des billes de verre rouges en fonction du temps [a) 82 s, b) 237 s, c) 470 s, d) 639 s, e) 974 s et f) à l'équilibre] pour une vitesse des tiges de mélange et la TPI de 160 tpm et un rapport de vitesse R_N égale à 24.

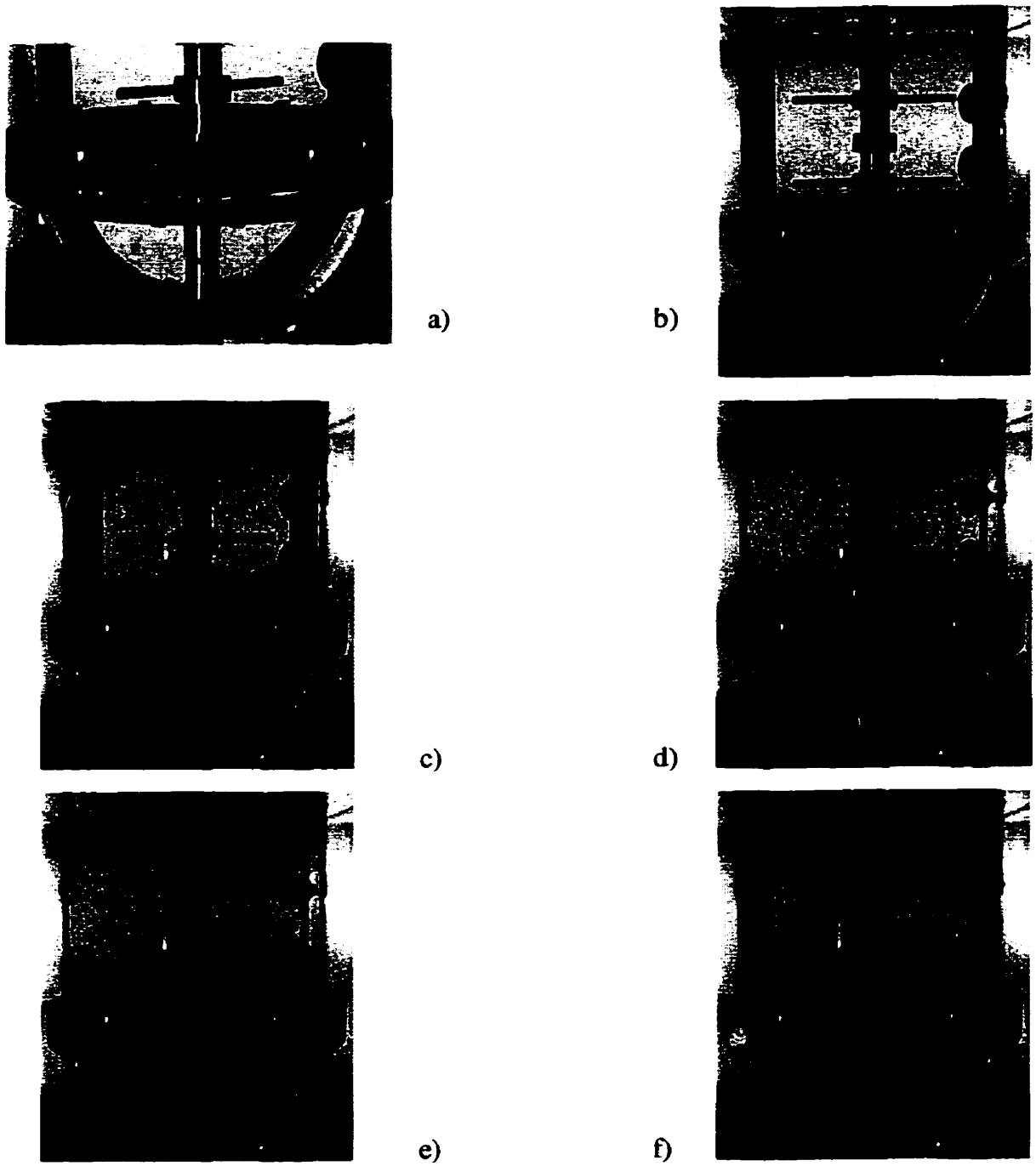


Figure 6.3 Évolution de la distribution des billes de verre rouges en fonction du temps [a) 82 s, b) 237 s, c) 470 s, d) 639 s, e) 974 s et f) à l'équilibre] pour une vitesse des tiges de mélange et la TPI de 160 tpm et un rapport de vitesse R_N égale à 8.

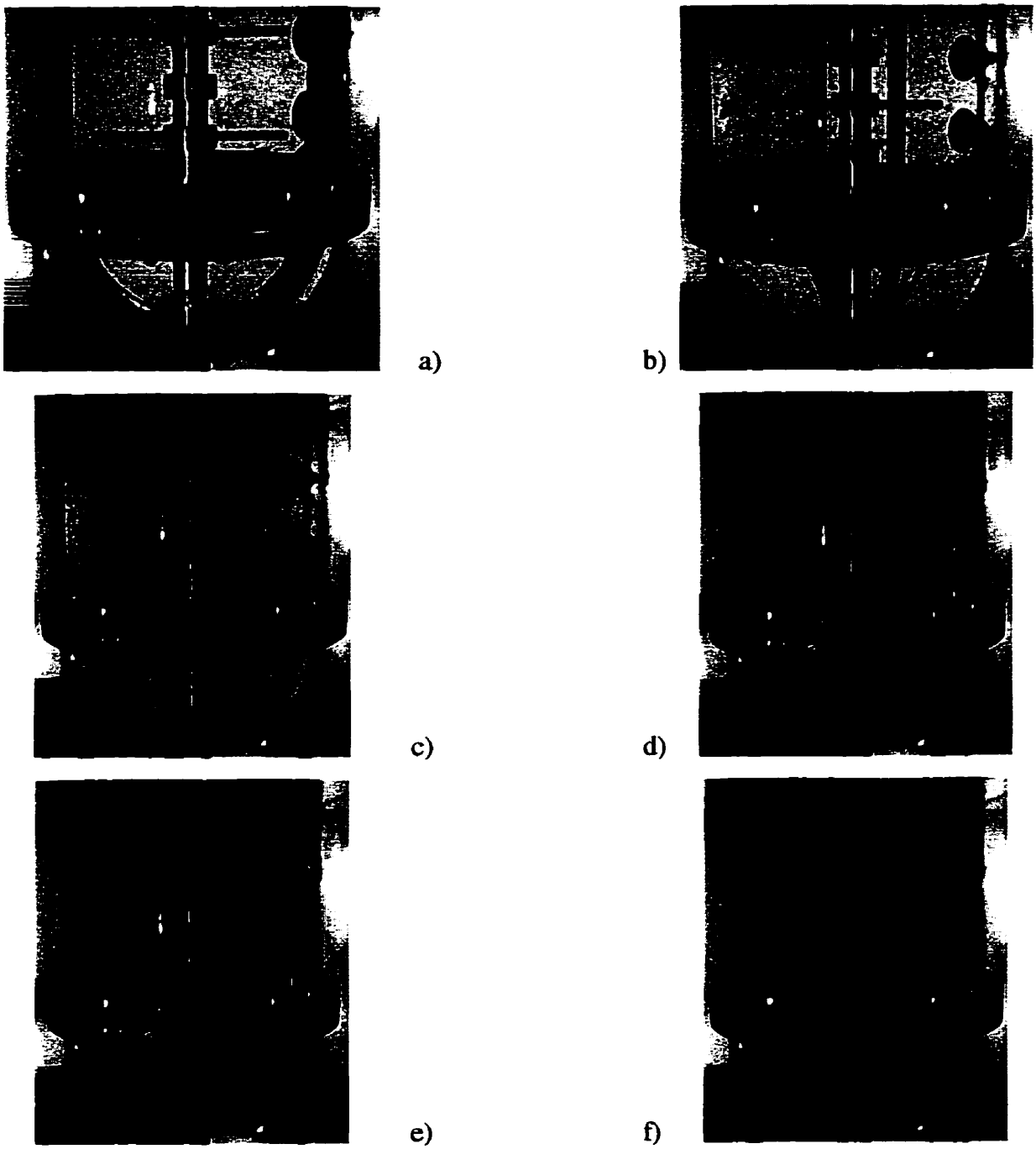


Figure 6.4 Évolution de la distribution des billes de verre rouges en fonction du temps [a) 20 s, b) 30 s, c) 72 s, d) 190 s, e) 180 s et f) à l'équilibre] pour une vitesse des tiges de mélange et la TPI de 160 tpm et un rapport de vitesse R_N égale à 4.

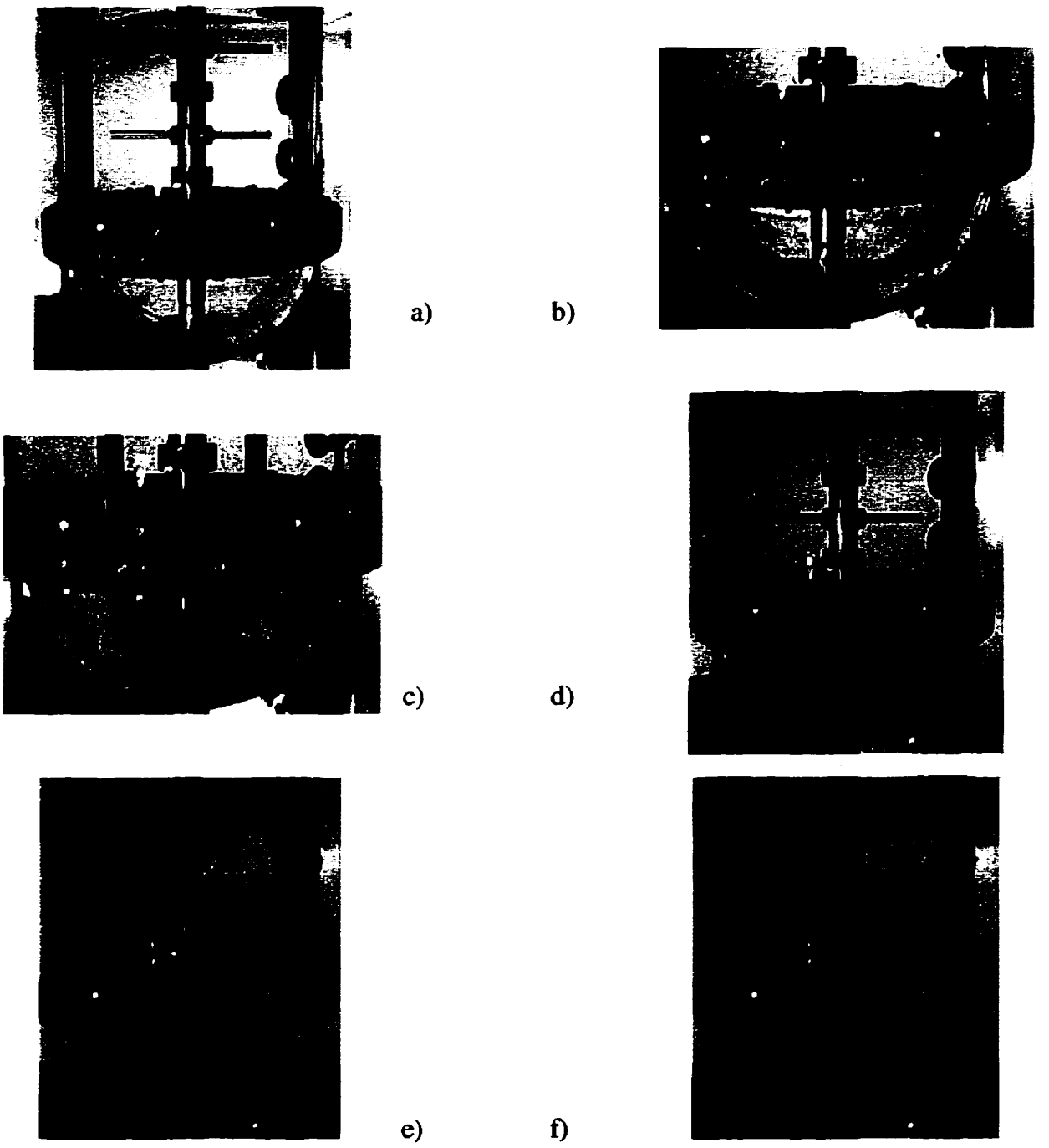


Figure 6.5 Évolution de la distribution des billes de verre rouges en fonction du temps [a) 28 s, b) 39 s, c) 54 s, d) 77 s, e) 180 s et f) à l'équilibre] lorsque seule l'ancre est en mouvement et possède une vitesse de 40 tpm.

Premièrement, on constate à la figure 6.1 que la rotation des tiges de mélange et la TPI seulement ne suffisent pas à remettre les particules solides en suspension. Mentionnons qu'au démarrage, seule la TPI peut agir sur les particules solides déposées au fond du réservoir en raison de son pompage axial vers le bas. Cette absence de remise en suspension était prévisible car si on estime la vitesse d'agitation minimale pour la suspension complète des particules solides (N_{js}) à partir des récents travaux de Armenante et Nagamine (1998), on trouve, pour une turbine à 6 pales inclinées, une valeur de N_{js} d'environ 600 tpm, ce qui est environ 4 fois supérieure à la vitesse de rotation étudiée. Il est par contre audacieux d'utiliser les corrélations développées par ces auteurs car la viscosité du fluide suspendant est supérieure à 0.1 Pa-s (Ibrahim et Nienow, 1994), ce qui peut engendrer un pourcentage d'erreur important pour la prédiction de N_{js}. Cependant, cette valeur de N_{js} nous donne un ordre de grandeur de la vitesse de rotation nécessaire afin de remettre les particules solides en suspension. De plus, puisque nous utilisons une turbine à 2 pales inclinées et que l'ancre agit comme un obstacle et freine le mouvement des particules au fond du réservoir, la valeur de N_{js} pour cette situation bien précise serait sûrement plus élevée que 600 tpm. Ceci explique l'absence de particules solides dans l'ensemble du réservoir.

Les figures 6.2 à 6.4 présentent l'influence du rapport de vitesse R_N sur le mécanisme de remise en suspension des particules solides. Plus précisément, puisque la vitesse des tiges de mélange et la TPI est constante et égale à 160 tpm, l'augmentation du rapport de vitesse R_N nous permet de caractériser l'influence de la vitesse de l'ancre sur le mécanisme de remise en suspension des particules solides. Par exemple, pour le rapport de vitesse égal à 24, un faible pourcentage des particules solides se retrouvent dans la partie supérieure de la cuve de mélange (figure 6.2). Par contre, pour le rapport de vitesse égal à 4, on note une remise en suspension complète des particules solides (figure 6.5). Cette remise en suspension est attribuable à la rotation de l'ancre dans le fond du réservoir. En effet, lorsque la vitesse de l'ancre devient assez importante, les particules solides sont entraînées par la dépression située

derrière l'ancre et grimpent le long de cet agitateur (figure 6.4 a). Lorsque les particules atteignent le début de la partie cylindrique du réservoir, les particules solides se détachent de l'ancre et sont projetées dans l'ensemble du réservoir (figure 6.4 b et c). Il devient alors facile pour les tiges de mélange et la TPI de bien répartir ces particules dans la partie supérieure du mélangeur. Ceci signifie que lorsque la vitesse des agitateurs dans la partie centrale est fixée, plus la vitesse de l'ancre est élevée, plus importante sera la remise en suspension des particules solides dans l'ensemble du réservoir.

La figure 6.5 illustre l'influence de l'ancre seulement sur la remise en suspension des particules solides. On note que l'ancre permet de remettre la totalité des particules solides en suspension sans toutefois leur permettre d'atteindre la partie supérieure de la cuve de mélange. En effet, comme l'illustre la figure 5.20, la vitesse de pompage axial vers le haut dans la partie supérieure du mélangeur lorsque seule l'ancre est en rotation est très faible voire même inexistante, ce qui explique qu'aucune particule n'a pu atteindre cette région du mélangeur.

Finalement, on constate que le mélangeur coaxial à double mouvement est très approprié pour la remise en suspension des particules solides à des faibles vitesses de rotation. La question qui se pose est la suivante : d'un point de vue énergétique, est-il plus avantageux d'utiliser un système d'agitation simple possédant une seule turbine à pales inclinées tournant à 600 tpm ou bien d'employer un mélangeur coaxial possédant une vitesse de rotation des tiges de mélange et la TPI de 160 tpm et un rapport de vitesse R_N égal à 4. Toujours à partir des travaux de Armenante et Nagamine (1998), nous avons déterminé le nombre de puissance d'une turbine à pales inclinées et évalué la puissance nécessaire à la remise en suspension des particules solides à 1120 W. En ce qui concerne le mélangeur coaxial, il est facile d'estimer la puissance nécessaire à partir du graphe de la figure 5.33; on trouve alors une puissance d'agitation d'environ 40 W, en faisant l'hypothèse que la phase solide n'influence pas la puissance d'agitation, qui est valide pour une concentration volumique de 1%. On constate

donc qu'avec 30 fois moins de puissance, on est en mesure d'obtenir une remise en suspension complète des particules solides. Bien que l'investissement initial pour la fabrication d'un mélangeur coaxial soit beaucoup plus élevé qu'un système d'agitation simple tel une turbine à pales inclinées, sa faible consommation énergétique permettra d'obtenir un retour sur l'investissement d'une courte durée.

2. Préparation de suspensions concentrées de pigments

Dans cette section, nous allons discuter de la faisabilité de la préparation des sauces de couchage du papier à partir du mélangeur coaxial proposé dans ce travail. Dans un but de comparaison, des suspensions de kaolin ont été préparées en parallèle avec un système d'agitation possédant une turbine défloculeuse (ou disperseur) (figure 3.5). Ce système d'agitation a été sélectionné car il est souvent utilisé dans l'industrie.

Rappelons que la problématique majeure lors de la préparation des suspensions concentrées de kaolin se situe au niveau du mouillage de la poudre. En effet, puisque les particules de kaolin sont hydrophobes, ces dernières ont tendance à s'agglomérer lorsque déposées sur la surface libre de la suspension. Il devient alors difficile de briser ces agglomérats afin de permettre à l'eau de mouiller chacune des particules. Une fois le mouillage terminé, le mélangeur doit être en mesure de favoriser une bonne désagrégation des agglomérats grâce aux forces de cisaillement (mélange dispersif), c'est-à-dire de réduire la taille de ces agglomérats et, finalement, de permettre une bonne distribution de ces agglomérats au sein du mélangeur (mélange distributif).

Quelques essais préliminaires nous ont permis de constater que la vitesse de tiges du mélangeur coaxial était un facteur important sur la capacité de mouillage des pigments déposés en surface du réservoir. Puisque nous avons comme objectif de mouiller à basse

vitesse et à faible consommation énergétique, nous nous sommes aperçus que la vitesse minimale des tiges de mélange permettant de bien mouiller les pigments était d'environ 160 tpm. Lorsque nous avons essayé de mouiller les pigments avec un rapport de vitesse R_N égale à 24, nous avons observé une accumulation de poudre sur les parois du réservoir et sur l'ancre causée par sa faible vitesse de rotation. De plus, tel que mentionné à la section précédente, pour une vitesse de tiges fixée, le rapport de vitesse R_N égale à 24 ne favorise pas la remise en suspension des particules situées au fond de la réservoir. Pour toutes ces raisons, nous n'avons pas considéré ce rapport de vitesse pour la préparation de la suspension de pigments et la sauce de couchage.

La discussion des résultats sera articulée en quatre sections, c'est-à-dire la capacité de mouillage, de dispersion, la machinabilité et finalement la consommation énergétique des suspensions de pigments et des sauces de couchage.

2.1 Capacité de mouillage

Rappelons que la suspension de kaolin est composé de kaolin délaminé et calciné dans une proportion de 90% et 10% respectivement et possède une concentration massique en pigments de 68%. De plus, la suspension contient un dispersant anionique (dispex N40) dans une proportion de 0.15 kg par 100 kg de pigments.

Le tableau 6.2 résume les conditions opératoires utilisées lors du mouillage des pigments de kaolin.

Tableau 6.2 Conditions opératoires utilisées lors du mouillage des pigments de kaolin pour le mélangeur coaxial et le disperseur.

Essai	Mélangeur coaxial		Disperseur
	R_N (-)	N_{pales} (tpm)	N (tpm)
1	4	160	nd[†]
2	8	200	700
3	8	200	625[††]
4	8	200	700

[†]non-disponible; [††]diamètre de la turbine égale à 17 cm.

Les figures 6.6 à 6.9 présentent l'évolution du couple (C) et de la puissance par unité de volume (P/V) lors du mouillage des pigments de kaolin pour les deux systèmes d'agitation étudiés. De façon générale, et cela pour ces deux systèmes d'agitation, on note une légère augmentation du couple et du rapport P/V au début de l'incorporation des pigments, signifiant que le mouillage du kaolin s'effectue facilement. Ceci s'explique par la faible concentration massique de pigments au début de l'incorporation et une plus grande disponibilité du solvant (eau) à mouiller les particules de kaolin. Par contre, à la fin de l'incorporation, on observe un fort accroissement du couple et du rapport P/V causé par une augmentation de la viscosité de la suspension et l'apparition d'un comportement rhéoépaississant (figure 6.10) d'une part, et la formation d'agglomérats de pigments en surface du réservoir favorisant une augmentation locale de la viscosité. La formation de ces agglomérats est causé par la difficulté à mouiller les dernières traces de pigments car la suspension possède un encombrement stérique en particules très élevé.

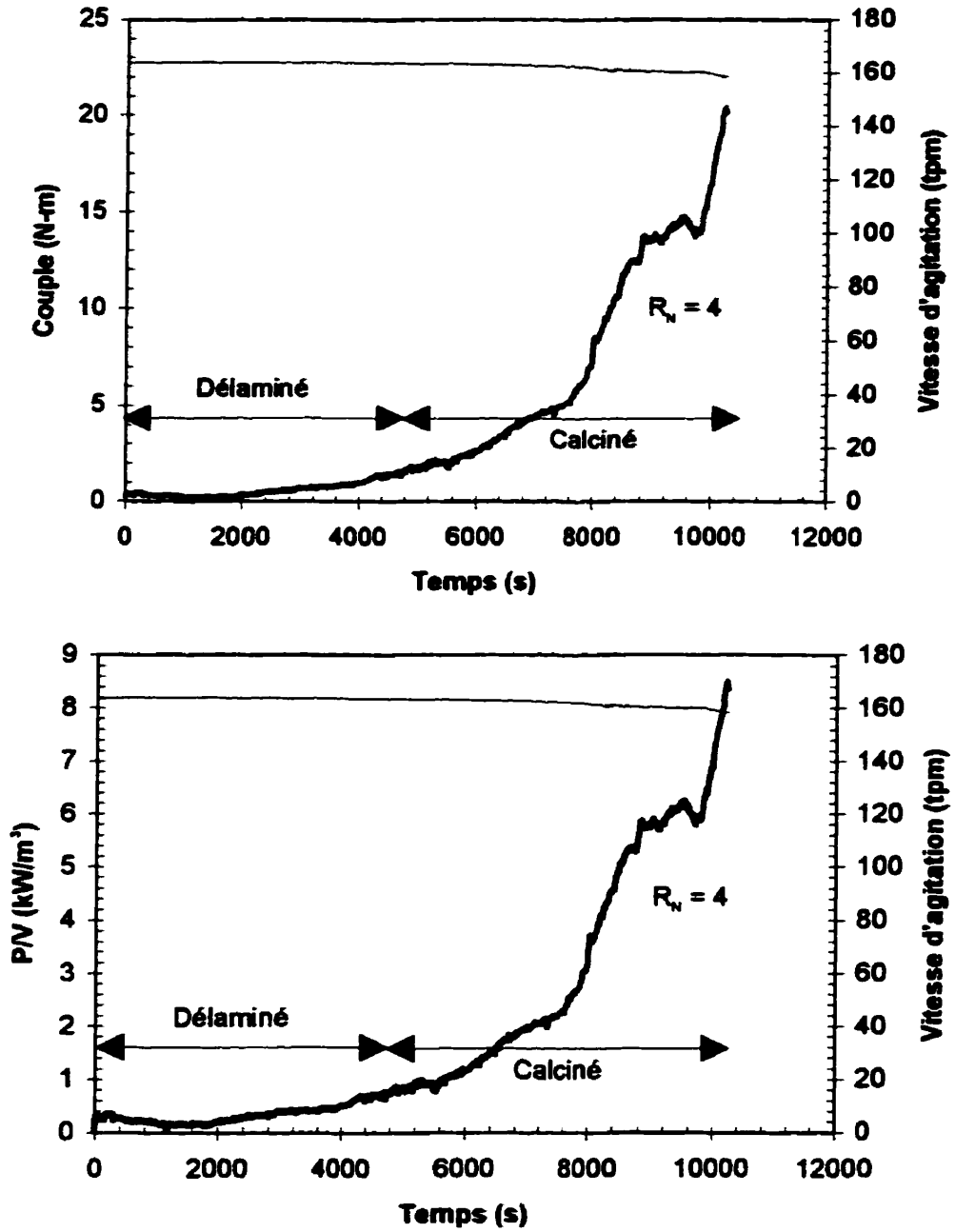


Figure 6.6 Évolution du couple et du rapport P/V en fonction du temps pendant l'étape du mouillage des pigments (mélangeur coaxial - essai 1).

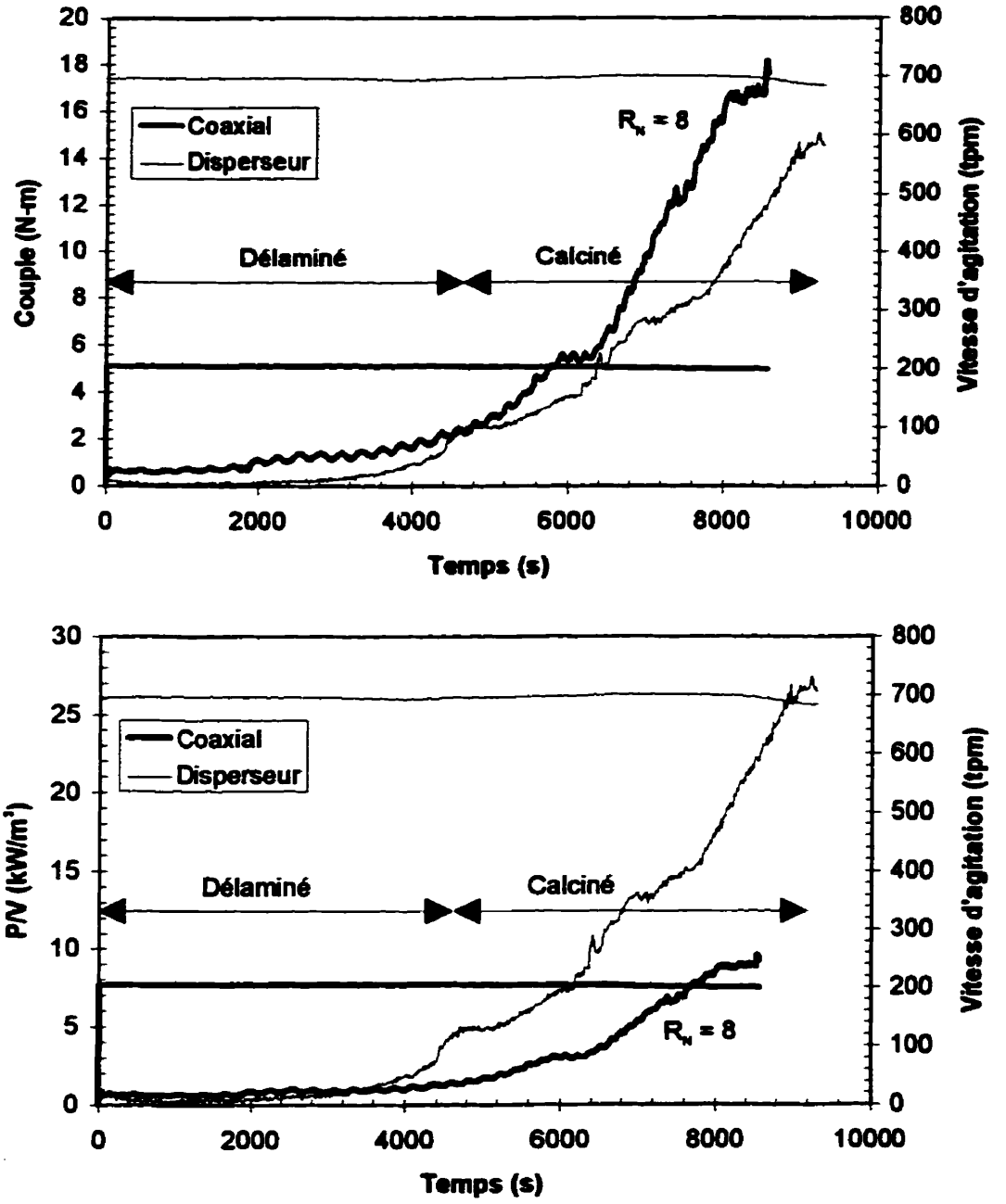


Figure 6.7 Évolution du couple et du rapport P/V en fonction du temps pendant l'étape du mouillage des pigments (mélangeur coaxial et disperseur - essai 2).

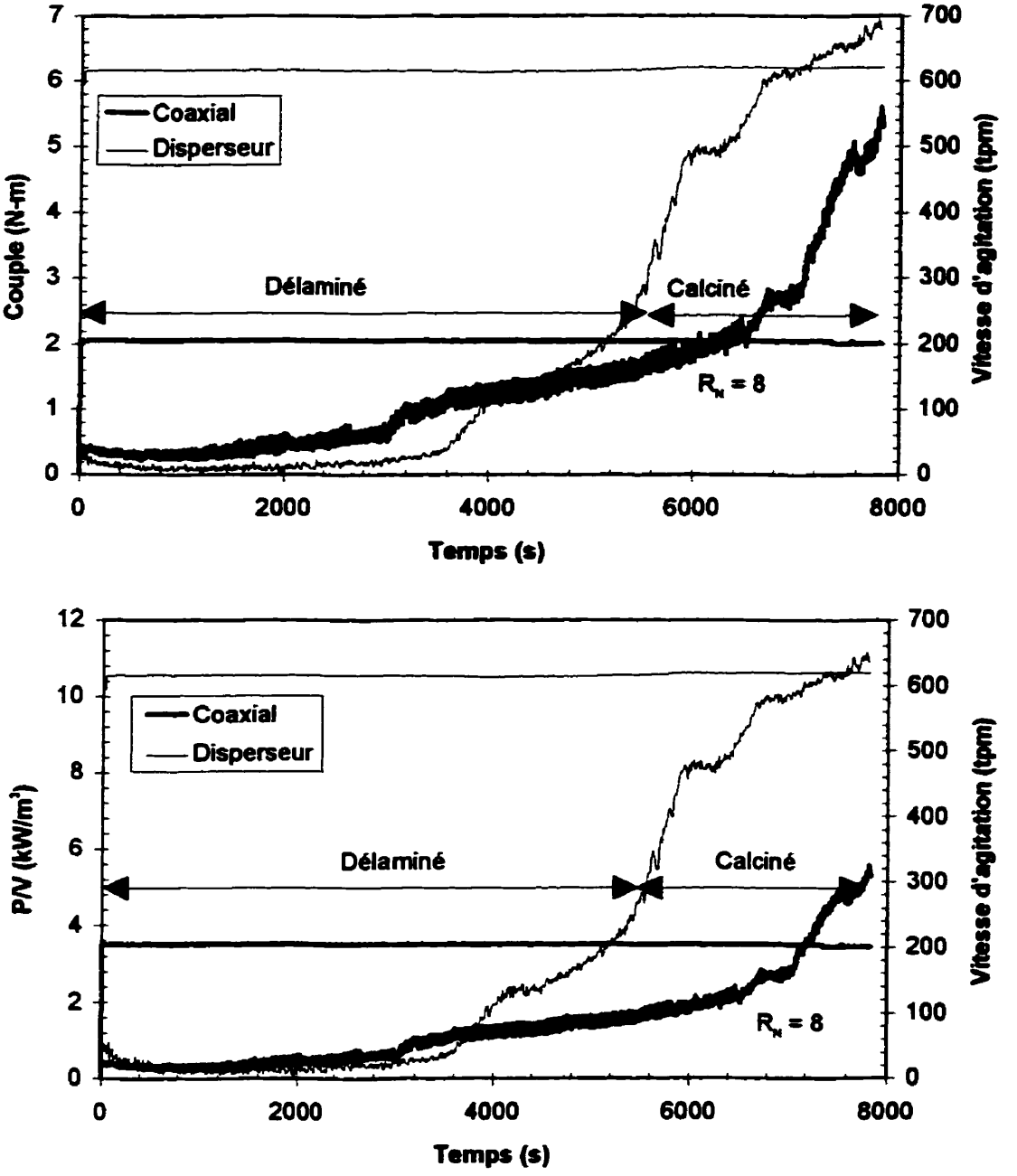


Figure 6.8 Évolution du couple et du rapport P/V en fonction du temps pendant l'étape du mouillage des pigments (mélangeur coaxial et disperseur - essai 3).

