POLYPUBLIE
Polytechnique Montréal

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

Titre: Title:	Étude expérimentale du mélange solide-liquide : caractérisation de suspensions concentrées avec des solides surnageants
Auteur: Author:	Maxime Florant
Date:	2015
Type:	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis
Référence: Citation:	Florant, M. (2015). Étude expérimentale du mélange solide-liquide : caractérisation de suspensions concentrées avec des solides surnageants [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/2028/

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: PolyPublie URL:	https://publications.polymtl.ca/2028/
Directeurs de recherche: Advisors:	Louis Fradette
Programme: Program:	Génie chimique

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

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DU MÉLANGE SOLIDE-LIQUIDE : CARACTÉRISATION DE SUSPENSIONS CONCENTRÉES AVEC DES SOLIDES SURNAGEANTS

MAXIME FLORANT

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

(GÉNIE CHIMIQUE)

DÉCEMBRE 2015

© Maxime Florant, 2015.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DU MÉLANGE SOLIDE-LIQUIDE : CARACTÉRISATION DE SUSPENSIONS CONCENTRÉES AVEC DES SOLIDES SURNAGEANTS

présenté par : FLORANT Maxime

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

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

M. HENRY Olivier, Ph. D., président

M. FRADETTE Louis, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. VIDAL David, Ph. D., membre

DÉDICACE

À mes parents

REMERCIEMENTS

J’aimerais d’abord adresser mes plus sincères remerciements à mon directeur de recherche, Professeur Louis Fradette. Sous sa guidance et ses encouragements, mes apprentissages ont largement dépassé le cadre de mon projet de maîtrise et j’en sors indubitablement grandi. Merci pour le support et l’aide régulière malgré un horaire très chargé tout au long de ces deux années et pour la patience que vous avez eu à mon endroit lorsque le projet avançait moins rapidement.

Je tiens également à remercier tous les membres de l’équipe technique du département de génie chimique pour l’aide rapide qu’ils m’ont octroyé à chaque fois que j’en ai eu besoin. Je voudrais spécialement remercier Jean Huard à qui j’ai dû souvent faire appel surtout au début de mon projet. Également, j’aimerais adresser un immense merci à Daniel Pilon qui avec son savoir-faire et son imagination a contribué à améliorer grandement mon projet d’un point de vue expérimental, mais aussi ma compréhension technique de différents équipements.

Je souhaite également remercier tous les gens que j’ai rencontrés et côtoyés à l’URPEI durant ma maîtrise. Merci à Inci Ayranci qui m’a supporté beaucoup en début de maîtrise et qui assurait les présentations régulières entre les membres de l’URPEI et merci à Christine Beaulieu d’avoir pris la relève après le départ d’Inci. Merci à Bruno Blais pour ses encouragements et son aide. Merci à Emir Tsabet pour son support et ses idées, ainsi que pour avoir assuré le rôle de responsable de laboratoire.

Un grand merci à Sélim Douïeb sans qui j’aurais eu énormément de difficulté à commencer ce projet. Merci de m’avoir légué autant de connaissances et de m’avoir épaulé au cours des 6 premiers mois de mon projet. Merci pour son humour et de m’avoir appris une certaine débrouillardise. Merci infiniment.

Un merci tout spécial à mon amie Manon Lassaigne que j’ai côtoyé durant la presque totalité de ma maîtrise. Merci pour son sourire et sa bonne humeur contagieuse qui ajoutait un peu du soleil dans ce laboratoire sans fenêtres. Merci pour ses encouragements, sa générosité et son altruisme de tous les jours sans quoi mon projet de maîtrise aurait été beaucoup plus difficile.

RÉSUMÉ

Peu d'études ont été menées sur les systèmes de mélange triphasés. Dans un contexte d'optimisation de génération d'hydrates de dioxyde carbone, solides de masse volumique d'environ 900 kg/m^3, une étude hydrodynamique a été conduite afin de déterminer l'effet de la présence croissante de particules inertes légères (ρ=860 kg/m^3) et d'air sur la capacité de mélange de trois mobiles d'agitation différents, soient une turbine à 6 pales inclinées (PBT) en pompage vers le haut et vers le bas, une turbine à 6 pales droites de type Dispersimax avec et sans obstruction à l'aération et un agitateur de type Maxblend. Afin d'y parvenir, des mesures de couple ont été collectées en parallèle avec des données de pression à la paroi, une méthode encore inutilisée dans les conditions de l'étude. Ces dernières devaient indiquer des différences de régimes hydrodynamiques puisqu'elles consistaient essentiellement en mesures de pression dynamiques. Aucun changement d'écoulement n'a cependant pu être clairement observé par la pression, ni par la consommation de puissance mesurée indirectement par le couple développé par le système de mélange. Par ailleurs, des données de temps de mélange par tomographie à résistance électrique ont également été collectées dans le but d'aider à confirmer les résultats susmentionnés, ce qu'elles ont accompli. En effet, aucun changement notable de temps de mélange n'a pu être observé aux différentes fractions massiques de solides. Tous les essais ont été effectués à trois vitesses différentes pour chaque agitateur et en régime d'écoulement totalement turbulent. La fraction massique de solides a été variée de 0 à 25% massique.

De manière générale, il est possible de s'apercevoir que l'agitateur de type Dispersimax est efficace en termes d'aération, mais l'est très peu en entraînement de particules surtout en raison du fait que le mobile devait être placé au bas de la cuve pour avoir une bonne dispersion et distribution gazeuse. La PBT placée près de la surface en configuration de pompage vers le haut était particulièrement performante pour tirer les particules dans la cuve et pour l'entraînement d'air par la surface, mais elle perdait rapidement cette capacité lorsqu'une couche de particules n'était pas incluse dans la cuve et flottait à la surface. Le mélangeur Maxblend était efficace comme la PBT, mais perdait rapidement son efficacité lorsqu'il commençait à être immergé.

Mots-clés : Mélange triphasé, solides flottants, aération, mélangeur Maxblend, mélangeur dispersimax.

ABSTRACT

Very few studies have been conducted on three-phase mixing systems. In a context of carbon dioxyde hydrates (light solids of density around 860 kg/m^3) formation optimization, a hydrodynamic study has been developed to determine the effect of the increasing presence of low-density inert particles (ρ=860 kg/m^3) and air on the mixing performance of three different impellers : a 6 pitched-blades turbine, a six blades hollow Rushton turbine (Dispersimax) and a Maxblend mixer. Torque and wall pressure, a method still unutilized in the experiment's condition, data were collected and since these consisted essentially of dynamic pressure data, they were supposed to help identify changes in the hydrodynamic regime. Nevertheless no such changes have been clearly found either by the pressure data or the power consumption indirectly measured by the torque data. Furthermore, mixing time data by electrical resistance tomography (ERT) was collected to confirm the above-mentioned results, which they accomplished. In fact, no clear changes in mixing times have been denoted at the different solids concentrations. All the experiments were conducted at three different rotational speeds for each impeller and in completely developed turbulent flow regime. The solids mass fractions were varied from 0 to 25%.

The Dispersimax impeller was particularly good for bringing air into the tank, but was poor for dragging down floating particles mainly because it had to be placed in the bottom half of the tank to ensure good gas dispersion and distribution. The PBT, especially in up-pumping mode and near the free surface, was very efficient in particles drawdown and was also somewhat efficient in air entrainment from the free surface but lost quickly this ability when a thin layer of solids could not be dragged down. The Maxblend mixer was also efficient for both particles drawdown and air entrainment from the free surface but lost its efficiency as soon as it was submerged.

Keywords : Three-phase mixing, floating particles, aeration, Dispersimax impeller, Maxblend mixer.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE III

REMERCIEMENTS IV

RÉSUMÉ V

ABSTRACT VI

TABLE DES MATIÈRES VII

LISTE DES TABLEAUX X

LISTE DES FIGURES XI

LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS XVIII

LISTE DES ANNEXES XXII

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE 9

2.1 Cuves agitées et agitateurs 9

2.1.1 Régimes hydrodynamiques 9

2.1.2 Considérations de mélange 10

2.1.3 Suspension et tirage de particules 13

2.1.4 Turbine à pales inclinées (PBT) 14

2.1.5 Dispersimax 15

2.1.6 Maxblend 16

2.1.7 Système de contre-pales 18

2.1.8 N_{js} et N_{jd} 20

2.1.9 Hauteur de nuage et profondeur de nuage 21

2.2 Entraînement d'air 22

2.2.1 Mécanismes de formation et d'entraînement de bulles d'air 22
2.2.2 Considérations générales en agitation gaz-liquide 27
2.2.3 Mélange solide-liquide avec aération (mélange triphasé) 28
2.3 Méthodes de caractérisation de performance d'agitateurs et en milieux polyphasiques 30
2.3.1 Mesure de couple et de puissance dissipée 30
2.3.2 Mesure de pression 32
2.3.3 Tomographie à résistance électrique (ERT) 34
2.3.4 Temps de mélange 37
2.3.5 Dépistage de particules radioactives 39
2.4 Revue critique 39
2.5 Objectifs spécifiques 40
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE 41
3.1 Montage expérimental et matériel 41
3.1.1 Cuve de mélange et systèmes d'agitation 41
3.2 Stratégie expérimentale 44
3.3 Paramètres contrôlés 46
3.4 Prise de données 47
3.4.1 Couple 49
3.4.2 Pression 51
3.4.3 ERT 54
3.4.4 Incertitudes 57
3.4.5 N_{jd} 58
3.5 Étude de répétabilité 60
3.5.1 Couple 60

3.5.2 Pression 61
3.5.3 Temps de mélange 62
CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET DISCUSSION 64
4.1 Explication des résultats de couple et de pression 64
4.2 Résultats attendus 64
4.3 Analyse générale et implication des résultats de couple, de pression et de temps de mélange 65
4.3.1 Couple 65
4.3.2 Pression 70
4.3.3 Temps de mélange 74
4.4 Effet du sens de rotation (PBT) 77
4.5 Effet de la présence ou de l'absence d'obstruction au pompage d'air (Dispersimax) 80
4.6 Effet de la hauteur de l'agitateur 89
4.7 Effet de l'agitateur 90
CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 94
CHAPITRE 6 BIBLIOGRAPHIE 96

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3. 1 : Dimensions des systèmes de mélange.....44

Tableau 3. 2 : Paramètres manipulés dans les expériences 47

Tableau 3. 3 : Paramètres constants dans les expériences.....47

Tableau 3. 4 : Valeurs de couples calculées pour l'analyse de données 51

Tableau 3. 5 : Valeurs de pression calculées pour l'analyse de données 53

Tableau 3. 6 : Paramètres physiques de l'étude de répétabilité 60

Tableau 4. 1 : Temps de mélange pour les 3 systèmes d'agitation dans leur meilleure configuration pour l'inclusion de solide flottants 93

Tableau C. 1 : Données de couple à vide en selon la vitesse de rotation en sens horaire.....113

Tableau C. 2 : Données de couple à vide en selon la vitesse de rotation en sens antihoraire.....114

LISTE DES FIGURES

Figure 1. 1 : Tableau de méthodes de capture de CO_2 et leur avancement technologique (International Energy Agency-IEA, 2013).....2

Figure 1. 2 : Bouchon d'hydrates de gaz dans un oléoduc (Heriot Watt Institute of Petroleum Engineering, 2015).....4

Figure 1. 3 : Tableau présentant les différentes structures et configurations des cavités inhérentes aux hydrates de gaz en général (National Research Council, 2004).....5

Figure 2. 1 : Exemples de mobiles d'agitation utilisés en régime laminaire. A : Ancre (Post Mixing Optimization and Solutions, LLC, 2013). B : Ruban hélicoïdal (Shandong OUMI Machinery Manufacturing Co.,Ltd, 2015). 11

Figure 2. 2 : Exemple de mobiles d'agitation utilises en regime turbulent. A : Turbine à pales inclinées (Fusion Fluid Equipment, LLC, 2015). B : Turbine Rushton (Mixel agitators, 2015). C : Mixel TT (Mixel agitators, 2015). D : A310 (SPX Corporation, 2015). 11

Figure 2. 3 : Cas de dispersion et distribution en mélange (Guntzburger, 2012) (Adaptation de (Manas-Zloczower, 1997)).....12

Figure 2. 4 : Équilibre des forces gouvernant le sens du mouvement des particules flottantes (Khazam & Kresta, 2008) 13

Figure 2. 5 : Photographie de la PBT utilisée dans les expériences.....15

Figure 2. 6 : Patrons d'écoulement générés par un agitateur axial (University of Michigan, 2008) 15

Figure 2. 7 : Photographie de l'agitateur de type Dispersimax utilisé dans les expériences 16

Figure 2. 8 : Patrons d'écoulement générés par un agitateur radial (University of Michigan, 2008) 16

Figure 2. 9 : Photographie du mélangeur Maxblend utilisé dans les expériences 17

Figure 2. 10 : Patrons d'écoulement générés par l'agitateur de type Maxblend (Iranshari, et al., 2007).....18

Figure 2. 11 : Efficacité d'entraînement de particules selon la variation du nombre de contre-pales (Khazam & Kresta, 2008) 19

Figure 2. 12 : Effet du niveau d'immersion d'une PBTU et vers le bas sur la vitesse d'immersion des particules (Khazam & Kresta, 2008) 21

Figure 2. 13 : Graphique de l'interaction des forces de turbulence, de tension de surface et de gravité (Bhattacharya, Hebert, & Kresta, 2007).....24

Figure 2. 14 : Mécanisme d'entraînement de l'air et tirage de l'air vers le fond de la cuve (Bhattacharya, Hebert, & Kresta, 2007).....25

Figure 2. 15 : Courbes typiques de puissance consommée (Po_g) en fonction du taux d'alimentation de gaz pour un système de mélange triphasé avec une turbine Rushton et différentes concentrations de billes de verre (Chapman, Nienow, Cooke, & Middleton, 1983).....29

Figure 2. 16 : Procédure de mesure de la conductivité électrique sur un plan (Bera, 2012).....35

Figure 2. 17 : Cartes de trois plans et construction d'une image 3D (Wang, Marashdeh, Fan, & Warsito, 2010).....36

Figure 2. 18 : Courbe de décoloration typique pour le Maxblend avec exemples d'images (Guntzburger, 2012).....38

Figure 3. 1 : Nomenclature des paramètres de dimensionnement de cuve agitée.....41

Figure 3. 2: Cuve de réaction pouvant être mise sous pression utilisée pour la production d'hydrates de CO_2 42

Figure 3. 3: Cuve utilisée pour l'étude hydrodynamique présentée dans ce document.....43

Figure 3. 4 : Schéma présentant la position des capteurs de pression sur la cuve de mélange.....52

Figure 3. 5 : Schéma présentant la position et l'agencement des électrodes sur la cuve de mélange 54

Figure 3. 6 : Signal ERT pour la PBTU placée à 6'' du fond de la cuve à 480 RPM et à 15 %wt de particules (**Plan 1**).....55

Figure 3. 7 : Signal ERT pour la PBTU placée à 6'' du fond de la cuve à 480 RPM et à 15% wt de particules (**Plan 4**) 56

Figure 3. 8 : Signal ERT pour la PBTU placée à 6'' du fond de la cuve à 480 RPM et à 15 %wt de particules agrandi sur la plage d'intérêt (sur ±0.5% de la valeur moyenne des 5 derniers points) (**Plan 4**) 56

Figure 3. 9 : Résultats de N_{jd} en fonction de la fraction massique de particules avant manipulation des données pour la PBTD 59

Figure 3. 10 : Résultats de N_{jd} en fonction de la fraction massique de particules après manipulation des données pour la PBTD 59

Figure 3. 11 : Résultat de couple de l'étude de répétabilité 61

Figure 3. 12 : Résultat de pression au plan 2 de l'étude de répétabilité 62

Figure 3. 13 : Données de temps de mélange du système PBTU à 4'' du fond de la cuve pour des fractions massiques de particules de 0 %wt et de 1 %wt 63

Figure 4. 1 : Données corrigées de couple normalisées par rapport à l'essai à 0% de particules pour l'agitateur de type Dispersimax sans obstruction au pompage d'air à une hauteur de 2'' du fond de la cuve 65

Figure 4. 2 : Données corrigées de couple normalisées par rapport à l'essai à 0% de particules compensant l'augmentation de volume associé à l'ajout de particules humides pour l'agitateur de type Dispersimax sans obstruction au pompage d'air à une hauteur de 2'' du fond de la cuve 66

Figure 4. 3 : Données corrigées de couple normalisées par rapport à l'essai à 0% de particules pour la PBT opérée en pompage vers le bas à 4'' du fond de la cuve 66

Figure 4. 4 : Données corrigées de couple normalisées par rapport à l'essai à 0% de particules compensant l'augmentation de volume associé à l'ajout de particules humides pour la PBT opérée en pompage vers le bas à 4'' du fond de la cuve 67

Figure 4. 5 : Données corrigées de couple normalisées par rapport à l'essai à 0% de particules pour le mélangeur Maxblend à 1'' du fond de la cuve 67