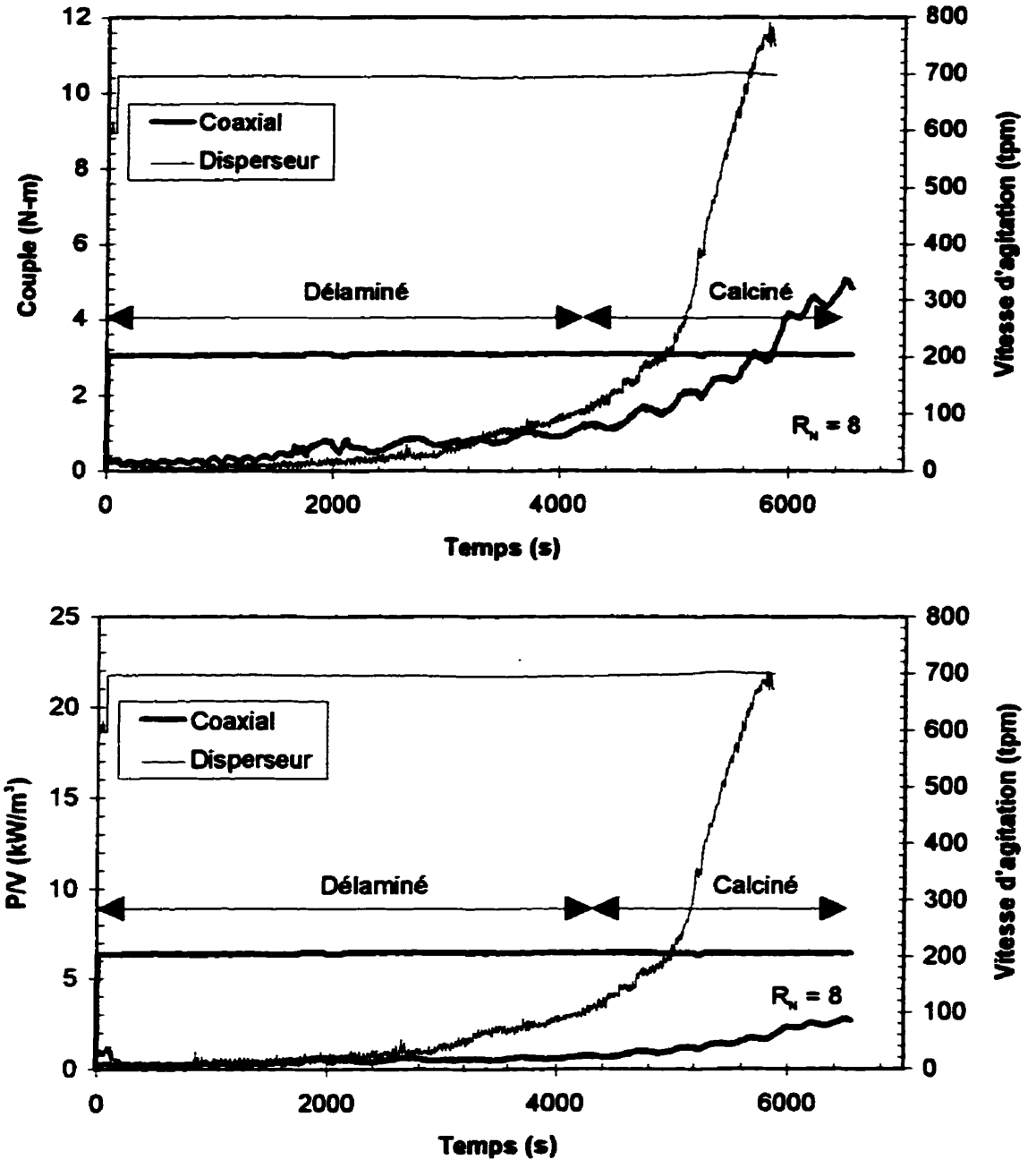


Figure 6.9 Évolution du couple et du rapport P/V en fonction du temps pendant l'étape du mouillage des pigments (mélangeur coaxial et disperseur - essai 4).

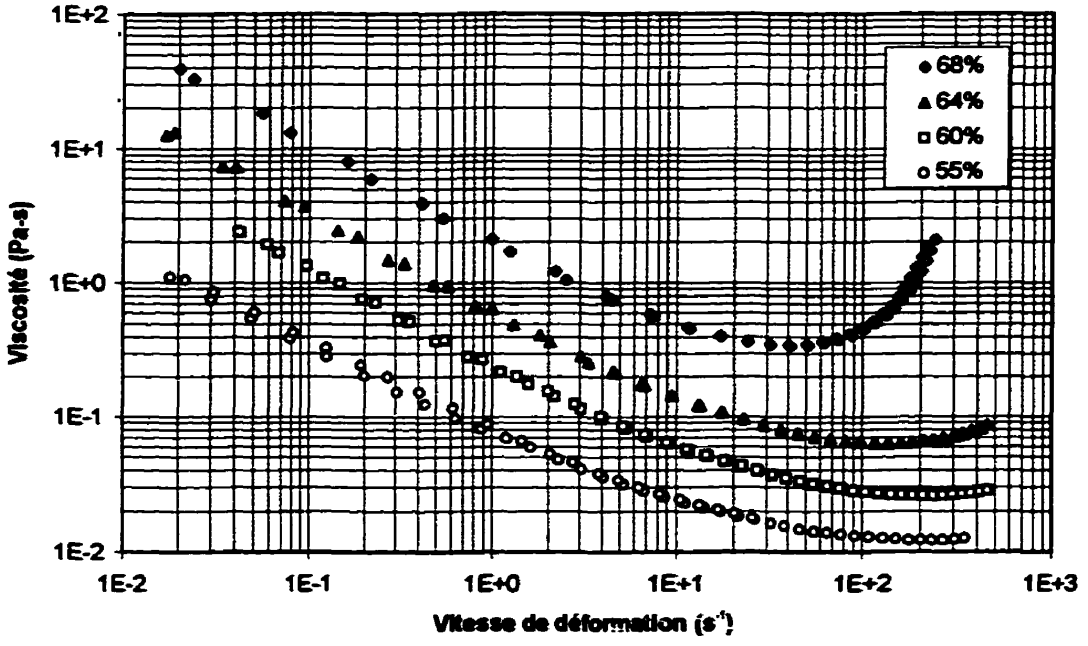


Figure 6.10 Comportement rhéologique typique d'une suspension de kaolin en fonction de la concentration massique (90% de kaolin délaminé et 10% de kaolin calciné).

Le tableau 6.3 compare l'énergie de mouillage[1] (E_m) qui représente l'aire sous la courbe de la puissance en fonction du temps, le couple maximal (C_{max}) atteint pendant l'étape du mouillage, le rapport puissance par unité de volume maximal (P/V_{max}) ainsi que la cinétique d'alimentation du kaolin délaminé (Q_{kd}) et calciné (Q_{kc}) pour chacun des essais. Il est difficile de comparer les deux systèmes d'agitation car il a été impossible de conserver constante la cinétique d'alimentation lors de chacun des essais sachant très bien que cette cinétique influence grandement les résultats obtenus. Cependant, nous pouvons faire les remarques suivantes :

- les couples maximaux atteints par le mélangeur coaxial pour les essais 2 et 4 sont sensiblement les mêmes que ceux obtenus par le disperseur. Par contre, l'essai 3 montre que

[1]. L'énergie de mouillage, expression utilisée dans l'industrie papetière, est un abus de language. Il comprend la consommation énergétique pour le mouillage des pigments de kaolin, la dissipation visqueuse au sein de la suspension et l'augmentation du volume de la suspension lors de l'incorporation.

Tableau 6.3 Résulats comparatifs entre le mélangeur coaxial et le disperseur pour l'étape du mouillage des pigments de kaolin.

Essai	Mélangeur coaxial					Disperseur				
	Q_{kd} (g/s)	Q_{kc} (g/s)	E_m (kJ kg)	C_{max} (N-m)	P/V_{max} (kW/m^3)	Q_{kd} (g/s)	Q_{kc} (g/s)	E_m (kJ kg)	C_{max} (N-m)	P/V_{max} (kW/m^3)
1	7.65	0.96	16.5	20.4	8.5	-	-	-	-	-
2	9.19	1.12	21.1	18.2	9.6	9.83	0.88	56.8	15.1	27.4
3	7.41	1.97	5.5	5.6	3.0	9.97	1.23	23.0	7.0	11.2
4	9.73	1.97	6.9	5.1	2.8	9.97	2.56	17.2	12.5	21.6

le couple maximal atteint par le disperseur est 2.5 fois plus élevé que celui atteint par le mélangeur coaxial. Ceci est essentiellement causé par un débit d'incorporation plus élevé de kaolin calciné (disperseur : 2.56 g/s et mélangeur coaxial : 1.97 g/s).

- on observe que l'énergie de mouillage pour le mélangeur coaxial est de beaucoup inférieure au disperseur. En effet, l'énergie de mouillage est d'environ 2.5 à 4.2 fois inférieure pour le mélangeur coaxial, ce qui nous permet de mouiller à faible coût énergétique, rendant par le fait même cette technologie forte intéressante. De la même façon, la puissance d'agitation par unité de volume suit la même tendance.

- on constate que l'énergie de mouillage entre les deux premiers et les deux derniers essais donnent des résultats très différents. Nous savons que le kaolin délaminé des essais 1 et 2 ne provient pas du même lot de préparation que les essais 3 et 4 bien qu'il s'agisse du même type de kaolin de la compagnie ECC International (USA). Lors des essais, nous avons de plus remarqué que les pigments des essais 3 et 4 collaient d'avantage aux parois du tamis vibrant, signifiant que ce kaolin possédait une humidité résiduel plus importante. Après vérification, nous nous sommes aperçus que le kaolin des essais 1-2 et 3-4 possédait une humidité de 0.5%

et 1% respectivement. Le pourcentage d'humidité initial a donc une influence significative sur la capacité de mouillage des pigments de kaolin. Par conséquent, plus le kaolin possède une humidité résiduel importante, plus facile sera l'étape du mouillage.

Ces résultats sont très intéressants car le disperseur que nous avons utilisé possède une vitesse périphérique de l'ordre de 5,5 m/s pendant l'étape du mouillage alors que la vitesse périphérique utilisée dans l'industrie varie de 20 à 40 m/s. Le mélangeur coaxial a donc la possibilité de mouiller les particules de kaolin à basse vitesse et à faible consommation énergétique alors qu'une partie importante de la consommation énergétique de la technologie du disperseur est utilisée afin de favoriser la formation d'un vortex permettant d'entraîner les pigments au sein de la turbine.

2.2 Capacité de dispersion

a) Mélange distributif

Pendant l'étape du mouillage, nous devons nous assurer que le mélangeur coaxial favorise le mélange distributif, c'est-à-dire qu'il soit en mesure de bien répartir les particules de kaolin dans l'ensemble du réservoir afin d'obtenir une concentration uniforme. Pour ce faire, une fois l'incorporation terminée, nous avons soutiré trois échantillons de la suspension concentrée à la surface libre du réservoir et mesuré le pourcentage de matière solide qu'ils contenaient par dessiccation/séchage forcé (1 jour) dans un four maintenu à 120°C (tableau 6.4). Comme on peut le constater, le pourcentage de matière solide mesuré est très près de la valeur théorique de 68%, ce qui signifie que le mélangeur coaxial et le disperseur permettent d'obtenir une concentration homogène à la surface libre du réservoir. Ce test nous semble très strict car la partie supérieure du réservoir est généralement une région possédant

Tableau 6.4 Mesures de la concentrati - massique de la suspension concentrée de kaolin à la fin de l'étape du mouillage pour le mélangeur coaxial et le disperseur.

Essai	Mélangeur coaxial	Disperseur
1	67.9, 67.9, 67.9%	-
2	67.9, 67.9, 67.9%	67.9, 67.8, 67.8%
3	67.6, 67.6, 67.6%	67.5, 67.5%
4	67.7, 67.7, 67.7%	67.7, 67.5, 67.9%

un faible pompage axial et une concentration en matière solide généralement inférieure à la concentration massique moyenne. Par conséquent, tout porte à croire que la concentration massique dans le reste du réservoir est sensiblement la même valeur et que le mélangeur coaxial, tout comme le disperseur, permet d'obtenir un bon mélange distributif à l'étape du mouillage.

b) Mélange dispersif

Afin d'évaluer le mélange dispersif, nous avons mesuré le rhéologie de la suspension concentrée de kaolin à la fin de l'étape du mouillage. La figure 6.11 présente la rhéologie des suspensions de kaolin obtenue pour les deux systèmes d'agitation. Nous présentons la rhéologie des essais 1-2 et 3-4 sur des graphes différents car le kaolin des essais 1-2 et 3-4 ne provient pas du même lot de préparation. On note, pour les essais 1 et 2, que la viscosité des suspensions obtenue à l'aide du mélangeur coaxial est supérieure à celle obtenue à partir du disperseur, signifiant que le mélangeur coaxial permet une moins bonne dispersion ou réduction de taille des agglomérats de kaolin à la fin de l'étape du mouillage. De plus, on remarque que la rhéologie de la suspension, obtenue à l'aide du disperseur, possède un caractère plus rhéofluidifiant et le rhéoépaississement apparaît à une vitesse de déformation plus élevée. On retrouve essentiellement les mêmes tendances pour les essais 3 et 4. Cependant, on observe un écart moins important entre le mélangeur coaxial et le disperseur,

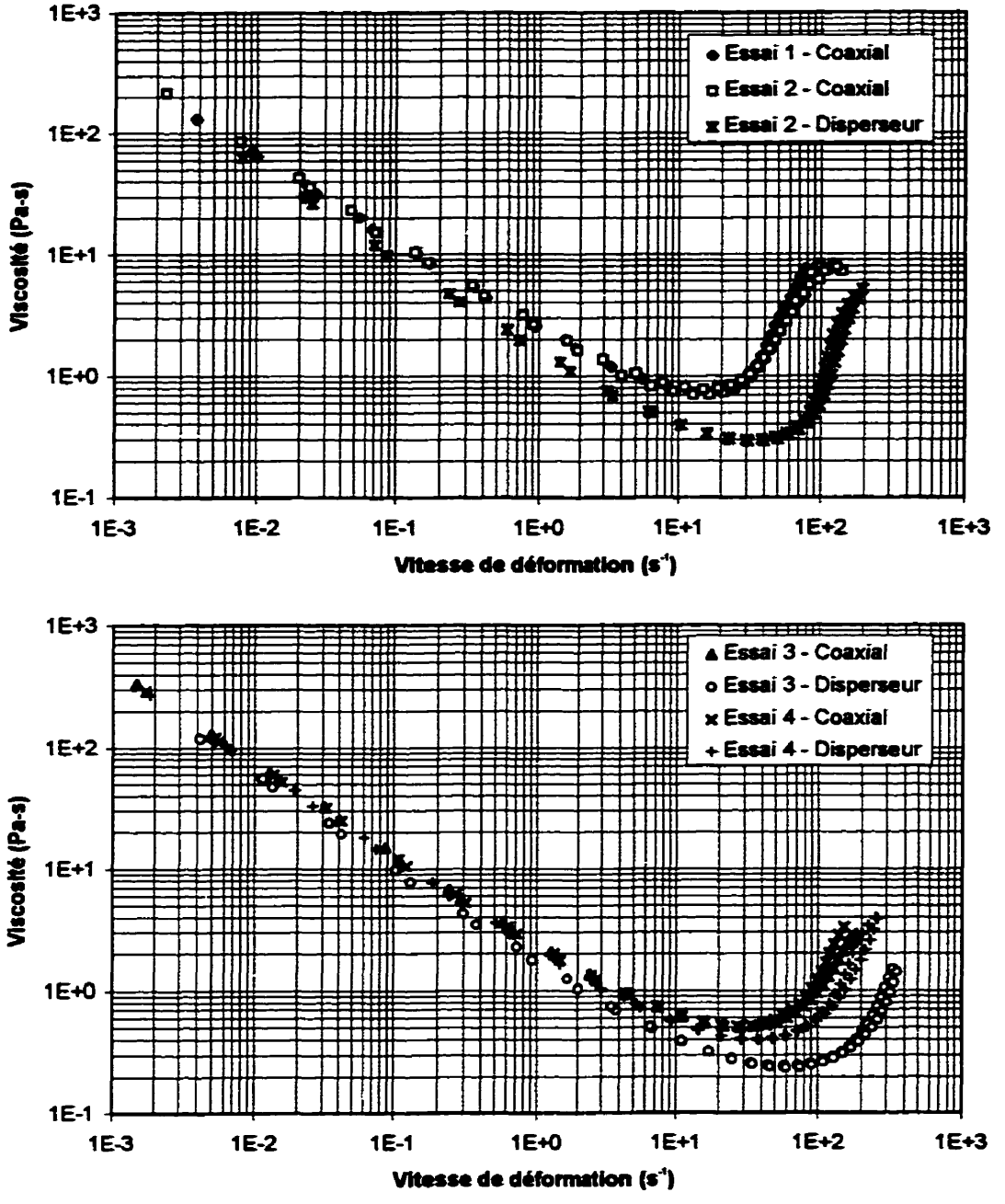


Figure 6.11 Rhéologie de la suspension concentrée de kaolin à la fin de l'étape du mouillage pour le mélangeur coaxial et le disperseur pour les essais a) 1 et 2 et b) 3 et 4.

exception faite de l'essai 3. De plus, pour les essais 3 et 4, le caractère rhéoépaississant apparaît pour une vitesse de cisaillement plus élevée, et cela pour les deux systèmes d'agitation par comparaison aux essais 1 et 2, signifiant que la taille des agglomérats atteinte à la fin de l'étape du mouillage est probablement inférieure.

Ces premiers résultats rhéologiques semblent indiquer qu'il y a un compromis entre l'énergie mécanique induite au sein de la suspension lors de la période de mouillage et la réduction de la taille des agglomérats ainsi obtenus. En effet, puisque le disperseur consomme beaucoup plus d'énergie que le mélangeur coaxial, il en résulte un meilleur mélange dispersif. Cependant, pour les essais 3 et 4, bien que peu d'énergie ait été dissipée au sein de la suspension, on s'aperçoit que la viscosité de la suspension pour des vitesses de déformation élevées est de beaucoup inférieure à celle obtenue pour les essais 1 et 2. À notre avis, cette différence de comportement rhéologique peut être attribuable à deux facteurs, à savoir la valeur initiale du pourcentage d'humidité résiduelle de la poudre de kaolin ou encore que le kaolin des essais 1-2 et 3-4 ait subi une pré-dispersion différente avant d'être ensaché.

Afin d'évaluer la qualité du mélange dispersif post-mouillage, nous avons soumis la suspension concentrée de kaolin à une agitation constante pendant une heure tout en soutirant des échantillons à intervalle régulier afin de mesurer l'évolution rhéologique. Le tableau 6.5 montre les conditions opératoires utilisées pendant la période post-mouillage. La figure 6.12 illustre l'évolution du couple en fonction du temps pour le mélangeur coaxial seulement car le disperseur n'a montré aucune variation significative du couple lors de cette étape de mélange post-mouillage. Finalement, les figures 6.13 et 6.14 illustrent l'évolution de la rhéologie dans le temps pour chacun des essais pour le mélangeur coaxial et le disperseur.

Concernant le mélangeur coaxial, on note, pour les essais 1 et 2, une décroissance du couple d'agitation en fonction du temps jusqu'à l'obtention d'une valeurs asymptotique. Cette

Tableau 6.5 Conditions opératoires utilisées lors du mélange post-mouillage des suspensions de kaolin pour le mélangeur coaxial et le disperseur.

Essai	Mélangeur coaxial		Disperseur
	R_N (-)	N_{inter} (tpm)	N (tpm)
1	4	200	-
2	8	200	700
3	8	200	625
4	8	200	700

décroissance du couple correspond à la diminution de la viscosité de la suspension tel qu'illustrée à la figure 6.13 créée par l'effet du mélange dispersif, c'est-à-dire la diminution de la taille des agrégats de kaolin au sein de la suspension. Puisque le comportement rhéoépaississant est causé par l'augmentation de la fréquence de collisions, alors la diminution de taille des agrégats a comme effet d'amortir ce phénomène rhéoépaississant. De plus, on remarque que la viscosité de la suspension obtenue après une heure de mélange post-mouillage à l'aide du mélangeur coaxial est supérieure à celle obtenue à partir du disperseur à la fin de l'étape du mouillage, signifiant que le disperseur possède un meilleur mélange dispersif.

Pour les essais 3 et 4, le mélangeur coaxial montre une faible variation du couple pendant la période de mélange post-mouillage et aussi une faible variation de la viscosité de la suspension en fonction du temps. Ceci signifie que le niveau de dispersion atteint au niveau de l'étape du mouillage ne peut être amélioré davantage pendant la période de mélange post-mouillage, et cela pour les conditions opératoires utilisées. Pour le disperseur, nous avons seulement illustré la viscosité de la suspension au début et à la fin de l'étape post-mouillage car nous n'avons pas noté de variation significative de la viscosité en fonction du temps.

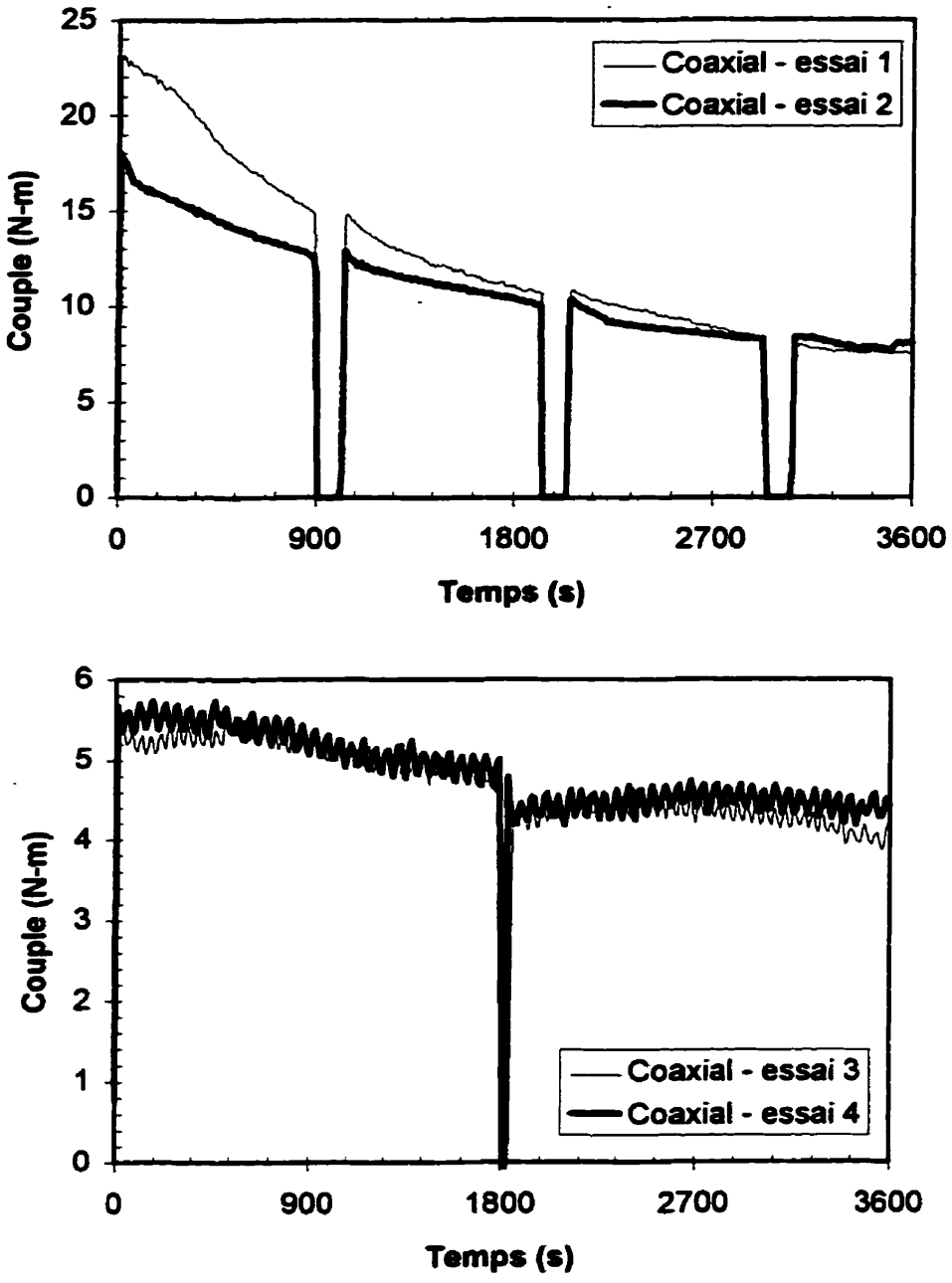


Figure 6.12 Évolution du couple en fonction du temps lors de période de mélange post-mouillage pour le mélangeur coaxial.

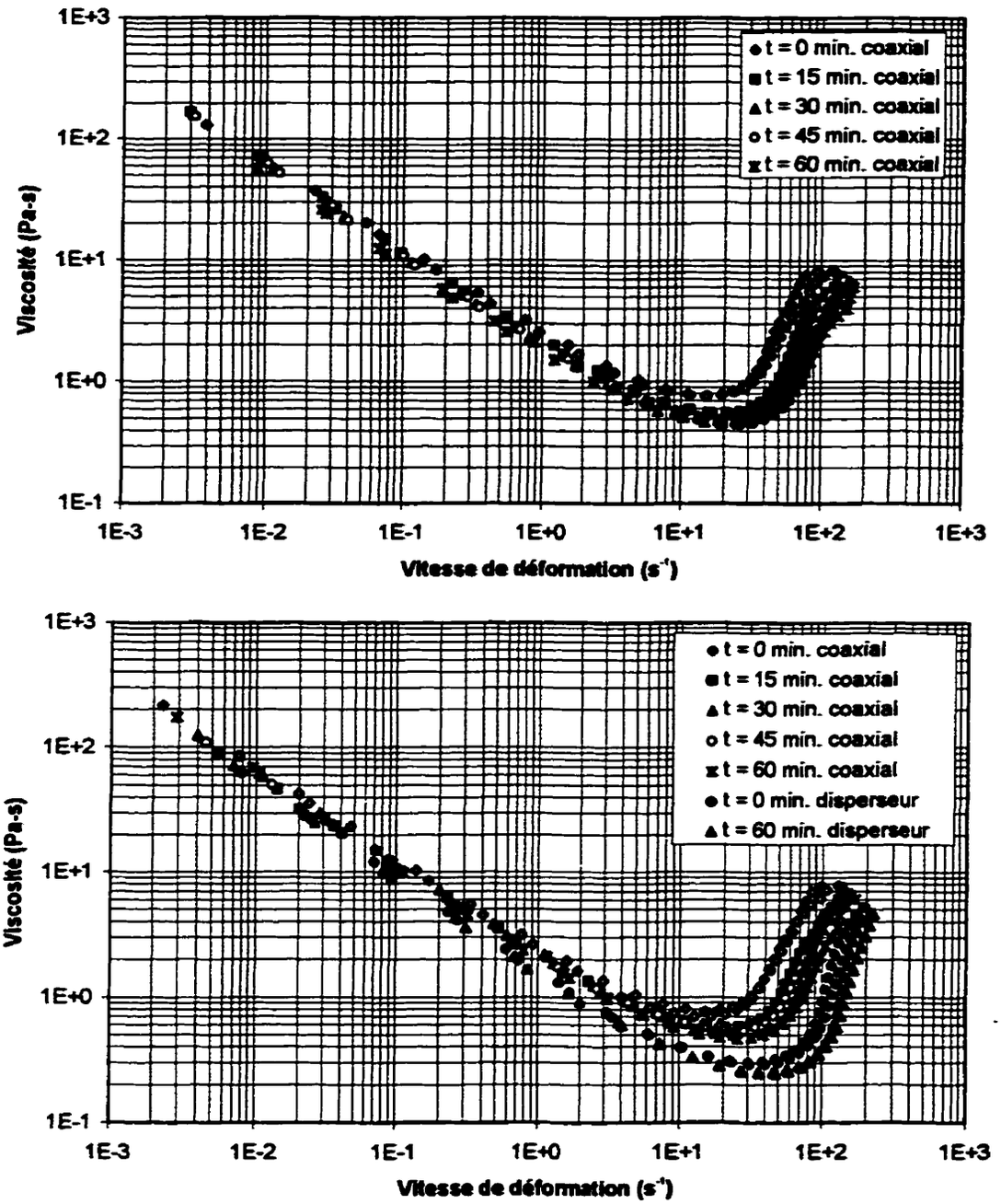


Figure 6.13 Rhéologie évolutive de la suspension de kaolin lors de la période de mélange post-mouillage pour les essais 1 (haut) et 2 (bas) du mélangeur coaxial et du disperseur.

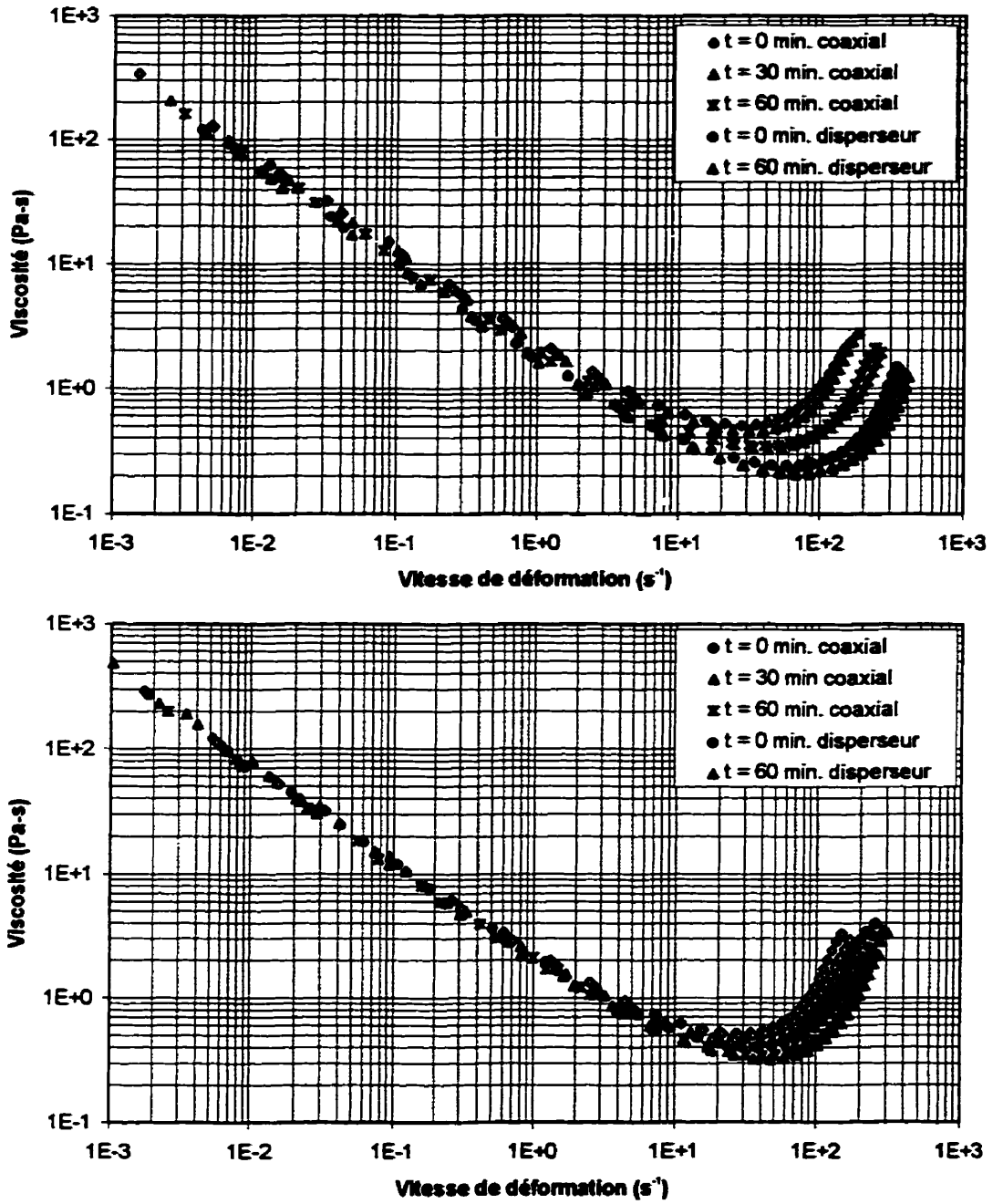


Figure 6.14 Rhéologie évolutive de la suspension de kaolin lors de la période de mélange post-mouillage pour les essais 3 (haut) et 4 (bas) du mélangeur coaxial et du disperseur.

Par conséquent, nous pouvons conclure que, pour l'étape du mouillage de la suspension de kaolin, le disperseur possède un meilleur pouvoir dispersif que le mélangeur coaxial mais qu'en revanche il consomme beaucoup plus d'énergie. Par contre, pour les essais 2 et 3, nous avons préparé une sauce de couchage contenant les ingrédients du tableau 3.2. Afin d'illustrer la qualité du mélange dispersif, nous avons mesuré la rhéologie des sauces de couchage ainsi obtenues (figure 6.15). Comme on peut le constater, les sauces de couchage préparées à l'aide du mélangeur coaxial semblent posséder un comportement rhéologique et un mélange dispersif comparables à ceux obtenus à partir du disperseur. Il faut cependant mentionner que la préparation de la sauce de couchage nécessite une période de mélange supplémentaire d'environ une heure, ce qui permet au mélangeur coaxial d'améliorer l'état du mélange dispersif tout en utilisant une faible consommation énergétique. Ce résultat est très intéressant car il illustre une fois de plus l'intérêt de la technologie coaxiale pour le mouillage et l'homogénéisation des suspensions concentrées de kaolin et la préparation des sauces de couchage.

2.3 Machinabilité

Du point de vue de la machinabilité, nous entendons la facilité à déposer la suspension de kaolin ou la sauce de couchage sur une trame de papier. Cette évaluation a été effectuée sur une coucheuse pilote à dosage par rouleaux située dans notre laboratoire à l'École Polytechnique. L'épaisseur des stries ("ribbing") et l'apparition d'instabilité tels les éclaboussures ("spitting") ont été mesurées à partir d'un enregistrement vidéo effectué lors de l'application de la suspension de kaolin des essais 1, 2, 3 et 4 et de la sauce de couchage des essais 2 et 3. De la même façon que précédemment, nous avons pris soin de comparer la machinabilité des suspensions préparées à l'aide du mélangeur coaxial et du disperseur.

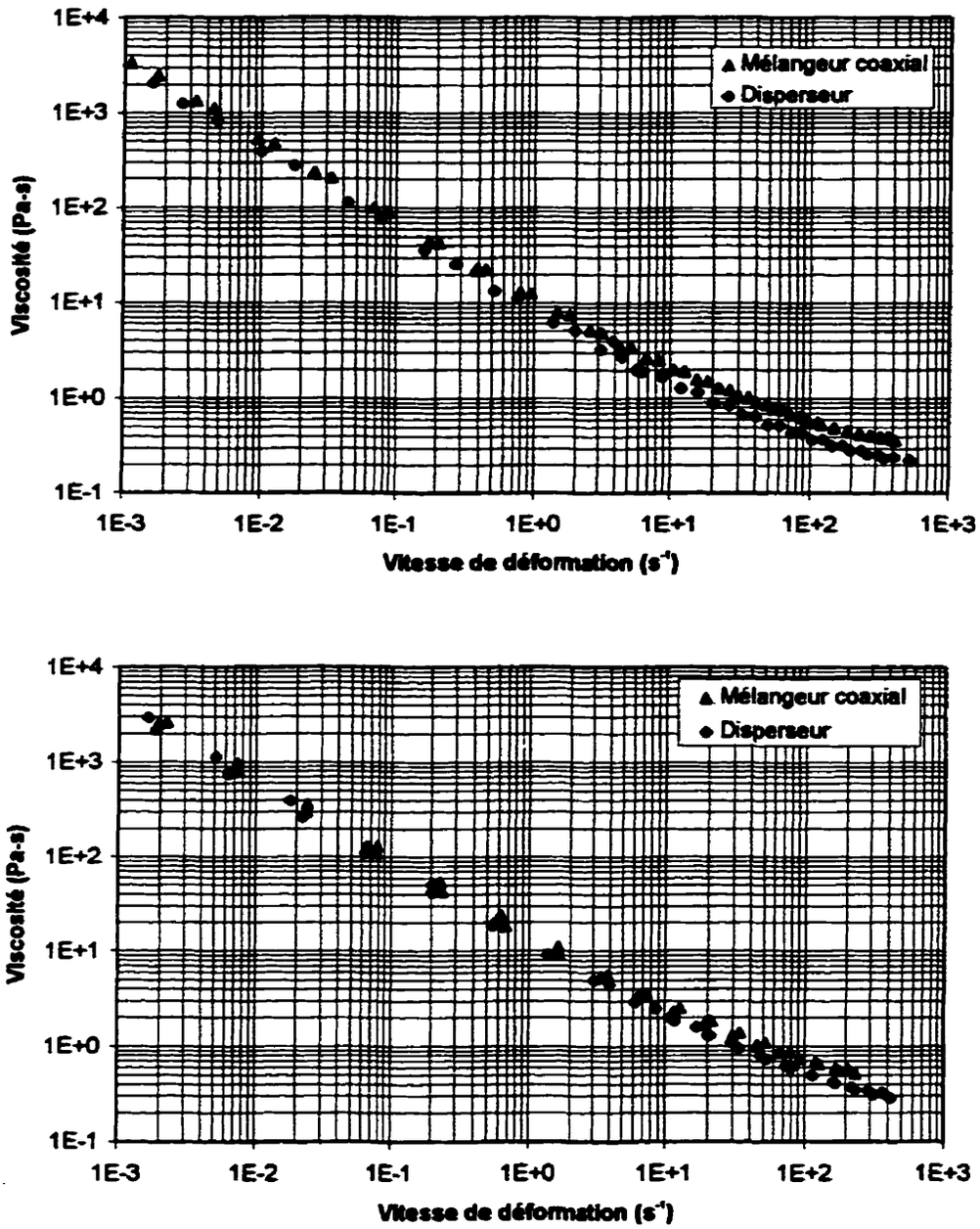


Figure 6.15 Rhéologie des sauces de couchage obtenue des essais 2 (haut) et 3 (bas) à partir du mélangeur coaxial et le disperseur.

Voici en résumé les résultats obtenus :

a) Nombre de stries : les mesures de l'épaisseur des stries ont seulement été effectuées pour les sauces de couchage des essais 2 et 3. La sauce de couchage préparé à l'aide du disperseur permet d'obtenir un plus grand nombre de stries une fois appliquée sur le rouleau applicateur, ce qui permet un meilleur lissage lors de l'application sur le papier.

b) Éclaboussures : en ce qui concerne les suspensions de pigments des essais 1 à 4, on n'a trouvé aucune différence notable sur la tendance à produire des éclaboussures entre les suspensions préparées à l'aide du mélangeur coaxial et du disperseur. Par contre, pour les sauces de couchage des essais 2 et 3, les sauces de couchage préparées à l'aide du mélangeur coaxial créent moins d'éclaboussures et par le fait même moins d'instabilités d'écoulement, ce qui est favorable lors de l'application sur le support papier.

2.4 Caractérisation de la puissance d'agitation des suspensions concentrées

a) Suspension de kaolin :

Dans le chapitre V, nous avons montré que la puissance d'agitation du mélangeur coaxial pouvait être déterminée grâce au concept de Metzner et Otto pour un fluide obéissant à un modèle loi de puissance. Dans les prochaines lignes, nous allons essayé d'établir si ce concept est toujours applicable pour le comportement rhéologique complexe des suspensions concentrées, c'est-à-dire une rhéologie du type rhéofluidifiant-rhéoépaississant.

Mentionnons tout d'abord que nous avons montré, pour un régime d'écoulement laminaire et un système d'agitation simple tel une ancre, que le concept de Metzner et Otto est valable

pour un fluide du type rhéofluidifiant-rhéoépaississant. Cette étude a été effectuée à l'aide de la simulation numérique seulement. Nous ne présenterons pas ici les détails mais le lecteur intéressé trouvera cette analyse à l'annexe E.

Afin d'analyser la consommation de puissance du mélangeur coaxial pour les suspensions concentrées, nous avons retenu la suspension de kaolin de l'essai No 2. Nous avons déterminé, expérimentalement et numériquement, la puissance d'agitation de cette suspension en fonction du rapport de vitesse R_N après la période de mélange post-mouillage pour laquelle la rhéologie n'évoluait plus dans le temps. Les paramètres du modèle rhéologique (équ. [4.9]) pour cette suspension ont été déterminés par régression non-linéaire à partir des données expérimentales (figure 6.16). On note une légère défaillance du modèle dans la zone de transition rhéofluidifiante-rhéoépaississante.

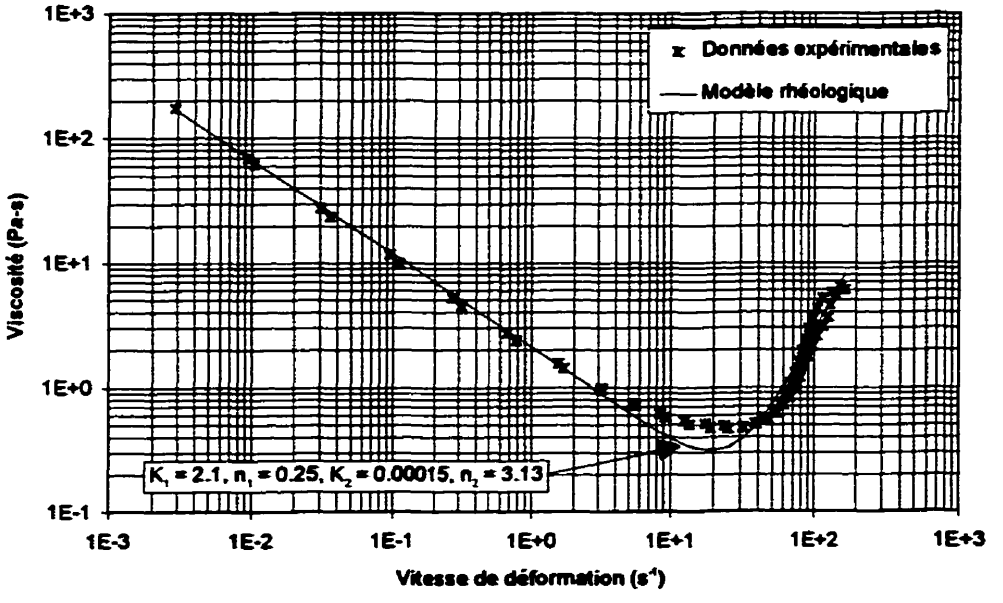


Figure 6.16 Viscosité de la suspensions concentrées après la période de mélange post-mouillage : comparaison entre les données expérimentales et le modèle rhéologique.

Du point de vue numérique, le maillage utilisé pour les calculs est composé de 12694 éléments finis P_1^+-P_0 (figure 6.17). Une fois l'incorporation des pigments de kaolin terminée, le volume du réservoir n'est que de 39.7 litres car la suspension de pigments constitue une étape intermédiaire à la fabrication de la sauce de couchage, laquelle occupera un volume de 57 litres (100% du volume disponible) après avoir ajouté les différents additifs.

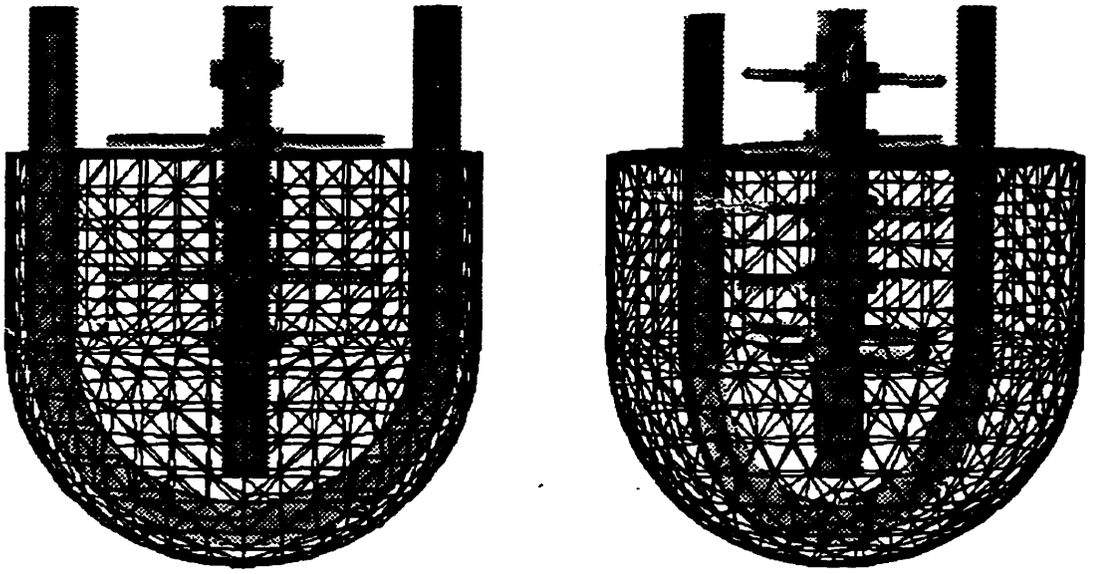


Figure 6.17 Maillage de réservoir et de l'ancre. Les tiges de mélange et la TPI sont représentés à l'aide de points de contrôle(voir tableau 5.3).

Il est important de comprendre ici que nous faisons l'hypothèse que la concentration de la suspension concentrée de kaolin est homogène dans la cuve de mélange. Cette hypothèse nous permet de traiter le problème comme un écoulement d'une pseudo-phase et d'utiliser la rhéologie de la figure 6.16 pour déterminer le champ de vitesse de la suspension à l'intérieur du réservoir.

Nous présentons à la figure 6.18 les valeurs expérimentales et numériques de la variation de N_p en fonction du nombre de $Re_{Giancre}$ (basé sur la vitesse et les dimensions caractéristiques de l'ancre) pour différents rapports de vitesse (N_c/N_a) entre les axes lent et rapide.

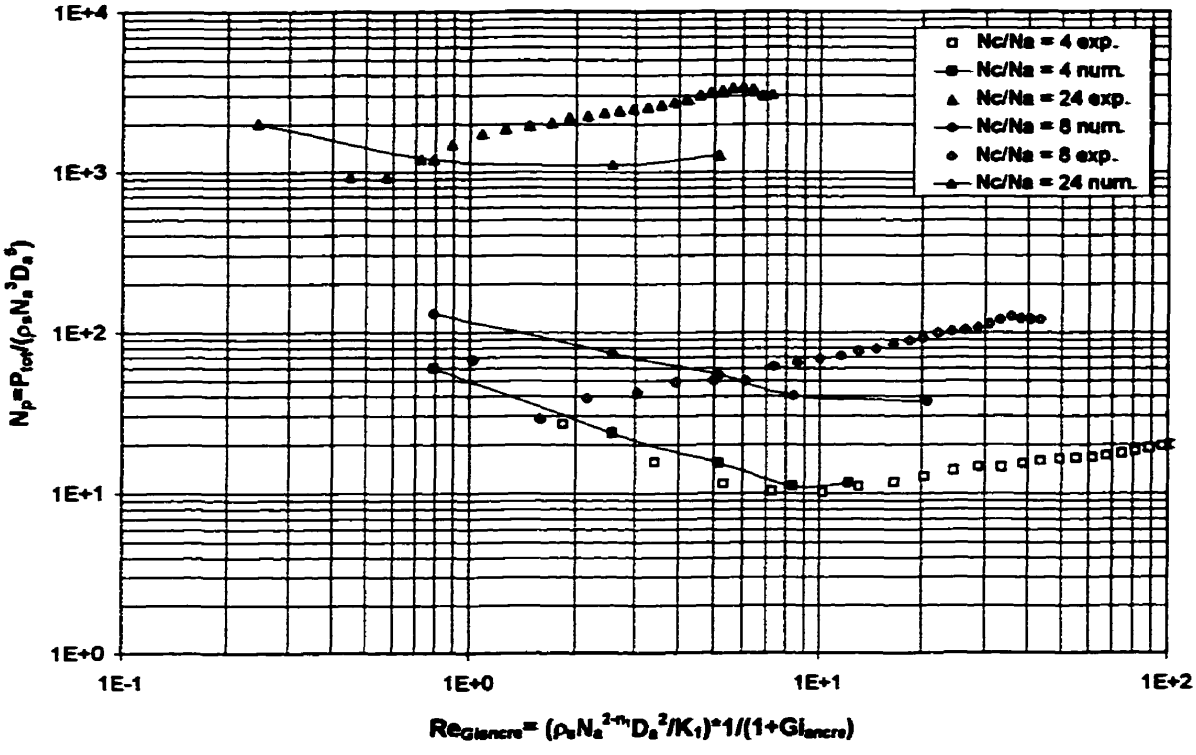


Figure 6.18 Résultats expérimentaux et numériques de N_p en fonction de $Re_{Giancre}$ pour différents rapports de vitesse (N_c/N_a) basés sur les dimensions caractéristiques de l'ancre (ρ_s: masse volumique de la suspension égale à 1700 kg/m^3).

Gi_{ancre} est un nouveau nombre sans dimension appelé nombre de Gillespie que nous définissons comme

$$Gi_{ancre} = \frac{K_2}{K_1} N_a^{n_2 - n_1} \qquad [6.2]$$

Il indique l'importance du comportement rhéoépaississant par rapport au comportement rhéofluidifiant pour une vitesse d'agitation donnée. Si le comportement rhéoépaississant est inexistant, c'est-à-dire que la valeur de l'indice de consistance K_2 est égale à 0, l'expression

du nombre de Reynolds devient alors égale à la définition du nombre de Reynolds pour un fluide obéissant au modèle de type loi de puissance.

On note à la figure 6.18 que la simulation numérique prédit correctement la puissance d'agitation pour le rapport de vitesse R_N égal à 4, alors que pour les rapports de vitesse 8 et 24, on observe un écart plus important entre les valeurs expérimentales et numériques. De plus, pour les mêmes rapports de vitesse 8 et 24, on constate que les valeurs numériques surestiment la puissance d'agitation lorsque l'ancre tourne à basse vitesse (faibles valeurs de Reynolds) et la sous-estiment pour des valeurs de vitesse élevées. Puisque la simulation numérique nous a permis de bien approximer la puissance d'agitation pour des fluides newtoniens et non newtoniens du type loi de puissance, il est difficile ici de remettre en cause la méthode des éléments finis. Par contre, plusieurs autres raisons peuvent expliquer ces écarts entre les valeurs expérimentales et numériques, à savoir :

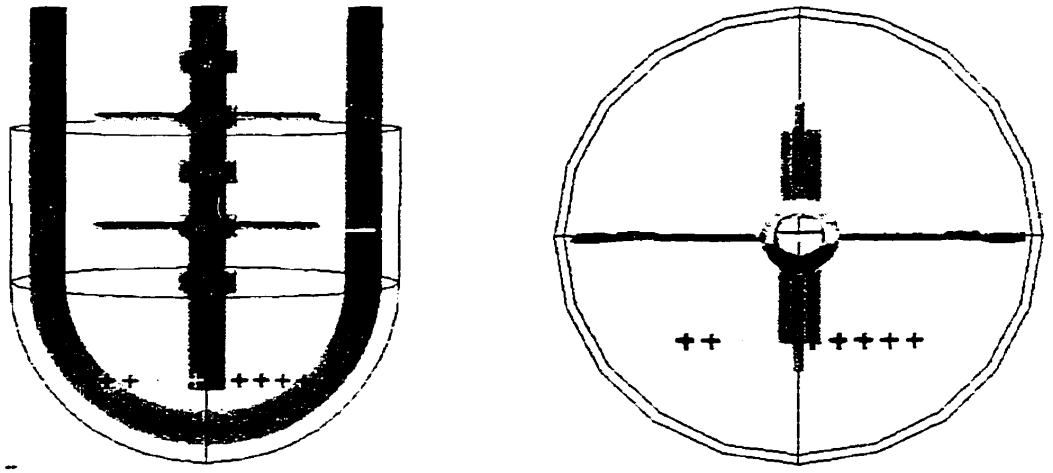
- l'hypothèse que la concentration de la suspension est homogène n'est peut être pas valable. En effet, pour des rapports de vitesse élevé, les gradients de cisaillement générés deviennent de plus en plus importants, pouvant causer des migrations de particules au sein de la suspension et modifier localement le comportement rhéologique;
- la courbe de viscosité est obtenue à partir d'un rhéomètre de type Couette en régime stationnaire. Pour ce type de rhéomètre, on évalue seulement la viscosité en cisaillement alors que dans le mélangeur coaxial, la combinaison entre l'ancre tournant dans une direction et les tiges de mélange tournant dans l'autre direction crée des gradients de cisaillement élongationnelles. Par le fait même, lors de la modélisation, nous supposons que la viscosité élongationnelle est semblable à la viscosité en cisaillement, ce qui n'est jamais le cas en rhéologie classique. De plus, si l'on suit une particule de kaolin dans le mélangeur, son histoire d'écoulement est de nature transitoire. Par contre, à chaque point du domaine d'écoulement, le modèle numérique suppose que l'écoulement est stationnaire, ce qui biaise le résultat;
- tel que mentionné dans la revue de la littérature, les suspensions concentrées possèdent des

comportements rhéologiques très complexes que nous avons pas pris en compte, tels que les effets viscoélastiques et thixotropiques;
Comme nous pouvons le constater, le comportement rhéologique complexe des suspensions concentrées demeure sans aucun doute la cause majeure de ces écarts.

Finalement, nous montrons aux figures 6.19 et 6.20 des trajectoires lancées dans les parties inférieure et supérieure du réservoir pour des conditions opératoires semblables à celles employées lors de la période de mélange post-mouillage ($R_N = 8$, $N_a = 25$ tpm, $N_c = 200$ tpm). On note une très bon pompage axial pour les particules lancées dans la partie inférieure. Pour les particules lancées dans la partie supérieure, le pompage est un peu plus faible car les tiges de mélange offre un moins bon pompage axial que la TPI.

b) Sauce de couchage :

Nous allons maintenant chercher à déterminer la consommation énergétique pour l'agitation de sauces de couchage à l'aide du mélangeur coaxial. Afin de caractériser cette puissance d'agitation, nous avons retenu la sauce de couchage de l'essai No 2 (figure 6.15a). Puisque cette sauce de couchage possède un comportement rhéologique se rapprochant du modèle loi de puissance, nous avons utilisé ce modèle afin de lisser les mesures expérimentales de la viscosité (figure 6.21). Sachant que les constantes K_a (équ. [5.27, 5.28]) et K_{RN} (équ. [5.35, 5.36]) ont été obtenues à partir du concept de Metzner et Otto pour un fluide de type loi de puissance, nous sommes donc en mesure d'estimer la valeur du nombre puissance de cette sauce de couchage en fonction du nombre de Reynolds généralisé et du rapport de vitesse. Les resultats expérimentaux sont présentés à la figure 6.22 et comparés aux courbes maîtresses de la puissance d'agitation (figure 5.29). La caractérisation de la puissance d'agitation basée sur le modèle loi de puissance permet une bonne prédiction de la consommation énergétique pour des faibles valeurs du nombre de Reynolds. Par contre,



(Position initiale des particules)

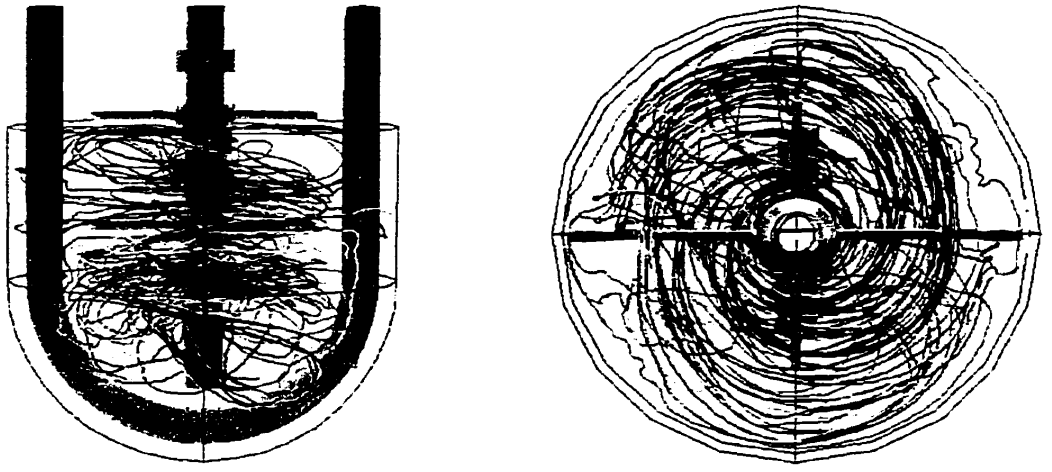
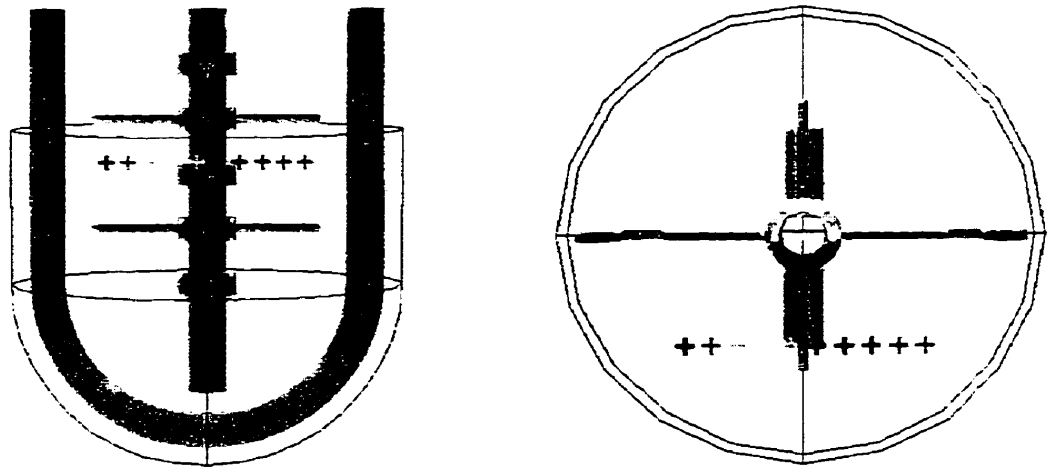


Figure 6.19 Trajectoires lancées dans la partie inférieure du réservoir pour un rapport de vitesse R_N=8 et pour un fluide rhéofluidifiant-rhéoépaississant (N_a=25 tpm, temps de parcours: 20 s).



(Position initiale des particules)

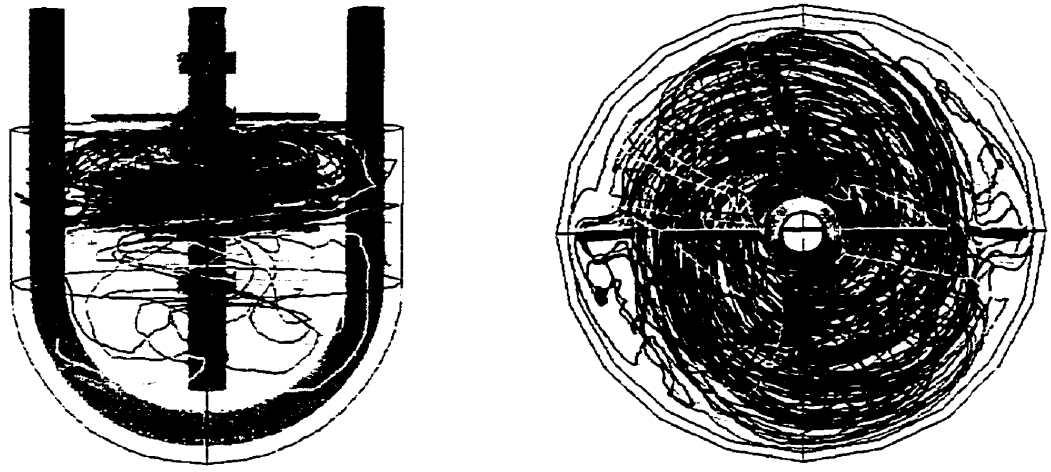


Figure 6.20 Trajectoires lancées dans la partie inférieure du réservoir pour un rapport de vitesse R_N=8 et pour un fluide rhéofluidifiant-rhéoépaississant (N_a=25 tpm, temps de parcours: 20 s).

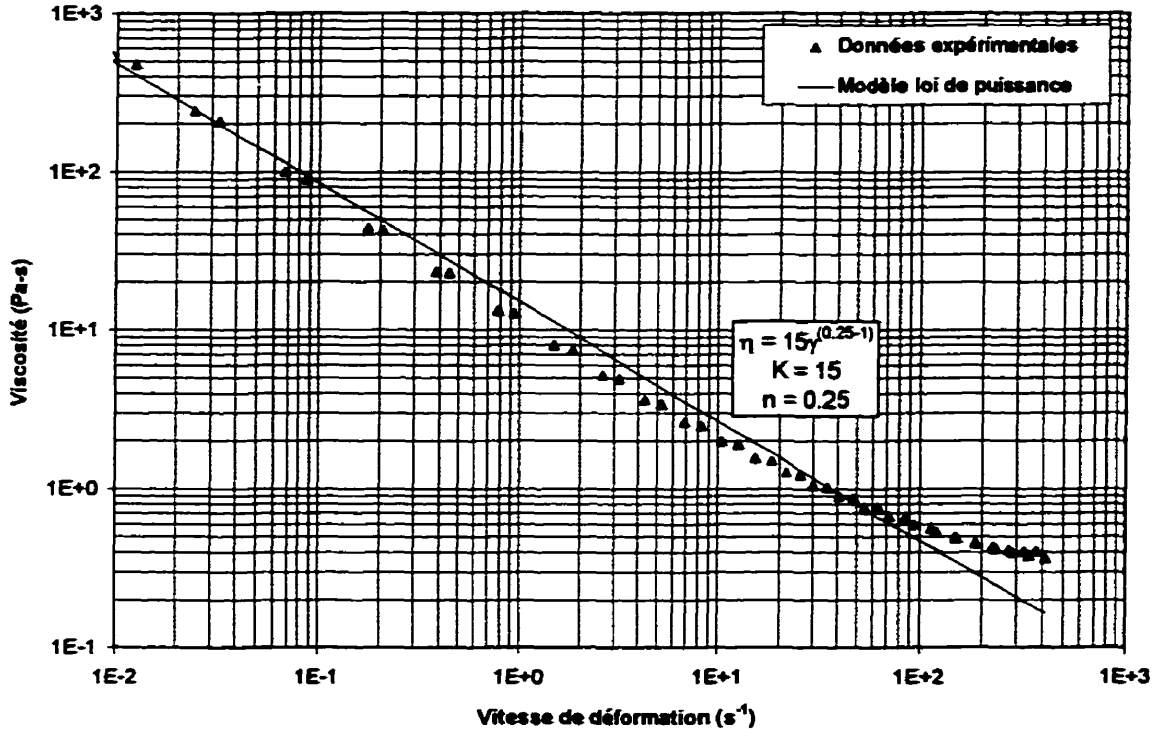


Figure 6.21 Lissage des données expérimentales de la viscosité de la sauce de couchage correspondant à l'essai No 2.

l'écart considérable observé à Reynolds élevés peut s'expliquer de diverses façons. Premièrement, le modèle loi de puissance suppose que le régime d'écoulement est laminaire alors que l'on observe une évolution vers la zone de transition (figure 6.22b) pour des valeurs du nombre de Reynolds d'environ 10 (basées sur la vitesse et les dimensions caractéristiques des tiges de mélanges), ce qui est en accord avec la théorie. Finalement, mentionnons que la sauce de couchage possède un léger comportement rhéoépaississant à des vitesse de déformations élevées alors que le modèle loi de puissance ne peut prendre en compte ce phénomène, sous-estimant par le fait même la puissance d'agitation pour des valeurs du nombre de Reynolds élevées.

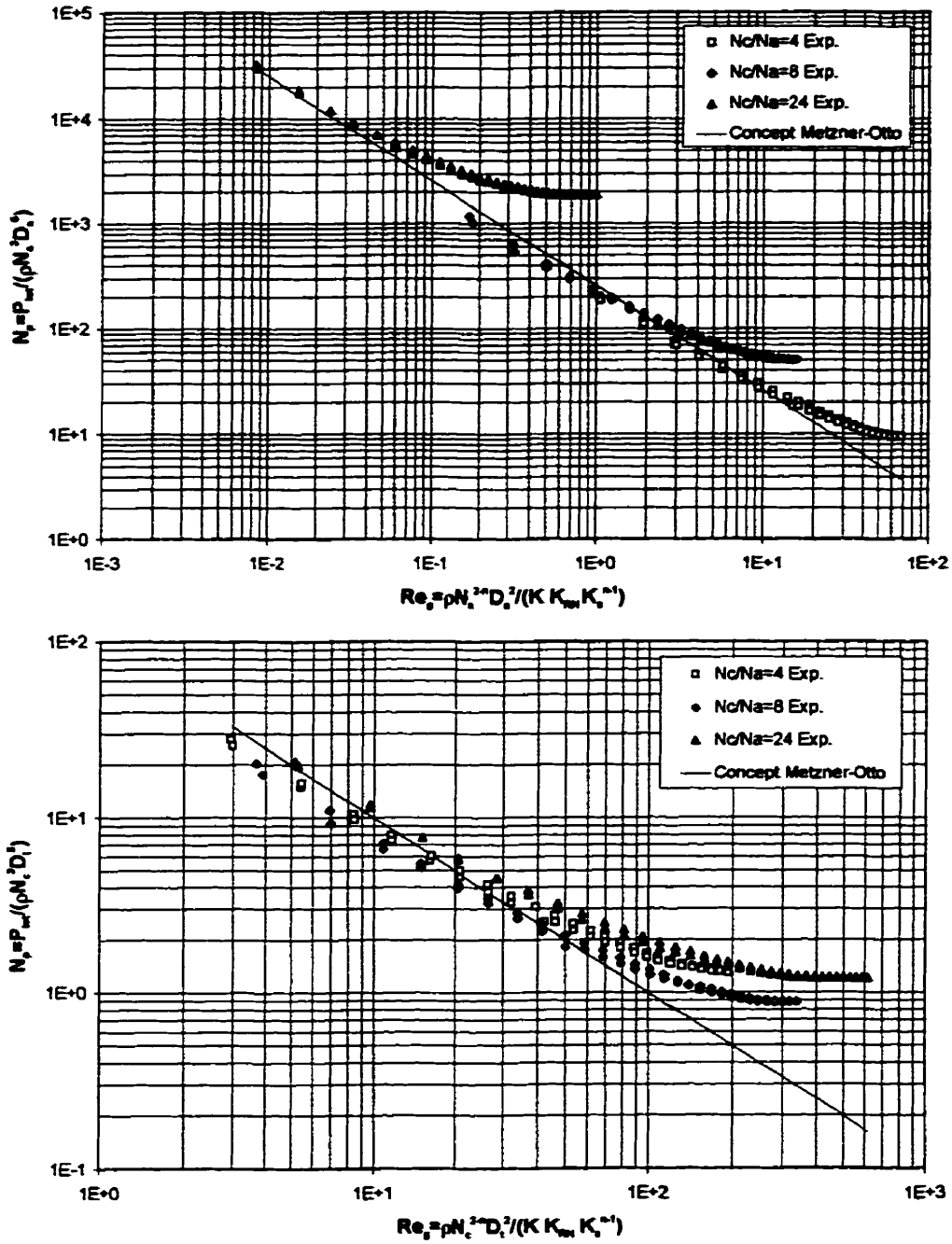


Figure 6.22 Comparaison entre les valeurs expérimentales et le concept de Metzner-Otto de N_p en fonction du nombre de Re_g pour différentes valeurs du rapport de vitesse(N_c/N_a) basés sur les valeurs caractéristiques de a) l'ancre et b) des tiges de mélange.