Figure 4. 6 : Données corrigées de couple normalisées par rapport à l'essai à 0% de particules compensant l'augmentation de volume associé à l'ajout de particules humides pour le mélangeur Maxblend à 1'' du fond de la cuve 68

Figure 4. 7 : Données corrigées de couple pour l'agitateur de type Maxblend à une hauteur de 1'' du fond de la cuve 69

Figure 4. 8 : Données corrigées de couple compensant l'augmentation de volume associé à l'ajout de particules humides pour le mélangeur Maxblend à 1'' du fond de la cuve 70

Figure 4. 9 : Données de pression brutes normalisées par rapport à l'état initial de 0% de particules en fonction de la fraction massique de particules pour la PBTU positionnée à 4'' du fond de la cuve (**Plan 1**) 71

Figure 4. 10 : Données de pression brutes normalisées par rapport à l'état initial de 0% de particules en fonction de la fraction massique de particules pour la PBTU positionnée à 4'' du fond de la cuve (**Plan 2**) 71

Figure 4. 11 : Données de pression brutes normalisées par rapport à l'état initial de 0% de particules en fonction de la fraction massique de particules pour la PBTU positionnée à 4'' du fond de la cuve (**Plan 3**) 72

Figure 4. 12 : Données de pression brutes normalisées en fonction de la fraction massique de particules selon l'état initial à 0% de solides pour la turbine Dispersimax **sans obstruction** au pompage d'air à 6'' du fond de la cuve (**Plan 3**) 73

Figure 4. 13 : Temps de mélange en fonction de la fraction massique de solides pour chaque vitesse de rotation (PBTU c=4'') 74

Figure 4. 14 : Temps de mélange en fonction de la fraction massique de solides pour chaque vitesse de rotation (Dispersimax c=2'') 75

Figure 4. 15 : Temps de mélange en fonction de la fraction massique de solides pour chaque vitesse de rotation (Maxblend c=1'') 75

Figure 4. 16 : Graphique présentant N_{jd} en fonction de la charge de particules pour la PBTD à toutes les hauteurs étudiées 78

Figure 4. 17 : Graphique présentant N_{jd} en fonction de la charge de particules pour la PBTU à toutes les hauteurs étudiées 78

Figure 4. 18 : Temps de mélange de la PBTU en fonction de la vitesse de rotation avec 15 %wt de particules à toutes les hauteurs étudiées 79

Figure 4. 19 : Temps de mélange de la PBTD en fonction de la vitesse de rotation avec 15 %wt de particules à toutes les hauteurs étudiées 79

Figure 4. 20 Couple en fonction de la vitesse de rotation pour l'agitateur de type Dispersimax avec et sans obstruction à l'aération, et pour deux hauteurs à partir du fond de la cuve 80

Figure 4. 21 : Données de pression en fonction de la charge de particules normalisées selon l'état à 0% de solides dans le cas de l'agitateur de type Dispersimax positionné à 6'' du fond de la cuve **sans obstruction** au pompage d'air (**Plan 1**) 82

Figure 4. 22 : Données de pression en fonction de la charge de particules normalisées selon l'état à 0% de solides dans le cas de l'agitateur de type Dispersimax positionné à 6'' du fond de la cuve **sans obstruction** au pompage d'air (**Plan 2**) 83

Figure 4. 23 : Données de pression en fonction de la charge de particules normalisées selon l'état à 0% de solides dans le cas de l'agitateur de type Dispersimax positionné à 6'' du fond de la cuve **sans obstruction** au pompage d'air (**Plan 3**) 83

Figure 4. 24 : Données de pression en fonction de la charge de particules normalisées selon l'état à 0% de solides dans le cas de l'agitateur de type Dispersimax positionné à 6'' du fond de la cuve **avec obstruction** au pompage d'air (**Plan 1**) 84

Figure 4. 25 : Données de pression en fonction de la charge de particules normalisées selon l'état à 0% de solides dans le cas de l'agitateur de type Dispersimax positionné à 6'' du fond de la cuve **avec obstruction** au pompage d'air (**Plan 2**) 84

Figure 4. 26 : Données de pression en fonction de la charge de particules normalisées selon l'état à 0% de solides dans le cas de l'agitateur de type Dispersimax positionné à 6'' du fond de la cuve **avec obstruction** au pompage d'air (**Plan 3**) 85

Figure 4. 27 : Graphique présentant N_{jd} en fonction de la charge de particules pour la turbine Dispersimax **avec obstruction** au pompage d'air à toutes les hauteurs étudiées 86

Figure 4. 28 : Graphique présentant N_{jd} en fonction de la charge de particules pour la turbine Dispersimax **sans obstruction** au pompage d'air à toutes les hauteurs étudiées 87

Figure 4. 29 : Temps de mélange de la turbine de type Dispersimax **sans obstruction** à l'aération en fonction de la vitesse de rotation avec 15 %wt de particules à toutes les hauteurs étudiées 88

Figure 4. 30 : Temps de mélange de la turbine de type Dispersimax **avec obstruction** à l'aération en fonction de la vitesse de rotation avec 15 %wt de particules à toutes les hauteurs étudiées 88

Figure 4. 31 : Graphique présentant N_{jd} en fonction de la charge de particules pour chaque système d'agitation dans ses conditions de tirage de solides flottants.....91

Figure 4. 32 : Graphique présentant la puissance dissipée par chaque agitateur dans ses conditions optimales de tirage de particules flottantes qui tourne à N_{jd} en fonction de la fraction massique de particules.....92

Figure B. 1 : Courbes de puissance de turbines typiques (Bertrand, 2015) 105

Figure B. 2 : Courbe de puissance du mélangeur Maxblend dans les cas de fluides newtoniens et non-newtoniens (Guntzburger, Fontaine, Fradette, & Bertrand, 2013) 105

Figure B. 3 : Courbes de puissance de la turbine Dispersimax à 2'' du fond de la cuve avec obstruction au pompage d'air aux différentes fractions massiques de particules 106

Figure B. 4 : Nombre de puissance moyen en fonction de la fraction massique pour Re>75000 (Dispersimax 2'' avec obstruction au pompage d'air).....106

Figure B. 5 : Courbes de puissance de la turbine Dispersimax à 2'' du fond de la cuve sans obstruction au pompage d'air aux différentes fractions massiques de particules 107

Figure B. 6 : Nombre de puissance moyen en fonction de la fraction massique pour Re>75000 (Dispersimax 2'' sans obstruction au pompage d'air) 108

Figure B. 7 : Courbes de puissance de la PBT opérée en pompage vers le bas à 6'' du fond de la cuve aux différentes fractions massiques de particules.....109

Figure B. 8 : Nombre de puissance moyen en fonction de la fraction massique pour Re>75000 (PBTD 6'') 109

Figure B. 9 : Courbes de puissance du mélangeur Maxblend à 1'' du fond de la cuve aux différentes fractions massiques de particules 111

Figure B. 10 : Nombre de puissance moyen en fonction de la fraction massique pour Re>20000 (Maxblend 1'') 111

Figure C. 1 : Couple à vide en fonction de la vitesse de rotation en sens horaire.....114

LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS

Abréviation	**Signification**
3D	Tridimensionnel
ERT	Tomographie à résistance électrique (*Electrical Resistance Tomography*)
GES	Gaz à effet de serre
PBT	Turbine à pales inclinées (*Pitched-Blade Turbine*)
PBTD	PBT utilisée en pompage vers le bas (*PBT Down-pumping*)
PBTU	PBT utilisée en pompage vers le haut (*PBT Up-pumping*)
RPM	Tours par minute (*Revolutions Per Minute*)
UHMWPE	Polyéthylène à masse molaire ultra élevée (*Ultra High Molecular Weight PolyEthylene*)
URPEI	Unité de Recherche en Procédés d'Écoulements Industriels

Symbole Grec	**Signification**	**Unités**
Δ	Variation	-
μ	Viscosité	Pa.s
ρ	Masse volumique du fluide (Densité)	kg/m^3
ρ_p	Masse volumique des particules	kg/m^3
$\rho_{hydrates}$	Masse volumiques des hydrates de gaz	kg/m^3
σ	Tension de surface	N/m

Symbole	Signification	Unités
c	Dégagement de l'agitateur	m (ou '')
d_p	Diamètre de particules	μm
D	Diamètre de l'agitateur	m (ou '')
E	Puissance dissipée par le système de mélange	W
F	Force	N
F_b	Force de flottabilité	N
F_g	Force gravitationnelle	N
F_{surf}	Tension de surface	N
g	Accélération gravitationnelle	m/s^2
H	Hauteur de liquide dans la cuve	m (ou '')
m_{eau}	Masse d'eau dans la cuve	kg
m_p	Masse de particules dans la cuve	kg
m_{tot}	Somme des masses d'eau et de particules dans la cuve	kg
N	Vitesse de rotation	RPM
N_{jd}	Vitesse à laquelle toutes les particules sont tirées dans le fluide pour au moins 2 secondes	RPM
N_{js}	Vitesse à laquelle toutes les particules sont suspendues dans le fluide pour au moins 2 secondes	RPM

P	Pression	Pa
P_{js}	Pression hydrostatique lorsque toutes les particules sont suspendues	Pa
Q_g	Débit de gaz	m^3/s
S	Niveau d'immersion de l'agitateur	m (ou '')
T	Diamètre de la cuve	m (ou '')
T_f	Différence entre le couple mesuré et le couple résiduel	N.m
T_m	Couple mesuré	N.m
T_v	Couple résiduel	N.m
T_x	Couple mesuré à une vitesse donnée	N.m
u	Composante radiale de la vitesse d'écoulement quadratique à la surface	m/s
U	Composante de vitesse moyenne axiale d'écoulement orientée vers le bas de la cuve	m/s
v	Volume contenu dans la cuve	m^3
V	Vitesse d'écoulement du fluide	m/s
w	Largeur des contre-pales	m (ou '')
w_d	Dégagement des contre-pales à la paroi	m (ou '')
x	Fraction massique de particules dans la cuve	%
z	Position de l'écoulement du fluide en termes de hauteur	m (ou '')

Nombre adimensionnel	**Signification**
Fl_g	Nombre de débit de gaz
Fr	Nombre de Froude
Kp	Constante de puissance
Np	Nombre de puissance
Re	Nombre de Reynolds
We	Nombre de Weber

LISTE DES ANNEXES

Annexe A – Arrêt d'aération de la turbine Dispersimax.....104

Annexe B – Courbes de puissance.....105

Annexe C – Données de couple à vide.....113

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

L'environnement est une préoccupation d'ordre mondial, notamment en ce qui a trait aux changements climatiques. En ce sens, il est également devenu un enjeu politique important. Ainsi, qui dit politique, dit également réglementations. Or, les réglementations afférentes aux émissions de gaz à effet de serre (GES) sont de plus en plus strictes et les entreprises doivent désormais traiter avec sérieux les extrants de leurs usines pour, par exemple, limiter les quantités ou les concentrations de produits toxiques, de produits instables ou encore de gaz à effet de serre émis.

Bien qu'il ne soit absolument pas le seul problème environnemental d'envergure planétaire, le réchauffement de la Terre est un sujet amplement discuté et partout des solutions sont recherchées afin de le contrer. Entre autres, une des pistes de solution est de limiter les émissions de gaz à effet de serre. Idéalement, dans un procédé, le principe serait d'avoir un ou des intrants qui ne produisent pas ce genre d'effluents, ce qui est rarement possible. Mais dans les cas où ce serait possible, cela engendrerait énormément de coûts et d'investissement de temps à modifier les procédés, équipements et matériaux, sans compter que la technologie appropriée n'est pas nécessairement disponible ou au point actuellement. Ainsi, l'idée est de limiter l'impact environnemental anthropogénique dans toutes ses formes, dont le secteur industriel, en attendant de pouvoir limiter les émissions en amont des procédés.

Sachant que tous les GES n'ont pas tous le même pouvoir d'effet de serre, il a fallu établir une référence entre eux. Même s'il n'est pas le plus puissant GES, le CO_2 est de loin celui qui est le plus émis dans l'atmosphère et constitue une très grande partie du problème, c'est pourquoi il est la référence choisie et chaque gaz à effet de serre peut être exprimé en kg de CO_2 en regard à son potentiel d'effet de serre uniquement. Ainsi, beaucoup d'efforts sont déployés afin de réduire l'émission anthropique de CO_2 et ils passent généralement par la capture du gaz en aval des procédés.

Par ailleurs, plusieurs méthodes avec leurs avantages et inconvénients ont été développées afin de capturer le dioxyde de carbone, certaines sont plus matures que d'autres, mais la Figure 1.1 suivante en présente plusieurs prouvant tout l'effort investi dans la capture du CO_2.

		Syngas-hydrogen capture	Post-process capture	Oxy-fuel combustion	Inherent separation
First-phase industrial applications	Gas processing	-	-	-	Sweetening
	Iron and steel	direct reduced iron (DRI)*, smelting (*e.g.* Corex)		-	DRI*
	Refining	-	-	-	Coal-to-liquids; synthetic natural gas from coal
					Hydrogen production
	Chemicals	-	-	-	Ammonia/methanol
	Biofuels	-	-	-	Ethanol fermentation
Power generation	Gas	Gas reforming and combined cycle	Natural gas combined cycle	Oxy-fuel combustion	Chemical looping combustion
	Coal	Integrated gasification combined cycle (IGCC)	Pulverised coal-fired boiler	Oxy-fuel combustion	Chemical looping combustion
	Biomass	IGCC	Biomass-fired boiler	Oxy-fuel combustion	Chemical looping combustion
Second-phase industrial applications	Iron and steel	Hydrogen reduction	Blast furnace capture	Oxy-fuel blast furnace	-
	Refining	Hydrogen fuel steam generation	Process heater and combined heat and power (CHP) capture	Process heater and CHP oxy-fuel	-
	Chemicals	-	Process heater, CHP, steam cracker capture	Process heater and CHP oxy-fuel	-
	Biofuels	Biomass-to-liquids	-	-	Advanced biofuels
	Cement	-	Rotary kiln	Oxy-fuel kiln	Calcium looping
	Pulp and paper	Black liquor gasification	Process heater and CHP capture	Process heater and CHP oxy-fuel	-

Legend: technical maturity of operational CO_2 capture plants to date.

Commercial | Demonstration | Pilot | Lab or concept

Figure 1. 1 : Tableau de méthodes de capture de CO_2 et leur avancement technologique (International Energy Agency-IEA, 2013)

Cependant, il existe une autre façon d'attraper le gaz carbonique en utilisant uniquement de l'eau : la production d'hydrates de CO_2. En effet, à partir de certaines conditions thermodynamiques, une réaction similaire à la cristallisation s'effectue entre plusieurs molécules d'eau et une molécule de gaz; le produit de cette réaction est appelé un hydrate de gaz.

Dans la majorité des projets scientifiques, les chercheurs s'inspirent énormément de phénomènes naturels qu'ils voudront adapter à leurs besoins et contraintes. Cependant, plusieurs sujets scientifiques, particulièrement en ingénierie servent plutôt à combattre un ou des phénomènes naturels. C'est dans ces esprits que s'inscrit, par exemple, l'étude des cristaux de méthanes qu'on retrouve au fond de certaines étendues d'eau assez profondes. Ces derniers sont des hydrates de gaz naturel qui sont tout simplement des cages d'eau solide emprisonnant des molécules de CH_4.

Évidemment, le gaz naturel est une ressource intéressante à exploiter et les hydrates présentent alors des options intéressantes en termes d'extraction et de transport. En effet, les hydrates de gaz naturels sont très stables, donc ils permettraient un transport et stockage facile et sécuritaire pour le méthane (Rajnauth, Barrufet, & Falcone, 2013), mais il suffit également de les chauffer pour récupérer les deux substances, soit l'eau et le méthane, donc il serait facile de récupérer le CH_4 des gisements d'hydrates naturels. Le transport du gaz naturel sous forme d'hydrates de gaz permettrait en plus de sauver beaucoup d'énergie (Daimaru, Fujii, Yamasaki, & Yanagisawa, 2004). Également, la formation d'hydrates est très exothermique, c'est-à-dire que leur formation génère beaucoup de chaleur, et inversement leur dissociation requiert beaucoup de chaleur. À titre d'exemple, l'enthalpie de formation d'hydrates de méthane est d'environ 60 kJ/mol de gaz (Jun & Marsh, 2003). Ainsi, le phénomène de production et de destruction des hydrates détient un potentiel intéressant comme système de réfrigération (Castellani, et al., 2014).

Mais, par-dessus tout, les hydrates sont reconnus pour former des bouchons dans les gazoducs et causent des ralentissements dans l'acheminement des hydrocarbures, des bris de conduites et/ou de compresseurs. Ainsi, les hydrates, dans le milieu pétrolier actuel sont un fléau et certains chercheurs mettent beaucoup d'effort à trouver un moyen d'inhiber leur formation. Le phénomène est peu complexe, le pétrole est transporté à très haute pression dans les oléoducs afin de parcourir de grandes distances à grande vitesse, mais quand il y a une restriction dans la conduite comme de l'encrassement ou un coude, la perte de charge est augmentée et la dépression locale engendrée peut faire évaporer une partie des fractions légères du pétrole. Une fois gazeuse, cette fraction légère qui est toujours à haute pression peut alors réagir avec les traces d'eau présentes dans le pétrole transporté dans le tuyau et commencer à former des hydrates si elle est à une température favorable. Or, comme en cristallisation, la partie la plus difficile est de produire un germe de cristallisation stable, mais une fois celui-ci produit, la croissance se fait rapidement. Donc, une fois la croissance bien entamée, il n'y a rien pour

l'empêcher et l'hydrate peut grossir au point d'encombrer une partie ou la totalité de l'écoulement et ainsi provoquer des bris et l'arrêt de l'acheminement de pétrole. Les conséquences de tels bris peuvent se compter par des pertes capitales astronomiques, certes, mais peuvent également se traduire en déversements importants, des catastrophes environnementales. La Figure 1.2 suivante présente un bouchon d'hydrates de gaz dans une conduite.

Figure 1. 2 : Bouchon d'hydrates de gaz dans un oléoduc (Heriot Watt Institute of Petroleum Engineering, 2015)

Un hydrate est un complexe cristallin non-dissemblant à la glace formé par un certain nombre de molécules d'eau et d'une molécule gazeuse de taille appropriée. Lorsque soumis à des conditions de température (basse) et de pression (haute) particulières, il se forme entre des molécules d'eau et une petite molécule hôte gazeuse apolaire de diamètre entre 0.35 et 0.9 nm (Sloan, 2004). Ainsi, les hydrates peuvent se former avec n'importe quel gaz, pourvu que sa taille soit adéquate pour que l'eau puisse former une cage stable; selon le gaz présent les hydrates peuvent prendre différentes formes. Certains gaz sont donc très spécifiques aux hydrates et y resteront stables, comme le méthane, alors que d'autres gaz n'ont tout simplement pas la taille voulue. C'est pourquoi il est possible de retrouver des gisements naturels d'hydrates de méthane par exemple. L'hydrate est formé de molécules d'eau liées par des ponts hydrogène créant ainsi des cages pour la molécule gazeuse qui y sera emprisonnée. Une fois complet, l'hydrate est stabilisé par des interactions répulsives entre les molécules d'eau et la molécule gazeuse. Ceci engendre qu'en

fonction de la molécule hôte gazeuse, l'hydrate prend une forme différente, notamment selon sa taille.

Trois structures sont particulièrement communes : la structure I ou sI, la structure II ou sII et la structure H ou sH. Évidemment, en fonction de chaque structure, le nombre de sites disponibles pour des molécules gazeuses variera et la taille de l'hydrate variera également. Ainsi, la Figure 1.3 résume les structures et formes des différents hydrates et des exemples de gaz qu'ils peuvent incorporer.

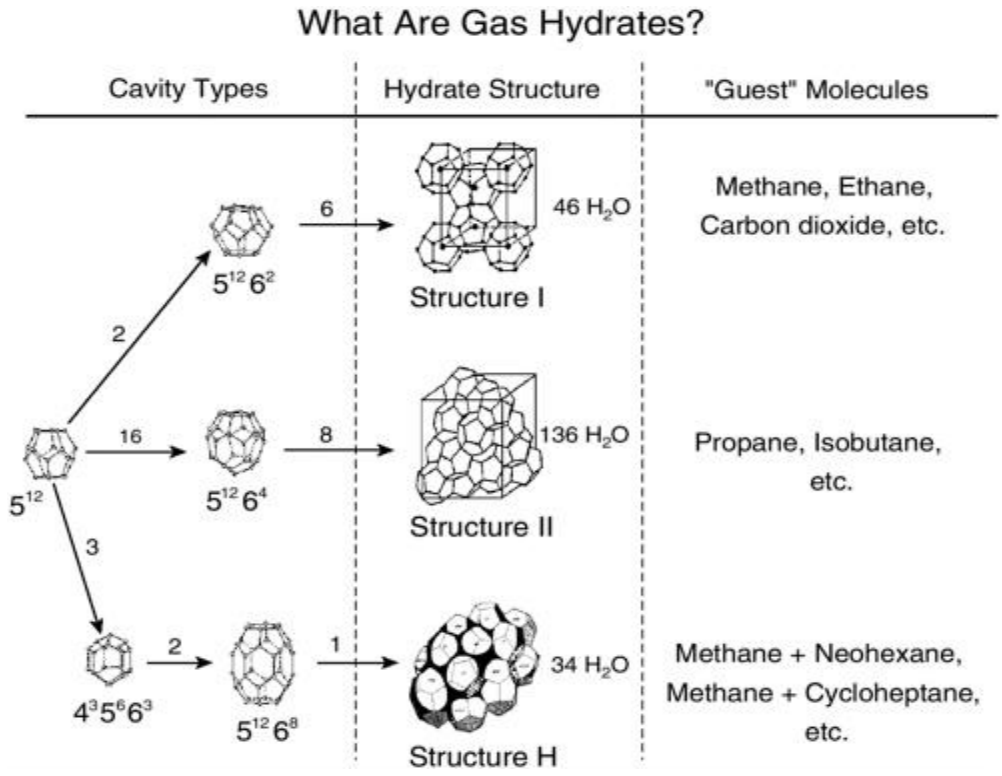


Figure 1. 3 : Tableau présentant les différentes structures et configurations des cavités inhérentes aux hydrates de gaz en général (National Research Council, 2004)

Dans la colonne de gauche, les différents types de cavités sont présentés. La valeur au-dessus de chaque flèche représente le nombre de chaque type de cavité pour former une structure donnée. Les nombres sous les cavités représentent le nombre de côtés de chaque face et l'exposant, le nombre de faces de chaque polygone pour former la cavité en question. Par exemple, la structure sI est composée de deux cavités formées par 12 pentagones et 6 cavités formées de 12 pentagones et 2 hexagones. Dans la colonne du centre sont illustrées les différentes structures et le nombre de molécules d'eau nécessaire pour les former; la structure sI nécessite 46 molécules d'eau. La

troisième colonne indique quelques exemples de molécules hôtes gazeuses avec lesquelles l'eau peut former des hydrates. Les hydrates de méthane et de CO_2 sont généralement en structure sI. La structure sI est généralement composée à 82,61% molaire d'eau et 17,39% molaire de gaz, alors que les structures sII et sH sont plutôt composées à 82,35% molaire d'eau et 17,65% molaire de gaz (Sloan, 2004).

La taille de la molécule gazeuse a énormément à jouer sur sa capacité à former des hydrates, du moins sous certaines formes comme en fait foi la Figure 1.3. Généralement, la capacité d'un gaz à être emprisonné par une cavité spécifique s'exprime par le ratio entre le diamètre de la molécule gazeuse et celui de la cavité. Il est généralement désiré que ce ratio soit près de 0.9 pour la stabilité de l'hydrate. Si le ratio est supérieur à 1, la molécule gazeuse ne peut pas entrer dans la cavité et si le ratio est inférieur à 0.9 de manière significative, la molécule ne peut pas conférer une stabilité suffisante à la structure (Sloan, 2004). La correspondance d'une molécule hôte gazeuse détermine la stabilité de l'hydrate à une température et pression données et chaque type de structure cristalline sans molécule gazeuse est instable et les liaisons H s'effondreront en l'absence d'une telle molécule pour garder les cavités en forme (Sloan, 2004). Néanmoins, d'autres critères ont également un impact significatif comme l'aspect physicochimique de la molécule gazeuse, ainsi que sa morphologie.

La formation des hydrates de gaz est similaire en plusieurs points au processus de cristallisation en solution (Douïeb S. , 2012). Ainsi, quelques principes de base seront présentés à ce sujet. Trois étapes régissent la cristallisation en solution :

1. Atteinte de l'état de sursaturation
2. Formation de germes cristallins (germination ou nucléation)
3. Croissance

(Douïeb, Fradette, Bertrand, & Haut, 2015)

La génération d'hydrates de gaz se fait généralement dans de petits systèmes agités à très petite échelle. Dans ce contexte, plusieurs problèmes pour leur production en lien aux phénomènes hydrodynamiques n'apparaissent pas, par exemple le caractère surnageant des hydrates a très peu d'impact. C'est pourquoi une évaluation de la performance d'agitateurs généralement recommandés pour l'agitation gaz-liquide-solide dans un contexte de solides flottants est de mise.

Ultimement, l'idée à exploiter est d'utiliser cette réaction en aval d'un procédé pour faire la capture et la séquestration du CO_2. Mais le tout n'est pas simple, car les conditions de formation des hydrates sont généralement difficiles à atteindre puisqu'il faut une haute pression et une basse température pour que la réaction puisse s'effectuer. De plus, les taux de formation sont généralement faibles. Or, pour contrevenir à ces contraintes ou, du moins, les amoindrir et augmenter la production d'hydrates il faut travailler sur les principes de base qui dictent l'efficacité de toute réaction chimique : les transferts de matière et d'énergie ou encore utiliser des substances qui permettent d'adoucir les conditions nécessaires à la réaction.

Ainsi, différentes approches peuvent être exploitées. Dans un premier cas, des additifs ou promoteurs cinétiques et/ou thermodynamiques peuvent être développés afin de réduire la pression d'opération et accélérer la formation d'hydrates, mais ceux-ci sont généralement toxiques et coûteux. Dans un deuxième cas, les efforts peuvent être plutôt orientés vers la conception de réacteurs spécifiques à cette réaction, l'idée demeure d'assurer un bon transfert de matière entre les différentes phases et un bon transfert d'énergie entre ces dernières phases et le système de refroidissement de la cuve de réaction. Dans un troisième cas, le travail peut être axé sur les conditions d'écoulement en cuve qui permettront d'assurer le meilleur transfert de matière et d'énergie possible.

Cette dernière voie est celle qui est empruntée dans le présent ouvrage. Si les opérations de mélange peuvent parfois sembler banales, elles ont néanmoins été impliquées dans les processus réactionnels depuis des milliers d'années. Sans nécessairement saisir l'ampleur de son importance, on avait déjà compris que l'agitation mécanique était cruciale pour une réaction rapide et efficace. Même si depuis cette époque, le mélange a évolué, les bases restent les mêmes. Cette avenue est particulièrement intéressante, car elle implique comme intrant seulement l'ajout d'énergie mécanique, ce qui pourrait faire de la capture de gaz carbonique par formation d'hydrates une solution viable en termes d'environnement et d'un point de vue financier. Puisque le traitement de rejet s'inscrit dans une optique environnementale et que cette opération ne rapporte généralement aucun dividende, le potentiel des hydrates de CO_2 est d'autant plus grand et intéressant à exploiter.

C'est dans cette optique que s'inscrit le but du projet. Afin de mieux d'améliorer les taux de production d'hydrates en cuve, une étude de mélange avec de l'eau et des solides aux propriétés

semblables aux hydrates sera effectuée pour reproduire les phénomènes hydrodynamiques présents lors de la production d'hydrates de CO_2. L'objectif général du projet est donc de déterminer l'influence de l'augmentation de la concentration de solides sur la performance d'un système d'agitation similaire au système de cuve de formation d'hydrates.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Les mobiles de mélanges fonctionnent d'une façon qui leur est propre, c'est pourquoi il y a autant de d'options et que beaucoup de critères sont à considérer pour effectuer un choix de mélangeur judicieux pour une opération donnée. Entre autres, il faut considérer la puissance consommée par le mobile, le temps qu'elle mettra à atteindre un certain degré d'homogénéité. Classiquement, ces considérations permettent de bien évaluer le mobile de mélange le plus performant lorsque deux phases sont en contact. Mais lorsque l'application le nécessite, il faut aussi déterminer quel mobile est le plus efficace pour en entraînement et dissipation gazeuse conjointement avec la suspension de solides, par exemple. Dans ce chapitre, la consommation de puissance, le temps de mélange, la capacité de suspension de solides et d'entraînement de solides surnageants, la capacité d'entraînement de gaz et les notions de mélange en général seront abordés.

2.1 Cuves agitées et agitateurs

2.1.1 Régimes hydrodynamiques

Le rapport entre les forces visqueuses et les forces d'inertie de n'importe quel écoulement s'exprime par le nombre de Reynolds (Re) défini suivant :

$$Re = \frac{\rho N D^2}{\mu} \qquad (2.\ 1)$$

Où ρ est la masse volumique du fluide, N est la vitesse de rotation de l'agitateur, D est le diamètre de l'agitateur et μ est la viscosité du fluide. Les régimes d'écoulement se classent en trois catégories distinctes par ordre croissant de Re : le régime laminaire, le régime de transition et le régime turbulent.

Lorsque l'écoulement est principalement dominé par les forces visqueuses, le régime d'écoulement est appelé laminaire et l'écoulement de fluide se fait typiquement très lentement et celui-ci se fait de manière ordonnée. À l'inverse, lorsque les forces inertielles ont le dessus sur les forces visqueuses, le régime d'écoulement est turbulent et les fluides circulent à grandes vitesses et l'écoulement est chaotique. Le régime d'écoulement transitionnel se trouve entre les deux derniers régimes et est particulièrement complexe alors que le rapport des forces n'est pas clair, que l'écoulement du fluide n'est pas bien caractérisé et dépend de nombreux facteurs. Le

comportement de l'écoulement peut avoir des aspects d'écoulement turbulent et laminaire en même temps.

2.1.2 Considérations de mélange

En cuve, le mélange se fait classiquement par l'entremise d'un mobile d'agitation relié à un moteur électrique et convertit ainsi l'énergie électrique en énergie mécanique qu'il transmet au contenu de la cuve à mélanger. Si le système dans sa globalité est simple, le choix des composantes ne l'est pas. Par exemple, il faut choisir le moteur adéquat pour les applications à effectuer en fonction de l'intervalle de puissance qu'il peut développer. Il faut également choisir le mobile d'agitation adapté à la situation ou l'application. Il y a plusieurs sortes d'agitateurs et chacun possède un domaine d'application qui lui est propre en raison de leurs différences de fonctionnement. Le choix de ce dernier se fait alors en fonction de plusieurs facteurs dont la viscosité des fluides à mélanger, la présence de solides, la présence de gaz le régime d'écoulement désiré ou requis, la présence d'une réaction chimique, le comportement rhéologique, etc.

De manière générale, pour effectuer une opération de mélange en régime d'écoulement laminaire, de gros mobiles d'agitation sont utilisés. En effet, la vitesse d'écoulement devant être lente, il faut utiliser un agitateur ayant la capacité de fournir une bonne efficacité de mélange tout en bougeant lentement. Ainsi, l'idée est de prendre un agitateur qui met en mouvement un grand volume de liquide pour compenser sa faible vitesse de rotation ; le ruban hélicoïdal et l'ancre en sont des exemples bien connus. À l'opposé, en régime turbulent, les agitateurs sont généralement beaucoup plus petits et tournent très rapidement ; les turbines à pales inclinées et Rushton en sont des exemples classiques.

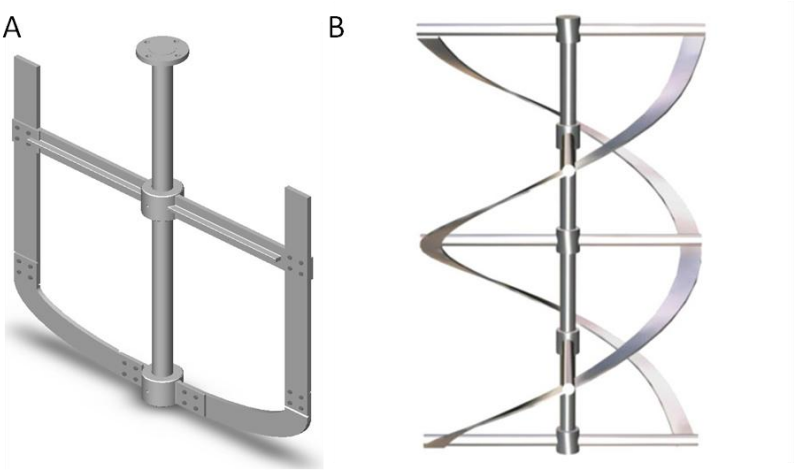


Figure 2. 1 : Exemples de mobiles d'agitation utilisés en régime laminaire. A : Ancre (Post Mixing Optimization and Solutions, LLC, 2013). B : Ruban hélicoïdal (Shandong OUMI Machinery Manufacturing Co.,Ltd, 2015).