- CHAPITRE VII -

ÉCOULEMENT BIPHASIQUE : VALIDATION ET ÉTUDE DE CAS

Dans ce chapitre, nous nous proposons de caractériser l'hydrodynamique dans le mélangeur coaxial pour des systèmes biphasiques (solide-liquide). Dans un premier temps, nous allons présenter les simulations numériques qui ont permis de valider les modèles de dispersion de des solides, c'est-à-dire les modèles de Mann et de Phillips. Par la suite, nous allons utiliser ces deux modèles afin de caractériser le mécanisme de remise en suspension pour un système d'agitation simple (hélice marine) et complexe (mélangeur coaxial) et comparerons les résultats obtenus à l'expérimentation.

1. Validation des modèles de dispersion de la phase solide

1.1 Modèle de Mann

Le modèle de Mann consiste à effectuer un bilan de matière instationnaire de la phase solide sur un ensemble de cellules définissant le domaine étudié. De façon unanime dans la littérature, les bilans de matière sont effectués sur des cellules (ou volumes finis) représentés par des quadrangles en 2D et des hexaèdres en 3D car les auteurs utilisent des maillages structurés. En ce qui nous concerne, les bilans de matière seront réalisés sur des volumes finis représentés par des éléments finis tétraédriques 3D utilisés pour la résolution de l'écoulement de la phase liquide. Par le fait même, nous utiliserons une méthode de volumes finis sur une grille non-structurée. À notre connaissance, cette approche est nouvelle et n'a pas été

mentionnée dans la littérature.

Nous allons considérer une cellule de sédimentation possédant un diamètre de 21 cm et une hauteur égale au diamètre. Les propriétés physiques des phases liquide et solide sont illustrées au tableau 7.1.

Tableau 7.1 Propriétés physiques des phases liquide et solide pour la validation du modèle de Mann.

Propriétés physiques	Phase liquide	Phase solide
Masse volumique, ρ (kg/m^3)	1000	2500
Viscosité, μ (Pa-s)	1	-
Diamètre des particules, D_p (m)	-	$1x10^{-3}$
Fraction volumique maximale, ϕ_m (-)	-	0,60

Cette cellule contient une fraction volumique de 10% en billes de verre et l'on considère que les particules sont uniformément distribuées. On cherche à calculer l'évolution de la concentration en fonction du temps pour une sédimentation libre (sans interaction particule-particule) et entravée (interaction particule-particule) et le temps nécessaire pour que toutes les particules atteignent le fond du réservoir. Sachant que la vitesse de sédimentation d'une particule est de $v_s = 6.213x10^{-4}$ m/s (équ. [2.3]), alors le temps théorique pour atteindre le fond de la cellule doit être environ de 257 secondes en sédimentation libre et supérieure à cette valeur en sédimentation entravée.

Trois maillages différents ont été utilisés afin de tester la précision du calcul (figure 7.1). Les figures 7.2 et 7.3 illustrent un exemple de l'évolution de la fraction volumique obtenue en fonction du temps pour le maillage de 7031 éléments concernant une sédimentation libre.

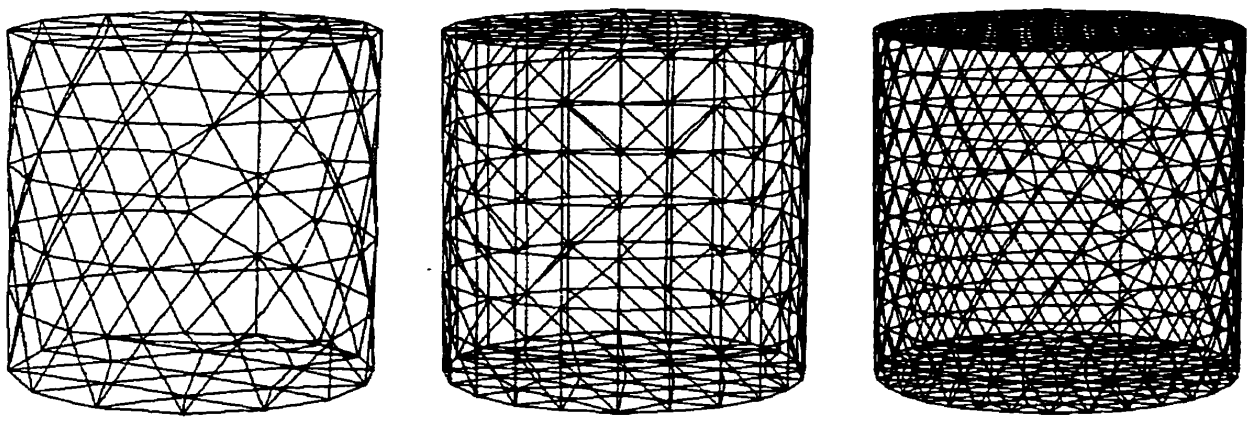


Figure 7.1 Maillages de la cellule de sédimentation: 472 (gauche), 2222 et 7031 éléments tétraédriques.

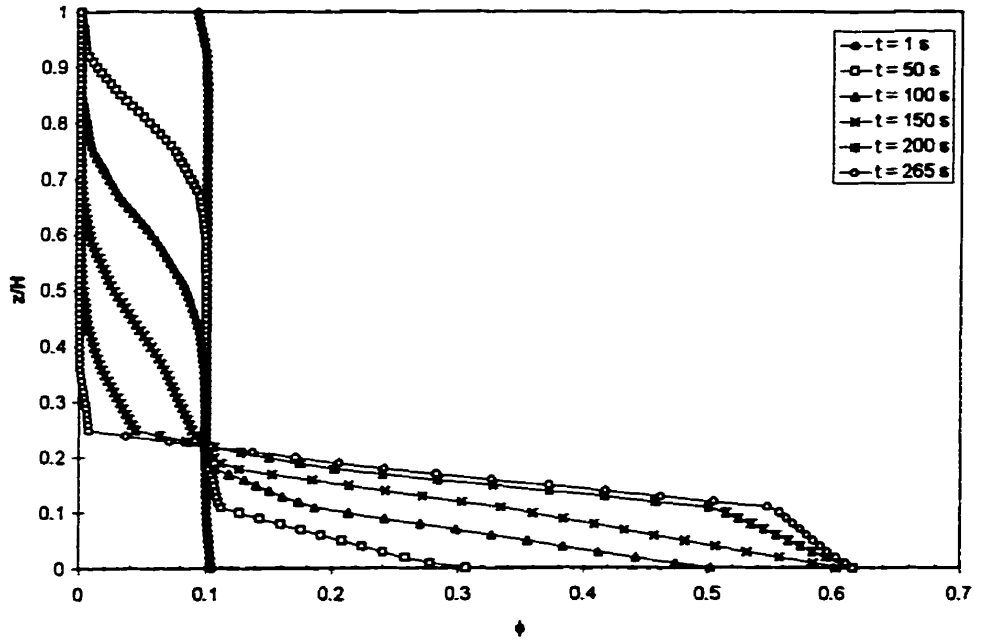


Figure 7.2 Évolution de ϕ dans la direction axiale de la cellule en fonction du temps pour le maillage de 7031 éléments (sédimentation libre).

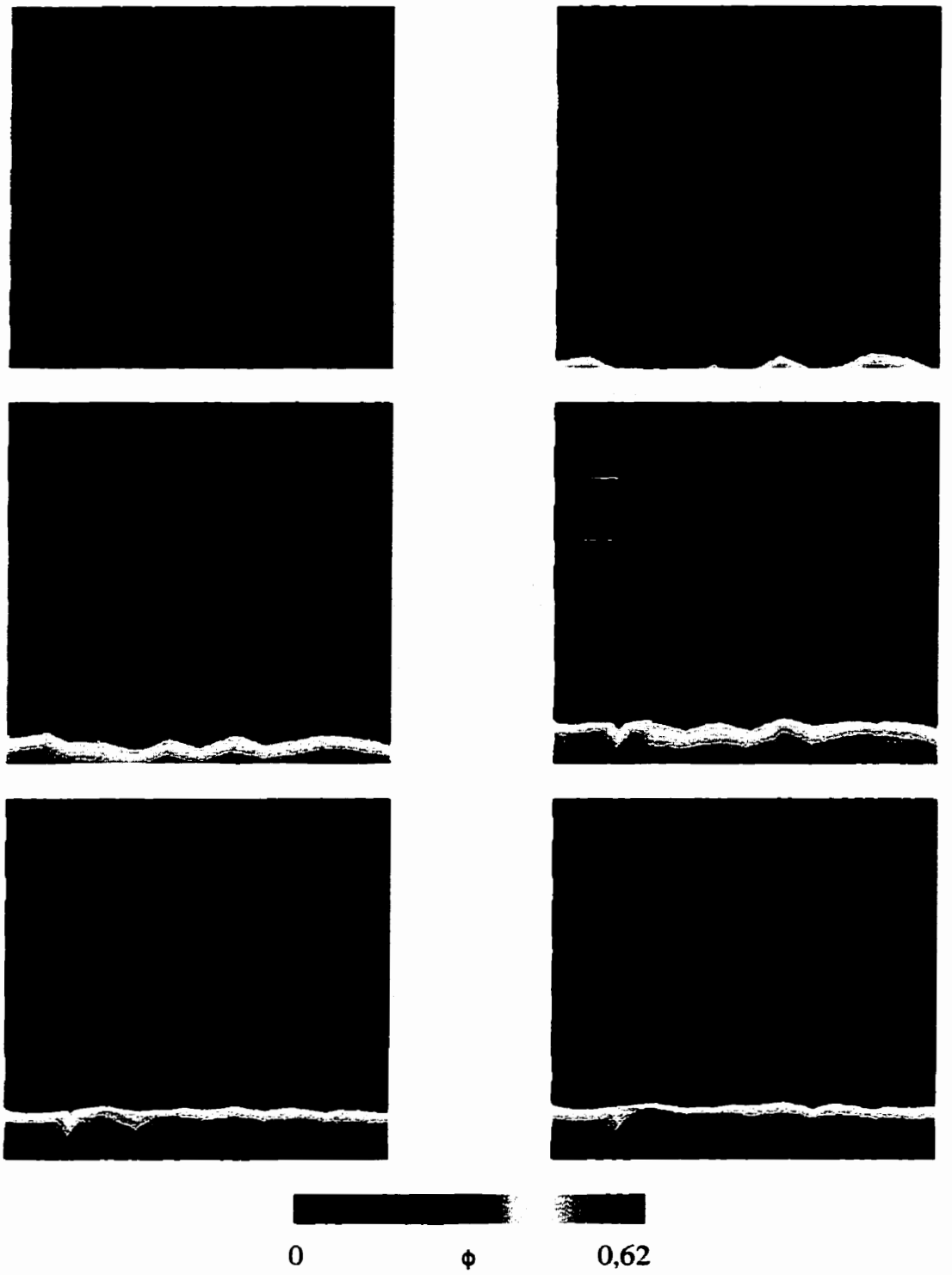


Figure 7.3 Évolution de ϕ en fonction du temps (1, 50, 100, 150, 200 et 265 s) sur un plan médian (plan x-z, y=0) pour le maillage de 7031 éléments (sédimentation libre).

Comme on peut le constater, la région supérieure de la cellule de sédimentation s'appauvrit en particules solides, la région centrale sédimente avec la même concentration de départ et la partie inférieure voit sa concentration augmenter jusqu'à la fraction volumique maximale, ce qui est conforme à la théorie de la sédimentation. De plus, nous avons implanté une stratégie qui permet d'éviter que la fraction volumique n'excède ϕ_m, ce qui n'est pas le cas pour la majorité des modèles dans la littérature (Brucato et al., 1990; Brucato et Rizzuti, 1988). Cette stratégie consiste à bloquer la vitesse de sédimentation dans la cellule lorsque la concentration devient supérieure à ϕ_m. Cette contrainte physique ne peut être respectée qu'en régime instationnaire seulement (car nous connaissons ϕ au pas de temps précédent).

Afin d'estimer le temps nécessaire à la sédimentation totale, nous illustrons à la figure 7.4 l'évolution du coefficient de variation de ϕ (équ. [2.37]) en fonction du temps. Lorsque l'on atteint le plateau, cela signifie qu'il n'y a plus aucune variation de la concentration dans la cellule et que toute les particules ont sédimentées. Le tableau 7.2 présente les résultats obtenus.

Tableau 7.2 Comparaison entre le temps de sédimentations libre et entravée pour différents maillages (le % d'écart représente l'écart avec la valeur théorique, i.e. 257 s).

Maillage (# éléments)	Sédimentation libre (s)-(% écart)	Sédimentation entravée (s)
472	335 (30,4%)	400
2222	290 (12,8%)	375
7031	265 (3,1%)	365

Mentionnons qu'un maillage plus fin nous permet de nous approcher de la valeur théorique. Remarquons également que la sédimentation entravée nécessite un temps de sédimentation plus élevé, tel que prévu.

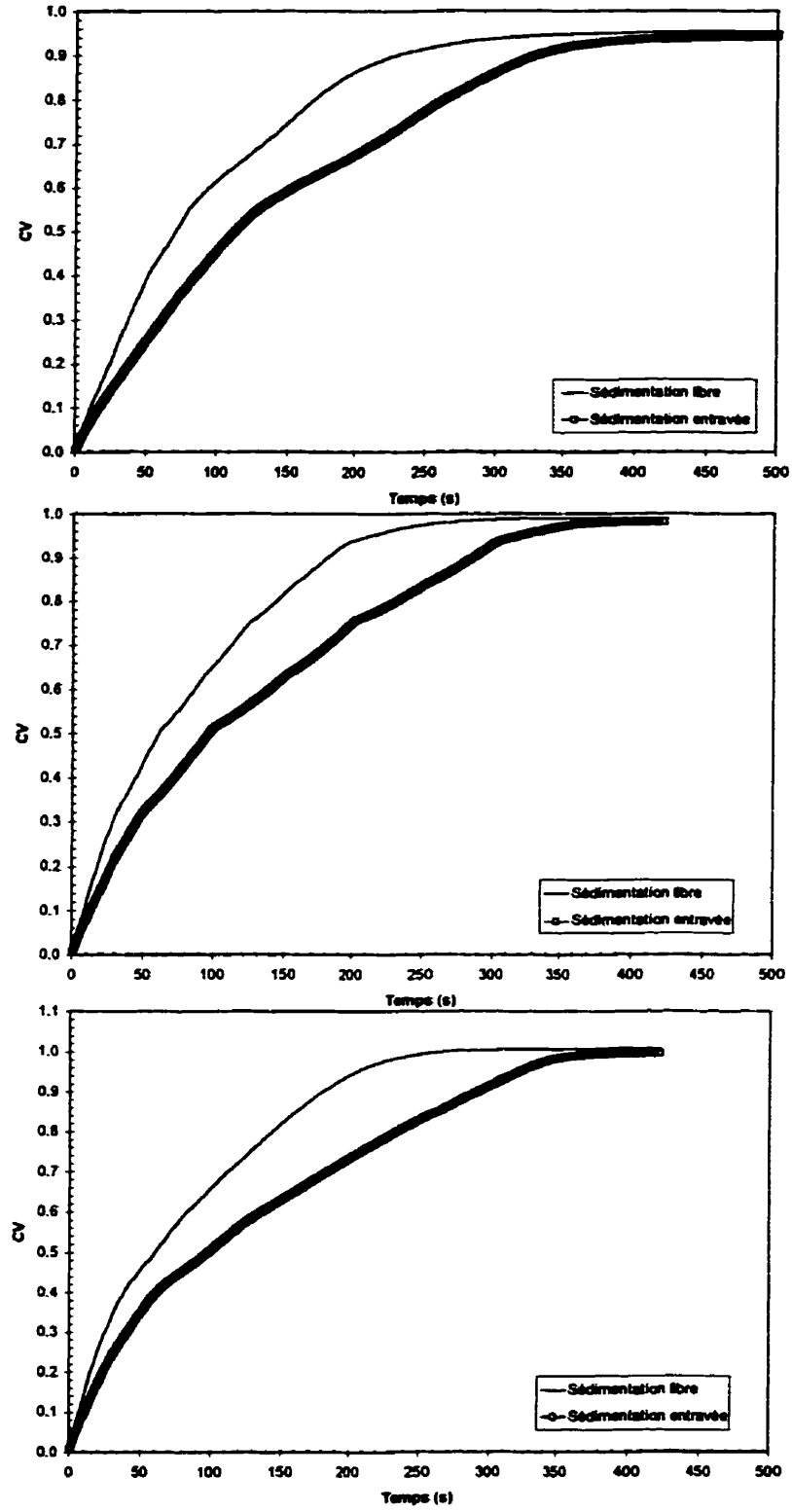


Figure 7.4 Coefficient de variation en fonction du temps pour les sédimentations libre et entravée (472 (haut), 2222 et 7031 éléments).

Finalement, nous nous sommes assurés que le transport convectif des particules solides était résolu de façon exacte. Pour ce faire, nous avons cherché, pour un écoulement de Couette, à transporter un champ de concentration uniforme de particules solides et de voir après quelques tours du cylindre en rotation si la concentration demeurait la même, nous assurant ainsi que le schéma est conservatif. Les résultats de ces tests sont présentés en annexe C.

1.2 Modèle de Phillips

L'équation de conservation de la matière solide selon le modèle de Phillips (en négligeant le terme de sédimentation) permet de prendre en compte le transport convectif des particules, la diffusion due à la fréquence de collisions et à la variation de la viscosité au sein de la suspension. Cette équation s'écrit

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + v \cdot \nabla \phi = \nabla \cdot \left(K_c a^2 \phi \nabla (\dot{\gamma} \phi) \right) + \nabla \cdot \left(K_\eta \frac{a^2}{\eta} \dot{\gamma} \phi^2 \frac{\partial \eta}{\partial \phi} \nabla \phi \right) \qquad [7.1]$$

où v est la vitesse de la suspension, a le rayon des particules, $\dot{\gamma}$ la norme du tenseur des vitesses de déformation, K_c et K_η des constantes empiriques généralement égales à 0,41 et 0,62 respectivement, et finalement η la viscosité de la suspension décrite par le modèle de Krieger et Dougherty

$$\eta = \mu_l \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m} \right)^{-\alpha} \qquad [7.2]$$

ou μ_l est la viscosité de la phase liquide et α une constante empirique.

Dans cette section, nous nous proposons de confronter les valeurs numériques prédites par ce modèle à des solutions analytiques et des résultats expérimentaux. Pour ce faire,

nous étudierons l'écoulement de suspensions concentrées dans un système de Couette.

On considère l'écoulement de particules solides de polyméthylmétacrylate concentrée ($\overline{\phi}$ = 50%) dans une huile de silicone (fluide newtonien) à l'intérieur d'un système de Couette. Les rayons intérieur et extérieur des deux cylindres concentriques sont de kR=0,63 et R=2,4 cm respectivement et le cylindre intérieur tourne à une vitesse de π rad/s (30 tpm). Les propriétés physiques des phases solide et liquide sont montrées au tableau 7.3.

Tableau 7.3 Propriétés physiques des phases liquide et solide.

Propriétés physiques	Phase liquide	Phase solide
Masse volumique, ρ (kg/m^3)	1182	2100
Viscosité, μ (Pa-s)	4,95	-
Diamètre des particules, D_p (m)	-	$6{,}75 \times 10^{-4}$
Fraction volumique maximale, ϕ_m (-)	-	0,68

À partir de la résolution des équations de la conservation de la quantité de mouvement couplées avec l'équation de continuité de la phase solide, Phillips et al. (1992) ont montré, en supposant le modèle de viscosité de Krieger-Dougherty, que les profils de concentration et de vitesse dans l'entrefer sont donnés par les expressions suivantes :

$$\frac{\phi}{\phi_m} = \frac{\hat{r}^2}{k^2}\left(\frac{1-\phi_w/\phi_m}{1-\phi/\phi_m}\right)^{1.82(1-\overline{\phi}/\phi_m)} \qquad [7.3]$$

$$\frac{d}{dr}\left(\frac{v_\theta}{r}\right) = \frac{C}{r^2}\left(1-\phi/\phi_m\right)^{\alpha} \qquad [7.4]$$

où ϕ_w est la concentration à la paroi du cylindre intérieure et $\hat{r}$=r/R. Les constantes C et ϕ_w

sont déterminées à l'aide des conditions suivantes

- vitesse aux parois : $$v_\theta(kR) = \pi \text{ et } v_\theta(R) = 0, \qquad [7.5]$$

- conservation de la matière solide : $$\overline{\phi} = \int_{kR}^{R} \phi(r)\, r\, dr \,/\, \int_{kR}^{R} r\, dr \qquad [7.6]$$

Le profil de concentration entre les deux cylindres est présenté à la figure 7.5 et comparé aux valeurs analytiques et expérimentales à la figure 7.6.

Comme on peut le constater, les particules solides migrent du cylindre intérieur vers le cylindre extérieur, ce qui est en accord avec le modèle de Phillips car ce modèle prédit une migration des particules solides des régions de haut cisaillement vers les régions de faible cisaillement. Les valeurs numériques du profil de concentration sont en très bon accord avec les valeurs analytiques et les résultats expérimentaux de Phillips et al. (1992) obtenus par RMN. Cette solution a été obtenue après dix itérations de couplage entre les équations de Navier-Stokes et l'équation de conservation de la phase solide. Nous pouvons aussi noter que la présence de la phase solide influence grandement le profil de vitesse dans l'entrefer. Ceci est principalement causé par une importante variation de la viscosité de la suspension avec la fraction volumique.

La simulation précédente nous a permis de valider l'équation de Phillips en l'absence de transport convectif ($v \cdot \nabla\phi$). Afin de nous assurer que l'équation de Phillips est bien résolue à l'aide de la méthode SUPG en présence du terme de transport par convection, nous avons effectué le test de l'échelon transversal, ce qui permet de mettre en évidence la diffusion numérique du schéma. Ce test consiste à imposer deux valeurs différentes de concentration sur le bord du domaine et à transporter ces valeurs selon un champ de vitesse uniforme faisant un angle de 45°. Ce test nous a permis de constater que le schéma est très peu diffusif et que le résultat ainsi obtenu représente très bien la physique du problème. Les résultats sont présentés en annexe D.

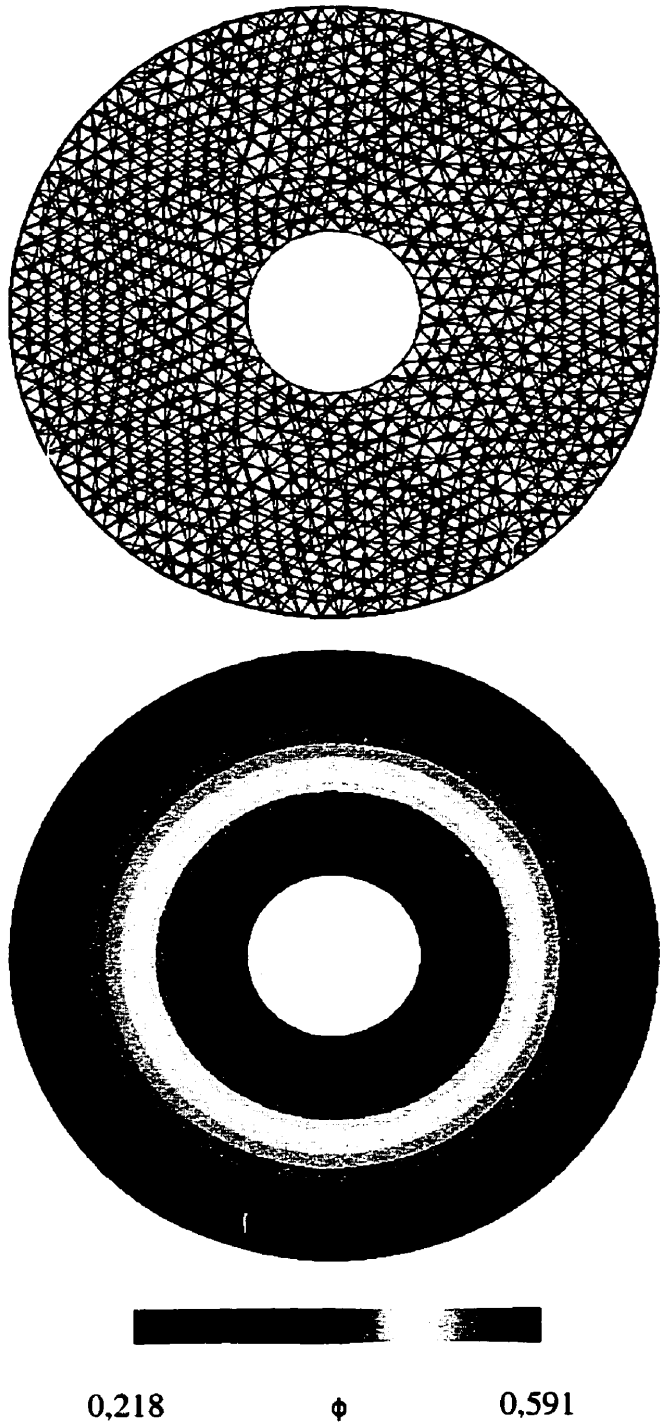


Figure 7.5 Maillage (4872 éléments finis) et champ de concentration en particules solides dans l'entrefer d'un système de Couette pour une suspension $\phi = 50\%$ (cylindre intérieur tourne à 30 tpm).

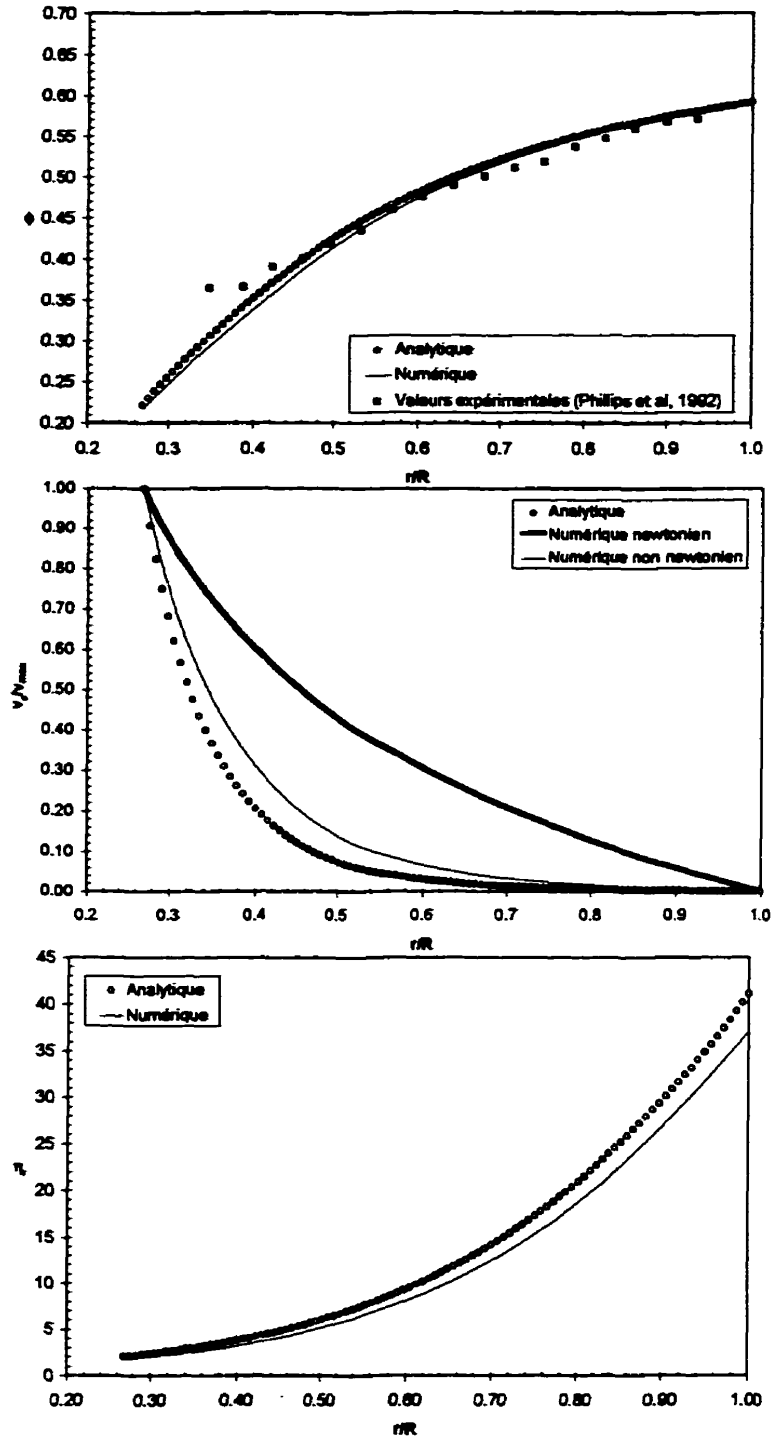


Figure 7.6 Comparaison entre les résultats analytiques et numériques des profils de a) concentration, b) vitesse et c) viscosité relative de la suspension dans l'entrefer d'un système de Couette pour une suspension ϕ=50% (cylindre intérieur tourne à 30 tpm).

2. Étude de cas

2.1 Système d'agitation simple : hélice marine

Les caractéristiques géométriques du système d'agitation sont présentés à la figure 7.7. Ce système est composé d'une hélice marine possédant un diamètre périphérique de 5,2 cm, un diamètre de pale de 1,8 cm et est positionnée à une distance de 2,6 cm du fond. L'hélice marine tourne dans le sens horaire, c'est-à-dire elle crée un débit de pompage vers le bas. Le réservoir (bécher en verre) possède un diamètre de 7,2 cm et une hauteur de fluide de 6,5 cm correspondant à un volume agité de 264 cm^3. Les caractéristiques des phases liquide (sirop de maïs) et solide (bille de verre rouge) sont présentées au tableau 7.4.

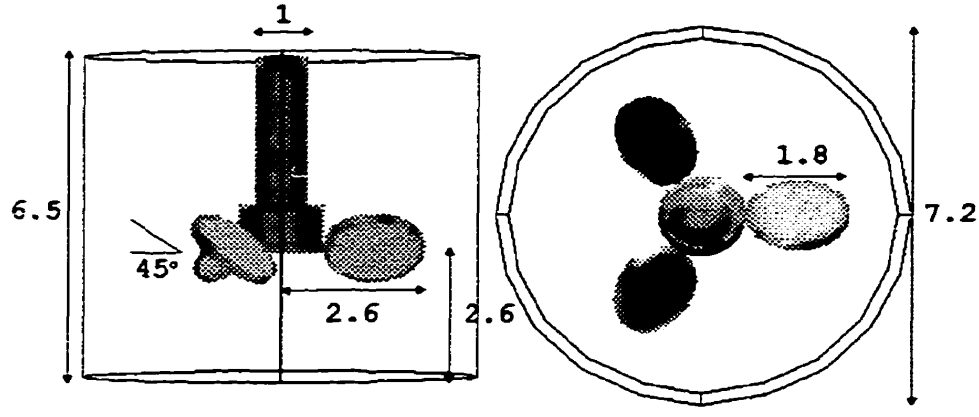


Figure 7.7 Caractéristiques géométriques du système d'agitation simple (hélice marine) pour l'étude de la remise en suspension (dimensions en cm).

Tableau 7.4 Propriétés physiques des phases liquide et solide pour l'étude de la remise en suspension dans un système d'agitation simple (hélice marine).

Propriétés physiques	Phase liquide	Phase solide
Masse volumique, ρ (kg/m^3)	1360	2500
Viscosité, μ (Pa-s)	1,05	-
Diamètre des particules, D_p (m)	-	$1,0x10^{-3}$
Fraction volumique maximale, ϕ_m (-)	-	0,60

D'un point de vue expérimental, nous avons fait varier deux paramètres, c'est-à-dire la vitesse et le pourcentage volumique en particules solides afin d'étudier le mécanisme de remise en suspension pour un tel système d'agitation. Les conditions opératoires étudiées se résument ainsi :

- N = 173 tpm et $\overline{\phi} = 2,8\%$,
- N = 230 tpm et $\overline{\phi} = 7,1\%$,
- N = 350 tpm et $\overline{\phi} = 11,9\%$.