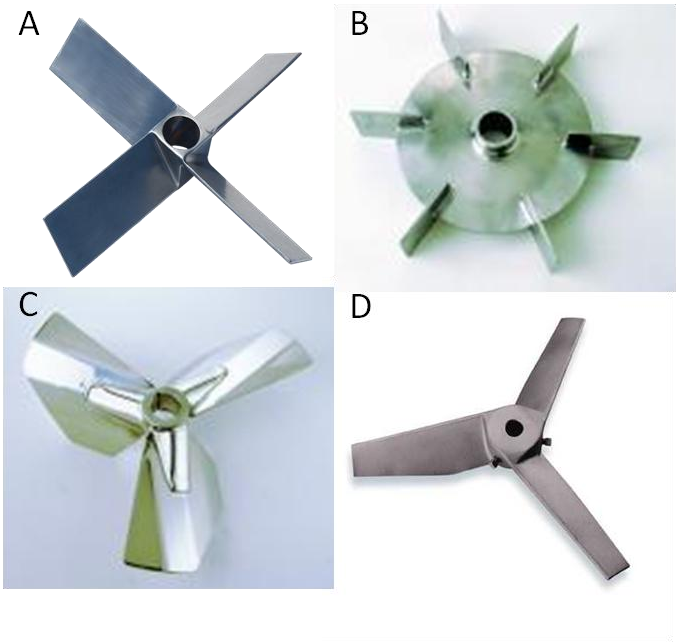


Figure 2. 2 : Exemple de mobiles d'agitation utilises en regime turbulent. A : Turbine à pales inclinées (Fusion Fluid Equipment, LLC, 2015). B : Turbine Rushton (Mixel agitators, 2015). C : Mixel TT (Mixel agitators, 2015). D : A310 (SPX Corporation, 2015).

Pour faire le bon choix d'agitateur, il faut donc savoir lequel est le plus performant dans les conditions du procédé et plusieurs critères existent afin de déterminer cette performance. La puissance dissipée est un critère important, principalement pour la viabilité de l'opération de

mélange, car plus un agitateur consomme d'énergie, plus les coûts reliés à son opération sont grands et moins sont utilisation est intéressante. L'idée est donc de trouver le mobile qui permet d'assurer le meilleur mélange à moindres coûts. Le temps de mélange est un autre critère de performance, celui-ci permet d'évaluer en combien de temps un agitateur arrive à atteindre un degré de mélange fixé, souvent défini à 99% d'uniformité d'une caractéristique choisie (température, concentration, couleur, …).

Il est par ailleurs approprié de définir ce qu'est le mélange et ne pas le confondre avec l'agitation qui est la mise en mouvement d'un fluide dans une cuve agitée. Le mélange implique plutôt l'imbrication de plusieurs phases originalement séparées (Guntzburger, 2012), le but du mélange étant de rendre ces différentes phases homogènes les unes par rapport aux autres, soit à avoir une bonne dispersion et une bonne distribution des phases. La Figure 2.3 suivante présente les différents cas de mélange possibles.

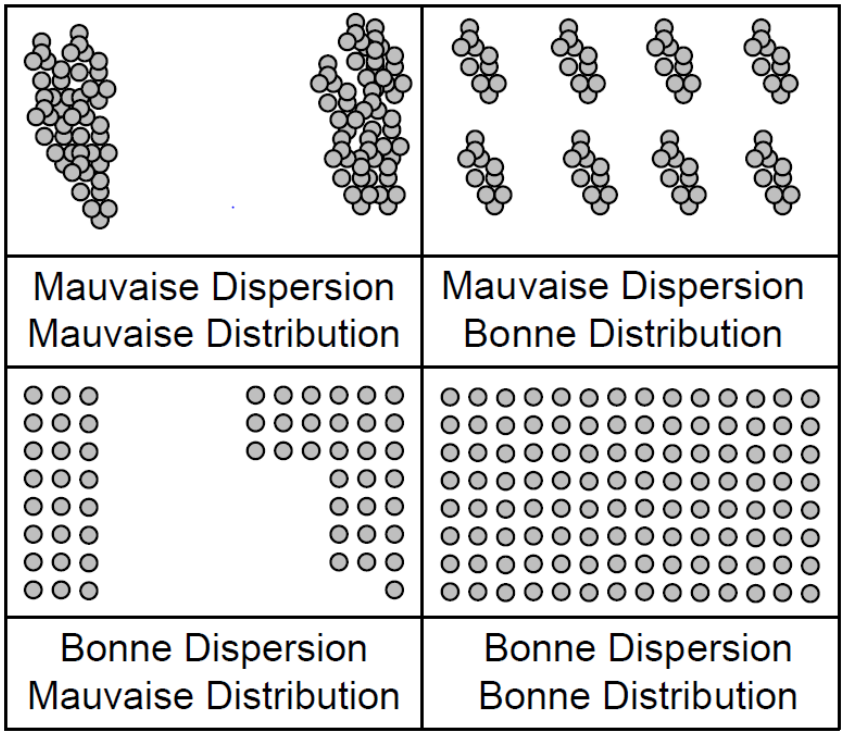


Figure 2. 3 : Cas de dispersion et distribution en mélange (Guntzburger, 2012) (Adaptation de (Manas-Zloczower, 1997))

Un bon mélange, soit une bonne distribution et une bonne dispersion confère aux différentes phases la meilleure surface de contact entre elles, ce qui est primordial en milieu réactionnel, comme, par exemple, pour la formation d'hydrates de gaz.

2.1.3 Suspension et tirage de particules

En suspension et tirage de solides, l'agitateur doit apporter suffisamment d'énergie afin de contrer, l'effet de la gravité qui tend à séparer les phases. Dans le cas classique de solides plus denses que la phase continue, la gravité fait en sorte que ceux-ci coulent au fond de la cuve. Pour avoir une bonne dispersion et une bonne distribution, il faut alors un système de mélange apportant assez d'énergie pour permettre aux solides de remonter dans la cuve de manière à être en concentration à peu près égale en tout point de la cuve. De manière analogue, lorsque les solides sont de masse volumique inférieure au fluide, l'agitateur doit encore apporter de l'énergie, mais cette fois, en quantité suffisante pour entraîner les particules dans le fluide jusqu'au fond de la cuve et atteindre le degré d'homogénéité désiré. Cette quantité d'énergie se définit par l'atteinte d'un équilibre de forces qui favorise le mouvement vers le bas des particules. En effet, les forces de turbulence et de traînée doivent à la base être plus importantes que les forces de flottabilité et de tension de surface (Khazam & Kresta, 2008). La Figure 2.4 suivante illustre le schéma des forces appliquées sur les particules.

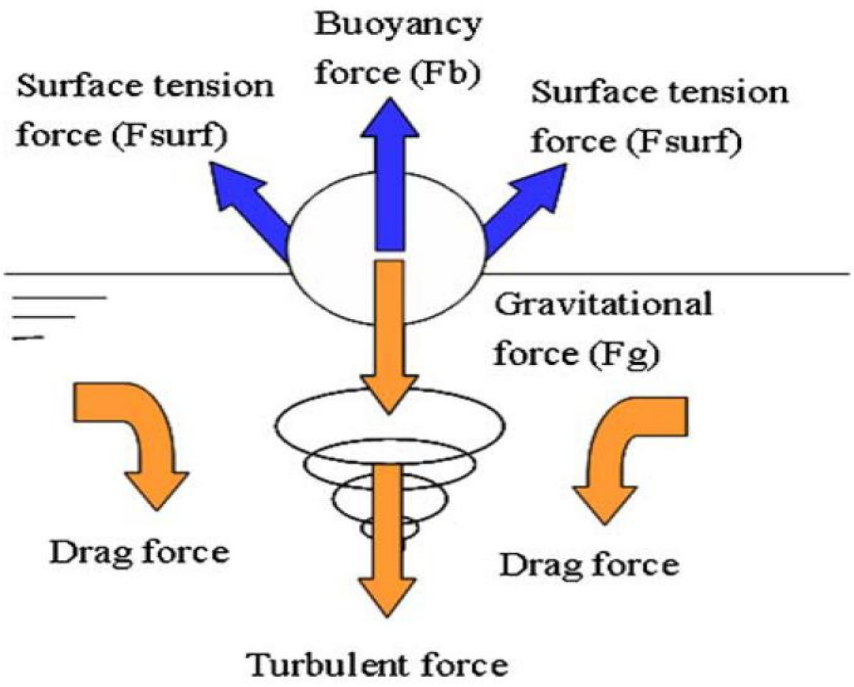


Figure 2. 4 : Équilibre des forces gouvernant le sens du mouvement des particules flottantes (Khazam & Kresta, 2008)

En ce sens, il est important de déterminer quel agitateur permet d'atteindre ce résultat en dépensant le moins d'énergie possible. Par ailleurs, il est recommandé, pour avoir une opération stable et à faibles coûts énergétiques sans trop d'entraînement d'air de la surface libre de placer l'agitateur à une hauteur de c=3T/4 avec un système complet de contre-pales (Özcan-Taskin & McGrath, 2001), où T est le diamètre de la cuve.

Il existe deux mécanismes par lesquels il peut y avoir du tirage de particules flottantes. Les particules sont entraînées dans le liquide soit par les boucles de circulation inhérentes au mouvement du mobile de mélange ou encore par les tourbillons entraînant de l'air dans le liquide (Özcan-Taskin & Wei, 2003). Il faut toutefois bien définir les besoins de présence ou d'absence d'air dans la cuve selon l'opération à l'étude.

Les écoulements développés par les agitateurs sont généralement catégorisés en deux classes : l'écoulement axial et l'écoulement radial. Chacun des deux types a son propre mécanisme pour le mélange solide-liquide. Par exemple, en suspension de solides en régime turbulent, l'écoulement axial est généralement préféré à son homologue radial ; c'est également vrai en tirage de particules flottantes, alors qu'il est suggéré d'utiliser un agitateur axial ou mixte (Özcan-Taskin & McGrath, 2001). Pour un écoulement axial, le tirage de particules est beaucoup plus aisé. Donc, il nécessite moins de puissance lorsque l'opération se fait en pompage vers le haut par rapport au même système en pompage vers le bas lorsque le niveau d'immersion du mobile de mélange n'est pas trop grand (Özcan-Taskin, 2006). De même, pour un mobile d'agitation axial, si l'agitateur est trop grand (D=T/2), l'écoulement généré sera presque radial, ainsi, il est préférable d'utiliser un plus petit mobile d'agitation (D=T/3) puisque la décharge axiale de l'écoulement sera plus forte (Özcan-Taskin & Wei, 2003). L'importance des agitateurs et de leurs différences dans les systèmes de mélange solide-liquide étant explicite, il est nécessaire de définir les agitateurs utilisés dans la présente étude.

2.1.4 Turbine à pales inclinées (PBT)

La PBT est un agitateur classique utilité dans des opérations de mélange en régime laminaire ou turbulent qui peut pomper le fluide vers le haut ou vers le bas tout dépendant de son sens de rotation. Il est très souvent utilisé notamment dans les opérations de suspension de solides, mais est moins efficace qu'une turbine à pales droites pour la dispersion de gaz. L'opération d'une

telle turbine engendre un écoulement dit axial et les Figures 2.5 et 2.6 suivantes illustrent l'agitateur et son profil de mouvement de fluide.

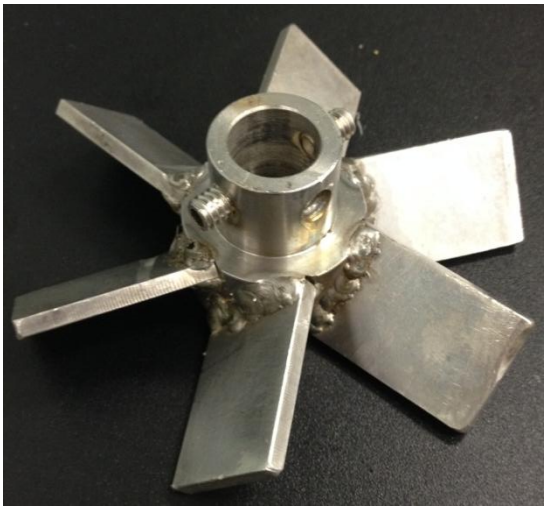


Figure 2. 5 : Photographie de la PBT utilisée dans les expériences

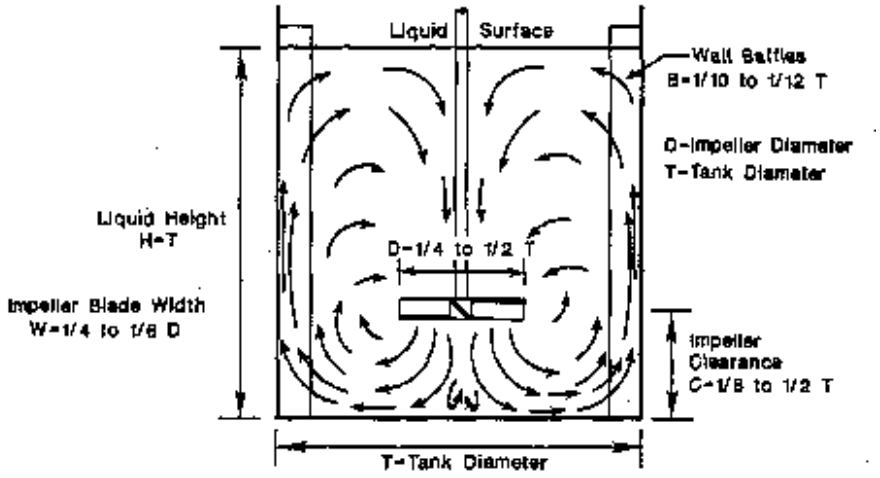


Figure 2. 6 : Patrons d'écoulement générés par un agitateur axial (University of Michigan, 2008)

2.1.5 Dispersimax

La turbine de type Dispersimax est un agitateur classique, soit la turbine Rushton, légèrement modifiée. La modification consiste en l'ajout de trous d'aération entre les pales de l'agitateur avec un arbre de rotation creux permettant d'exploiter la dépression créée derrière les pales de l'agitateur en mouvement lors de sa rotation et de pomper du gaz à même le mobile de mélange par gradient de pression. L'opération d'une telle turbine engendre un écoulement radial idéal

pour la dispersion gazeuse et les Figures 2.7 et 2.8 suivantes illustrent l'agitateur et son profil de mouvement de fluide.

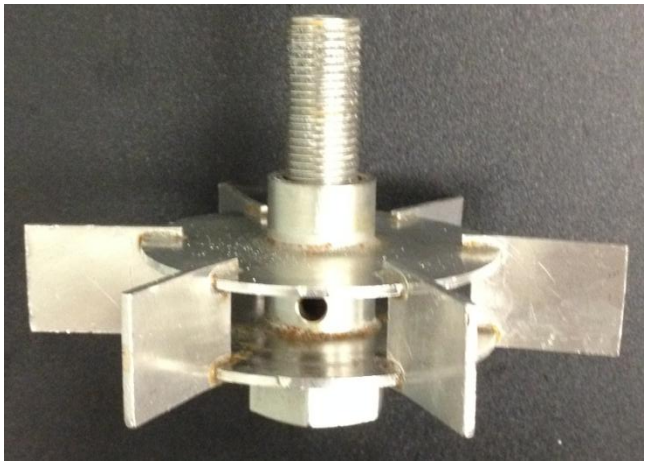


Figure 2. 7 : Photographie de l'agitateur de type Dispersimax utilisé dans les expériences

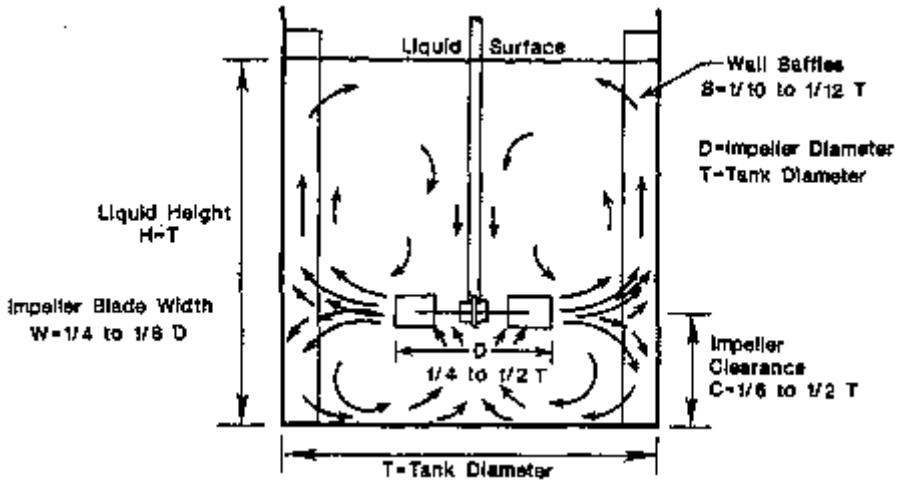


Figure 2. 8 : Patrons d'écoulement générés par un agitateur radial (University of Michigan, 2008)

2.1.6 Maxblend

Le mélangeur Maxblend est un mobile de mélange moins classique développé durant les années 1990 par Sumitomo Heavy Industrials Mechanical & Equipements. Il s'agit d'un agitateur beaucoup plus massif que les autres mobiles susmentionnés. Il est donc également utilisé à des vitesses beaucoup plus petites en raison des contraintes mécaniques engendrées par son

mouvement et la consommation de puissance qui lui est associée. Dans les opérations où l'aération du liquide n'est pas désirée, l'agitateur sera complètement submergé par le liquide, mais dans le cas où l'entraînement d'air au-dessus de la surface libre dans le liquide est voulu ou encore s'il faut tirer des particules flottantes dans le liquide, il est possible de concevoir le mobile de type Maxblend pour qu'il dépasse de la surface libre afin de la rendre très instable et d'entraîner l'air par son mouvement (le phénomène d'entraînement d'air par la surface libre est expliqué plus loin dans la Section 2.2). L'agitateur doit par ailleurs être positionné très près du fond de la cuve. Il peut également être utilisé en présence de fluides newtoniens ou non-newtoniens. Il est utilisé en mélange liquide-liquide, liquide-solide et gaz-liquide. Ainsi, il n'y a aucune raison pour laquelle il ne pourrait pas être utilisé en mélange gaz-liquide-solide. Les Figures 2.9 et 2.10 présentent l'agitateur en soi et l'écoulement qu'il engendre.