Pour chacune de ces expériences, toutes les particules sont initialement au repos au fond du réservoir et l'agitateur est soudainement mis en route. Nous avons enregistré sur une bande vidéo le mouvement des particules du démarrage jusqu'à l'obtention du régime d'équilibre. Afin de minimiser les effets de réfraction près des parois, nous avons pris soin de placer le bécher en verre dans un bassin rectangulaire rempli d'eau. Les figures 7.8 à 7.10 illustrent la position des particules en fonction du temps. Pour ce type d'agitateur, on observe les phénomènes suivants sur le mécanisme de remise en suspension des particules solides :

a) au démarrage, les particules solides, situées à l'interface solide-liquide, glissent les unes par rapport aux autres, s'amoncellent sous l'agitateur et sont aspirés par ce dernier. Sous l'action de l'agitateur, les particules sont projetées sur la paroi; un pourcentage de celles-ci passent dans la partie supérieure du réservoir alors qu'une portion demeurent dans la partie inférieure;

b) à faible vitesse, on remarque qu'une grande proportion des particules demeurent immobiles au fond du réservoir. À cette position, la concentration en solide est égale à la fraction volumique maximale (ϕ_m). L'énergie dissipée au sein de la suspension par le mouvement de l'agitateur n'est donc pas suffisante pour déplacer ces particules; c'est donc dire que la vitesse de pompage axiale ou la force de traînée créée par l'agitateur n'est pas suffisant pour combattre le poids apparent des particules;

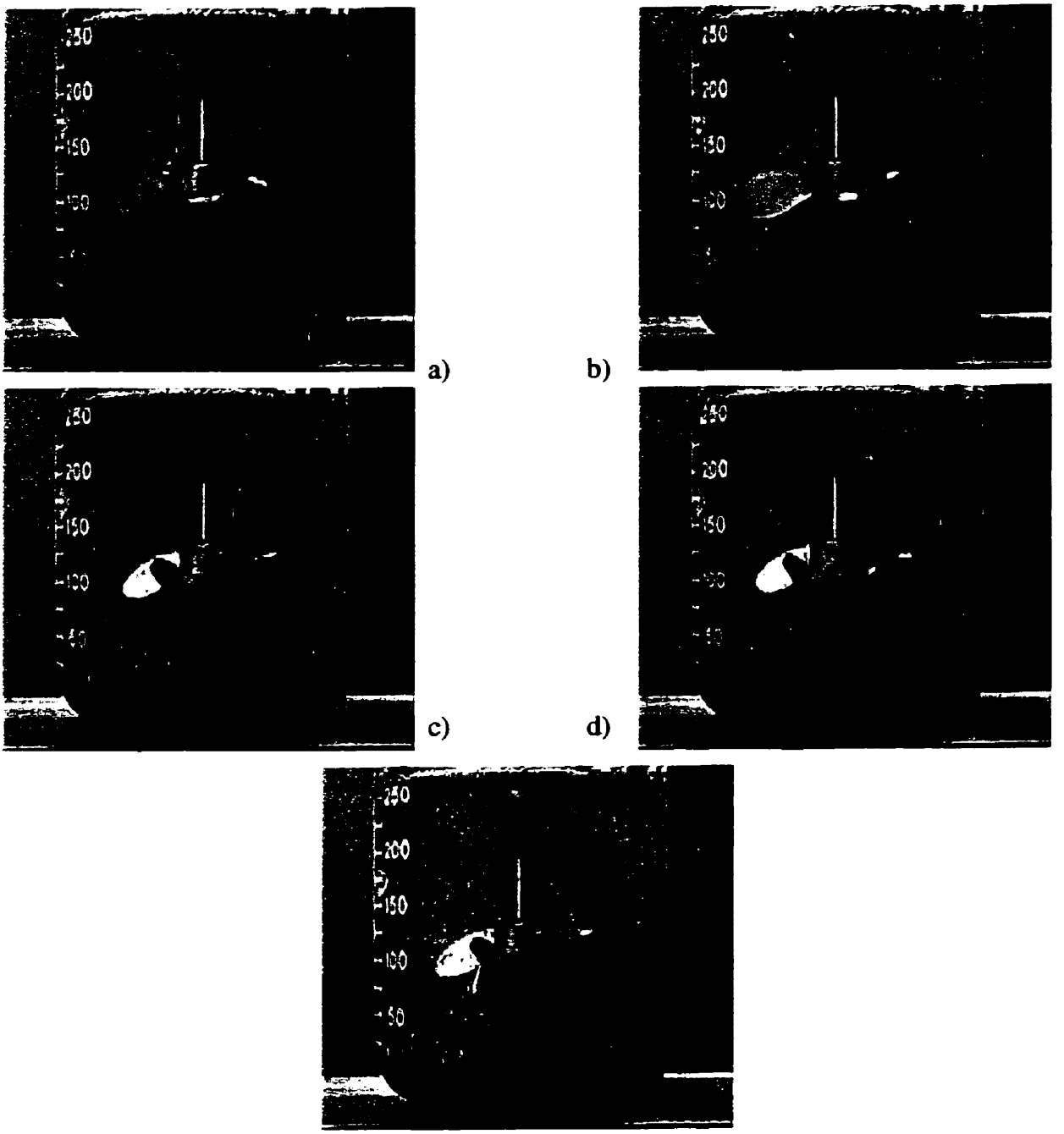


Figure 7.8 Mécanisme de remise en suspension de billes de verre pour une vitesse de rotation de 173 tpm et une concentration moyenne de particules solides de 2.8% vol. : a) t = 0 s, b) t = 25 s, c) t = 50 s, d) t = 90 s, et e) à l'équilibre.

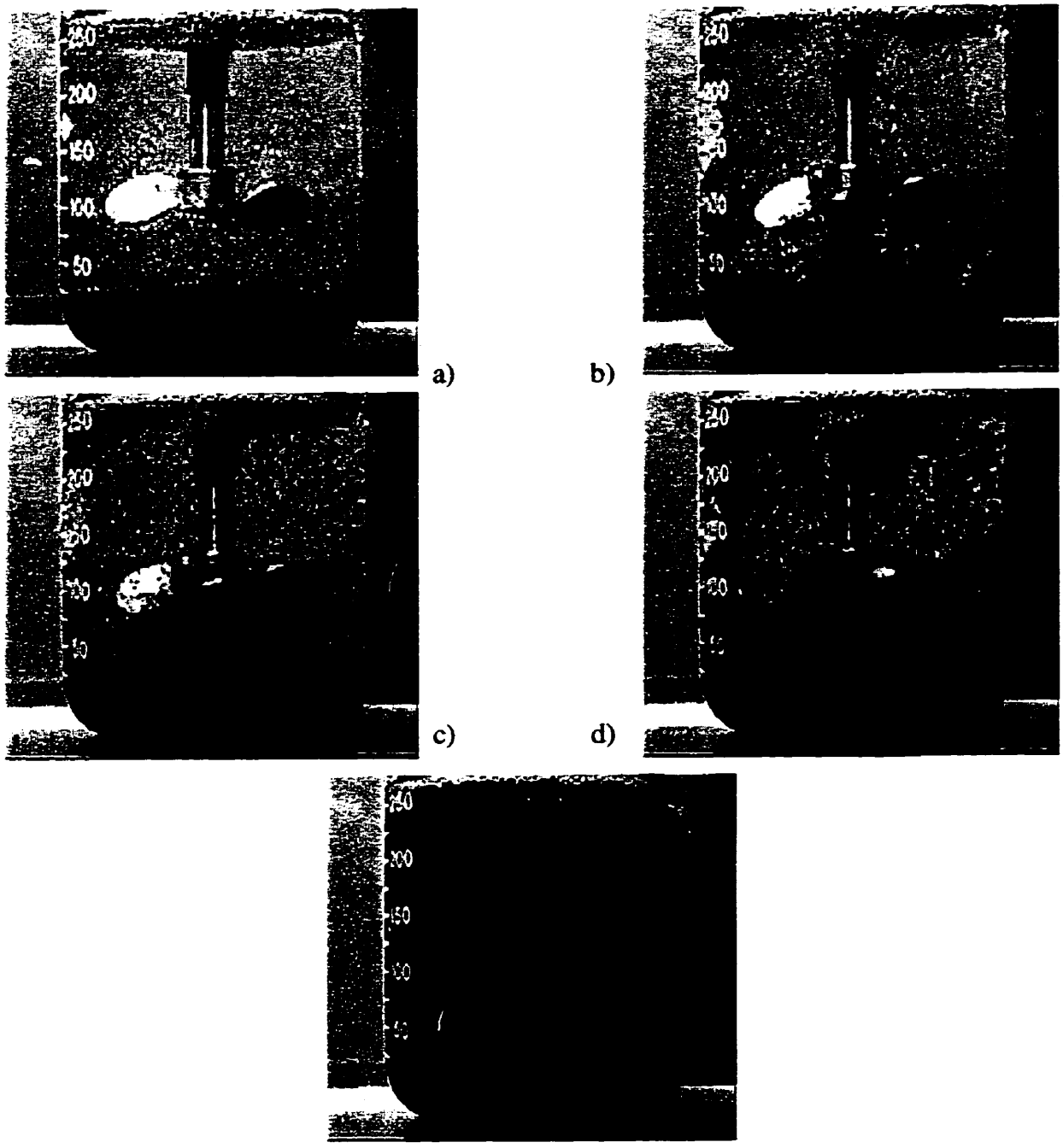


Figure 7.9 Mécanisme de remise en suspension de billes de verre pour une vitesse de rotation de 230 tpm et une concentration moyenne de particules solides de 7.1% vol. : a) t = 0 s, b) t = 25 s, c) t = 50 s, d) t = 90 s, et e) à l'équilibre.

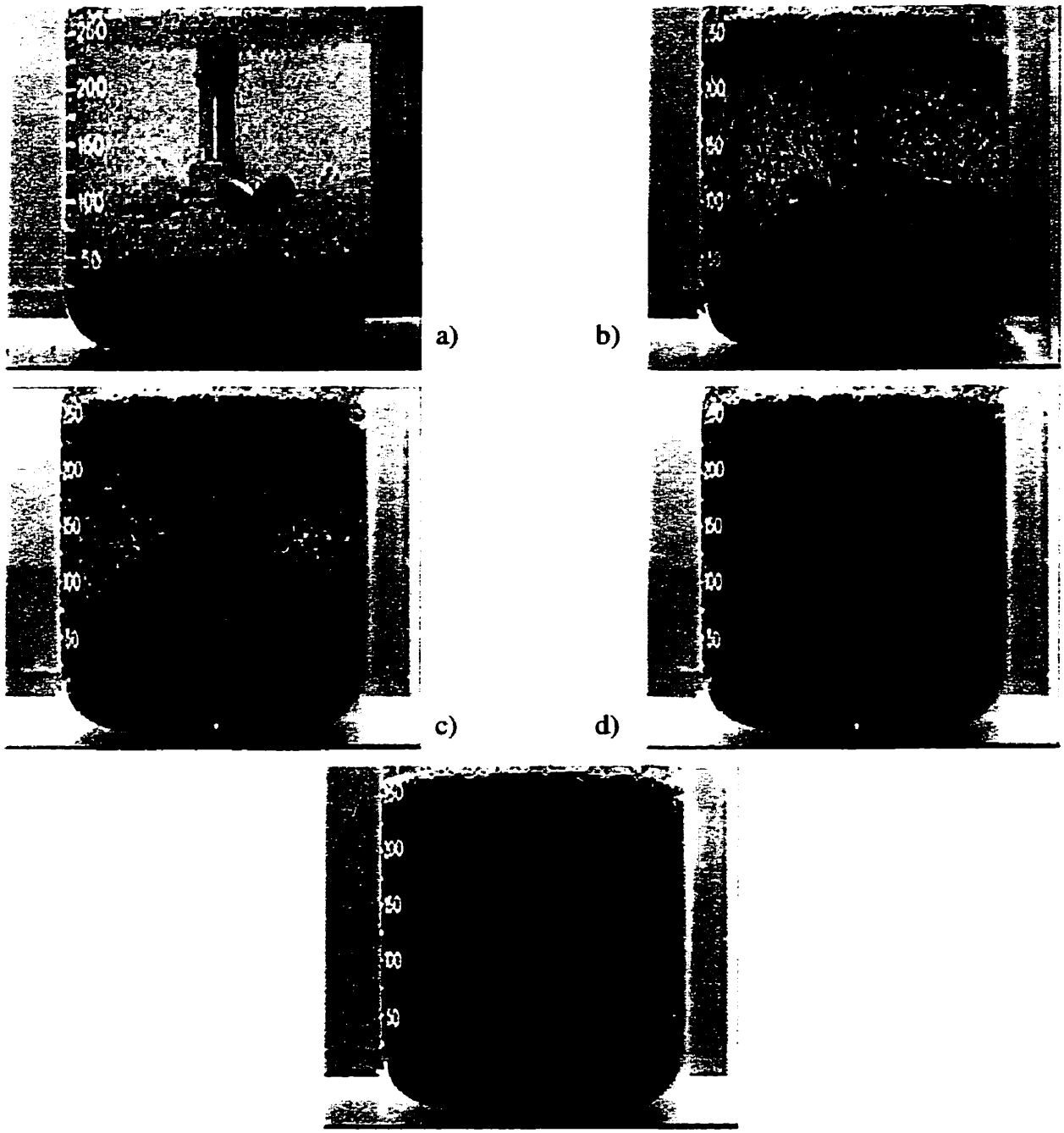


Figure 7.10 Mécanisme de remise en suspension de billes de verre pour une vitesse de rotation de 350 tpm et une concentration moyenne de particules solides de 11.9% vol. : a) t = 0 s, b) t = 25 s, c) t = 50 s, d) t = 90 s, et e) à l'équilibre.

c) une augmentation de la vitesse d'agitation favorisent une plus grande remise en suspension des particules, et par le fait même une meilleure homogénéisation ou uniformité de la matière solide dans l'ensemble du réservoir.

Pour ce système d'agitation, nous avons évalué, à partir des travaux de Armenante et Nagamine (1998), la vitesse minimale de mise en suspension (N_{js}) à environ 855 tpm lorsque la concentration moyenne en particules solide est de 11.9% vol.. À la figure 7.10, on constate que toutes les billes de verre sont en suspension complètes et uniformément distribuées pour une vitesse de 350 tpm, ce qui représente un écart de 144%. Tel que mentionné par Ibrahim et Nienow (1994) lors de l'étude bibliographique, puisque la viscosité du fluide suspendant (sirop de maïs) est supérieure à 0.1 Pa-s, alors les corrélations de N_{js}, obtenues à partir de systèmes biphasiques eau-particules, surestiment largement la valeur de N_{js}. Pour cette raison, peu d'effort a été consenti afin de déterminer cette valeur en fonction de la concentration massique car notre objectif ici est plutôt d'effectuer une comparaison avec la simulation numérique.

Afin de valider les approches numériques développées dans cette thèse, nous avons effectué, dans un premier temps, des simulations numériques en utilisant le modèle de Mann. Le repère de calcul étant eulérien, la méthode des éléments finis virtuels a été employée afin de déterminer le champ de vitesse à l'intérieur du réservoir en fonction du temps. Le maillage volumique du réservoir possède 8746 éléments P_1^+-P_0 (54 333 équations en vitesse, 8746 équations en concentration) et le maillage surfacique est constitué de 964 points de contrôle (figure 7.11). Au plus 3 points de contrôle par élément ont été imposés.

Pour chacune des conditions opératoires mentionnées précédemment, nous avons réalisé des simulations instationnaires en utilisant un pas de temps de 1 sec. Pour chaque pas de temps, 3 itérations de couplage entre les équations de Navier-Stokes et l'équation de la conservation de la matière solide selon le modèle de Mann ont été nécessaires. Dans ces simulations, la

variation de la viscosité est basée sur le modèle de Krieger-Dougherty et la vitesse de sédimentation des particules est obtenue à partir de l'expression de Richardson-Zaki. Le régime stationnaire d'écoulement a été déterminé à partir de l'évolution du coefficient de variation de la concentration en solide. Lorsque ce coefficient ne varie plus, il n'y a donc plus de variation de la concentration à l'intérieur du domaine d'écoulement.

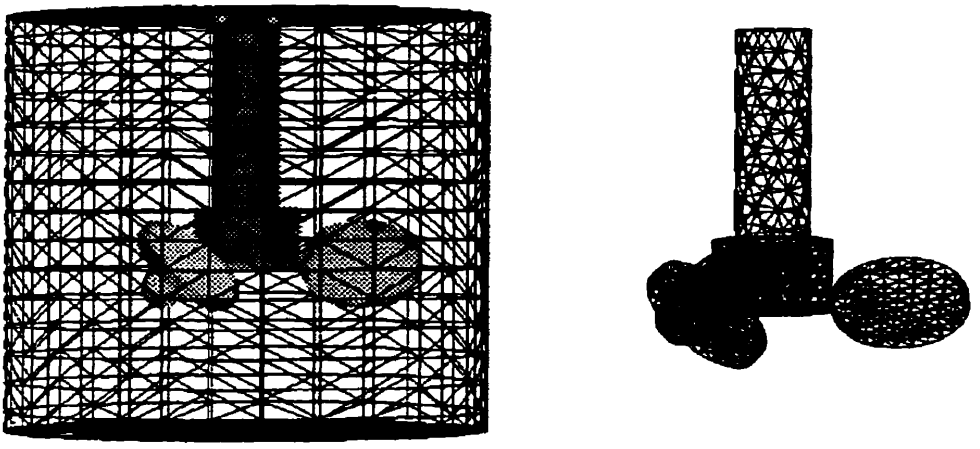


Figure 7.11 Maillage du réservoir (droite) et maillage surfacique de la turbine marine.

Les figures 7.12 à 7.14 présentent les valeurs numériques de l'évolution de la fraction volumique sur un plan de coupe médian du réservoir jusqu'à l'obtention du régime d'équilibre pour chacune des conditions opératoires et également la fraction volumique à la paroi du réservoir à l'équilibre. Puisque nous n'avons pas de mesures expérimentales de la concentration en solide à l'intérieur du bécher, les résultats numériques ne peuvent être comparés aux résultats expérimentaux (fig. 7.8 à 7.10) que d'un point de vue qualitatif. Remarquons cependant que, de façon générale, on note que la simulation numérique permet de prédire l'amoncellement de particules sous l'agitateur. Puisque les gradients de concentration sous l'agitateur sont importants, d'autres simulations à l'aide de maillage beaucoup plus fins seraient nécessaires pour juger de la forme plus exacte et de la concentration en solide dans cette zone. De plus, le modèle de Mann permet de prédire une

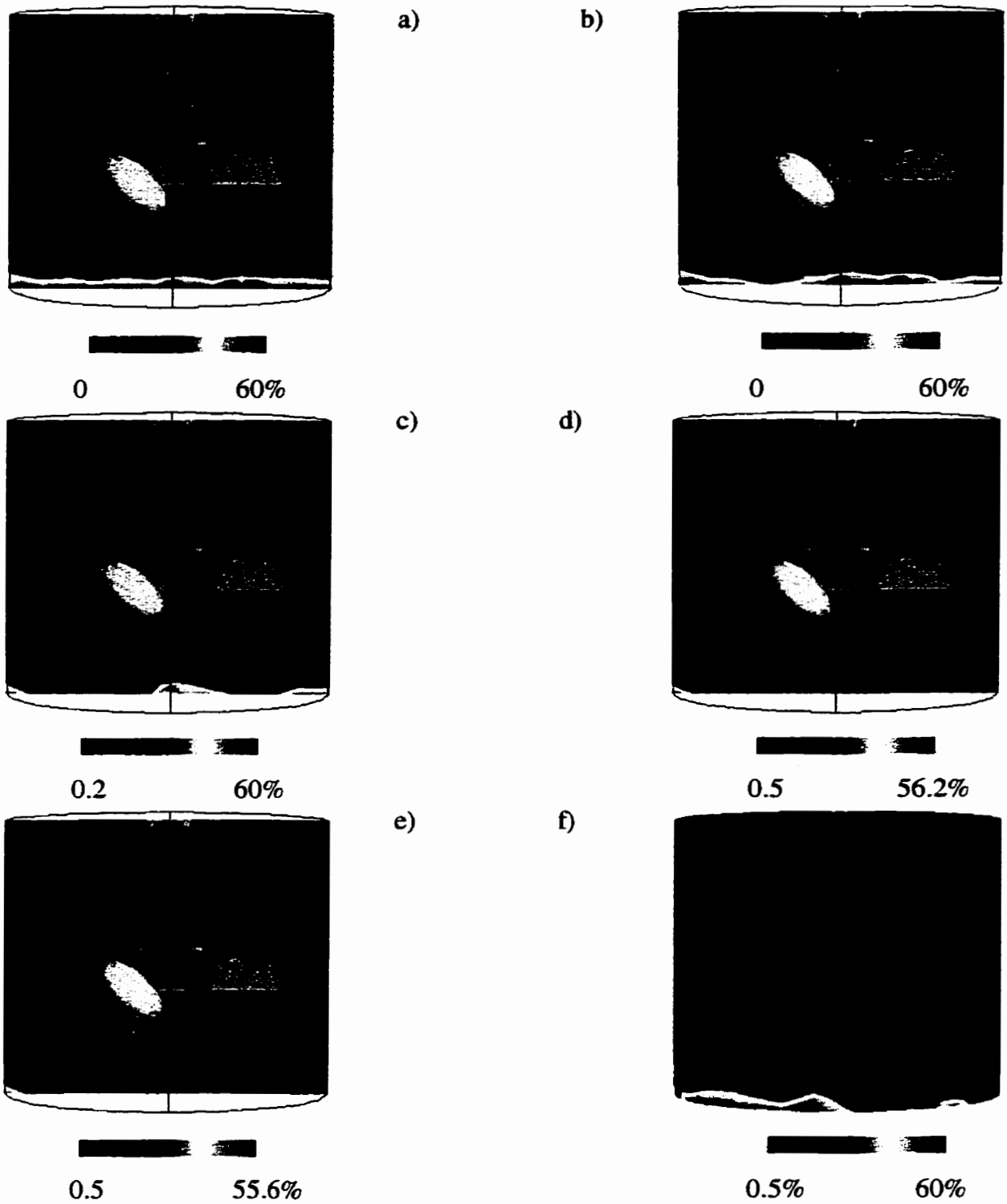


Figure 7.12 Évolution de la fraction volumique pour une vitesse de rotation de 173 tours/min et une fraction volumique moyenne de 2.8% en fonction du temps : a) 0 s, b) 25 s, c) 50 s, d) 90 s et à l'équilibre e) sur un plan médian et f) à la paroi du réservoir.

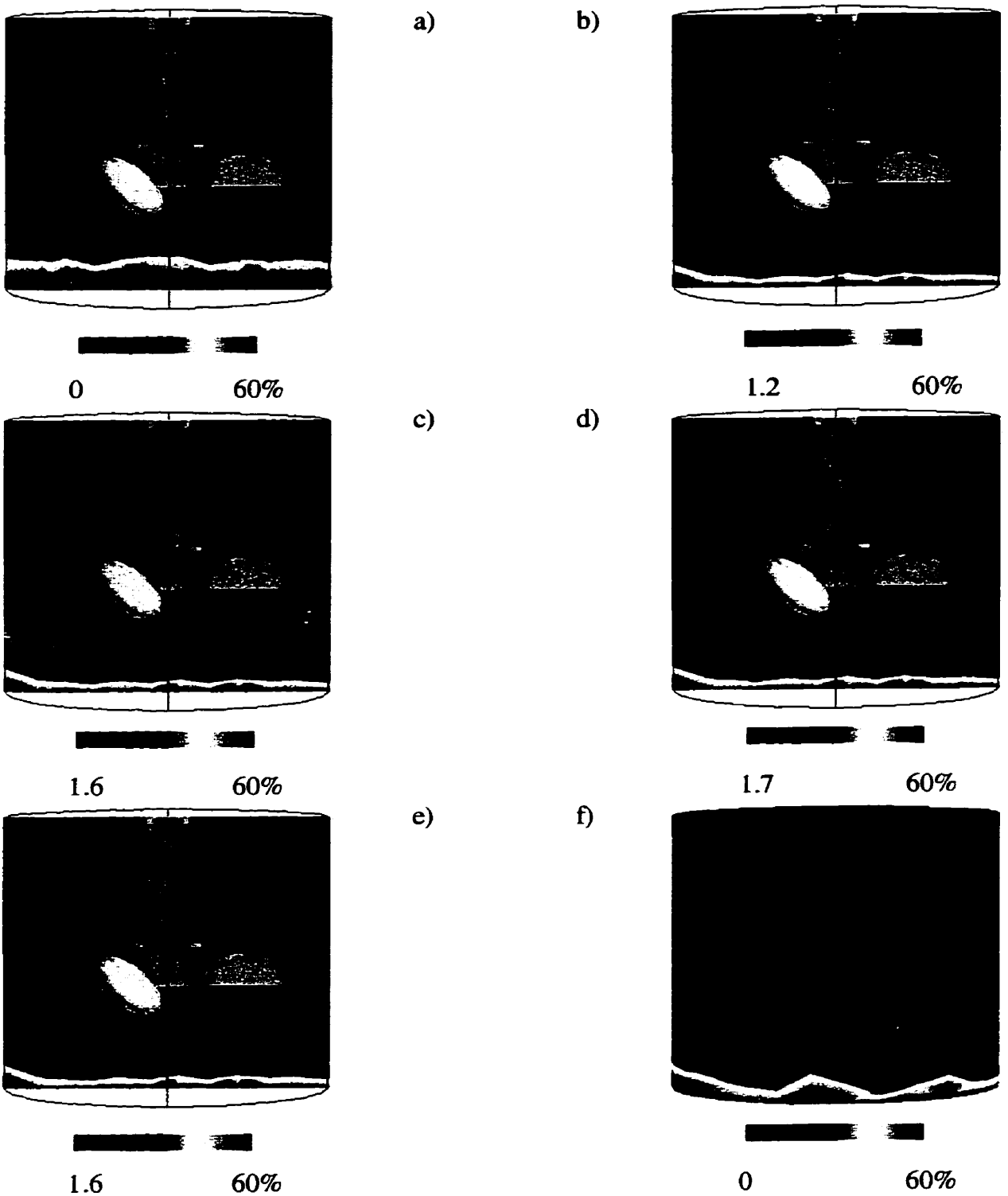


Figure 7.13 Évolution de la fraction volumique pour une vitesse de rotation de 230 tours/min et une fraction volumique moyenne de 7.1% en fonction du temps : a) 0 s, b) 25 s, c) 50 s, d) 90 s et à l'équilibre e) sur un plan médian et f) à la paroi du réservoir.

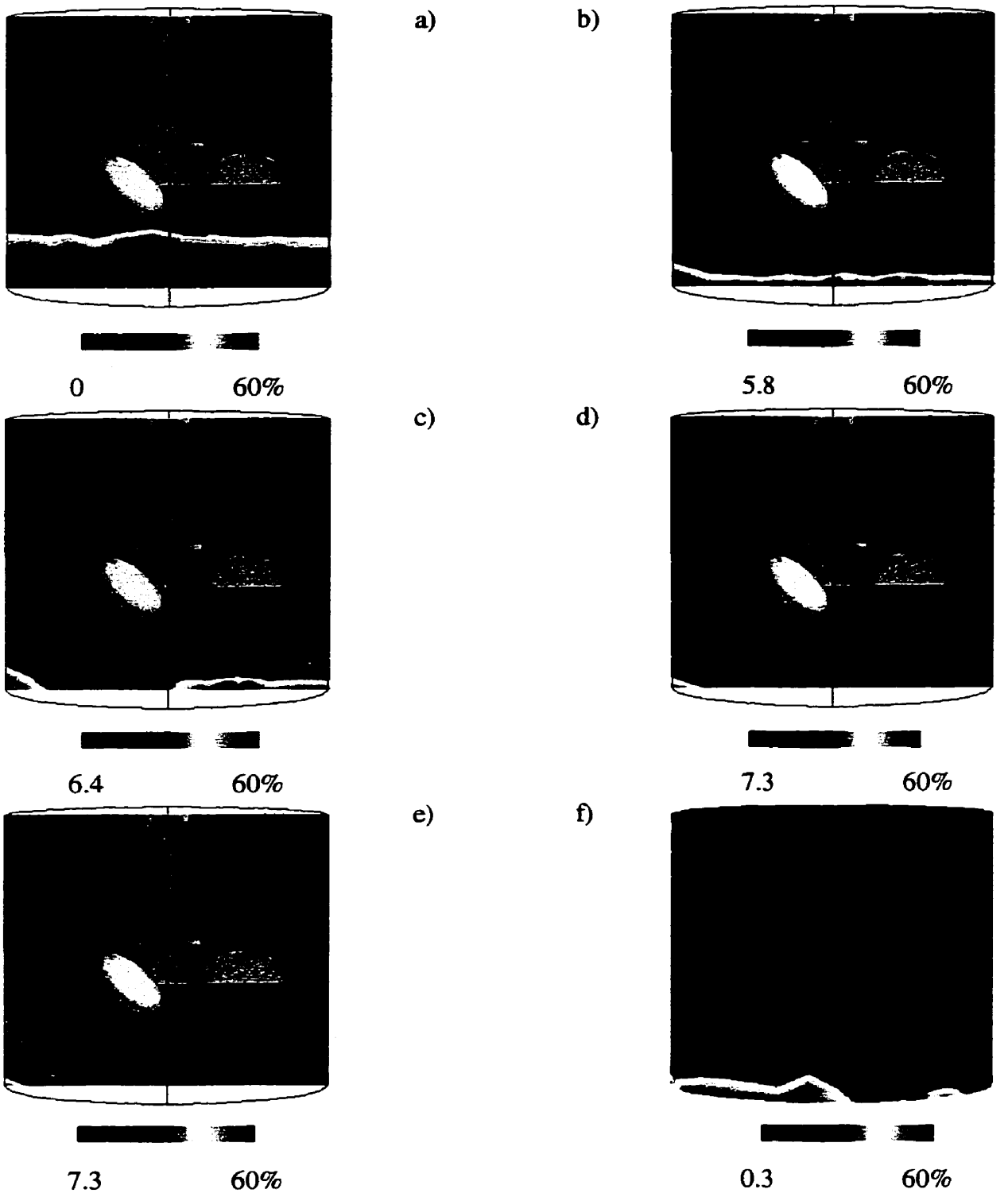


Figure 7.14 Évolution de la fraction volumique pour une vitesse de rotation de 350 tours/min et une fraction volumique moyenne de 11.9% en fonction du temps : a) 0 s, b) 25 s, c) 50 s, d) 90 s et à l'équilibre e) sur un plan médian et f) à la paroi du réservoir.

plus grande remise en suspension avec l'augmentation de la vitesse de rotation et de la concentration moyenne dans le bécher, ce qui est en accord avec l'expérience. En effet, la simulation prédit une fraction volumique de 0.5%, 1.7% et 7.3% dans la partie supérieure du réservoir à l'équilibre pour une fraction volumique moyenne et une vitesse de rotation de (2.8%, 173 tpm), (7.1%, 230 tpm) et (11.9%, 350 tpm). De plus, cette remise en suspension est d'autant plus rapide que la vitesse de rotation est élevée. Finalement, le modèle de Mann permet de prédire de façon adéquate l'accumulation de particules solides dans le fond du bécher à l'équilibre. On remarque, pour une vitesse de rotation 230 tpm et une fraction volumique moyenne de 7.1% (figure 7.13 e et f), une importante couche de particules solides immobiles au fond du bécher possédant une fraction volumique maximale de 60% et une couche un peu plus importante à la paroi, ce qui correspond au résultat expérimental (figure 7.9 e). En ce qui trait à la vitesse de rotation de 350 tpm et une fraction volumique moyenne de 11.9% (figure 7.14 e et f), on observe que la presque totalité des particules solides ont été remises en suspension, exception faite des particules au fond du bécher près de la paroi, ce qui, encore une fois, est en accord avec l'image de la figure 7.10 e. Cependant, le modèle de Mann ne prédit pas très bien la couche de particules solides déposée au fond du réservoir à l'équilibre pour la vitesse de rotation de 173 tpm et une fraction volumique de 2.8% mais permet d'obtenir une bonne estimation de la concentration en solide à la paroi du réservoir. Ce comportement est probablement relié au fait que cette couche de particules est très faible et nécessiterait des cellules de mélange (ou éléments finis) de taille beaucoup plus petite afin de pouvoir prédire ce phénomène.

Afin d'analyser l'influence du modèle de dispersion des particules solides, nous avons effectué, pour les mêmes conditions opératoires, des simulations à l'aide du modèle de Phillips. Puisque ce modèle nécessite l'évaluation du gradient de la norme du tenseur des vitesses de déformation, alors des éléments finis possédant une interpolation quadratique en vitesse doivent être employés. Le maillage utilisé pour les calculs (figure 7.15) est constitué de 19879 éléments finis $P_2^+P_1$ en vitesse (249626 équations) et de 19 879 éléments finis $P_1^+-P_0$

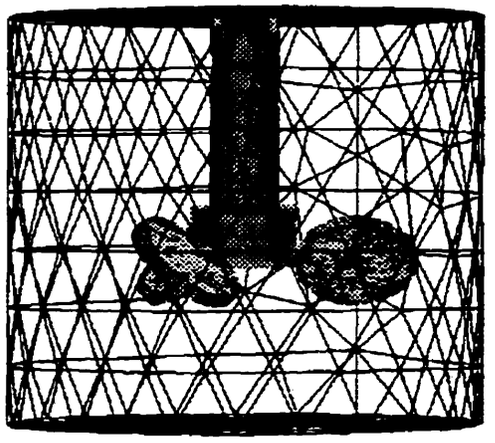


Figure 7.15 Maillage P_2^+-P_1 du réservoir et de la turbine marine (modèle de Phillips).

en concentration (3915 équations). Le modèle de Phillips nécessite donc un effort de simulation très élevé. Pour cette raison, nous avons décidé de déterminer le champ de concentration en régime stationnaire seulement. Pour ce faire, nous avons réalisé des simulations dans un repère lagrangien car seul ce repère nous permet d'obtenir une solution stationnaire en vitesse et en concentration. Tout comme pour le modèle de Mann, la variation de la viscosité a été déterminé à partir du modèle de Krieger-Dougherty et la vitesse de sédimentation des particules en se basant sur l'expression de Richardson-Zaki. Puisque nous cherchions une solution stationnaire, nous avons démarré le calcul en distribuant uniformément les particules dans l'ensemble du réservoir. La convergence des équations de Navier-Stokes et du modèle de Phillips a été obtenue après 6 itérations de couplage.