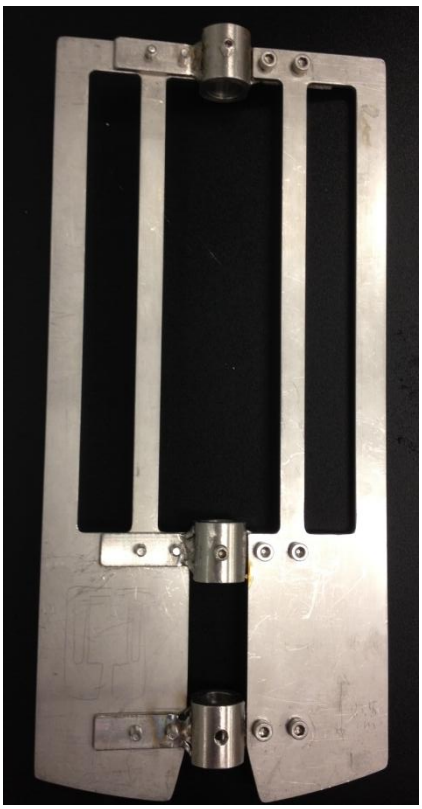


Figure 2. 9 : Photographie du mélangeur Maxblend utilisé dans les expériences

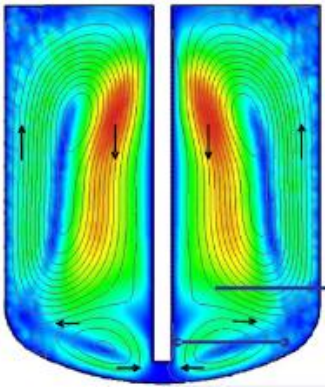


Figure 2. 10 : Patrons d'écoulement générés par l'agitateur de type Maxblend (Iranshari, et al., 2007)

Les patrons d'écoulement de l'agitateur de type Maxblend sont donc très semblables à ceux d'agitateurs axiaux classiques à la différence que la boucle de circulation supérieure est très grande en raison de la taille du mobile de mélange. La boucle inférieure est quant à elle petite en raison de la proximité de l'agitateur au fond de la cuve.

2.1.7 Système de contre-pales

En 2008, Khazam et Kresta ont démontré que pour entraîner des particules flottantes, la présence de contre-pales est essentielle. En effet, en leur absence, la formation du vortex contribue à la séparation des phases en concentrant la couche de particules près de la surface par l'action de la force centrifuge et l'élimination de ce vortex est cruciale pour l'entraînement des particules (Khazam & Kresta, 2008). Ainsi, ils ont utilisé trois systèmes différents : le premier sans contre-pales, le deuxième avec une seule contre-pale et le troisième avec le système de contre-pales complet, soit avec 4 contre-pales. La Figure 2.11 montre les résultats qu'ils ont obtenus.

Table 5. Different baffle configurations studied [Color figure can be viewed in the online issue, which is available at http://www.interscience.wiley.com/.]

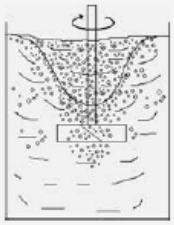
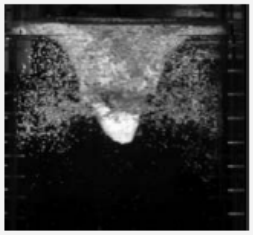
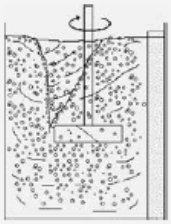
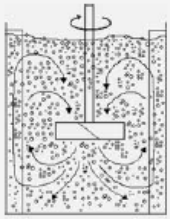
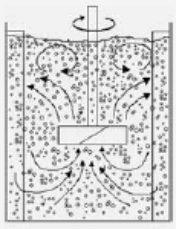
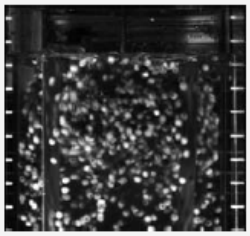
Baffle configuration	Top view of the tank	Sketch of the system	Experimental picture
No baffles (unbaffled)			
One baffle			
Fully baffled: four full baffles (PBTD and PBTU shown)		 Down-pumping  Up-pumping	

Figure 2. 11 : Efficacité d'entraînement de particules selon la variation du nombre de contre-pales (Khazam & Kresta, 2008)

En présence de système complet de contre-pales, deux mécanismes agissent pour l'entraînement de solides flottants : la force de traînée et les fluctuations turbulentes et l'utilisation de contre-pales pour supprimer le vortex et augmenter la turbulence et la traînée est la meilleure façon d'entraîner les particules flottantes (Khazam & Kresta, 2008). À petites immersions de la PBT, la turbulence est la force prédominante quant à l'inclusion des solides dans le fluide autant en pompage vers le bas que vers le haut. À l'inverse, lorsque l'immersion est plus importante, la force de traînée devient le mécanisme d'entraînement dominant (Khazam & Kresta, 2008).

2.1.8 N_{js} et N_{jd}

En suspension de solides, un des paramètres les plus importants pour savoir si la suspension est complète est la vitesse d'agitation à laquelle toutes les particules sont suspendues pour au moins deux secondes (N_{js}). Plusieurs méthodes existent pour la mesurer, mais le principe inverse, soit la vitesse d'immersion des particules ou la vitesse à laquelle toutes les particules flottantes sont tirées dans le fluide pour au moins deux secondes (N_{jd}) est beaucoup moins bien étudié. Sa détermination est particulièrement ardue en raison du fait que même à de très grandes vitesses, des particules arrivent à apparaître à la surface du liquide (Khazam & Kresta, 2008). Pour l'instant, sa mesure est principalement effectuée de manière visuelle et pour en amoindrir l'incertitude, Khazam et Kresta (2008) répétaient l'expérience 3 fois et obtenaient une répétabilité à ±5 RPM. Par ailleurs, la relation entre N_{jd} et la concentration de particules serait linéaire et moins l'agitateur est submergé, moins la vitesse nécessaire à l'entraînement de la totalité des particules est grande autant en pompage vers le haut que vers le bas (Khazam & Kresta, 2008).

Pour la PBT, en pompage vers le haut, l'écoulement de décharge de l'agitateur agit sur la surface libre la déstabilisant grandement en raison de la turbulence et de l'énergie de décharge, permettant ainsi l'inclusion des particules dans le fluide (Khazam & Kresta, 2008). Cependant, ceci est vrai seulement pour de faibles immersions de l'agitateur, soit à moins de 37,5% du diamètre de la cuve (S/T=0,375, où S est le niveau d'immersion de l'agitateur (voir Figure 3.1)) ; pour de plus grandes submersions, l'efficacité de tirage de particules diminuant drastiquement comparativement au mode de pompage vers le bas (Khazam & Kresta, 2008). Lorsque la submersion devient importante (>T/2), l'écoulement de décharge devient entièrement submergé et atteint la paroi de la cuve au lieu de la surface libre, ne laissant que très peu d'énergie pour le tirage de particules (Khazam & Kresta, 2008). Par ailleurs, lorsque la PBT est utilisée en pompage vers le bas, elle utilise les boucles de circulation de fluide engendrée par le mouvement de l'agitateur pour tirer les particules dans le fluide et il s'agit d'une énergie stable pour une plus grande plage d'immersion de l'agitateur (Khazam & Kresta, 2008).Les résultats obtenus par Khazam et Kresta en 2008 en font foi de façon éloquente et montrent qu'en tirage de particules flottantes pour la PBT, les conditions de pompage vers le haut à faible submersion est la meilleure configuration. La Figure 2.12 présente ces résultats et la relation linéaire entre N_{jd} et la concentration de particules.

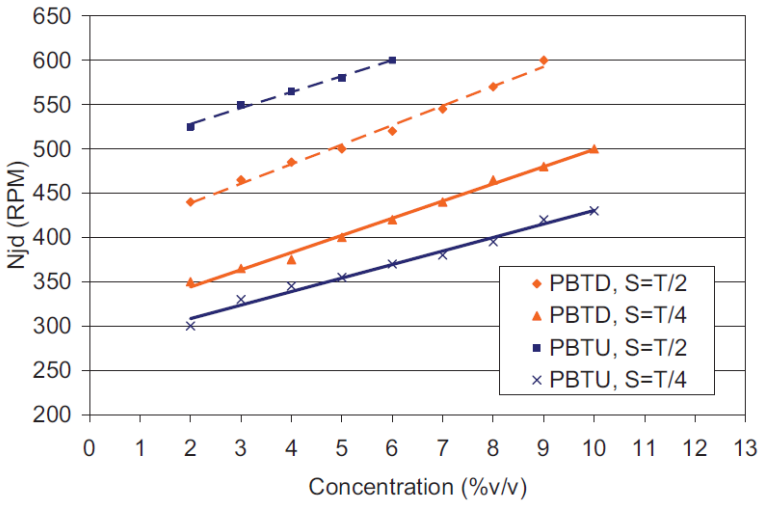


Figure 2. 12 : Effet du niveau d'immersion d'une PBTU et vers le bas sur la vitesse d'immersion des particules (Khazam & Kresta, 2008)

où N_{jd} est la vitesse d'immersion.

2.1.9 Hauteur de nuage et profondeur de nuage

En suspension de solides, il existe un niveau auquel la majorité des particules sont élevées, même au-delà de N_{js} (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004). Cette distance à partir du fond de la cuve est appelé hauteur de nuage (*cloud height*) et sous ce niveau, le fluide est dit riche en particules, alors qu'au-dessus, seulement quelques particules occasionnelles s'y aventurent (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004). Le même genre de phénomène existe pour les solides dont la masse volumique est inférieure à celle du fluide, mais celui-ci s'appelle plutôt la profondeur du nuage (*cloud depth*), mais sa mesure est plus compliquée en raison de la déformation de la surface libre. Encore une fois, lorsque les solides sont tirés dans le fluide, la majorité des particules descendent à un certain niveau à partir de la surface libre, même au-delà de N_{jd}. La mesure de la profondeur ou hauteur de nuage donne une indication de la qualité de la dispersion des particules, mais il s'agit néanmoins d'une mesure à caractère subjectif de l'endroit où la concentration de solides diminue drastiquement (Khazam & Kresta, 2008).

2.2 Entraînement d'air

2.2.1 Mécanismes de formation et d'entraînement de bulles d'air

La présence de gaz dans des systèmes d'agitation de liquides est parfois nécessaire, notamment dans le cas des procédés d'absorption, d'oxydation, d'hydrogénation, de fermentation, de traitement des eaux usées et plusieurs autres (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004). L'entraînement de gaz est tout aussi vital pour la formation d'hydrates de gaz. Dans d'autres cas, la présence de gaz est indésirable. En ce sens, la vitesse d'agitation à partir de laquelle de l'air est tiré dans le liquide constitue une limite opérationnelle, une limite inférieure lorsque l'entraînement d'air est désirable et une limite supérieure dans le cas contraire (Bhattacharya, Hebert, & Kresta, 2007).

L'entraînement d'air à partir de la surface libre dépend de trois facteurs : l'effet de la gravité, la tension de surface et la turbulence à la surface (Bhattacharya, Hebert, & Kresta, 2007). Il faut ainsi que la turbulence soit suffisamment grande pour contrer les deux autres facteurs pour former des bulles dans le système. La taille des bulles est déterminée par l'écoulement tout juste sous la surface dont l'action est de tirer les bulles dans la cuve (Bhattacharya, Hebert, & Kresta, 2007).

Depuis 1958, plusieurs études ont été conduites sur l'entraînement d'air en présence de contre-pales. Les sujets ont été variés : le transfert de masse, l'effet du type d'agitateur, de la vitesse d'agitation et de l'immersion de l'agitateur sur les taux d'aération, la relation entre la puissance consommée et le taux d'aération par la surface libre, les effets des propriétés de fluides, des paramètres d'opération et de la géométrie de la cuve sur le début de l'entraînement d'air, etc. (Bhattacharya, Hebert, & Kresta, 2007). Plusieurs corrélations empiriques ont été développées afin d'établir des relations entre vitesse de rotation nécessaire à l'aération et différents paramètres géométriques comme D/T, S, H (voir Figure 3.1) et les propriétés physiques des fluides, mais ces dernières ne sont pas convaincantes à l'extérieur des plages d'opération dans lesquelles elles ont été construites en raison de la forte dépendance des patrons d'écoulement à la géométrie du système (Bhattacharya, Hebert, & Kresta, 2007). Néanmoins, des éléments de différentes études permettent d'établir que la formation de bulles et l'entraînement de celles-ci s'effectuent en

étapes distinctes et permettent de dresser une liste de trois mécanismes susceptibles d'expliquer la formation de bulles d'air par la surface libre en écoulement complètement turbulent :

- Bris de la surface libre par bris de vagues
- Impacts de gouttelettes à la surface
- Emprisonnement d'air par des tourbillons près de la surface libre

(Bhattacharya, Hebert, & Kresta, 2007)

Le premier mécanisme peut être éliminé comme explication des premières phases de l'entraînement d'air puisqu'il requiert une forte turbulence interagissant avec la surface, d'autres mécanismes seront effectifs avant celui-ci, et le deuxième peut être éliminé, car de grands nombres de gouttelettes n'ont jamais été observés au-dessus de la surface (Bhattacharya, Hebert, & Kresta, 2007). Dans le troisième mécanisme, l'air est emprisonné à la surface libre par les fluctuations de vélocité en régime d'écoulement turbulent : lorsque la vitesse est assez grande pour contrer la tension de surface et les effets de la gravité, de petits tourbillons locaux sont formés à la surface et de l'air commence à être entraîné (Bhattacharya, Hebert, & Kresta, 2007). Il s'agit du mécanisme qui semble le plus près de la réalité et il repose fortement sur la turbulence pour déformer la surface libre et permettre à l'air d'entrer dans le liquide.

Comme il a été discuté préalablement, l'ampleur des déformations de la surface libre permettant l'entraînement d'air dépend de la force relative attribuable à l'énergie cinétique atteignant la surface libre (force perturbatrice) par rapport aux forces de gravité et de tension de surface (forces stabilisatrices). L'ampleur relative à ces dernières forces peut être estimée à l'aide de deux nombres adimensionnels, soient les nombres de Froude (Fr) qui donne une idée du rapport de force entre l'énergie cinétique et l'énergie gravitationnelle et de Weber (We) qui donne une indication du rapport de forces entre l'inertie et la tension de surface (Bhattacharya, Hebert, & Kresta, 2007). Lorsque Fr est grand, la turbulence domine la gravité et de grandes déformations de la surface peuvent être créées ; lorsque We est grand la turbulence est dominante par rapport à la tension de surface et la cause des bris de la surface libre ainsi que la formation d'éventuelles gouttes de liquide et de jets contribuant à l'entraînement d'air (Bhattacharya, Hebert, & Kresta, 2007). L'effet des trois forces étant interdépendant, la Figure 2.13 illustre leur relation à différentes distances caractéristiques de la surface libre.

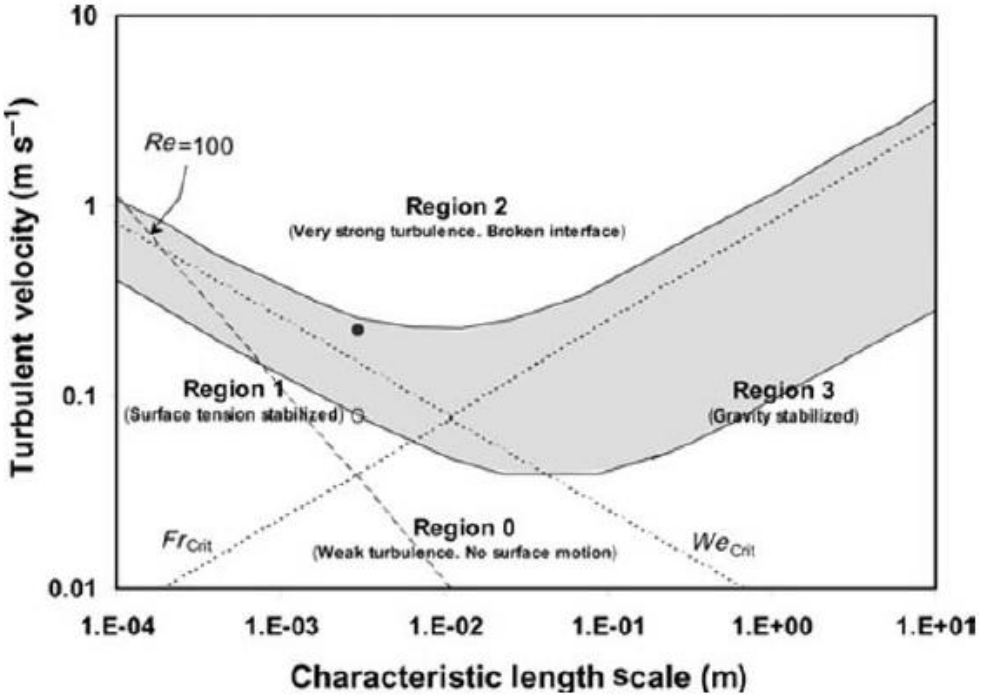


Figure 2. 13 : Graphique de l'interaction des forces de turbulence, de tension de surface et de gravité (Bhattacharya, Hebert, & Kresta, 2007)

La Figure 2.13 précédente présente les quatre régions d'opération en termes de stabilité de la surface libre en entraînement d'air délimitées par les traits pointillés suivant l'évolution des nombres de Froude et de Weber critiques (Fr_{crit} et We_{crit}), soient les valeurs à partir desquelles la turbulence prend le dessus sur les forces de gravité et de tension de surface respectivement. La région 2 est celle pour laquelle l'entraînement d'air par la surface libre est possible, car la turbulence est dominante par rapport à la gravité ($Fr>Fr_{crit}$) et à la tension de surface ($We>We_{crit}$). Dans la région 1, la turbulence domine la force de gravité ($Fr>Fr_{crit}$), mais pas la tension de surface ($We<We_{crit}$) qui, elle, stabilise la surface et empêche l'entraînement d'air. De manière analogue, dans la région 3, la turbulence domine la tension de surface ($We>We_{crit}$), mais pas la gravité ($Fr<Fr_{crit}$) qui, elle, stabilise la surface et empêche l'entraînement d'air. Dans la région 0, la surface est immobile et la turbulence est dominée par la gravité ($Fr<Fr_{crit}$) et par la tension de surface ($We<We_{crit}$) ; aucun entraînement d'air n'est possible. Dans la région ombrée, l'interaction entre la turbulence et la surface libre augmente graduellement de faibles ondulations de la surface près de la limite inférieure au bris de la surface et à l'entraînement d'air près de la limite supérieure (Bhattacharya, Hebert, & Kresta, 2007).

D’un point de vue général, plusieurs critères peuvent être utilisés afin de déterminer la qualité d’un système de dispersion gazeuse. En effet, pour avoir un système adéquat, il ne faut pas seulement qu’il soit capable d’introduire du gaz dans le liquide, il faut également qu’il soit capable de le garder à l’intérieur du liquide en quantité suffisante pour un temps suffisant et que les bulles de gaz soient de petites tailles afin de maximiser la surface de contact gaz-liquide. Ainsi, pour que les bulles soit tirées dans la cuve après avoir été formées à la surface, il faut que l’écoulement moyen près de la surface libre soit suffisamment fort pour les tirer jusqu’aux boucles de circulation principales engendrées par le mouvement de l’agitateur (Bhattacharya, Hebert, & Kresta, 2007). La Figure 2.14 présente le mécanisme d’entraînement d’air et son tirage par l’écoulement du fluide.

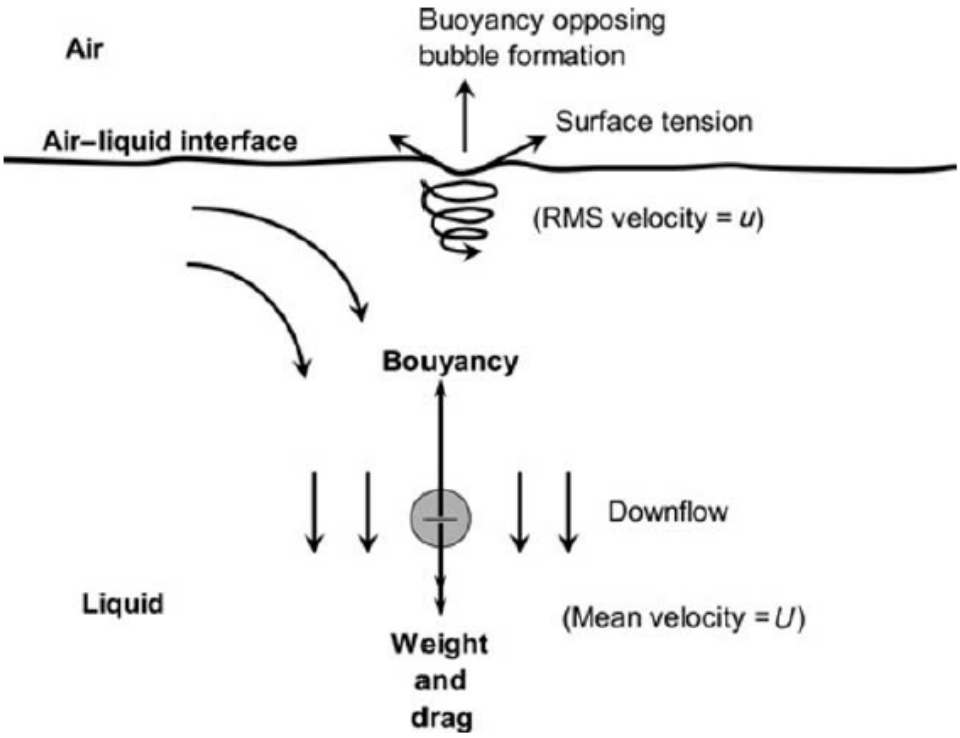


Figure 2. 14 : Mécanisme d’entraînement de l’air et tirage de l’air vers le fond de la cuve (Bhattacharya, Hebert, & Kresta, 2007)

La Figure 2.14 précédente explique, d’une part, le mécanisme suivi pour la formation des bulles d’air à la surface et, d’autre part, le mécanisme d’entraînement de ces dernières vers le fond de la cuve. Il faut donc que l’écoulement près de la surface soit assez fort pour entraîner les bulles

jusqu'aux lignes de courants principales dirigées vers le bas du système de mélange pour contrer la force de flottabilité de la bulle et pour que son temps de séjour dans la cuve soit significatif.

Par ailleurs, afin de retenir les bulles d'air dans la cuve, il faut que la composante dirigée vers le bas de la vitesse moyenne d'écoulement à la surface soit plus grande ou égale à la vitesse à laquelle la bulle remonte vers la surface dans le liquide (Bhattacharya, Hebert, & Kresta, 2007). Ainsi, un plus haut niveau de turbulence contribue à la déformation de la surface libre et à la formation de bulles, mais l'augmentation de la densité et de la viscosité du fluide rend l'entraînement d'air plus facile (Bhattacharya, Hebert, & Kresta, 2007). En effet, il est considéré que lorsque le terme de gauche de l'équation 2.2 suivante est plus grand que son terme de droite, la formation de bulles et leur entraînement dans la cuve est prévue.

$$\frac{u}{U} \sim C'' \left(\frac{\sigma^2 g}{\mu \rho U^5} \right)^{0.25} \qquad (2.\ 2)$$

où u est la composante axiale de la vitesse effective à la surface, U est la vitesse moyenne axiale d'écoulement vers le bas de la cuve, C'' est une constante, g est l'accélération gravitationnelle, μ est la viscosité du liquide et ρ est la masse volumique du liquide.

Bhattacharya (2007) démontre par ailleurs différents éléments importants en ce qui a trait à l'entraînement d'air en cuve agitée. Premièrement, les propriétés du fluide et le diamètre de l'agitateur ont un impact important sur la vitesse d'agitation minimale pour l'entraînement d'air, alors que la géométrie des contre-pales n'a aucune influence sur ce paramètre. Deuxièmement, l'augmentation du niveau d'immersion de l'agitateur a comme effet d'augmenter la vitesse d'agitation minimale à l'entraînement d'air de manière indépendamment du diamètre de l'agitateur et de la nature du fluide. Troisièmement, la propagation de la turbulence à partir du mobile de mélange jusqu'à la surface et la vitesse moyenne d'écoulement près de la surface libre sont très dépendantes de la géométrie du système et ne peuvent en aucun cas être prédites ou estimées par la consommation de puissance moyenne ou les conditions près de l'agitateur.

2.2.2 Considérations générales en agitation gaz-liquide

Il a été démontré que la turbine à pales droites est la plus efficace en termes de dispersion de gaz, les turbines générant un écoulement axial peuvent également être utilisées pour cette application avec une efficacité moindre (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004). Lorsque le gaz doit être entraîné par la surface, un agitateur de type axial est plus adapté en raison de l'écoulement qu'il engendre. Cependant, lorsqu'un système d'alimentation de gaz est employé, un agitateur de type radial est généralement employé. Pour utiliser un tel système, il faut évidemment que le gaz entrant dans le liquide soit à plus haute pression que ce dernier, ce qui peut engendrer des problèmes et des coûts supplémentaires associés, par exemple, à un système de compression de gaz. Il est possible d'utiliser un système d'agitateur à arbre creux comme solution alternative lorsque le système est suffisamment petit puisque ce types d'agitateurs communément appelés agitateurs à auto-induction ne sont pas efficaces pour tirer du gaz à plus de 2,5 mètres de la surface (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004). Le principe est expliqué précédemment dans la Section 2.1.5. Par ailleurs, il est généralement conseillé d'utiliser des systèmes d'agitateurs complexes combinant un agitateur radial pour la dispersion de gaz et un ou plusieurs agitateurs axiaux pour l'entraînement de gaz (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004).

Comme mentionné précédemment, les bulles de taille minimale sont désirées puisqu'elles permettent d'assurer une surface d'échange maximale entre le gaz et le liquide. C'est la puissance développée par le mobile de mélange qui permet de déterminer la taille des bulles (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004). Le gaz est brisé en une dispersion de bulles dans les zones de cisaillement élevée comme en bout de pales d'agitateurs ou au niveau du trou de sortie d'un distributeur de gaz. Une des raisons qui fait en sorte que l'agitateur radial est plus communément utilisé en dispersion gazeuse est le fait qu'il engendre des zones de cisaillement plus grand que pour les agitateurs axiaux à une vitesse de rotation donnée près des pales et que ces dernières permettent de briser les bulles de gaz pour en réduire la taille. Par ailleurs, la puissance consommée par un agitateur est généralement grandement réduite par la présence de gaz, c'est notamment le cas de la turbine Rushton et de la turbine à pales inclinées employée en pompage vers le bas (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004).

Lorsque la présence de gaz le long de l'arbre de rotation est trop grande, il peut y avoir une grande baisse dans la consommation de puissance de l'agitateur ; le régime d'inondation de

l'agitateur est alors atteint (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004). Dans ces conditions, l'agitateur perd rapidement sa capacité d'entraînement d'air et de pompage de liquide ce qui peut avoir des impacts extrêmement négatifs sur le rendement du procédé (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004). La condition à respecter pour éviter l'atteinte de ce régime dépend du nombre de Froude et de la géométrie du système et est donnée par l'équation 2.3 (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004) :

$$Fl_g < 30Fr\left(\frac{D}{T}\right)^{3.5} \qquad (2.3)$$

et

$$Fl_g = \frac{Q_g}{ND^3} \qquad (2.4)$$

où Fl_g est le nombre de débit de gaz (ou taux d'alimentation de gaz adimensionnel), Q_g est le débit de gaz et N est la vitesse de rotation de l'agitateur.

Il est à noter que la présence faible ou modérée de gaz peut affecter la qualité du mélange par son effet sur la puissance développée par l'agitateur et par sa position puisque l'écoulement en est changé (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004). Toutefois, lorsque les bulles sont grosses et qu'il y en a beaucoup, leur mouvement vers la surface libre dû à leur force de flottabilité engendre un mouvement net du fluide vers le haut et peut occasionner une augmentation de l'intensité du mélange, il n'y a cependant aucune quantification, ni de corrélation associée à ce phénomène pour l'instant (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004).

2.2.3 Mélange solide-liquide avec aération (mélange triphasé)

« La suspension de particules à partir du fond de cuve ou tirée par la surface est souvent une nécessité en cuve agitée gaz-liquide et elle est influencée de manière excessivement complexe par la présence de gaz » (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004, p. 591). Présentement, aucune corrélation bien établie n'existe en suspension de solides dans un liquide (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004). Selon le Handbook of Industrial Mixing (2004), la suspension de solides est probablement contrôlée par l'énergie et la fréquence d'éclatements turbulents et le tirage de particules par les écoulements et tourbillons à la surface et dans les deux cas, il est supposé que la présence de bulles de gaz peut jouer un grand rôle (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004). Néanmoins, dans un système triphasé, il faut s'assurer que les besoins de suspension ou de tirage

de particules solides et de dispersion de gaz soient satisfaits individuellement (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004). Il faut par contre considérer que la rétention de gaz diminue grandement avec l'augmentation de la concentration de particules solides (Bao, Hao, Gao, Shi, & Smith, 2005). Par ailleurs, la présence d'air diminuerait N_{jd} puisque les bulles montant à la surface contribueraient à briser la couche stagnante de particules à la surface (Tagawa, Dohi, & Kawase, 2006). Malheureusement, très peu d'information a été publiée sur les systèmes de mélange triphasés. Le peu de travail qui a été effectué à cet égard a par ailleurs été fait soit sur des systèmes de lits fluidifiés (avec des particules plus denses que le liquide) ou en cuve avec des particules plus denses que le liquide avec des systèmes de distribution de gaz. Toutefois, la Figure 2.15 présente la puissance consommée par un système d'agitation avec des billes de verre et une alimentation en air :

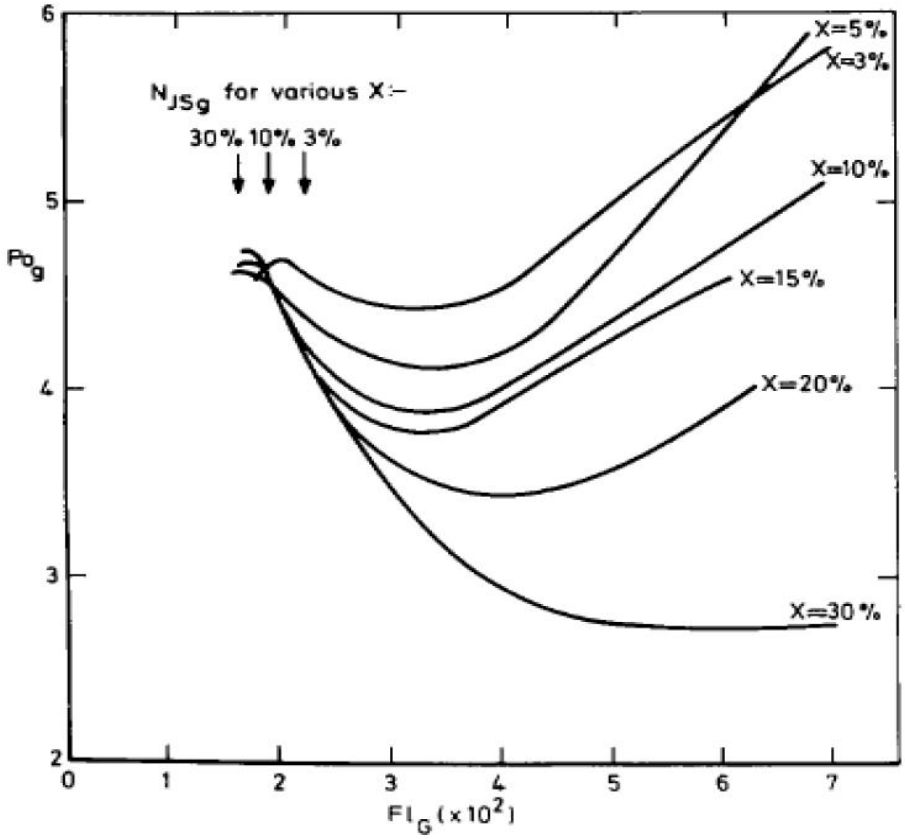


Figure 2. 15 : Courbes typiques de puissance consommée (Po_g) en fonction du taux d'alimentation de gaz pour un système de mélange triphasé avec une turbine Rushton et différentes concentrations de billes de verre (Chapman, Nienow, Cooke, & Middleton, 1983)

Ce que l'auteur stipule est que sous les 5% de particules, la présence de particules a un effet négligeable sur la tendance de consommation de puissance (Hofinger, 2012). Alors qu'à haute présence de solide (20 à 30%), la diminution de la puissance serait due au fait que les particules ne sont pas toutes en suspension et forment un « faux » fond sous l'agitateur et serait à l'origine du phénomène observé (Hofinger, 2012). Généralement, la consommation de puissance est plutôt semblable entre les systèmes d'agitation avec et sans air.