La figure 7.16 illustre les valeurs numériques de la fraction volumique sur le plan médian du réservoir à l'équilibre pour chacune des conditions opératoires. De plus, nous avons illustré sur cette figure la norme du tenseur des vitesses de déformation car le modèle de Phillips repose sur la migration des particules des régions de hautes vitesses de déformation vers des régions de faibles vitesses de déformation. Premièrement, on constate que le modèle de Phillips ne permet pas de prédire l'entassement maximal des particules au fond du bécher pour

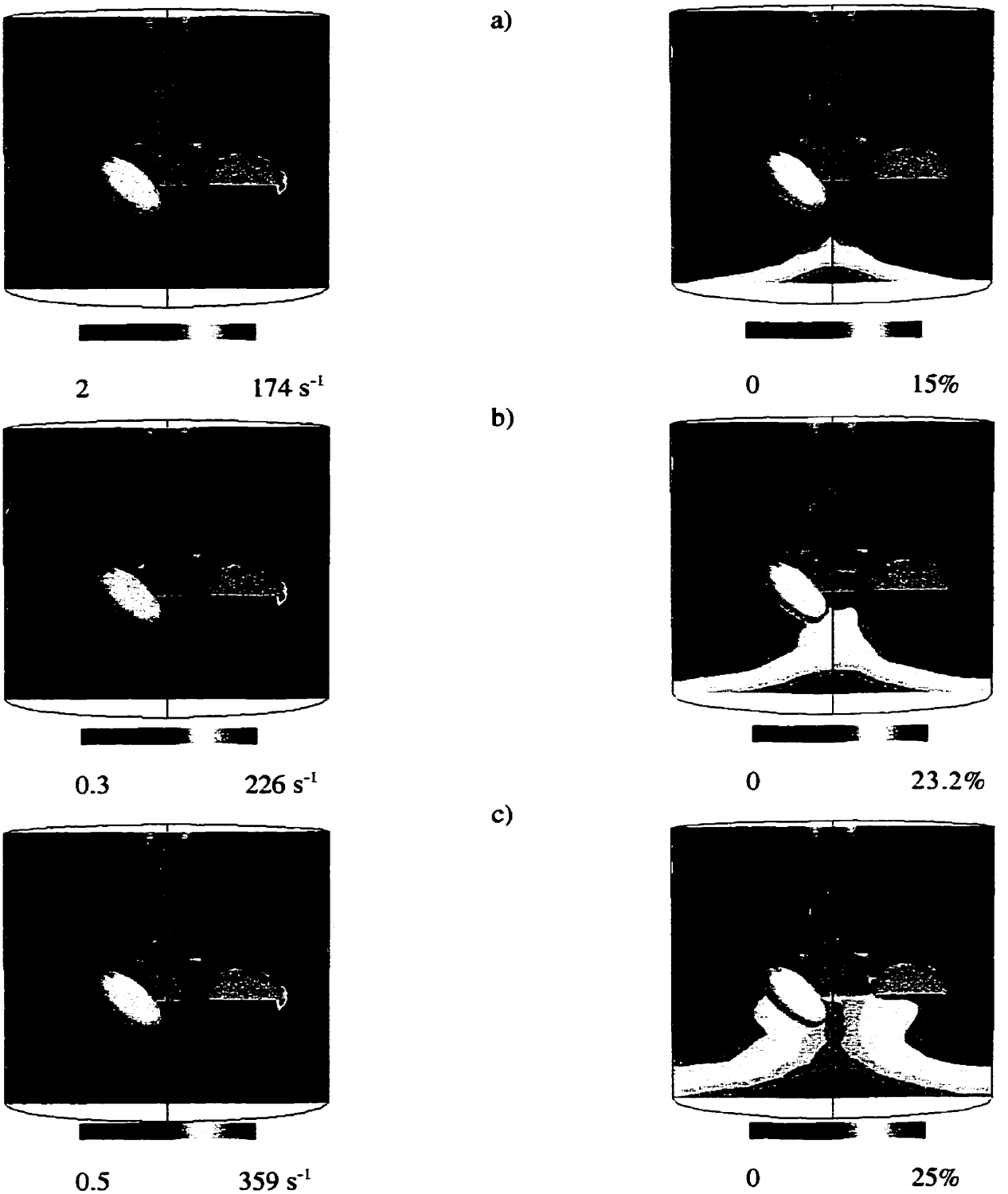


Figure 7.16 Champ de la norme du tenseur des vitesses de déformation (droite) et de la fraction volumique en solide à l'équilibre pour les conditions opératoires suivantes a) 173 tpm, $\overline{\phi}$=2.8%, b) 230 tpm, $\overline{\phi}$=7.1%, et c) 350 tpm, $\overline{\phi}$=11.9% obtenu à l'aide du modèle de Phillips.

les vitesses de 173 et 250 tpm, contrairement à ce qui est observé expérimentalement. Par contre, il permet de prédire l'amoncellement de particules sous l'agitateur; le champ de concentration obtenu pour la vitesse de 350 tpm semble être en accord avec le résultat expérimental (figure 7.10e). Les particules solides migrent sous l'agitateur car la norme de la vitesse de déformation est très faible dans cette zone. Aussi, le modèle de Phillips prédit une concentration nulle très près de la surface libre du réservoir, ce qui semble être en accord avec les résultats expérimentaux pour les vitesses de 173 et 230 tpm (figures 7.8e et 7.9e). De plus, ce modèle permet de prédire une remise en suspension plus importante avec une augmentation de la vitesse d'agitation, ce qui en accord avec les expériences.

Il est difficile, à la lumière de ces résultats, de déterminer le modèle de dispersion de la phase solide le plus adéquat. Il serait donc nécessaire que des mesures expérimentales de concentration soient effectuées afin de juger de la précision des modèles de Mann et de Phillips. Cependant, nous croyons, pour de faibles concentrations volumiques (< 10%), que les interactions fluide-particule dominent par rapport aux interactions particule-particule. Puisque le modèle de Mann est basé sur le transport des particules par convection et la sédimentation, ce modèle est donc bien adapté aux interactions fluide-particule. Par contre, le modèle de Phillips a été développé afin de prendre en compte la migration des particules causée par les interactions particule-particule. D'un point de vue phénoménologique, ces deux modèles semblent donc être complémentaires.

2.2 Système d'agitation complexe : mélangeur coaxial

Dans cette section, nous allons tester les deux modèles de dispersion dans le mélangeur coaxial. Comme nous l'avons illustré au chapitre 6, nous avons caractérisé la remise en suspension de billes de verre rouges à l'intérieur du mélangeur coaxial en fonction du rapport de vitesse entre l'ancre et les tiges de mélange et la TPI. Les propriétés physiques des phases liquide et solide sont identiques à celles présentés au tableau 7.4. La concentration

volumique moyenne dans le mélangeur est de 1%. Initialement, les billes sont déposées au fond du réservoir et le mélangeur est soudainement mis en marche.

Le premier cas étudié est celui où seule l'ancre est en mouvement dans le mélangeur coaxial à une vitesse de 40 tpm. Les simulations ont été effectuées dans le repère lagrangien lorsque l'ancre est fixe. Le maillage utilisé pour les calculs est identique à celui présenté à la figure 5.1. La figure 7.17 présente la fraction volumique de matière solide à l'équilibre dans le mélangeur obtenue des modèles de Mann et de Phillips et la comparaison avec l'expérimentation. Bien que les deux modèles prédisent environ la même concentration en solide au fond du réservoir (Mann: 2.3% et Phillips: 2.9%), le modèle de Mann permet de prédire correctement la position de l'interface solide-liquide à l'équilibre contrairement au modèle de Phillips qui surestime la hauteur de cette interface. Bien que la vitesse de pompage vers le haut est inexistante au dessus de cette interface, le modèle de Phillips a permis une migration des particules au-delà de cette interface car la vitesse de déformation est faible dans les parties centrale et supérieure du mélangeur. Ce résultat vient donc appuyer l'argumentation que le modèle de Phillips n'est pas adapté aux suspensions à faibles concentrations en solide.

En second lieu, nous avons étudié la remise en suspension lorsque seules les tiges de mélanges et la TPI sont en mouvement et animées d'une vitesse de 160 tpm. Même dans le repère lagrangien lié à l'ancre, cette simulation a nécessité l'utilisation de la méthode des éléments finis virtuels afin de déterminer le champ de vitesse à l'intérieur du réservoir car la position des tiges de mélanges changent en fonction du temps. Seul le modèle de Mann a été employé afin de prédire la distribution des particules solides au sein du mélangeur pour la raison évoquée précédemment. Le régime stationnaire d'écoulement a été atteint suite à 20 rotations des tiges de mélange et de la TPI, ce qui a nécessité environ 20 jours de temps calcul sur un IBM RISC6000/590. Le temps de calcul élevé provient du fait que l'on doit effectuer 20 pas

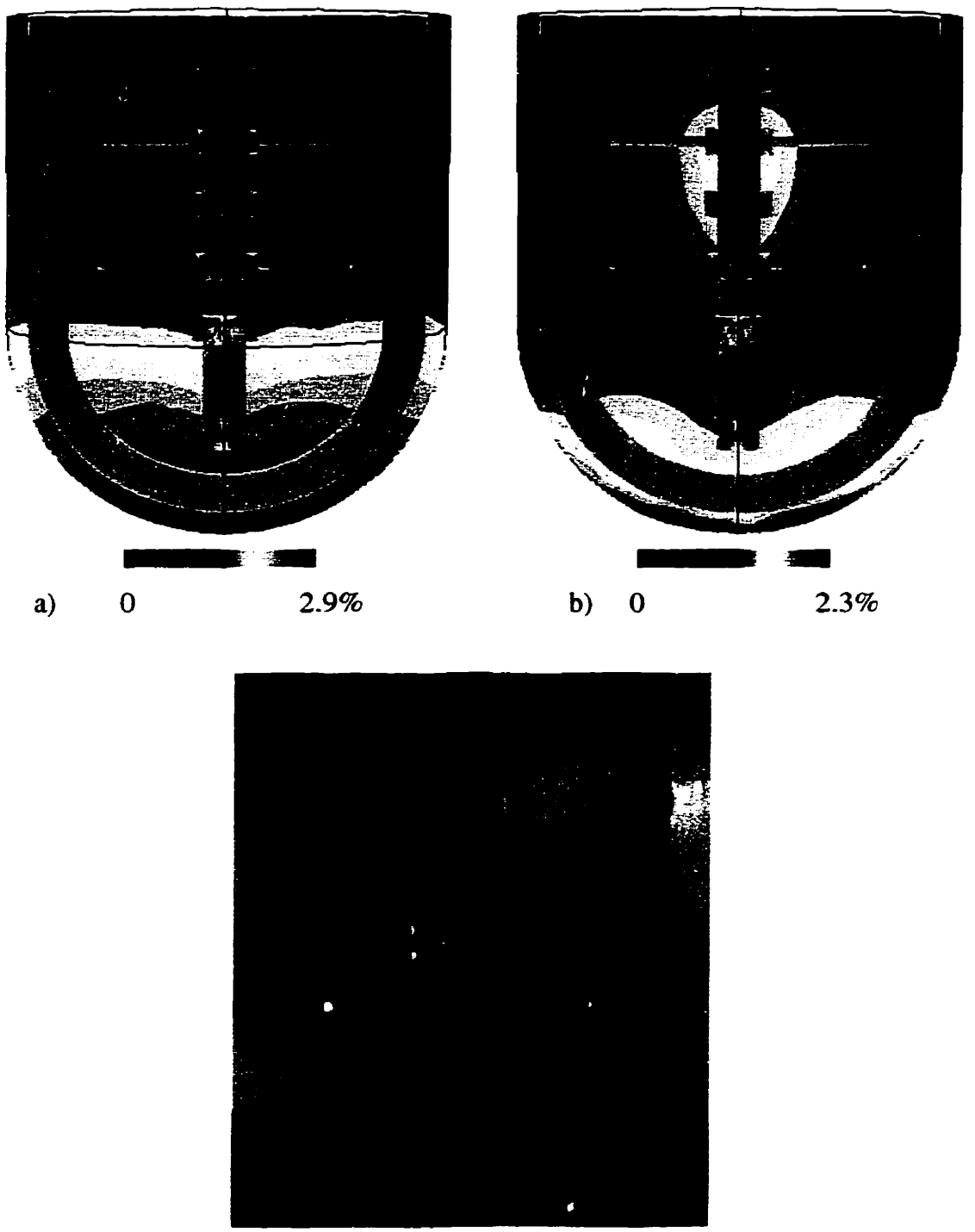
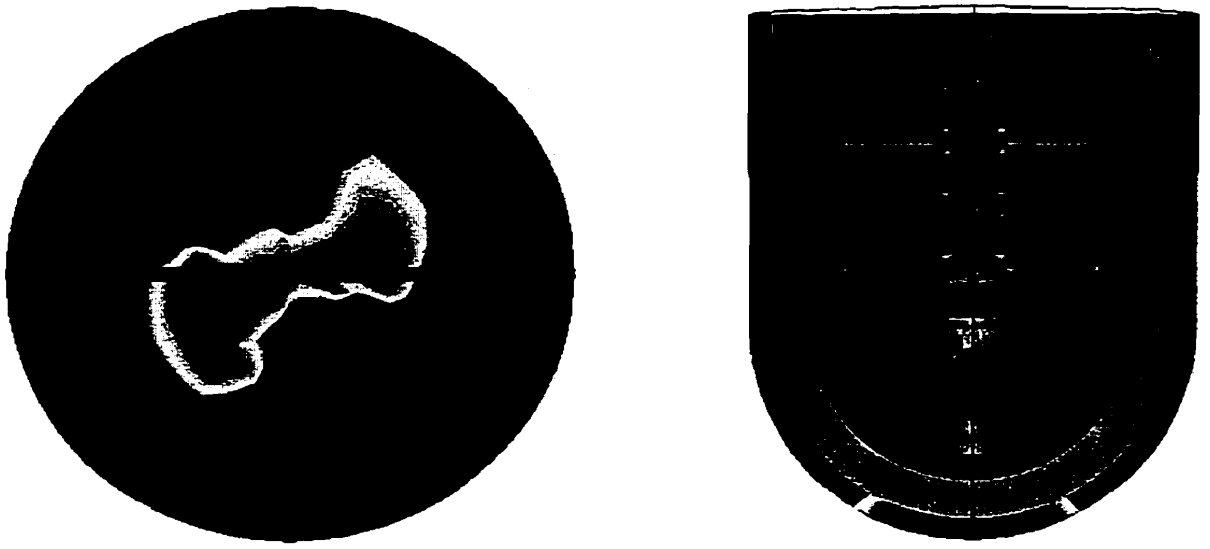


Figure 7.17 Prédiction de la fraction volumique à l'équilibre pour les modèle de a) Mann et de b) Phillips et comparaison à l'expérimentation lorsque seul l'ancre est en animée d'une vitesse de 40 tpm pour une concentration moyenne en particules de 1%.

de temps pour chaque rotation complète des tiges de mélange et la TPI. De plus, pour chaque pas de temps, 3 itérations de couplage entre les équations de Navier-Stokes et l'équation de conservation des particules solides du modèle de Mann doivent être effectuées. Sachant que le nombre d'équations en vitesse est de 106295 et en concentration de 17083, alors nous avons du résoudre 3600 fois les deux systèmes matriciels précédents! La figure 7.18 présente les résultats numériques et expérimentales de la répartition des particules solides dans le réservoir. Le résultat numérique est en accord avec l'expérimentation, c'est-à-dire qu'aucune particule solide n'a été remise en suspension. De plus, bien que les tiges de mélange et la TPI tournent dans la direction anti-horaire, les particules se sont déplacées dans la direction horaire et se sont accumulées derrière l'ancre. Le modèle de Mann a donc réussit à prédire le mouvement de ces particules au fond du réservoir, phénomène qui n'était pas évident a priori.

Finalement, nous présentons des résultats partiels de remise en suspension des billes de verre pour une vitesse de rotation des tiges de mélange et la TPI de 160 tpm et un rapport de vitesse R_N (N_c/N_a=4) égal à 4. Ces résultats sont qualifiés de partiels car nous avons estimé à environ 5 à 6 mois le temps calcul afin d'atteindre le régime stationnaire d'écoulement, ce qui déborde le cadre de ce travail. Pour cette raison, nous avons décidé de présenter les résultats obtenus à l'aide du modèle de Mann pour les 60 premiers tours de rotation des agitateurs centraux, ce qui a nécessité tout près de 60 jours de temps calcul sur un IBM RISC6000/590. Bien que partiels, les résultats de cette simulation, présentés à la figure 7.19, contiennent des informations fort intéressantes. Premièrement, on note une surconcentration en particules solides dans le sillage de l'ancre, ce qui est en accord avec l'expérimentation (figure 6.4). Avec le temps, cette surconcentration diminue en importance car le fond de la cuve s'appauvrit en particules solides, diminuant par le fait même la quantité de solide pouvant être aspirée dans ce sillage. En ce qui concerne l'interface solide-liquide, cette dernière s'élève de façon régulière dans la cuve en fonction du temps. Tout porte à croire que cette interface



a) vue plongeante : fond du réservoir

0

60%

b) plan médian

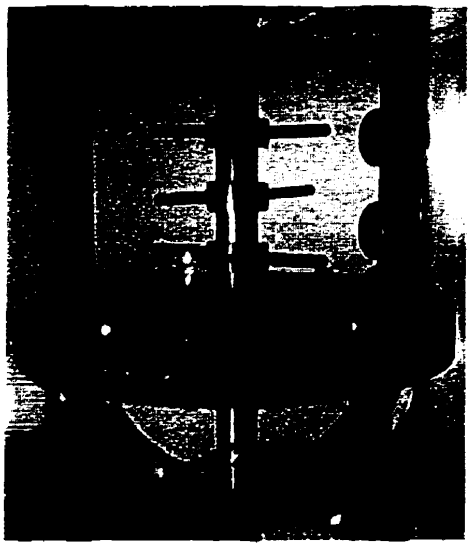


Figure 7.18 Prédiction de la fraction volumique à l'équilibre pour le modèle de Mann et comparaison à l'expérimentation lorsque seules les tiges de mélange et la TPI sont en animées d'une vitesse de 160 tpm pour un concentration moyenne en particules de 1%.

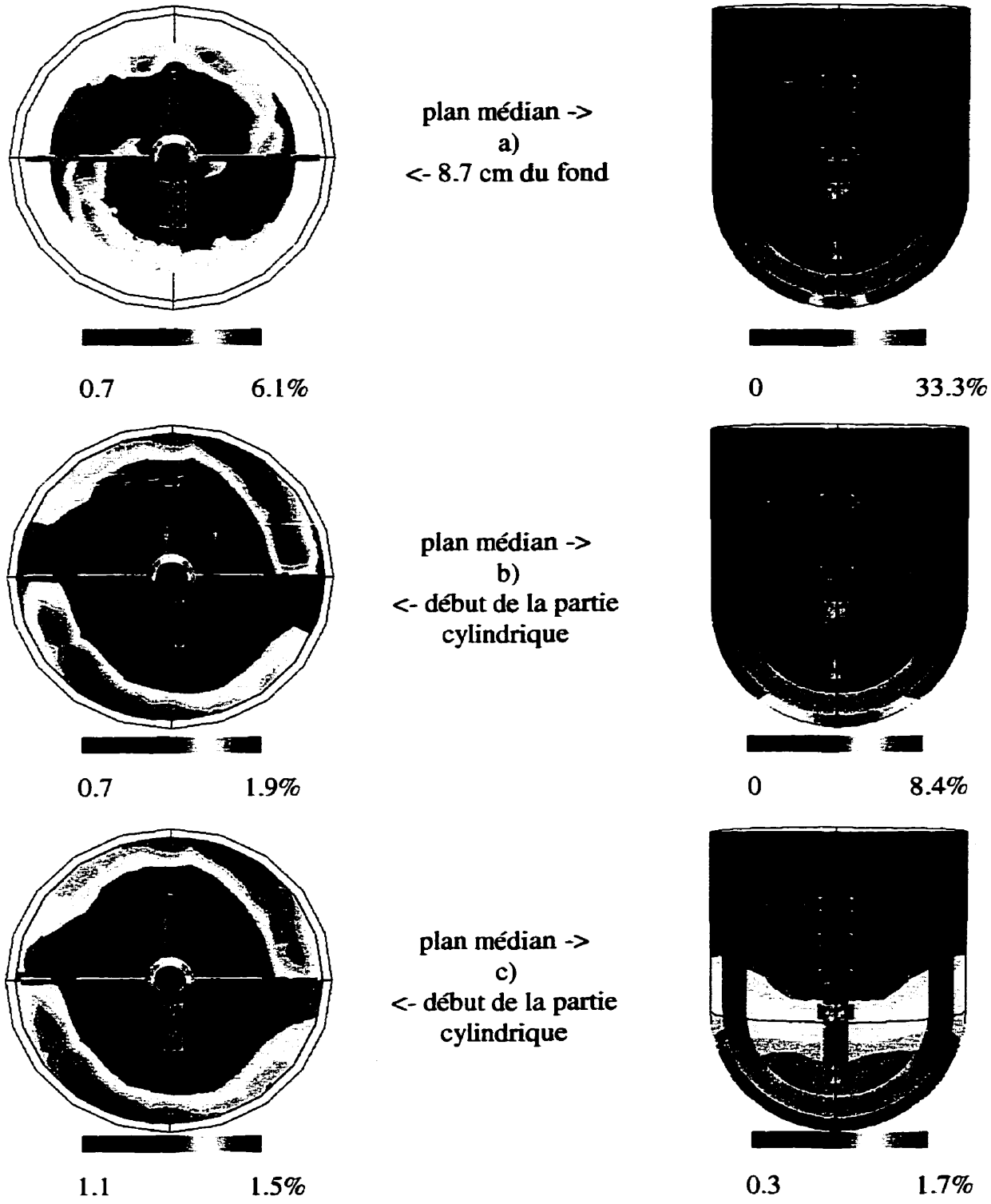


Figure 7.19 Prédiction de la fraction volumique en fonction du nombre de tours des agitateurs centraux : a) 10 tours, b) 20 tours et c) 60 tours pour une vitesse des tiges de mélange et la TPI de 160 tpm et un rapport de vitesse R_N égal à 4.

va s'élever davantage dans la cuve et atteindra probablement la partie supérieure du réservoir, tel qu'illustré à la figure 6.4. On remarque aussi que la partie centrale du réservoir (où sont situés les tiges de mélanges et la TPI) s'appauvrit en particules solides. Bien que les résultats expérimentaux de la figure 6.4 ne soient pas en mesure d'illustrer ce phénomène, nous avons constaté visuellement que la concentration, près des agitateurs centraux, était plus faible que la concentration dans le reste du réservoir.

Suspension de kaolin concentrée

Puisque le modèle de Phillips est adapté aux cas de suspensions concentrées pour lesquelles les interactions particule-particule sont importantes, nous avons décidé de tester la prédiction de ce modèle pour les suspensions de kaolin à 68% massique afin de s'affranchir de l'homogénéité en concentration dans le mélangeur coaxial. Pour des raisons évidentes de temps calcul, nous choisi d'étudier le cas où seule l'ancre est en rotation dans la cuve de mélange. Puisque les suspensions de kaolin (figure 6.10) possèdent un comportement rhéologique différent du modèle de Krieger-Dougherty, il est nécessaire d'évaluer la variation de la viscosité par rapport à fraction volumique ($\partial\eta/\partial\phi$) dans l'expression du modèle de Phillips [équ. 4.35]. Par contre, nous nous sommes aperçus, pour des petites tailles de particules tel le kaolin qui possède un diamètre moyen d'environ 2 µm, que le modèle de Phillips ne prédit aucune migration par cisaillement de particules solides dans le réservoir. En effet, puisque le terme diffusif du modèle de Phillips est fonction du carré du diamètre des particules, alors plus les particules sont petites, plus le coefficient de diffusion est faible. Bien que ce résultat numérique vient corroborer les mesures du pourcentage solide de kaolin dans le mélangeur coaxial présentées au chapitre 6, nous croyons que le modèle de Phillips n'est pas apte à prédire la migration de si petites particules. Par conséquent, des mesures RMN en concentration pour des suspensions de kaolin seraient nécessaires afin d'établir le phénomène de migration et d'établir la valeur des constantes empiriques (K_c et K_η) du modèle de Phillips.

- CHAPITRE VII -

CONCLUSION
ET
RECOMMANDATIONS

Le but de ce travail consistait à caractériser numériquement et expérimentalement l'hydrodynamique dans un mélangeur coaxial à double mouvement possédant une nouvelle configuration d'agitateurs, c'est-à-dire une ancre située en périphérie du réservoir tournant à basse vitesse et des agitateurs centraux composés de tiges de mélange et une turbine à pales inclinées tournant à haute vitesse dans la direction opposée. Plus spécifiquement, nous devions caractériser les paramètres macroscopiques tels la puissance d'agitation, la capacité de mouillage et de dispersion et la puissance d'agitation nécessaires lors de la préparation des suspensions concentrées de kaolin.

Pour réaliser cette étude, nous avons conçu un montage expérimental original composé d'un mélangeur coaxial contra-rotatif d'une capacité de 60 litres possédant un tachymètre, un couplemètre, une trémie d'alimentation et un alimentateur vibrant. De plus, un jeu de poulies nous a permis de varier le rapport de vitesse ($R_N = 0, 4, 8, 24, \infty$) entre l'ancre et les agitateurs centraux.

Sur le plan de la modélisation, nous avons implanté dans le logiciel POLY3D™ les modèles de Mann et de Phillips qui permettent de prédire la dispersion des particules solides lors de l'écoulement en trois dimensions. En ce qui concerne le modèle de Mann, basé sur le transport convectif et la sédimentation des particules solides, nous avons développé une nouvelle approche de résolution basée sur une grille non-structurée représentée par des éléments finis

tétraédriques. De plus, nous avons développé une stratégie de calcul qui limite la valeur de la concentration à ϕ_m pour des écoulements instationnaires seulement. Pour sa part, le modèle de Phillips, basé sur le transport convectif et la migration des particules par cisaillement, a été, pour la première fois, implanté et testé en trois dimensions.

Bien que le mélangeur coaxial possède une cinématique complexe de rotation, les résultats numériques obtenus à partir de la méthode des éléments finis virtuels sont en très bon accord avec les mesures expérimentales tant pour les fluides newtoniens que pour les fluides non newtoniens de type loi de puissance. Ces résultats ont permis d'établir que la constante K_p est fonction du rapport de vitesse et de l'indice loi de puissance alors que la constante K_s est seulement fonction du rapport de vitesse, ces deux constantes étant des grandeurs caractéristiques d'un système d'agitation. De plus, tous les résultats obtenus ont été regroupés sur un courbe maîtresse permettant d'estimer la puissance d'agitation en fonction du rapport de vitesse et des paramètres rhéologiques. Finalement, des essais expérimentaux nous ont permis de caractériser le nombre de puissance (N_p) et par le fait même la puissance d'agitation en régime turbulent d'écoulement en fonction du rapport de vitesse.

L'étude numérique des profils d'écoulement dans le mélangeur coaxial, pour des fluides newtoniens et non newtonien du type loi de puissance, nous a permis de caractériser la vitesse de pompage axiale vers le haut, paramètre important lors du mécanisme de remise en suspension des particules solides. Nous avons montré, pour une vitesse donnée de l'ancre, qu'une augmentation du rapport de vitesse favorise un accroissement du pompage axial. Par contre, pour une vitesse donnée des agitateurs centraux, une augmentation du rapport de vitesse crée une diminution du pompage axial vers le haut.

À partir d'une technique d'analyse d'image vidéo, nous avons étudié la remise en suspension d'une suspension diluée (1% v/v) de billes de verre à l'intérieur du mélangeur coaxial en fonction du rapport de vitesse pour une vitesse donnée des agitateurs centraux. Nous avons

déterminé que la vitesse de l'ancre et le rapport de vitesse jouent un rôle important sur le mécanisme de remise en suspension. De plus, nous avons estimé que le mélangeur coaxial proposé nécessitait environ 30 fois mois d'énergie qu'un système d'agitation simple tel une turbine à pales inclinées afin d'assurer une remise en suspension complète des particules solides. La présence de l'ancre au fond du réservoir permet d'aspirer les particules solides dans son sillage et favorise par le fait même la remise en suspension dans l'ensemble du réservoir.

Afin de déterminer la capacité de mouillage et de dispersion du mélangeur coaxial, nous avons préparé quatre suspensions de kaolin à 68% massique à l'aide du mélangeur coaxial et comparé les résultats obtenus à ceux d'un système d'agitation souvent utilisé dans l'industrie, à savoir la turbine défloculeuse. Premièrement, mentionnons que la configuration géométrique du mélangeur coaxial proposée s'est avérée adéquate afin de préparer des suspensions concentrées de kaolin jusqu'à 68% massique. Nous avons montré que l'énergie de mouillage est directement reliée au degré d'humidité initial du kaolin et à la cinétique d'alimentation. De plus, le mélangeur coaxial est beaucoup moins énergivore que la turbine défloculeuse pendant la période de mouillage. Par contre, la turbine défloculeuse favorise un meilleur mélange dispersif si l'on s'en tient aux mesures rhéologiques comme critère de qualité. Une fois la suspension de pigments préparée, nous avons ajouté les ingrédients nécessaires afin d'obtenir la sauce de couchage. Bien que ces résultats soient préliminaires, nous avons démontré qu'il n'y avait pas de différence notable sur la machinabilité des sauces préparées à l'aide du mélangeur coaxial et la turbine défloculeuse. La simulation numérique n'a pas permis de prédire adéquatement la puissance d'agitation des suspensions concentrées en fonction du rapport de vitesse. Cette mauvaise prédiction est probablement reliée à l'incertitude du modèle rhéologique établi à partir d'un rhéomètre en cisaillement simple pour lequel les effets élongationnels ne sont donc pas pris en compte. Par contre, pour les sauces de couchage, la courbe maîtresse obtenue précédemment pour les fluides non newtoniens de type loi de puissance nous a permis de prédire une puissance d'agitation comparable aux mesures

expérimentales car les sauces de couchage possèdent un comportement rhéologique se rapprochant du modèle loi de puissance à basse vitesse d'agitation.

Après avoir validé le modèle de Mann à un cas de sédimentation libre et le modèle de Phillips aux mesures de concentration RMN dans un système de Couette, nous avons étudié la qualité de dispersion de ces deux modèles afin de caractériser la remise en suspension de billes de verre dans un système d'agitation simple (hélice marine) et complexe (mélangeur coaxial). Nous avons montré, pour le cas de l'hélice marine, que les résultats numériques des modèles de Mann et de Phillips permettent d'obtenir des résultats qui sont qualitativement en accord avec les observations expérimentales. Par contre, seul le modèle de Mann a permis de prédire la position de l'interface solide-liquide lorsque l'ancre est en rotation dans le mélangeur. De plus, le modèle de Mann a permis de prédire l'absence de remise en suspension des billes de verre lorsque seules les tiges de mélange et la TPI sont en mouvement. Pour ce qui est du modèle de Phillips appliqué aux suspensions concentrées de kaolin, aucune variation de concentration n'a été prédite par ce modèle lorsque seule l'ancre est en mouvement dans le mélangeur coaxial. Nous croyons que les constantes empiriques K_c et K_η du modèle de Phillips ne sont pas adaptées au cas du kaolin pour lequel le diamètre moyen de particules est de l'ordre de 2 μm.

Concernant la poursuite de ces travaux, plusieurs sujets de recherche pourraient être abordés, à savoir :

1) l'influence du sens de rotation des agitateurs. Il s'agirait de refaire la présente étude pour un mélangeur à mouvement co-rotatif afin de clarifier le rôle du sens de rotation sur les performances du mélangeur;
2) le rôle de l'effet de la concentration et de la taille des particules solides sur le mécanisme de remise en suspension pour une suspension newtonienne diluée modèle et lorsque le fluide suspendant possède une rhéologie non newtonienne;
3) l'influence du type et du nombre d'agitateurs centraux (turbines défloculeuses, turbines

à pales inclinées) sur les performances du mélangeur;

4) le développement d'une technique de mesure afin d'estimer la concentration locale en particules solides dans le réservoir afin de pouvoir valider les résultats numériques;
5) des mesures RMN de concentration en matière solide de particules de kaolin dans le système de Couette proposé par Phillips afin de s'affranchir de l'existence d'une migration de ces particules par cisaillement et déterminer les valeurs des constantes empiriques K_c et K_η du modèle de Phillips afin de prendre en compte la diffusion des particules de kaolin?
6) le rôle de la viscosité élongationnelle de la suspension, ce qui pourrait expliquer la défaillance du modèle de la double loi de puissance (rhéofluidifiant-rhéoépaississant) à prédire la puissance d'agitation du mélangeur coaxial lorsque le rapport de vitesse est élevé;
7) la réalisation d'une étude de la finesse du maillage sur la qualité de prédiction du modèle de Mann appliquée aux systèmes d'agitation tels l'hélice marine et le mélangeur coaxial;
8) l'amélioration de la vitesse de convergence lors de la résolution des équations de Navier-Stokes et du modèle de Mann en régime instationnaire à l'aide de la méthode des élémenis finis virtuels afin de rendre le temps calcul plus réaliste.

- RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES -

ACRIVOS A. (1994). Shear-Induced Particle Diffusion in Concentrated Suspensions of Noncolloidal Particles, J. Rheol., 39 (5), 813-826.

ACRIVOS A., MAURI R. et FAN X. (1993). Shear-Induced Resuspension in a Couette Device, Int. J. Multiphase Flow, 19 (5), 797-802.

ALESSANDRINI A., LAPASIN R. et STURZI F. (1982). The Kinetics of Thixotropic Behaviour in Clay/Kaolin Aqueous Suspensions, Chem. Eng. Commun., 17, 13-22.

ALTOBELLI S.A., GIVLER R.C. et FUKUSHIMA E. (1991). Velocity and Concentration Measurements of Suspensions by Nuclear Magnetic Resonance Imaging, J. Rheol., 35 (5), 721-735.