2.3 Méthodes de caractérisation de performance d'agitateurs et en milieux polyphasiques

2.3.1 Mesure de couple et de puissance dissipée

Un des paramètres les plus importants à considérer dans le choix d'un agitateur pour une application donnée est la quantité de puissance que celui-ci dissipe principalement parce qu'elle donne une indication des coûts inhérents à son utilisation. En effet, l'idée est généralement d'avoir le mélange le plus homogène possible tout en ayant le moins de puissance consommée.

En présence de fluides newtoniens, soit des fluides dont le comportement rhéologique ne change pas en fonction du cisaillement qui leur sont appliqué, la puissance dissipée par un agitateur en écoulement turbulent est généralement exprimée en nombre de puissance (Np), un paramètre constant en régime turbulent et identique pour les systèmes géométriquement semblables, défini de la façon suivante :

$$Np = \frac{P}{\rho N^3 D^5} \qquad (2.5)$$

Où Np est le nombre de puissance de l'agitateur, P est la puissance dissipée par le mouvement de l'agitateur, ρ est la masse volumique du fluide mélangé, N est la vitesse de rotation de l'agitateur et D est le diamètre de l'agitateur

Évidemment, Np étant directement proportionnel à P, plus Np est faible, plus le système de mélange est considéré comme étant performant.

En régime laminaire, pour les mêmes conditions, soient des fluides newtoniens et pour des systèmes de mélange géométriquement semblables, la puissance dissipée s'exprime plutôt selon la constante de puissance (Kp) de l'agitateur, un paramètre constant en régime laminaire et

identique pour tous les systèmes respectant les conditions susmentionnées. Ce nombre adimensionnel est défini comme suit :

$$Kp = \frac{E}{\mu N^2 D^3} \qquad (2.6)$$

où Kp est la constante de puissance de l'agitateur, E est l'énergie dissipée par l'agitateur, μ est la viscosité du fluide mélangé, N est la vitesse de rotation de l'agitateur et D est le diamètre de l'agitateur.

Comme pour le nombre de puissance, Kp est proportionnel à E et donc un agitateur performant se traduit par une faible constante de puissance.

Par ailleurs, en observant les équations de Np et Kp, la différence majeure est la propriété physique du fluide mélangé qui est considéré. En effet, dans le cas d'un écoulement turbulent où les forces inertielles sont dominantes par rapport aux forces visqueuses, la densité du fluide est importante et sert dans le calcul du nombre de puissance. À l'inverse, dans le cas d'un écoulement laminaire, les forces visqueuses dominant les forces inertielles, la viscosité du fluide mélangé est plutôt considérée dans le calcul de la constante de puissance.

Les Équations 2.5 et 2.6 sont le résultat de la résolution de bilans de quantité de mouvement où la viscosité est considérée constante. Dans les cas de fluides non-newtoniens, la viscosité du fluide mélangé ne peut pas être considérée constante et une autre approche doit être employée.

En présence de particules solides, généralement, le calcul du nombre de puissance s'effectue avec la densité moyenne du fluide et des particules et il s'agit d'une méthode qui fonctionne très bien lorsque le système de mélange a la capacité de faire le travail pour suspendre toutes les particules (Tsz-Chung Mak, 1992). Cependant, dans la région de l'agitateur, ce dernier ne ressentira cette densité qu'au moment où l'état d'homogénéisation complet est atteint (Tsz-Chung Mak, 1992). En effet, dans le cas où les particules sont plus lourdes que le liquide, à mesure que la vitesse augmente, le nuage de particules augmentera également. Ainsi, lorsque le nuage de particules est bas, l'agitateur tourne dans un fluide très concentré en particules et la densité qu'il ressent est beaucoup plus élevée que la densité moyenne entre les particules et le fluide (Tsz-Chung Mak, 1992). Puis, plus l'état d'homogénéisation est près d'être atteinte, plus la concentration en haut de cuve sera grande et celle en bas de cuve sera faible ce qui aura pour effet de diminuer la densité ressentie par l'agitateur (Tsz-Chung Mak, 1992). Ainsi, selon l'équation liant la puissance

à la densité, la puissance dissipée par l'agitateur doit diminuer lorsque la suspension de particules est complète. De manière analogue, le même genre de phénomène devrait être observable dans le cas des particules flottantes. En effet, à mesure que les particules de densité inférieure à celle du fluide circulent de plus en plus profondément, la densité autour de l'agitateur devrait diminuer et la puissance dissipée devrait également diminuer.

De manière similaire au tirage de particules de faible densité dans le fluide, lorsque des bulles de gaz sont entraînées dans le fluide et qu'elles circulent près de l'agitateur, la densité ressentie par l'agitateur diminue et la puissance dissipée aussi. Cependant, lorsque ce phénomène prend trop d'ampleur, le régime d'inondation peut être atteint et la puissance dissipée par l'agitateur diminue drastiquement (voir Section 2.2).

2.3.2 Mesure de pression

En mécanique des fluides, la pression est un terme potentiel volumique très important. En effet, il suffit d'étudier l'équation de Bernouilli, équation de conservation d'énergie mécanique issue d'un bilan d'énergie macroscopique, pour un fluide newtonien incompressible en écoulement pour s'en rendre compte :

$$\frac{1}{2}\rho V_1^2 + \rho g z_1 + P_1 = \frac{1}{2}\rho V_2^2 + \rho g z_2 + P_2 \qquad (2.7)$$

où ρ est la masse volumique du fluide en écoulement, V_1 est la vitesse d'écoulement du fluide à l'état, V_2 est la vitesse d'écoulement à l'état 2, g est l'accélération gravitationnelle, z_1 est la hauteur du fluide à l'état 1, z_2 est la hauteur du fluide à l'état 2, P_1 est la pression du fluide à l'état 1 et P_2 est la pression du fluide à l'état 2.

L'équation comporte alors des termes d'énergies cinétique, potentielle gravitationnelle et potentielle de pression. Si cette équation est utilisée pour un fluide en écoulement, les mêmes paramètres sont néanmoins pris en compte dans une cuve agitée. Ainsi, dans une telle cuve, les différents termes d'énergie sont évidemment reliés. L'énergie potentielle gravitationnelle dans un bilan énergétique sur une cuve agitée consiste essentiellement en la pression hydrostatique, soit la hauteur de la colonne de liquide. Il s'agit donc d'un paramètre constant dans une cuve de mélange fermée. Ainsi, les énergies cinétique et potentielle de pression sont alors intimement liées puisque le changement de l'un des paramètres en entraînera automatiquement un sur l'autre. La mesure de pression en continu pourrait servir à obtenir de l'information sur le régime

hydrodynamique et de ses changements dans la cuve en analysant le changement de la vitesse (ou de l'énergie cinétique) aux parois de la cuve pour différents systèmes de mélange dont les suspensions de solides et les dispersions gazeuses dans un liquide ou encore un système de mélange triphasé. Cependant, très peu de travail n'a été effectué à cet égard. Une technique employant la mesure de pression développée par G. Micale du collège universitaire de Londres en partenariat avec F. Grisafi et A. Brucato de l'université de Palerme (2002) a toutefois poussé de l'avant l'utilisation de la pression en hydrodynamique, notamment pour trouver la vitesse minimale de suspension de la totalité des particules solides (N_{js}) dans un système de mélange liquide-solide. Cette technique est expliquée à la Section 2.3.2.1.

2.3.2.1 Technique de pression de jauge

La technique de pression de jauge a été élaborée afin d'avoir une méthode fiable de mesure de N_{js} tout en limitant les inconvénients de sa mesure traditionnellement visuelle. En effet, l'approche visuelle requiert nécessairement une cuve transparente et devient très imprécise plus la concentration en solides est élevées. Avec la méthode de pression de jauge, n'importe quelle cuve peut être utilisée en autant qu'elle possède un capteur de pression judicieusement positionné dans le fond de cette dernière et permet d'avoir des mesures précises à grandes concentrations de particules solides, ce qui est très intéressant en milieu industriel.

Le principe de base de la méthode est tel que lorsque des particules solides reposent au fond de la cuve, elles sont toutes en contact les unes contre les autres et leur poids est réparti sur la paroi du fond de la cuve en tant que telle. Ainsi, le capteur de pression ne ressent pas leur présence puisque la force mécanique engendrée par le poids des particules est équilibrée par la force normale venant du contact entre les particules elles-mêmes, mais aussi et surtout entre les particules et le fond de la cuve (Micale, Grisafi & Brucato, 2002). C'est donc dire que lorsque le système est au repos et qu'il n'y a aucune agitation ou à très faible agitation ne permettant pas aux particules d'être soulevées, le capteur de pression ne ressent que la pression hydrostatique du liquide. Ainsi, à mesure que des particules sont suspendues, la masse et donc la pression ressenties par le capteur de pression augmente graduellement selon la fraction de particules en suspension ; la densité apparente du fluide augmente. Lorsque la pression est maximale, la densité apparente du fluide l'est également et c'est à ce moment que toutes les particules sont en

suspension. La première vitesse pour laquelle la pression maximale est mesurée consiste en N_{js} (Micale, Grisafi & Brucato, 2002).

Cette méthode repose toutefois uniquement sur la pression hydrostatique du fluide et des particules en suspension. Or, avec l'agitation, la vitesse du fluide passant près du capteur engendre une lecture de pression qui comporte également une composante dynamique. Le signal de pression doit donc être corrigé afin de ne pas la considérer. Il ne suffit pas cependant de soustraire au signal de pression la composante dynamique du liquide puisque le comportement du signal de pression résultant était incohérent à grande vitesse de rotation. Ceci serait dû principalement au fait que les patrons d'écoulement deviennent très affectés par la présence de particules à partir d'une certaine vitesse (Micale, Grisafi & Brucato, 2002). Ainsi, une technique de traitement de données a dû être développée dans le but de « prendre en considération que l'évolution du phénomène de suspension de solides inhibe la collecte de données significatives en regard à l'effet dynamique de la pression pour le système de mélange biphasé » (Micale, Grisafi & Brucato, 2002, p. 896). Ainsi, comme lorsque toutes les particules sont en suspension, la pression hydrostatique atteint un maximum, Micale et al. (2002) considèrent qu'une fois les particules toutes suspendues, les changements de pression sont uniquement attribuables à la composante dynamique. Comme dans le terme cinétique, la vitesse est un paramètre du deuxième ordre, la pression mesurée à partir du moment où toutes les particules sont soulevées est reliées de manière quadratique à la vitesse. Alors, à suffisamment haute vitesse, les points de pression expérimentaux forment une parabole interceptant l'axe des ordonnées en un point appelé ΔP_{js} ou la pression hydrostatique est atteinte lorsque tous les solides sont en suspension (Micale, Grisafi & Brucato, 2002). L'effet strictement dynamique est alors obtenu en soustrayant ΔP_{js} aux données de la parabole susmentionnée et en soustrayant cette composante dynamique aux données brutes, une courbe atteignant un plateau à ΔP_{js} est alors construite. Lorsque ce dernier plateau est atteint, N_{js} est atteint (Micale, Grisafi & Brucato, 2002).

2.3.3 Tomographie à résistance électrique (ERT)

En mélange, la tomographie à résistance électrique est un dispositif s'installant sur une cuve agitée ou sur une conduite afin d'y visualiser l'écoulement. Typiquement, ce dernier se compose de séries de capteurs, d'équipements permettant le contrôle de l'émission de courant et l'acquisition de données et les logiciels de traitement des données de résistivité électrique et de

reconstruction d'image. Typiquement, les capteurs sont installés de manière équidistante en anneaux autour de la cuve ou de la conduite pour former des plans de 8, 16 ou 32 électrodes.

La mesure de la résistivité électrique ou conductivité sur un plan s'effectue de la façon suivante (Lee, 2004):

- Le courant est envoyé par un couple d'électrodes voisines
- Le voltage est mesuré par le reste des couples d'électrodes voisines
- Le courant est envoyé par le prochain couple d'électrodes adjacentes et les mesures de voltage sont répétées
- La procédure itère jusqu'à ce que toutes les mesures indépendantes aient été faites
- Le même processus s'effectue pour le plan suivant et lorsque tous les plans sont parcourus, la procédure est recommencée au plan 1

La procédure globale est illustrée à la Figure 2.16 :

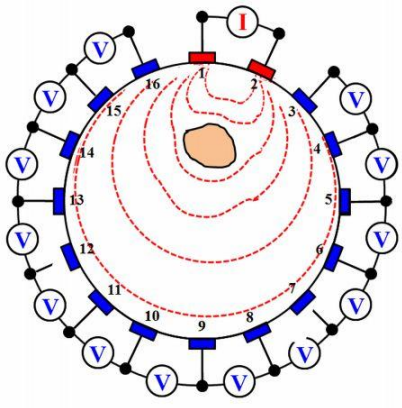


Figure 2. 16 : Procédure de mesure de la conductivité électrique sur un plan (Bera, 2012)

Après l'acquisition des données, le tomographe peut construire une carte de résistivité sur un plan selon les zones où la conductivité est plus ou moins grande. Si plusieurs plans sont utilisés, il peut également construire une image 3D à partir des données récupérées pour les différents plans. La Figure 2.17 présente à quoi ressemble une carte de conductivité et comment elles sont utilisées pour construire une image tridimensionnelle.

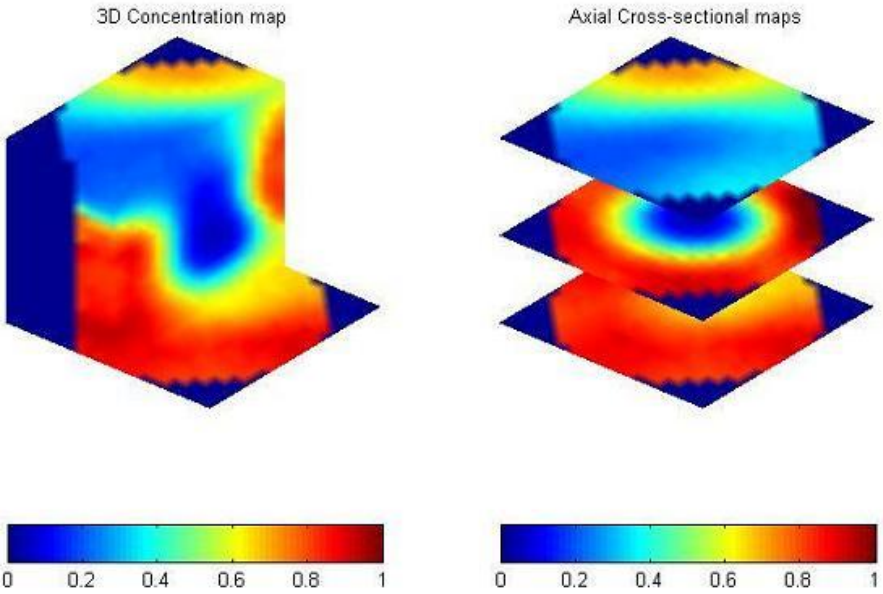


Figure 2. 17 : Cartes de trois plans et construction d'une image 3D (Wang, Marashdeh, Fan, & Warsito, 2010)

La tomographie à résistance électrique (ERT) est normalement utilisée dans le cas d'écoulement polyphasés, soit en mélange solide-liquide, gaz-liquide ou gaz-liquide-solide (Guntzburger, 2012). La mesure repose donc essentiellement sur la différence de conductivité entre les différentes phases présentes et plus elle est grande, plus la mesure est aisée. Ainsi, généralement, il sera désirable d'augmenter cette différence en augmentant la conductivité du liquide si le gaz et/ou le solide ne sont pas conducteurs. L'ajout de sel dans de l'eau est une approche commune par exemple.

Cependant, plusieurs limitations sont inhérentes à la ERT. Entre autres, il y a un intervalle de temps entre les mesures prises aux différents plans puisque les mesures se font plan par plan et non simultanément sur chaque plan. De plus, la résolution est faible, si bien qu'en général, elle n'est pas mieux que 5 à 10% du diamètre de la cuve. Également, la sensibilité d'images est plus grande en périphérie qu'en milieu de cuve. Finalement, les plans supérieur et inférieur subissent des distorsions dues à la nature tridimensionnelle des champs électriques qui n'est pas pris en compte dans la reconstruction d'image bidimensionnelle. (Lee, 2004)

La tomographie à résistance électrique peut également servir de méthode de mesure de temps de mélange (Pakzad, 2007).

2.3.4 Temps de mélange

Le temps de mélange est un paramètre permettant d'évaluer la performance d'agitateurs en évaluant leur capacité à engendrer rapidement un degré d'homogénéité arbitraire considéré comme l'état d'homogénéisation complète. Il peut également être exprimé de manière adimensionnelle lorsque multiplié par la vitesse de rotation et, concrètement, ce temps de mélange adimensionnel représente le nombre de rotations que l'agitateur doit effectuer pour atteindre le degré d'homogénéité désiré et il s'agit d'un paramètre constant en écoulements laminaire et turbulent. De manière générale, pour des fluides non visqueux, il est supposé que le temps de mélange est 4 ou 5 fois plus grand que le temps de circulation, soit le temps requis par l'agitateur pour faire recirculer 4 ou 5 fois le contenu de la cuve.