ARMENANTE P.M. et NAGAMINE E.U. (1998). Effect of Low Off-bottom Impeller Clearance on the Minimum Agitation Speed for Complete Suspension of Solids in Stirred Tanks, Chem. Eng. Sci., 53 (9), 1757-1775.

BABUSKA I. (1973). The Finite Element Method with Lagrangian Multipliers, Num. Math., 20, 179-192.

BAKKER A., FASANO J.B. et MYERS K.J. (1994). Effects of Flow Pattern on the Solids Distribution in a Stirred Tank, I.Chem.E. Symposium Series, Bradford, United-States, 136, 1-8.

BALDI G., CONTI R. et ALARIA E. (1978). Complete Suspension of Particles in Mechanically Agitated Vessels, Chem. Eng. Sci., 33, 21-25.

BARNES H.A., EDWARDS M.F. et WOODCOCK L.V. (1987). Application of Computer Simulations to Dense Suspension Rheology, Chem. Eng. Sci., 42, 591-608.

BARNES H.A, HUTTON J.F. et WALTERS K. (1989). An Introduction to Rheology - Rheology of Suspensions (chapitre 7), Ed. Elsevier.

BARRESI A. et BALDI G. (1987). Solid Dispersion in an Agitated Vessel, Chem. Eng. Sci., 42 (12), 2949-2956.

BARRESI A.A., KUZMANIC N. et BALDI G. (1994). Continuous Sampling of a Slurry from a Stirred Vessel : Analysis of the Sampling Efficiency and Affecting Parameters, I.Chem.E. Symposium Series, 136, Bradford, United-States, 17-24.

BATCHELOR G.K. et GREEN J.T (1972). The Determination of the Bulk Stress in a Suspension of Spherical Particles to Order C2, J. Fluid Mechanics, 56, 401-427.

BERTRAND F., TANGUY P.A. et THIBAULT F. (1997). A Three-Dimensional Fictitious Domain Method for Incompressible Flow Problems, Int. J. Num. Meth. Fluids, 25, 719-736.

BERTRAND F. (1995). Modélisation tridimensionnelle du procédé de malaxage à mouvement planétaire de fluides visqueux rhéologiquement complexes, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, France.

BERTRAND F.H., GADBOIS M.R. et TANGUY P.A. (1992). Tetrahedral Elements for Fluid Flow, Int. J. Num. Meth. Eng., 33, 1251-1267.

BERTRAND F. et TANGUY P.A. (1999). Toward an Efficient Krylov-Based Uzawa Algorithm for Solving the Navier-Stokes Equations, à paraître, 30 pages.

BIRD R.B., STEWART W.E. et LIGHTFOOT E.N. (1960). Transport Phenomena, John Wiley & Sons Publishers, pp. 780.

BLANC R. et GUYON E. (1991). La physique de la sédimentation, La Recherche, juillet-août, 866-873.

BOHNET M. et NIESMAK G. (1980). Distribution of Solids in Stirred Suspensions, Ger. Chem. Eng., 3, 57-65.

BREZZI F. (1974). On the Existence, Uniqueness and Approximation of Saddle-Point Problems Arising from lagrangian Multipliers, RAIRO Analyse Numérique, 8, 129-151.

BROWNS G.G. (1950). Unit Operations, John Wiley & Sons Publisher, pp.

BRUCATO A., MAGELLI F., NOCENTINI M. et RIZZUTI L. (1990). An Application of the Network-of-Zones Model to Solids Suspension in Multiple Impeller Mixers, Trans. Instn. Chem. Engrs., 69, Part A, 43-52.

BRUCATO A. et RIZZUTI L. (1988). The Application of the Network-of-Zones Model to Solid-Liquid Suspensions, Proceedings of the 6th European Conference on Mixing, Pavia, Italy, 273-280.

BURDEN R.L. et FAIRES J.D. (1989). Numerical Analysis, Fourth Edition, PWS-KENT publisinh compagny, Boston, 729 pages.

BUURMAN C. (1990). Stirring of Concentrated Slurries: a Semi-Empirical Model for Complete Suspension at High Solids Concentrations and 5 m^3 Verification Experiments, Fluid Mixing IV, I. Chem. E. Symposium Series, 121, 343-351.

BUURMAN C., RESOORT G. et PLASCHKES A. (1986). Scaling-Up Rules for Solids Suspension in Stirred Vessels, Chem. Eng. Sci., 41 (11), 2865-2871.

CARREAU P.J. et LAVOIE P.-A. (1993). Rheology of Coating Colors : a Rheologist Point of View, TAPPI Proceedings, Advanced Coating Fundamentals, 1-12.

CHAOUKI J., LARACHI F. et DUDUKOVIC M.P. (1997). Noninvasive Tomographic and Velocimetric Monitoring of Multiphase Flows, Ind. Eng. Chem. Res., 36, 4476-4503.

CHONG J.S., CHRISTIANSEN E.B. et BAER A.D. (1971). Rheology of Concentrated Suspensions, J. Applied Polym. Sci., 15, 2007-2021.

COULSON J.M. et RICHARDSON J.F. (1978). Chemical Engineering, Volume 1, 3rd edition, Pergamon Press, New York.

CUMBY T.R. et SLATER N.K.H. (1990). A Model of the Vertical Distribution of Solids During Slurry Mixing, J. Agric. Eng. Res., 45, 187-207.

DAVIS R.H. et ACRIVOS A. (1985). Sedimentation of Noncolloidal Particles at low Reynolds Numbers, Ann. Rev. Fluid Mech., 17, 91-118.

DEMIRDZIC I. et PERIC M. (1990). Finite Volume Method for the Prediction of Fluid Flow in Arbitrarily Shaped Domains with Moving Boundaries, Int. J. Num. Meth. in Fluids, 10, 771-790.

DREWER G.R., AHMED N. et JAMESON G.J. (1994). Suspension of High Concentration Solids in Mechanically Stirred Vessels, I.Chem.E. Symposium Series, 136, Bradford, United-States, 41-48.

DUDCZAK J. (1994). A Modified Network-of-Zones Model of Mixing, Trans. Instn. Chem. Engrs., 72, Part A, Sptember, 651-656.

DUQUESNOY J.A., THIBAULT F. et TANGUY P.A. (1995). Dispersion of Clay Suspensions at High Solids Content, Private Communication, MacMillan Bloedel, British Columbia.

EILERS P.A. (1941). Kolloid Z., 97, 313-321.

EINENKEL W.-D. (1980). Influence of Physical Properties and Equipment Design on the Homogeneity of Suspensions in Agitated Vessels, Ger. Chem. Eng., 3, 118-124.

EINSTEIN A. (1906). Eine neue Bestimmung der Molekuldimension, Ann. Physik, 19, 289.

EKLUND D. et TEIRFOLK J.-E. (1981). Dispersion of Talc for Use as a Coating Pigment, TAPPI J., 64 (5), 63-65.

ENGSTROM G. et RIGDAHL M. (1987). The Implication of Viscoelasticity of Coating Rheology and Structure, TAPPI J., 42, 91-94.

FAJNER D., MAGELLI F., NOCENTINI M. et PASQUALI G. (1985). Solids Concentration Profiles in a Mechanically Stirred and Staged Column Slurry Reactor, Chem. Eng. Res. Des., 63, 235-240.

FANG Z. et PHAN-THIEN N. (1995). Numerical Simulation of Particle Migration in Concentrated Suspensions by a Finite Volume Method, J. Non-Newt. Fluid Mech., 5, 67-81.

FERREIRA P.J., RASTEIRO M.G. et FIGUEIREDO M.M. (1994). A New Approach to Measuring Solids Concentration in Mixing Tanks, Advanced Powder Technology, 5 (1), 15-24.

FORTIN M. et FORTIN A. (1985). A Generalization of Uzawa's Algorithm for the Solution of the Navier-Stokes Equations, Comm. Appl. Num. Meth., 1, 205-208.

FORTIN M. et GLOWINSKI R. (1982). Méthode du Lagrangien augmenté, Dunod, Paris.

GADALA-MARIA F. et ACRIVOS A. (1980). Shear-Induced Structure in a Concentrated Suspension of Solid Spheres, J. Rheol., 24, 799-814. .

GARIN G., RABOT Y. et POUYET J. (1994). Concentrated Suspensons : Coating Color Viscosity at High Shear Rate, Proceedings of the 4th European Rheology Conference, Seville, 642-644.

GEISLER R.K., BUURMAN C. et MERSMANN A.B. (1993). Scale-up of the Necessary Power Input in Stirred Vessels with Suspensions, Chem. Eng. J., 51, 29-39.

GILLESPIE T. (1966). Application of the Hydrodynamic-Strutural Theory of Non-Newtonian Flow Suspensions Which Exhibit Moderate Shear Thickening with Particular Reference to Dilatant Vinyl Plastisols, J. Colloid Sci., 22, 554-562.

GLOWINSKI R., PAN T.-.W. et PÉRIEUX J. (1994). A Fictitious Domain Method for Dirichlet Problem and Applications, Comp. Meth. Appl. Mech. Eng., 111, 283-303.

GRYGIEL J.M. et TANGUY P.A. (1991). Finite Element Solution for Advection-Dominated Thermal Flows, Comp. Meth. Appl. Mech. Eng., 93, 277-289.

GUTOFF E.B. (1993). Avoid Coating and Drying Defects, Chem. Eng. Progress, January, 49-55.

HAGEMEYER R.W. (1997). Pigments for Paper, TAPPI Press, 247 pages.

HIBY J.W. (1981). Definition and Measurement of the Degree of Mixing in Liquid Mixtures, Int. Chem. Eng., 21 (2), 197-204.

HO F. et KWONG A. (1973). A Guide to Designing Special Agitators, Chem. Eng., New York, Juillet, 94-104

HOLLAND F.A. et CHAPMAN F.S. (1966). Liquid Mixing and Processing in Stirred Tanks, Reinhold Pub. Co., New York.

HU H.H. (1996). Direct Simulation of Flows of Solid-Liquid Mixtures, Int. J. Mult. Flow, 22 (2), 335-352.

HU H.H., JOSEPH D.D. et CROCHET M.J. (1992). Direct Simulation of Fluid Particle Motions, Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 3, 285-306.

IBRAHIM S.B. et NIENOW A.W. (1994). The Effect of Viscosity on Mixing Pattern and Solid Suspension in Stirred Vessels, I.Chem.E. Symposium Series, 136, Bradford, United-States, 25-32.

JOHNSON C. (1992). Numerical Solution of Partial Differential Equations by the Finite Element Method, Cambridge University Press.

KOURIS M. et KOCUREK J. (1990). Coating, Converting and Specialty Processes, Volume 8 of Pulp and Paper Manufacture, third edition, TAPPI Press Publishers, pp. 386.

KRAUME M. (1992). Mixing Times in Stirred Suspensions, Chem. Eng. Tech., 15, 313-318.

KRIEGER I.M. et DOUGHERTY T.J. (1959). A Mechanism for non Newtonian Flow in Suspension of Rigid Spheres, Trans. Soc. Rheol., 3, 137-152.

LAPASIN R. (1985). Clay/kaolin Aqueous Suspensions, Journal de Mécanique Théorique et Appliquée, Suppl., 239-251.

LAVOIE P.A. (1995). Rhéologie de sauces de couchage et autres suspensions modèles. Mémoire de maîtrrise, École Polytechnique de Montréal, pp. 153.

LEIGHTON D. et ACRIVOS A. (1986). Viscous Resuspension, Chem. Eng. Sci., 41 (6), 1377-1384.

LEIGHTON D. et ACRIVOS A. (1987). Measurement of Shear-Induced Self-Diffusion in Concentrated Suspensions of Spheres, J. Fluid Mech., 177, 109-131.

LEIGHTON D. et ACRIVOS A. (1987). The Shear-Induced Migration of Particles in Concentrated Suspensions, J. Fluid Mech., 181, 415-439.

LJUNG L. (1987). System Identification, Thoery for the User, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.

MACTAGGART R.S., NASR-EL-DIN H.A. et MASLIYAH J.H. (1993a). Sample Withdrawal from a Slurry Mixing Tank, Chem. Eng. Sci., 48, 921-931.

MACTAGGART R.S., NASR-EL-DIN H.A. et MASLIYAH J.H., 1993b. A Conductivity Probe for Measuring Solids Concentration in a Slurry Mixing Tank, Separation Technology, 3, 151-160.

MAGELLI F., FAJNER D., NONENTINI M. et PASQUALI G. (1990). Solid Distribution in Vessels Stirred with Multiple Impellers, Chem. Eng. Sci., 45, 615-625.

MAK A.T.C. et RUSZKOWSKI S.W. (1990). Scaling-up of Solids Distributed in Stirred Vessels, Fluid Mixing IV, I. Chem. E. Symposium Series, 121, 379-395.

MAKINEN M. et JARVENSIVU T. (1992). The Effect of Mixing Order of Chemicals on Rheological Properties in a Normal Coating Color, TAPPI Coating Conference, 385-401.

MAKINEN M. et NORDSTROM T. (1993). Dispersing of Coating Clay - How Unit Design Parameters of Disperser Influence it, TAPPI Coating Conference, 67-78.

MANN R. (1986). Gas-Liquid Stirred Vessel Mixers: Toward a Unified Theory Based on Network-of-Zones, Chem. Eng. Res. Des., 64, 23-34.

MANN R. et HACKETT L.A. (1988). Fundamentals of Gas-Liquid Mixing in a Stirred Vessel: An Analysis using Networks of Backmixed Zones, Proceedings of the 6th European Conference on Mixing, Pavia, Italy, 321-328.

MARGOTTA D.G. (1980). How to Avoid Harmful Sequences of Addition of Coating Ingredients, TAPPI J., 63 (5), 33-35.

MASLIYAH J. H. (1994). Electrokinetic Transport Phenomena, Published by Alberta Oil Sands Technology and Research, pp. 363.

MAURY B. et GLOWINSKI R. (1997). Fluid-Particle Flow : A Summetric Formulation, Méthode numériques de la Mécanique, 1-6.

MCKEE S.L., WILLIAMS R.A. et BOXMAN A. (1995). Development of Solid-Liquid Mixing Models using Tomographic Techniques, The Chem. Eng. J., 56, 101-107.

MCKEE S.L., WILLIAMS R.A., DICKIN F.J., MANN R., BRINKEL J., PYING P., BOXMAN A. et MCGRATH G. (1994). Measurement of Concentration Profiles and Mixing Kinetics in Stirred Tanks using a Resistance Tomography Technique, I.Chem.E. Symposium Series, 136, Bradford, United-States, 9-16.

METZNER A.B. et OTTO R.E. (1957). Agitation of Non-Newtonian Fluids, AIChE J., 3 (1), 3-10.

MOLERUS O. et LATZEL W. (1987a). Suspension of Solids Particles in Agitated Vessels-I: Archimedes Numbers < 40, Chem. Eng. Sci., 42, 1423-1430.

MOLERUS O. et LATZEL W. (1987b). Suspension of Solids Particles in Agitated Vessels-II: Archimedes Numbers > 40, Reliable Prediction of Minimum Stirrer Angular Velocities, Chem. Eng. Sci., 42, 1431-1437.

NAGATA S. (1975). Mixing - Principles and Applications, John Wiley & Sons Publisher, Tokyo.

NAGATA S., NISHIKAWA M., KATSUBE T. et TAKAISH K. (1972). Mixing of Highly Viscous Non-Newtonian Liquids, Int. Chem. Eng., 12, 175-182.

NIENOW A.W. (1968). Suspension of Solid Particle in Turbine Agitated Baffled Vessels, Chem. Eng. Sci., 23, 1453-1459.

NOCENTINI M. et MAGELLI F. (1992). Solid Distribution in Slurry Reactors Stirred with Multiple Impellers: Continuous Flow Systems, Fluid Mechanics and its Applications, Volume 10, Kluwer Academic Publishers, 73-80.

PARFITT G.D. et BARNES H.A.(1992). The Dispersion of Fine Particles in Liquid Media. Chapitre 6 du livre - Mixing in the Process Industries, Harnby N., Edwards M.F. et Nienow A.W., Butterworth-Heinemann, 414 pages.

PASQUALI G., FAJNER D. et MAGELLI F. (1983). Effect of Suspension Viscosity on Power Consumption in the Agitation of Solid-Liquid Systems, Chem. Eng. Commun., 22, 371-375.

PATTON T.C. (1979). Paint Flow and Pigment Dispersion - A Rheological Approach to Coating and Ink Technology, John Wiley & Sons Publishers, Second Edition, pp. 631.

PELLETIER D.H. et SCHETZ J.A. (1986). Finite Element Navier-Stokes Calculation of Three-Dimensional Turbulent Flow near a Propeller, AIAA, 24, 1409-1416.

PERNG C.Y. et MURTHY J. (1992). A Moving Mesh Technique for the Simulation of Flow in Mixing Tanks, AIChE Annual Meeting, Miami Beach.

PERSSON T., JARNSTROM L. et RIGDAHL R.H. (1995). Effect of Method of Preparation of Coating Colours on the Rheological Behaviour and Properties of Coating Layer and Coated Papers, Coating Fyndamentals Symposium, TAPPI Proceedings, 101-108.

PHAN-THIEN N. et FANG Z. (1996). A Study of the Flow Behaviors of Concentrated Suspension, Proceedings of the XIIth Int. Congres on Rheology, 435.

PHILLIPS R.J., ARMSTRONG R.C. et BROWN R.A. (1992). A Constitutive Equation for Concentrated Suspensions that Accounts for Shear-Induced Particle Migration, Phys. Fluids, A4 (1), 30-40.

QUEMADA D. (1977). Rheology of Concentrated Disperse Systems and Minimum Energy Dissipation Principle - I. Viscosity-Concentration Relationship, Rheol. Acta, 16, 82-94.

QUEMADA D. (1978). Rheology of Concentrated Disperse Systems - II. A Model for non-Newtonian Shear Viscosity in Steady Flows, Rheol. Acta, 17, 632-642.

QUEMADA D. (1978). Rheology of Concentrated Disperse Systems - III. General Features of the Proposed non-Newtonian Model. Comparison with Experimental Data, Rheol. Acta, 17, 643-653.

RASTEIRO M.G., FIGUEIREDO M.M. et FREIRE C. (1994). Modelling Slurry Mixing Tanks, Advanced Powder Technology, 5 (1), 1-14.

RAULINE D. (1998). Agitation de fluides à seuil et de fluides thixotropes. Mémoire de maîtrise. École Polytechnique de Montréal. Canada.

RIEGER F. et DITL P. (1994). Suspension of Solid Particles, Chem. Eng. Sci., 49, 2219-2227.

RIEGER F., DITL F. et HAVELKOVA O. (1988). Suspension of Solid Particles - Concentration Profiles and Particle Layer on the Vessel Bottom, Proceedings of the 6th European Conference on Mixing, Pavia, Italy, 251-258.

RIEGER F. et NOVAK V. (1973). Power Consumption of Agitators in Highly Viscous Non-Newtonian Liquids, Trans. Instn. Chem. Engrs., 51, 105-111.

RITZ J.-.B. (1997). Modélisation numérique des écoulements fluide-particules: définition d'un modèle de simulation directe, application à la sédimentation. Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux I, France.

RICHARDSON J.F. et ZAKI W.N. (1954). Sedimentation and Fluidisation : Part I, Trans. Instn. Chem. Engrs, 32, 35-53.

ROBICHAUD M.P., TANGUY P.A. et FORTIN M. (1990). An Iterative Implementation of the Uzawa Algorithm for 3-D Fluid Flow Problems, Int. J. Num. Meth. in Fluids, 10, 429-442.

ROPER J.A. et ATTAL J.F. (1993). Evaluation of Hign-Speed Runnability using Pilot Coater Data, Rheological Mesurements, and Computer Modeling, TAPPI Coating Conference, 107-113.

SAAD Y. et SCHULTZ M.H. (1983). A Generalized Minimal Resisual Algorithm for Solving Nonsymmetric Linear Systems, Research Report YALEU/DCS/RR-254, August 24.

SALOMON J., ELSON T.P. et NIENOW A.W. (1981). Cavern Sizes in Agitated Fluids with a Yield Stress, Chem. Eng. Commun., 11, 143-164.

SHAMLOU P.A. (1993). Processing of Solid-Liquid Suspenions, Butterworth-Heinemann Publisher, 332 pages.

SHAMLOU P.A. et KOUTSAKOS E. (1989). Solids Suspension and Distribution in Liquids under turbulent Agitation, Chem. Eng. Sci., 44 (3), 529-542.

SCHEMPP W., FRIESEN W. et SCHURZ J. (1975). The Pigment Shock in kaolin-Polyvinyl Alcohol Systems and Aspects of Pigment Dispersion, TAPPI J., 58 (1), 116-119.

SHILO D. (1969). Leistunbedarf von Tangentialrührern beim Rühren von nicht-Newtonschen Flüssigkeiten, Chemie-Ingr. Tech., 41, 253-259.

TANGUY P.A, FORTIN M. et CHOPLIN L. (1984). Finite Element Simulation of Dip Coating, II: Non-Newtonien Fluids, Int. J. Num. Meth. Fluids, 4, 459-475.

TANGUY P.A., THIBAULT F. et BRITO DE LA FUENTE E. (1996). A New Investigation of the Metzner-Otto Concept for Anchor Mixing Impellers, Can. J. Chem. Eng., 74, 222-228.

TANNER R.I. (1985). Engineering Rheology, Oxford University Press., pp. 451.

TENAM R. (1995). Navier-Stokes Equations and Nonlinear Functional Analysis, SIAM Press, p. 141.

THOMAS D.G. (1965). Transport Characteristics of Suspensions : VIII. A Note on the Viscosity of Newtonian Suspensions of Uniform Spherical Particles, J. Colloid Sci., 20, 267-277.

TRITTON D.J. (1988). Physical Fluid Dynamics, Clarendon Press, Oxford, pp. 325.

VAN DER VORST H. (1992). Bi-CGSTAB: A fast and Smoothly Converging Variant of Bi-CG for the Solution of Nonsymmetric Linear Systems, SIAM J. Sci. Statist. Comput., 13, 631-644.

VIDAL F. (1992). Rhéologie de l'enduction par un fluide complexe: application au procédé de fabrication des papiers couchés. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux I, 115 p.

WALTER J.C. (1993). The Coating Processes. TAPPI Press Publishers, pp. 260.

WICHTERLE K. (1988). Conditions for Suspension of Solids in Agitated Vessels, Chem. Eng. Sci., 43, 467-471.

WIGTON L.B., YU N.J. et YOUNG D.P. (1984). GMRES Acceleration of Computational Fluid Dynamics Codes, AIAA, 67-74.

WYPYCH G. (1993). Fillers, Chapter IV-Dispersion, Morphology and System Rheology, ChemTec Publishing, Toronto-Scarborough, Canada, pp. 295.

YAMAZAKI H., TOJO K. et MIYANAMI K. (1991). Effect of Power Consumption on Solids Concentration Profiles in a Slurry Mixing Tank, Powder Technology, 64, 199-206.

ZANG K. et ACRIVOS A. (1994). Viscous Resuspension in Fully Developed Laminar Pipe Flows, Int. J. Multiphase Flow, 20 (3), 579-591.

ZWIETERING T.N. (1958). Suspending of Solids Particles in Liquid by Agitators, Chem. Eng. Sci., 8, 244-253.

ANNEXE A

Caractérisation des propriétés physiques des billes de verre rouge #4

Dans cette section, nous présentons la méthode de mesure employée pour caractériser les propriétés physiques des billes de verre rouge #4 de la compagnie JB (USA). L'expérience consiste à ajouter des billes de verre dans un cylindre gradué contenant une quantité initiale d'eau et de mesurer l'augmentation du poids et du volume avec l'ajout de ces dernières. Les résultats sont montrés au tableau A.1. Lorsque les billes de verres mouillent en totalité la quantité d'eau initiale, alors on atteint la concentration maximale de particules dans la phase liquide.

Les résultats obtenus sont les suivants :

- masse volumique moyenne des billes de verre : $\rho_s \approx 2500$ kg/m^3,
- fraction volumique maximale : $\phi_m = 0{,}58$,
- fraction massique maximale : $\phi_w = 0{,}78$.

Tableau A.1 Caractérisation de la masse volumique, de la fraction volumique maximale (ϕ_m) et de la relation entre la fraction volumique (ϕ_v) et massique (ϕ_w) [Masse d'eau initiale (M_i) : 36 g, volume d'eau initial (V_i) : 36 ml].

Poids H_2O + billes (M) (g)	Volume H_2O + billes (V) (ml)	Ajout de billes $\Delta M = M - M_i$ (g)	Ajout de billes $\Delta V = V - V_i$ (ml)	ρ_s $\Delta M/\Delta V$ (g/ml)	ϕ_v $\Delta V/V$ (-)	ϕ_w $\Delta M/M$ (-)
40,8	38,0	4,8	2,0	2,40	0,053	0,118
44,1	39,5	8,1	3,5	2,41	0,089	0,184
51,8	42,5	15,8	6,5	2,43	0,153	0,305
60,8	46,0	24,8	10,0	2,48	0,217	0,408
74,3	51,5	38,3	15,5	2,47	0,301	0,515
87,9	57,0	51,9	21,0	2,47	0,368	0,590
101,2	62,5	65,2	26,5	2,46	0,424	0,644
115,3	68,0	79,3	32,0	2,48	0,471	0,688
133,0	75,2	97,0	39,2	2,47	0,521	0,729
147,6	81,5	111,6	45,5	2,45	0,558	0,756
157,5	85,0	121,5	49,0	2,48	0,576	0,771
162,7	86,5	126,7	50,5	2,51	0,584	0,779

ANNEXE B

Évaluation des flux de matière par convection et sédimentation sur la face d'un élément fini tétraédrique

Dans cette section, nous présentons les expressions analytiques pour la détermination des flux de matière par convection et sédimentation traversant une face d'un élément fini tétraédrique soumis à un champ de vitesse donné v(x,y,z) et à la sédimentation $v(0,0,v_s)$ (v_s=vitesse de sédimentation d'une particule).

Débutons par l'évaluation du flux de matière par convection sur la face d'un l'élément fini (le flux de matière par sédimentation pourra ainsi être déduit de cette expression)

$$Q_c = \int_S (\vec{v} \cdot \vec{n})\, dS \qquad \text{[B.1]}$$

$$Q_c = \int_S \left((u,v,w)\cdot(n_x,n_y,n_z)\right) dS \qquad \text{[B.2]}$$

$$Q_c = \int_S \left(n_x u + n_y v + n_z w\right) dS \qquad \text{[B.3]}$$

où $\vec{n}$ représente le vecteur unitaire sur la face pointant vers l'intérieur de l'élément fini.

Les composantes du vecteur vitesse sont évaluées à l'aide des polynômes de Lagrange, c'est-à-dire

$$u = \varphi_k(x,y,z)\cdot u_k = [\varphi]^T[u] \qquad \text{[B.4]}$$

$$v = \varphi_k(x,y,z) \cdot v_k = [\varphi]^T[v] \qquad [B.5]$$

$$w = \varphi_k(x,y,z) \cdot w_k = [\varphi]^T[u] \qquad [B.6]$$

où k, l'indice de sommation, prend la valeur de 4 ou 7 pour les éléments de types P_1^+-P_0 et P_2^+-P_1 respectivement.

Par substitution, on obtient

$$Q_c = n_x \int_S [\varphi]^T [u]\, dS + n_y \int_S [\varphi]^T [v]\, dS + n_z \int_S [\varphi]^T [w]\, dS \qquad [B.7]$$

L'intégration sur la face de l'élément de référence peut se réécrire sous la forme suivante

$$Q_c = n_x \int_{\hat{S}} [\hat{\varphi}]^T [u] |J| dS + n_y \int_{\hat{S}} [\hat{\varphi}]^T [v] |J| dS + n_z \int_{\hat{S}} [\hat{\varphi}]^T [w] |J| dS \qquad [B.8]$$

$$Q_c = \left(n_x |J| \int_{\hat{S}} [\hat{\varphi}]^T dS \right) [u] + \left(n_y |J| \int_{\hat{S}} [\hat{\varphi}]^T dS \right) [v] + \left(n_z |J| \int_{\hat{S}} [\hat{\varphi}]^T dS \right) [w] \qquad [B.9]$$

où $\hat{\varphi}$ sont les fonctions de base sur la face de l'élément de référence (Tableau B.1) et |J| le déterminant du jacobien évalué par l'expression suivante

$$|J| = 2A \qquad [B.10]$$

où A représente l'aire de la face de l'élément. En ce qui nous concerne, nous avons utilisé la formule de Héron afin d'évaluer cette aire à l'aide des expressions suivantes

$$A = \sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)} \qquad [B.11]$$

$$s = \tfrac{1}{2}(a+b+c) \qquad [B.12]$$

où a, b et c sont la longueur des trois arêtes de la face de l'élément.

Afin de déterminer le flux de matière Q_c, il faut évaluer l'intégrale suivante

$$I = \int_{\hat{S}} [\hat{\varphi}]^T dS \qquad [B.13]$$

Tableau B.1 Valeurs des fonctions de bases sur la face de l'élément de référence en fonction du type d'élément fini.

Élément P_1^+-P_0		Élément P_2^+-P_1	
	Fonctions de base		Fonctions de base
$\hat{\varphi}_1$	$(1-\varepsilon-\eta)-1/3\hat{\varphi}_4$	$\hat{\varphi}_1$	$(1-\varepsilon-\eta)-1/2(\hat{\varphi}_4+\hat{\varphi}_6)-1/3\hat{\varphi}_7$
$\hat{\varphi}_2$	$\varepsilon-1/3\hat{\varphi}_4$	$\hat{\varphi}_2$	$\varepsilon-1/2(\hat{\varphi}_4+\hat{\varphi}_5)-1/3\hat{\varphi}_7$
$\hat{\varphi}_3$	$\eta-1/3\hat{\varphi}_4$	$\hat{\varphi}_3$	$\eta-1/2(\hat{\varphi}_5+\hat{\varphi}_6)-1/3\hat{\varphi}_7$
$\hat{\varphi}_4$	$27(1-\varepsilon-\eta)\varepsilon\eta$	$\hat{\varphi}_4$	$4(1-\varepsilon-\eta)\varepsilon-4/9\hat{\varphi}_7$
		$\hat{\varphi}_5$	$4\varepsilon\eta-4/9\hat{\varphi}_7$
		$\hat{\varphi}_6$	$4(1-\varepsilon-\eta)\eta-4/9\hat{\varphi}_7$
		$\hat{\varphi}_7$	$27(1-\varepsilon-\eta)\varepsilon\eta$

Pour l'élément de type P_1^+-P_0, l'équation [B.13] s'écrit

$$I = \int_0^1 \int_0^{1-\varepsilon} \begin{bmatrix} (1-\varepsilon-\eta)-9(1-\varepsilon-\eta)\varepsilon\eta \\ \varepsilon-9(1-\varepsilon-\eta)\varepsilon\eta \\ \eta-9(1-\varepsilon-\eta)\varepsilon\eta \\ 27(1-\varepsilon-\eta)\varepsilon\eta \end{bmatrix} d\varepsilon\, d\eta = \begin{bmatrix} \frac{11}{120} \\ \frac{11}{120} \\ \frac{11}{120} \\ \frac{9}{40} \end{bmatrix} \qquad \text{[B.14]}$$

De la même façon pour l'élément de type P_2^+-P_1, on obtient les valeurs suivantes

$$I = \begin{bmatrix} \frac{3}{120} \\ \frac{3}{120} \\ \frac{3}{120} \\ \frac{8}{120} \\ \frac{8}{120} \\ \frac{8}{120} \\ \frac{9}{40} \end{bmatrix} \qquad \text{[B.15]}$$

Finalement, les expressions analytiques permettant de calculer le flux de matière par convection et sédimentation sur chacune des faces de l'élément fini s'écrivent

- élément fini P_1^+-P_0 :

$$Q_c = \begin{bmatrix} n_x|J|\left[\frac{11}{120}\ \frac{11}{120}\ \frac{11}{120}\ \frac{9}{40}\right][u] + n_y|J|\left[\frac{11}{120}\ \frac{11}{120}\ \frac{11}{120}\ \frac{9}{40}\right][v] \\ +n_z|J|\left[\frac{11}{120}\ \frac{11}{120}\ \frac{11}{120}\ \frac{9}{40}\right][w] \end{bmatrix} \qquad \text{[B.16]}$$

$$Q_s = \left[n_z|J|\left[\frac{11}{120}\ \frac{11}{120}\ \frac{11}{120}\ \frac{9}{40}\right][v_s]\right] = \frac{1}{2}n_z|J|v_s \qquad \text{[B.17]}$$

- élément fini P_2^+-P_1 :

$$Q_c = \begin{bmatrix} n_x|J|\left[\frac{3}{120}\ \frac{3}{120}\ \frac{3}{120}\ \frac{8}{120}\ \frac{8}{120}\ \frac{8}{120}\ \frac{9}{40}\right][u] + n_y|J|\left[\frac{3}{120}\ \frac{3}{120}\ \frac{3}{120}\ \frac{8}{120}\ \frac{8}{120}\ \frac{8}{120}\ \frac{9}{40}\right][v] \\ +n_z|J|\left[\frac{3}{120}\ \frac{3}{120}\ \frac{3}{120}\ \frac{8}{120}\ \frac{8}{120}\ \frac{8}{120}\ \frac{9}{40}\right][w] \end{bmatrix} \qquad \text{[B.18]}$$

$$Q_s = \frac{1}{2}n_z|J|v_s \qquad \text{[B.19]}$$

ANNEXE C

Validation de la résolution de l'équation de transport de la phase solide par convection du modèle de Mann

Dans cette section, nous présentons la validation du modèle de Mann en absence de sédimentation; ce modèle se résume donc au transport de la phase solide par convection. Afin de s'assurer que le schéma est conservatif, le cas test consiste à transporter un champ de concentration uniforme de particules solides dans un écoulement de Couette et de s'assurer que le champ de concentration de la phase solide demeure constante dans tout le domaine en fonction du temps.

Le système de Couette possède les caractéristiques géométriques suivantes :

- rayon cylindre intérieur : $r_i = 0{,}64$ cm;
- rayon cylindre extérieur : $r_e = 2{,}38$ cm;
- hauteur des cylindres : $H = 0{,}15$ cm.

Les calculs ont été effectués sur un maillage constitué de 4872 éléments (figure C.1). Le cylindre intérieur tourne à une vitesse de 20 tours/minute. Les particules sont uniformément distribuées sur le domaine et la concentration volumique moyenne est de ϕ=10%.

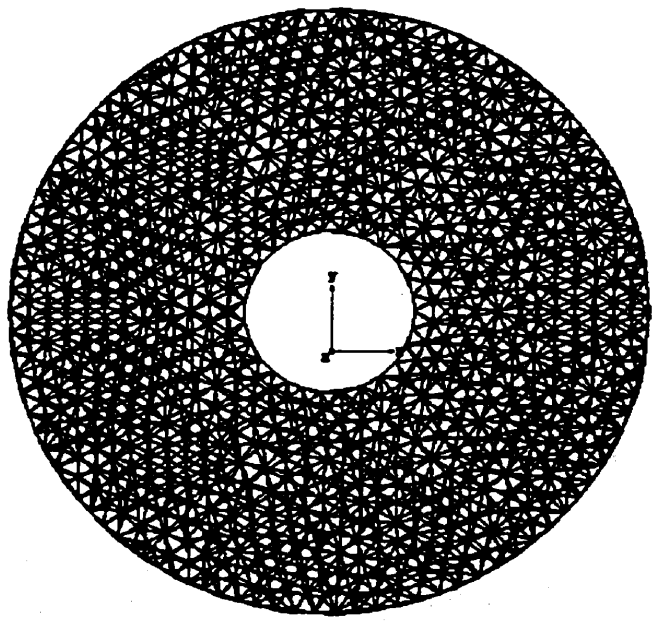


Figure C.1 Maillage (4872 éléments finis) pour la validation du modèle de Mann en absence de sédimentation.

La figure C.2 illustre le champ de concentration initialement et après 3 rotations du cylindre intérieur. Comme on peut le constater, la concentration demeure constante dans tout le domaine, ce qui nous assure que le schéma est conservatif et que le bilan de matière instationnaire du modèle de Mann à partir d'une grille non-structuré est adéquat.

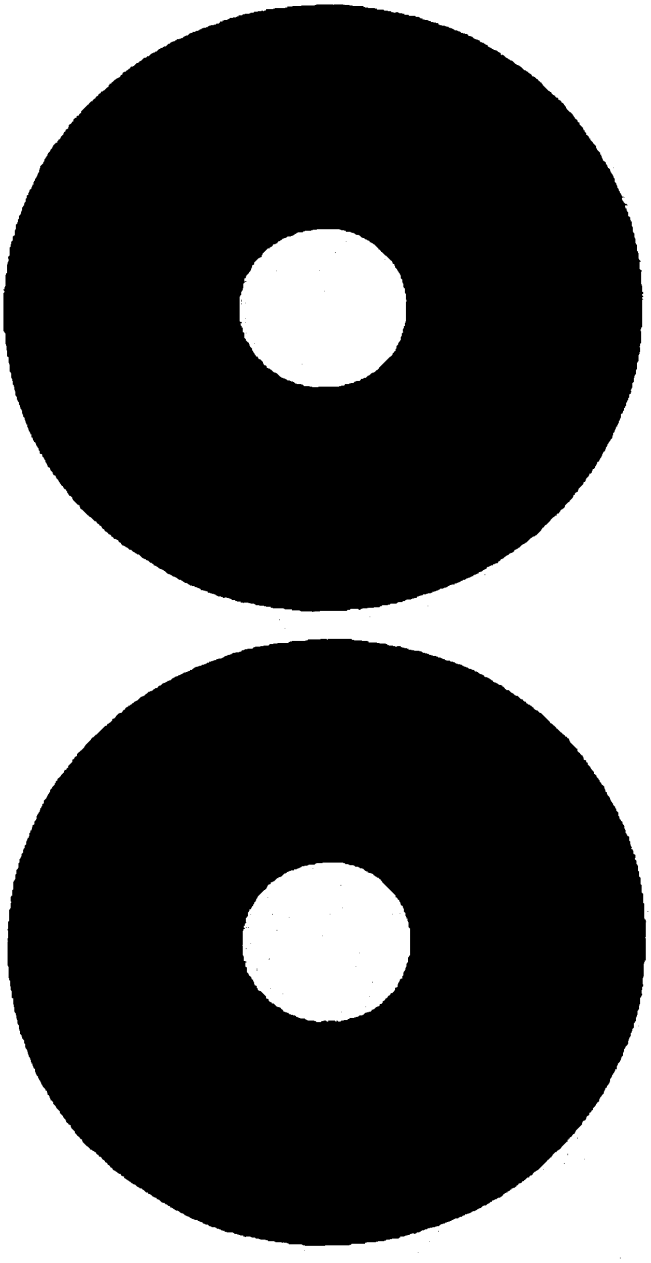


Figure C.2 Champ de concentration initiale (haut) et après 3 rotations du cylindre intérieur sur un plan x-y à mi-hauteur dans la direction axiale pour la validation du modèle de Mann en absence de sédimentation.

ANNEXE D

Validation de la méthode de SUPG pour la résolution de l'équation de transport du modèle de Phillips

Dans cette section, nous présentons la validation du modèle de Phillips lorsque le transport de la phase solide par convection ($v \cdot \nabla \phi$) domine le phénomène de migration par diffusion. L'équation [4.43] prend la forme suivante

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + v \cdot \nabla \phi = 0 \qquad [D.1]$$

La formulation faible de l'équation [D.1] s'écrit

$$\int_{\Omega} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + v \cdot \nabla \phi \right) \psi \; d\Omega = 0 \qquad [D.2]$$

Il est bien connu que la résolution de l'équation [D.2] à l'aide de la méthode des éléments finis de Ritz-Galerkin génère des oscillations lorsque le nombre de Péclet est élevé (Johnson, 1992). Afin de pallier ce problème, nous avons choisi d'utiliser une méthode d'upwinding consistante de type SUPG (Grygiel et Tanguy, 1991). Cette méthode consiste à modifier les polynômes d'interpolation et les fonctions-test de la façon suivante

$$\psi_{SU} = \psi + \beta v \cdot \nabla \psi \qquad [D.3]$$

où β est un paramètre qui varie proportionnellement avec la valeur du nombre de Péclet local. Cette correction a pour effet de générer de la diffusion numérique dans le sens de l'écoulement et de régulariser la solution.

Afin de valider l'algorithme de résolution de la méthode SUPG, nous avons effectué le test de l'échelon transversal. Ce test consiste à imposer deux valeurs différentes en concentration sur le bord du domaine et à transporter ces valeurs selon un champ de vitesse uniforme faisant un angle de 45°. La solution de ce problème est représentée par un saut (ou discontinuité) en concentration le long de la ligne directrice à 45°.

Le domaine d'étude est compris entre les côtes suivantes : $-0,5 < x < 0,5$, $-0,5 < y < 0,5$, $-0,05 < z < 0,05$. Les calculs ont été effectués sur un maillage constitué de 6086 éléments tétraédriques (figure D.1.). La valeur et l'orientation du vecteur vitesse sont respectivement de 1 m/s et 45°. Les conditions de Dirichlet imposées en concentrations sont de 0,1 et 0,2.

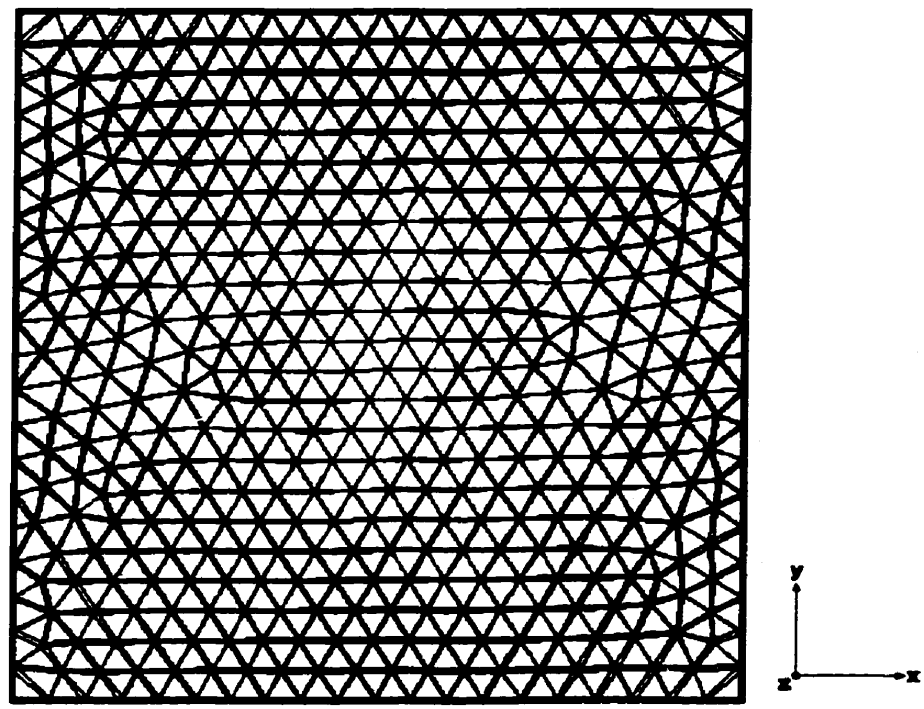


Figure D.1 Maillage (6086 éléments finis) pour la validation de la méthode de SUPG lors de la résolution de l'équation de transport du modèle de Phillips.

Dans un premier temps, nous illustrons le champ de concentration obtenu sur un plan x-y à mi-hauteur dans la direction axiale sans l'utilisation de la méthode SUPG (figure D.2). On constate que la solution est très oscillatoire et peu régulière. Loin du saut, les valeurs du champ scalaire calculées sont très différentes des valeurs désirées, c'est-à-dire ϕ=0,1 et 0,2. De plus, bien que des concentrations négatives ont été retrouvées dans le domaine étudié, la méthode a permis de conserver la matière (ϕ_{min}=-0.0089, ϕ_{max}=0,2503, ϕ_{moy}=0,151). Par conséquent, la méthode des éléments finis de Ritz-Galerkin ne permet pas de bien approximer la solution d'un problème hyperbolique.

Lorsque la méthode de SUPG est appliquée, les résultats montrent un très bon comportement d'un point de vue dissipation numérique (figure D.3). En effet, l'échelon est très peu étalé de part et d'autre de la discontinuité. Les oscillations ont disparu, la solution est devenue très régulière et la méthode permet de conserver la matière (ϕ_{min}=0,085, ϕ_{max}=0,208, ϕ_{moy}=0,151). Par contre, nous avons les classiques sur-évaluation et sous-évaluation de part et d'autre du saut en concentration. Loin du saut, la valeur des champs scalaires (c'est-à-dire ϕ=0,1 et 0,2) ont été transportés sans aucune modification, ce qui correspondant à la physique du problème.

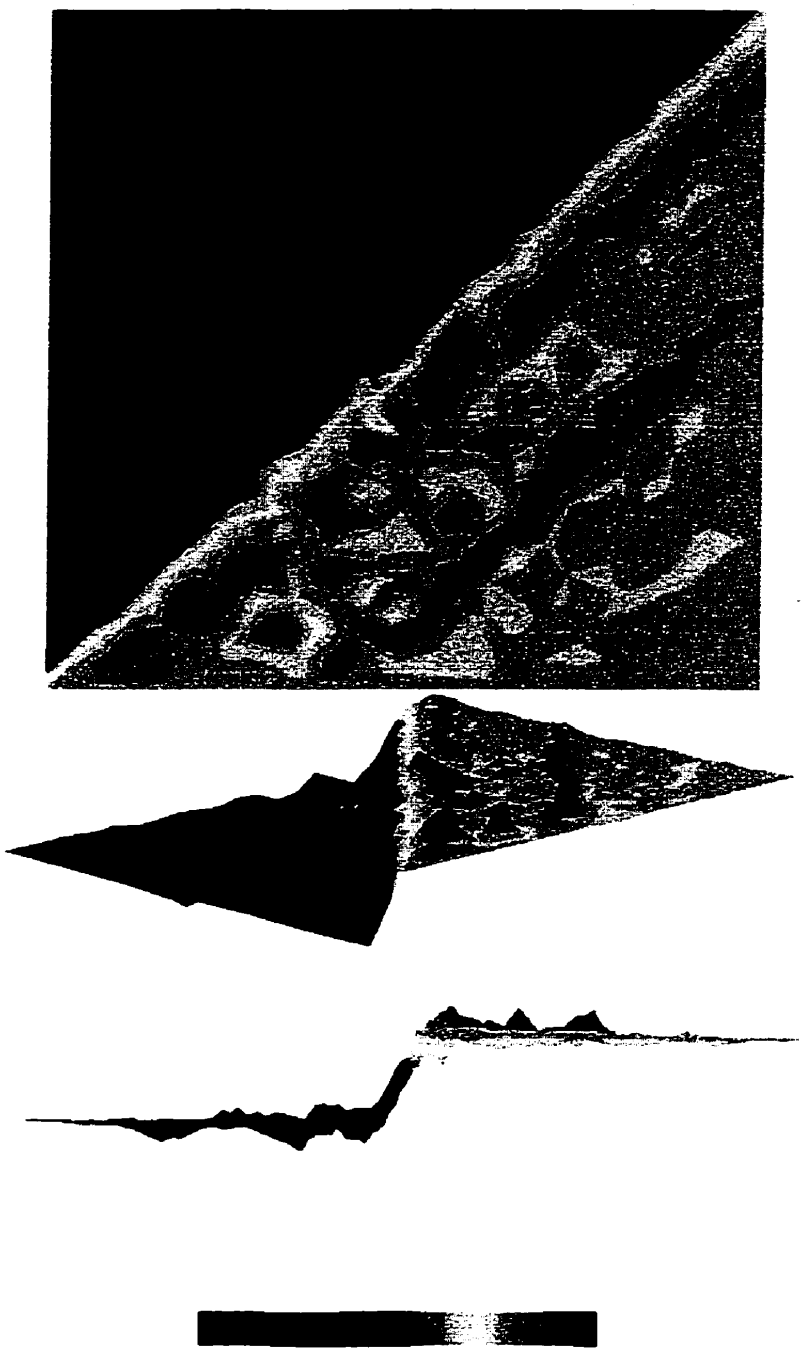


Figure D.2 Champ de concentration sur le plan x-y à mi-hauteur dans la direction axiale obtenu de la résolution de l'équation de transport à l'aide de la méthode de Ritz-Galerkin pour le cas de l'échelon transversal.

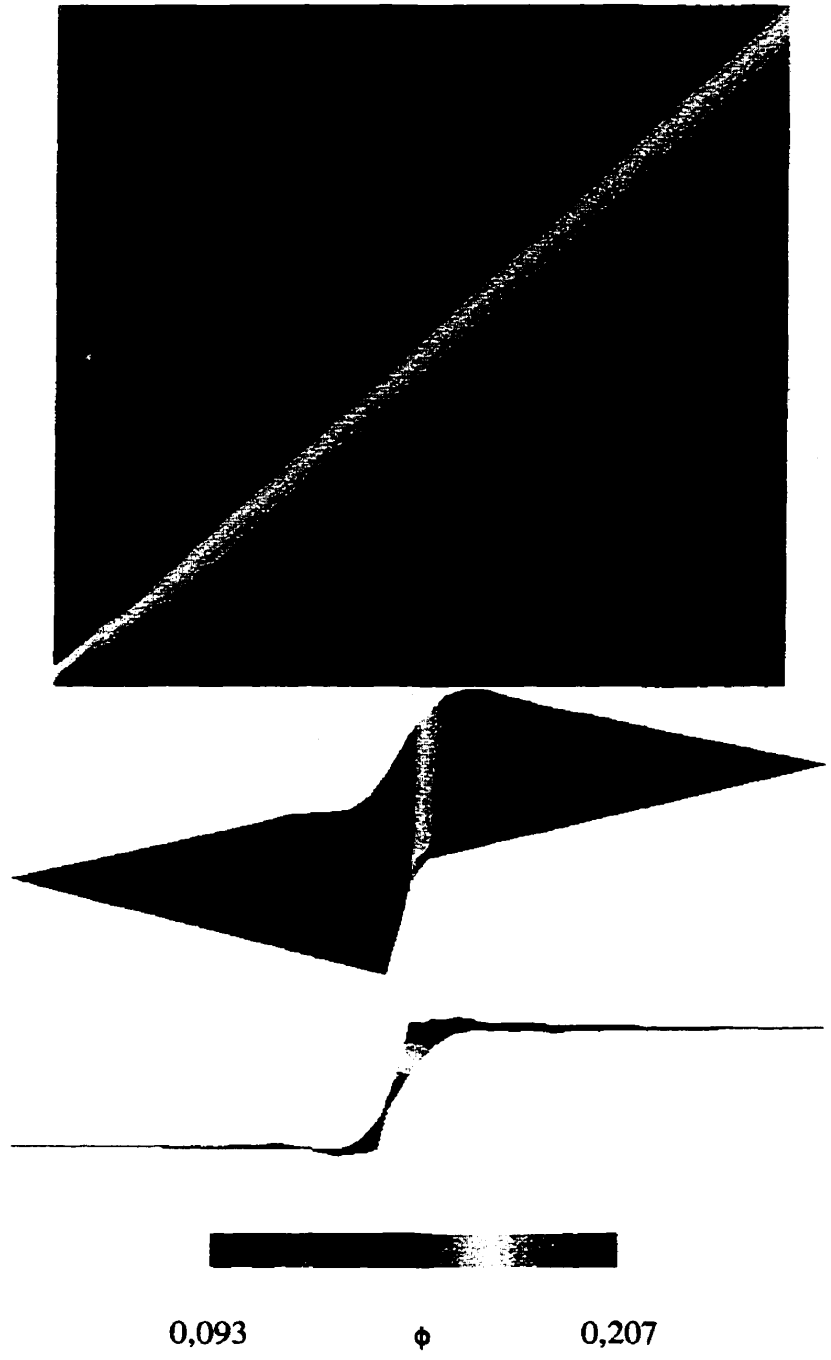


Figure D.3 Champ de concentration sur le plan x-y à mi-hauteur dans la direction axiale obtenu de la résolution de l'équation de transport à l'aide de la méthode de Ritz-Galerkin-SUPG pour le cas de l'échelon transversal.

ANNEXE E

Concept de Metzner et Otto pour des fluides possédant un comportement rhéologique du type rhéofluidifiant-rhéoépaississant pour un système d'agitation simple (ancre seulement)

En régime laminaire, la consommation énergétique du mélangeur associée à l'agitation de fluides newtoniens s'exprime par la relation

$$N_p = \frac{P_{tot}}{\rho N^3 D^5} = \frac{K_p \mu_a}{\rho N D^2} \qquad [E.1]$$

où μ_a est la viscosité apparente ou de procédé telle que proposée par Metzner et Otto. Pour des suspensions concentrées, le modèle rhéologique (équ. [4.9]) permettant de décrire l'évolution de la viscosité en fonction de la vitesse de déformation s'écrit

$$\mu_a = K_1 \dot{\gamma}_a^{n_1 - 1} + K_2 \dot{\gamma}_a^{n_2 - 1} \qquad [E.2]$$

où $\dot{\gamma}_a$ repésente le cisaillement apparent et est relié à la vitesse de rotation par la constante K_s

$$\dot{\gamma}_a = K_s N \qquad [E.3]$$

La substitution des équations E.2 et E.3 dans E.1 nous donne, après manipulation, l'expression suivante

$$N_p = \frac{K_p K_s^{n_1 - 1}}{\mathrm{Re}_{pl}} \left[1 + Gi\, K_s^{n_2 - n_1} \right] \qquad [E.4]$$

où Re_{pl} représente le nombre de Reynolds associé à la partie rhéofluidifiante de la loi rhéologique et Gi un nouveau nombre adimensionnel dénommé nombre de Gillespie indiquant l'importance du comportement rhéoépaississant par rapport au comportement rhéofluidifiant pour une vitesse d'agitation donnée. Ces deux nombres adimensionnels s'écrivent

$$\mathrm{Re}_{pl} = \frac{\rho N^{2-n_1} D^2}{K_1} \qquad [E.5]$$

$$Gi = \frac{K_2}{K_1} N^{n_2-n_1} \qquad [E.6]$$

Définissons un nouveau nombre de Reynolds Re_{Gi}

$$\mathrm{Re}_{Gi} = \frac{\rho N D^2}{\mu_a} = \frac{\rho N D^2}{K_1 N^{n_1-1} + K_2 N^{n_2-1}} \qquad [E.7]$$

$$\mathrm{Re}_{Gi} = \frac{\rho N^{2-n_1} D^2}{K_1} \left(\frac{1}{1+Gi} \right) \qquad [E.8]$$

On peut alors réécrire l'équation E.4 de la façon suivante

$$N_p = \frac{1}{\mathrm{Re}_{Gi}} \left[K_p K_s^{n_1-1} \left(\frac{1 + K_s^{n_2-n_1} Gi}{1+Gi} \right) \right] \qquad [E.9]$$

Le terme entre crochet n'est rien d'autre que $K_p(n_1,n_2,Gi)$ la constante de puissance pour un fluide obéissant au modèle rhéologique de type rhéofluidifiant-rhéoépaississant. Cette constante de puissance est équivalente à $K_p(n)$ pour un fluide de type loi de puissance. De plus, elle ne dépend que des indices de loi de puissance n_1 et n_2 et du nombre de Gillespie (Gi). Par conséquent, le tracé de log N_p en fonction de log Re_{Gi}, pour différentes valeurs de Gi à n_1 et n_2 fixées en régime laminaire, nous permet d'obtenir un ensemble de droites parallèles et de pente -1. Si le comportement rhéoépaississant est inexsitant (Gi = 0), alors l'équation [E.9] permet d'estimer la consommation de puissance pour l'agitation d'un fluide de type loi de puissance.

Afin de vérifier le concept de Metzner et Otto, nous avons effectué plusieurs simulations numériques pour un système simple d'agitation constitué d'une ancre. Le maillage utilisé est présenté à la figure 5.1. Les éléments utilisés sont de type P_1^+-P_0. Nous présentons à la figure E.1 la variation de N_p en fonction de Re_{Gi} pour différentes valeurs des paramètres n_1, n_2 et Gi. Ce résultat est conforme à l'équation E.9; en régime laminaire, les courbes de puissance sont des droites parallèles de pente égale à -1.

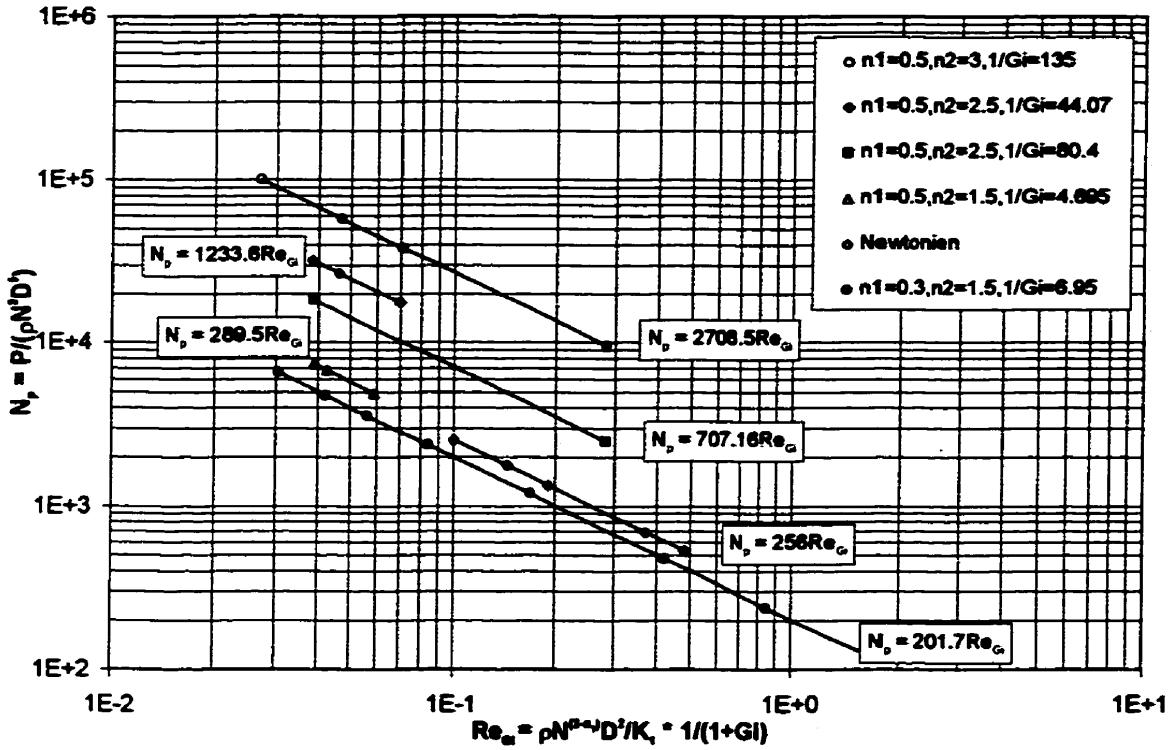


Figure E.1 Nombre de puissance (N_p) en fonction du nombre de Reynolds (Re_{Gi}) pour un fluide obéissant à un comportement rhéologique du type rhéofluidifiant-rhéoépaississant.

De plus, en effectuant quelques simulations numériques supplémentaires, nous avons corrélé la variation de $K_p(n_1,n_2,Gi)$ en fonction du nombre de Gi pour des valeurs de n_1 et n_2 fixées, c'est-à-dire pour un fluide donné. On observe, pour les différents comportement rhéologiques étudiés, que $K_p(n_1,n_2,Gi)$ varie linéairenment en fonction de Gi lorsque n_1 et n_2 sont fixées. Pour de faibles valeurs de Gi, ce résultat est en accord avec l'expression de $K_p(n_1,n_2,Gi)$.

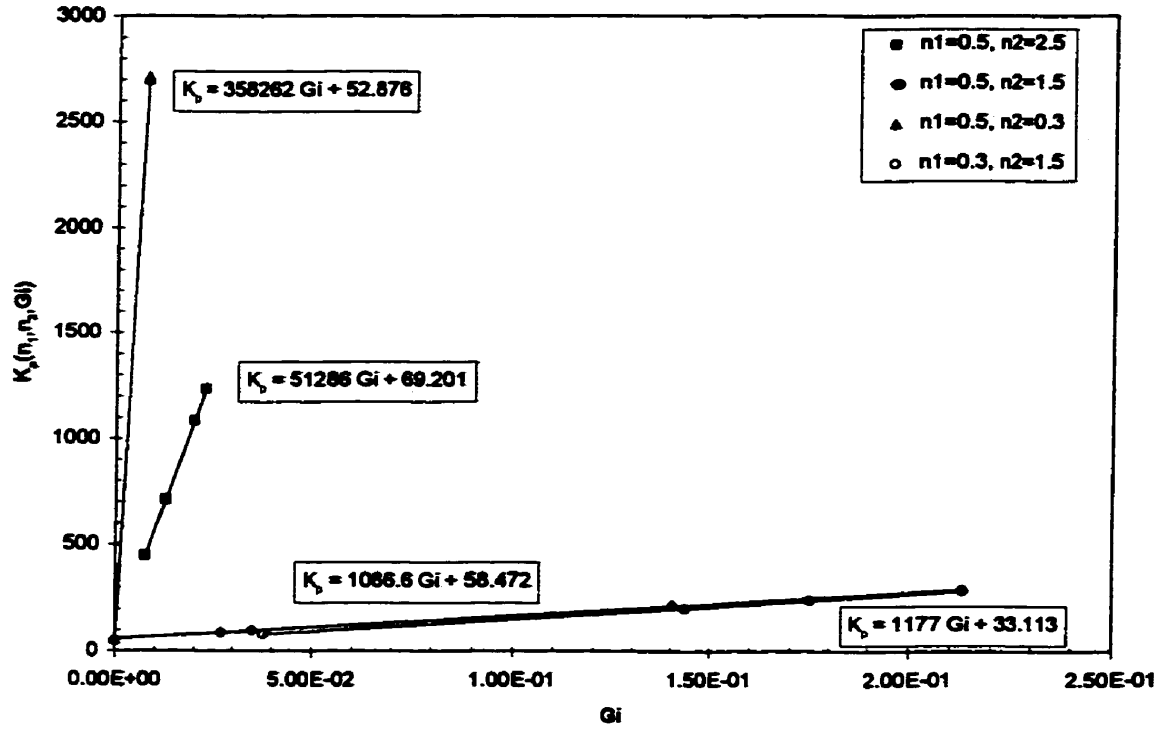


Figure E.2 Variation de la constante $K_p(n_1,n_2,Gi)$ en fonction du nombre de Gillespie Gi.

Le tableau E.1 montre les valeurs de K_s associées à chacune des droites présentées dans le graphique de la figure E.1. À la lecture de ce tableau, on constate que la valeur de K_s varie faiblement avec la nombre de Gi. De plus, on observe que la valeur de K_s est sûrement conditionnée par les valeurs des indices de loi de puissance n_1 et n_2. Par comparaison à la

Tableau E.1 Valeurs de K_s en fonction des paramètres n_1, n_2 et Gi.

n_1	n_2	1/Gi	K_s
0.3	1.5	6.95	31.3
0.5	1.5	4.695	30.7
0.5	2.5	80.4	35.4
0.5	2.5	44.07	35.2
0.5	3.0	135	37.6

valeur de K_s obtenue pour le mélange de fluide de type loi de puissance ($K_s = 22,65$) (tableau 5.2), on constate que la valeur de K_s pour des fluides possédant un comportement rhéologique du type rhéofluidifiant-rhéoépaississant est de beaucoup supérieure. En effet, pour une même vitesse d'agitation, cette augmentation de K_s se traduit par une augmentation de la vitesse de déformation apparente et de la viscosité de procédé, raison pour laquelle la consommation de puissance devient plus importante.

Les équations E.2 et E.3 permettent le calcul de la viscosité de procédé μ_a. Pour chacun des points illustrés à la figure E.1, on peut alors définir une courbe maîtresse (figure E.3) mettant en relation le nombre de puissance N_p et le nombre de Reynolds généralisé Re_g défini comme

$$Re_g = \frac{\rho N^{2-n_1} D^2}{K_1 K_s^{n_1-1}} \left(\frac{1}{1 + K_s^{n_2-n_1} Gi} \right) \qquad [E.10]$$

Ce graphique nous permet donc d'estimer la puissance d'agitation pour un fluide possédant un comportement rhéologique de type rhéofluidifiant-rhéoépaississant en fonction de la géométrie du système d'agitation et des conditions opératoires.

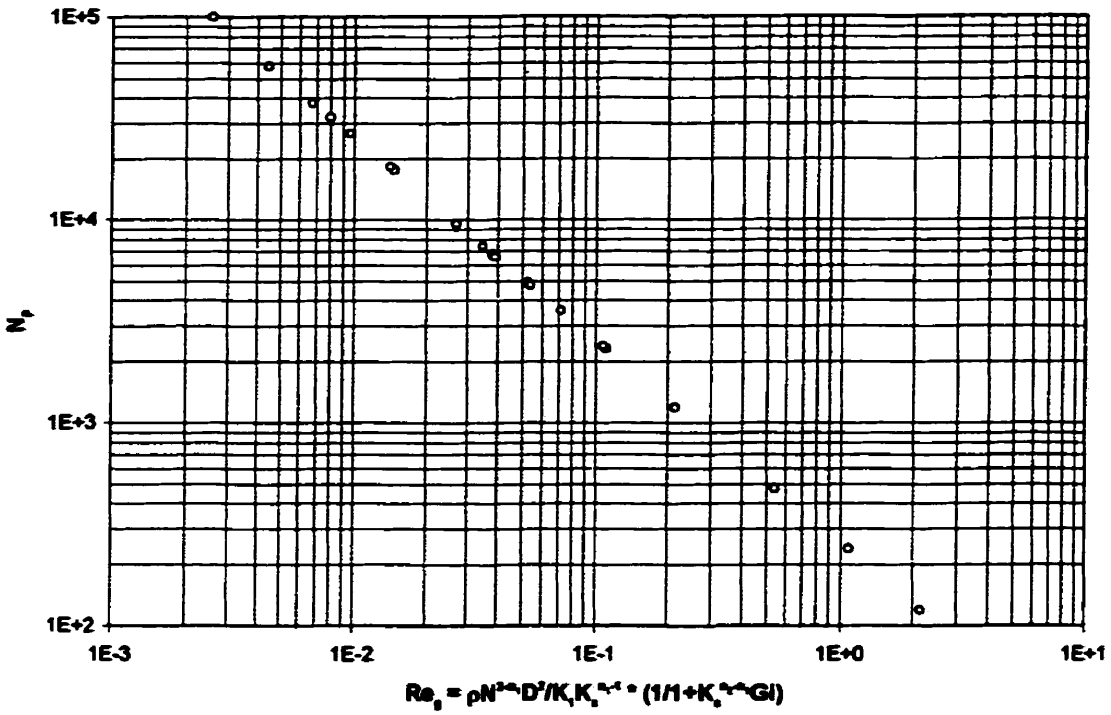


Figure E.3 Nombre de puissance (N_p) en fonction du nombre de Reynolds généralisé (Re_g) pour un fluide obéissant à un comportement rhéologique du type rhéofluidifiant-rhéoépaississant.