Il existe plusieurs méthodes de mesure du temps de mélange, mais chaque méthode possède ses propres inconvénients qui sont plus ou moins importants selon le système de mélange et des fluides présents. Ainsi, puisqu'aucune méthode n'est universellement reconnue comme la meilleure, il est important de choisir celle qui est la plus adaptée. Généralement, le temps de mélange sera mesuré par des méthodes thermiques (homogénéisation de la température), visuelles (changement de couleur), chimiques (pH) ou encore en suivant des traceurs. Cependant, d'autres méthodes sont de plus en plus utilisées comme la ERT ou encore les traceurs radioactifs. Les méthodes de mesure de temps de mélange sont classées selon qu'elles sont de nature locale ou globale. Les méthodes locales requièrent l'utilisation de sondes afin de mesurer le paramètre de mesure (par exemple, le pH) et prennent une mesure en un point donné. Ainsi, il s'agit d'approches dites intrusives puisqu'elles impliquent la perturbation de l'écoulement et affectent donc la mesure en soi. Si ces méthodes permettent d'obtenir une mesure directe et facile du temps de mélange, elles ne donnent également qu'une mesure à un endroit donné qui n'est pas nécessairement représentatif de l'entièreté du contenu de la cuve. Il est possible d'amoindrir ce problème en insérant plusieurs sondes à différents endroits dans la cuve augmentant ainsi considérablement la valeur des données récupérées, mais augmentant également considérablement l'effet perturbateur de l'écoulement dû à l'intrusion de sondes. Les moyens de mesure globaux sont quant-à-eux non-intrusifs et permettent de relever des zones où le mélange est déficient, mais ils sont généralement subjectifs. Un grand avantage de la méthode globale par rapport à la méthode locale est qu'en plus d'offrir le temps de mélange en tout point de la cuve à un seul moment, elle permet d'établir clairement lorsque le mélange est complet.

Une méthode de mesure du temps de mélange particulièrement utilisée à l'unité de recherche en procédés d'écoulements industriels est celle décrite par Cabaret et al. (2007). Celle-ci repose sur une réaction acide-base rapide en exploitant la décoloration du fluide mélangé avec un indicateur de pH coloré, soit une solution de bromocrésol pourpre. L'essai est débuté en milieu basique puis une solution acide est ajoutée de manière rapide, mais en limitant sa pénétration dans le fluide pour éliminer le plus possible le mélange par jet (« jet mixing »). L'ajout de la solution acide fait passer le milieu mélangé du violet au jaune. En soit, l'essai peut se faire dans les deux sens de la réaction, mais il est plus aisé pour l'expérimentateur d'observer les zones non mélangées violettes dans le fluide jaune que le contraire. Le mélange est considéré complet lorsque le seuil de décoloration fixé est atteint. L'expérience est filmée et l'analyse d'images permet d'établir une courbe de décoloration et de mesuré le temps de mélange.

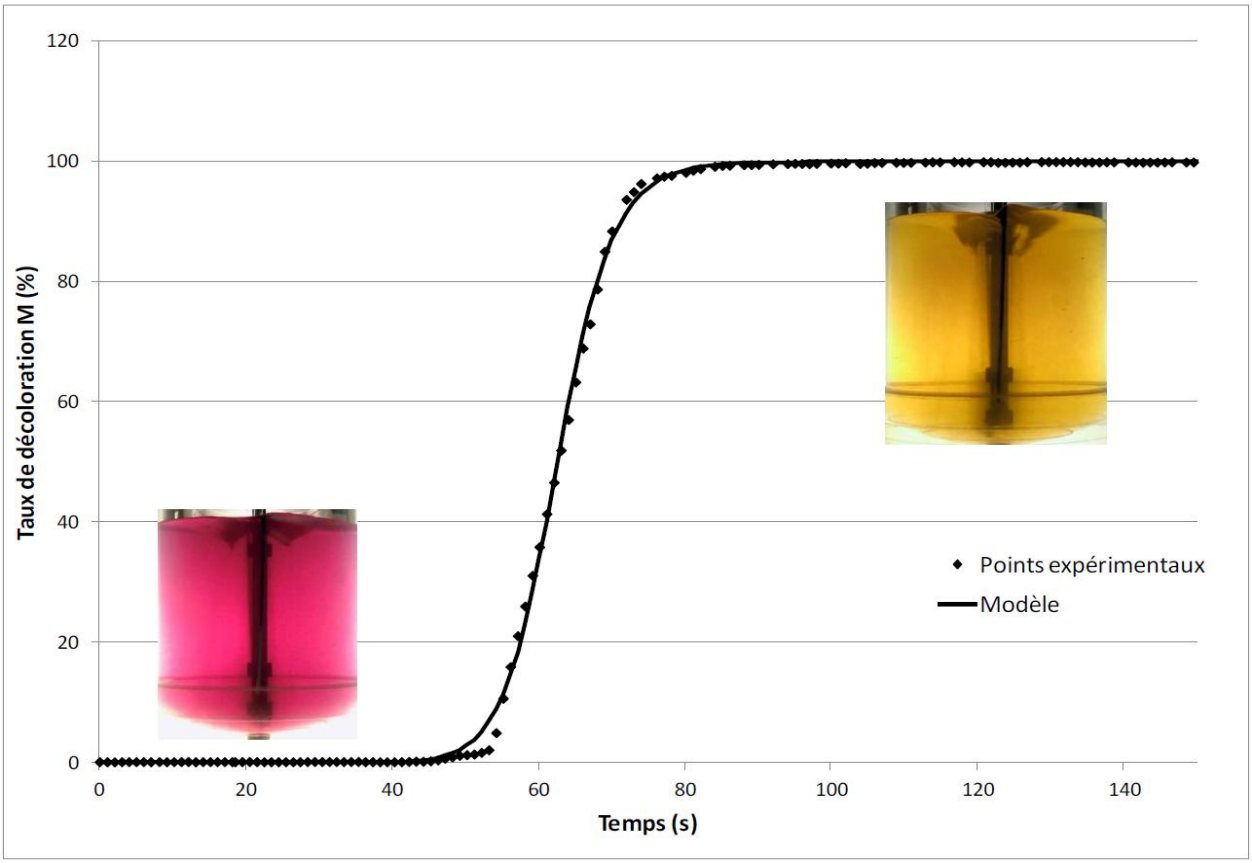


Figure 2. 18 : Courbe de décoloration typique pour le Maxblend avec exemples d'images (Guntzburger, 2012)

Par ailleurs, les nouvelles méthodes de mesure du temps de mélange locales sont un peu moins contraignantes et ne souffrent pas de tous les maux associés à leur classification. En effet, la

méthode de mesure par ERT (Holden, Wang, Mann, Dickin, & Edwards, 1998) emploie beaucoup de sondes (4 plans, 16 sondes/plan), ce qui permet d'avoir une mesure quasi-globale du temps de mélange. De plus, les sondes étant plates et incrustées à même la paroi de la cuve, l'effet intrusif et perturbateur est minimal. Cette approche permet également de relever d'éventuelles zones non-mélangées si ces dernières se trouvent au niveau des plans. Finalement, le caractère opaque ou transparent n'est pas un facteur à considérer. Il s'agit de la méthode de mesure employée dans le présent ouvrage.

2.3.5 Dépistage de particules radioactives

Cette technique de pointe n'est pas exploitée dans cet ouvrage, mais il est pertinent de l'introduire. Le dépistage de particules radioactives (« Radioactive particle tracking ») est une méthode non-intrusive permettant d'étudier la dynamique des écoulements à l'intérieur de cuves opaques. Cependant, cette technique est limitée à un seul traceur à la fois. Rasouli a donc introduit le dépistage de particules radioactives multiples permettant ainsi le suivi de deux traceurs simultanément (Rasouli, Bertrand, & Chaouki, 2014). Cette technique ne sera pas utilisée dans le cadre de ce projet, car le dépistage local d'une particule ne donnerait pas beaucoup d'information dans une étude qui se veut avant tout macroscopique. Les phénomènes d'ensemble sont étudiés, plutôt que le mouvement d'une particule unique.

2.4 Revue critique

La PBT semble donc être le meilleur mobile d'agitation pour la suspension et l'entraînement de solides et le mobile de type Dispersimax semble être le meilleur pour la dispersion gazeuse. Or, si cette revue de littérature tend à montrer la performance de ces agitateurs dans des contextes de mélange à deux phases, elle met également en lumière le peu de connaissances de la performance des agitateurs dans des systèmes de mélange triphasés où la dispersion gazeuse et l'entraînement ou la suspension de solides sont aussi importants. De plus, la revue de littérature indique également que très peu de connaissances existent sur les changements de régime hydrodynamique dans de telles conditions. Or, le but global de l'étude étant de déterminer l'influence de l'augmentation de la concentration de solides sur la performance d'un système d'agitation similaire au système de cuve de formation d'hydrates, ces considérations de mélange sont cruciales. En effet, la formation d'hydrates de gaz s'effectue dans un système d'écoulement

triphasé, système qui a été très peu étudié jusqu'à maintenant. Il faut optimiser les phénomènes de transfert de chaleur et de matière et l'optimisation des conditions hydrodynamiques est une partie de la solution. Qui plus est, la partie solide du système d'écoulement est de faible densité et tend à flotter; les études scientifiques sur les systèmes liquide-solide avec des solides flottants étant en nombre très limité, les études sur de tels systèmes en présence de gaz sont quasi-inexistantes. Quant aux systèmes de mélange liquide-solide, ils ont en effet été très peu étudiés en général, alors que dans le cas spécifique des hydrates de gaz, leur mauvaise distribution et dispersion peut s'avérer une importante limitation à la génération d'hydrates de gaz. De plus, l'effet de la présence de gaz entraîné par la surface ou par l'arbre creux et l'agitateur est une question qui a été peu défrichée au même titre que l'influence de particules solides sur la capacité d'entraînement de gaz d'un système de mélange.

L'absence ou le manque de profondeur de certaines connaissances énumérées ci-haut permet d'établir les objectifs spécifiques qui suivent pour le présent projet.

2.5 Objectifs spécifiques

1. Quantifier la performance de tirage (ou « drawdown ») de particules inertes de propriétés semblables à celles des hydrates de différents système d'agitation (PBT, Dispersimax, Maxblend)
2. Déterminer la capacité de pompage d'air engendré par un agitateur de type Dispersimax, un agitateur utilisé en aération de liquides en cuve
3. Déterminer l'impact de la concentration en solides sur l'hydrodynamique pour 3 agitateurs représentatifs du mélange gaz-liquide-solide en cuve

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

Dans ce chapitre, le matériel expérimental, les données étudiées et l'approche de traitement des données seront discutés. Une méthode utilisant les données de pression aux parois de la cuve afin d'y déceler d'éventuels changements dans le régime hydrodynamique inutilisée à ce jour dans ce contexte sera par ailleurs introduite. Finalement, la nomenclature des dimensions de la cuve est présentée à la Figure 3.1 suivante :

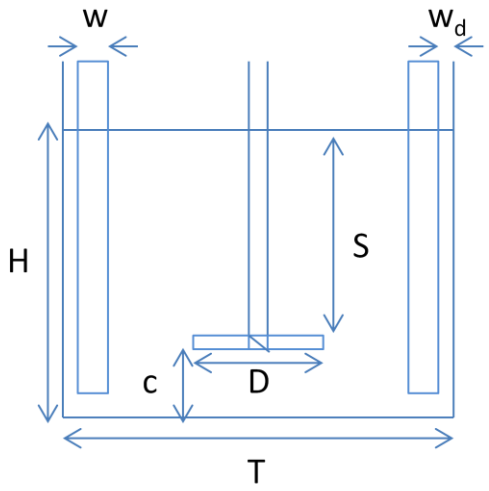


Figure 3. 1 : Nomenclature des paramètres de dimensionnement de cuve agitée

où H est la hauteur de liquide, T est le diamètre de la cuve, D est le diamètre de l'agitateur, c est le dégagement de l'agitateur à partir du fond de la cuve, S est le niveau d'immersion de l'agitateur, w est la largeur des contre-pales et w_d est le dégagement des contre-pales par rapport aux parois de la cuves.

3.1 Montage expérimental et matériel

3.1.1 Cuve de mélange et systèmes d'agitation

Afin d'approfondir les connaissances sur les phénomènes relatifs à la formation d'hydrates, notamment au niveau hydrodynamique, la cuve pouvant être mise sous pression utilisée antérieurement lors d'essais de production d'hydrates n'était pas adéquate. En effet, cette cuve étant complètement opaque et non modifiable, elle ne donnait pas beaucoup de marge de

manœuvre quant aux données qu'il était possible d'y collecter. Ce réacteur est présenté à la Figure 3.2.

Figure 3. 2: Cuve de réaction pouvant être mise sous pression utilisée pour la production d'hydrates de CO_2

Ainsi, pour les besoins de la présente étude le montage de la Figure 3.2 a été remplacé par le montage de la Figure 3.3. Celle-ci possède quelques différences notables par rapport à la cuve de réaction. Par exemple, le diamètre de la cuve opaque est de 12,5 pouces (0,3175 m), alors que celui de la cuve transparente est de 15 pouces (0,381 m). Leur géométrie est également différente. En effet, le fond de la cuve de production d'hydrates est semi-elliptique, alors que celui de la cuve en « plexiglas » est plat. La différence de la forme du fond de la cuve a un impact certain sur les lignes de courant engendrées par le mouvement des différents mobiles d'agitation. Ce sont des différences de taille, mais la comparaison entre les deux systèmes n'est pas le cœur de cet ouvrage. Ce travail est une étude hydrodynamique gaz-liquide-solide en présence de solides flottants, un système s'apparentant aux conditions de production d'hydrates de gaz. Par ailleurs,

en comparaison avec la cuve de réaction, l'étude effectuée représente, en quelque sorte, le pire scénario possible. Ainsi, en raison des différences entre les deux montages, les résultats obtenus dans la cuve réactionnelle ne peuvent qu'être supérieurs à ceux de son homologue en termes hydrodynamiques.

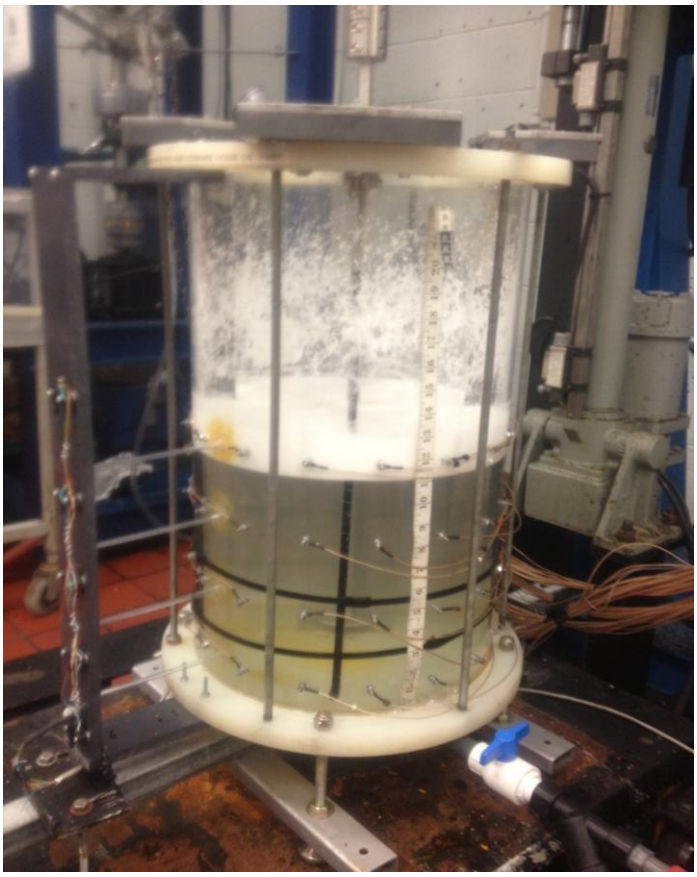


Figure 3. 3: Cuve utilisée pour l'étude hydrodynamique présentée dans ce document

Les systèmes d'agitation utilisés sont un agitateur de type turbine à pales inclinées (PBT 6 pales), un agitateur de type Dispersimax et un agitateur de type Maxblend. Le Tableau 3.1 présente les caractéristiques du système. De plus quatre chicanes y sont disposées de manière symétrique.

Tableau 3. 1 : Dimensions des systèmes de mélange

Système de mélange	Diamètre	Cuve
PBT	D= 4'' (0,1016 m)	T=15'' (0,381 m) H=12,5'' (0,3175 m) Présence de contre-pales w=1,5'' (0,0381 m) w_d=0,5'' (0,0127 m)
Dispersimax	D= 4'' (0,1016 m)	
Maxblend	D=6'' (0,1524 m)	

3.2 Stratégie expérimentale

Pour les besoins de l'expérience, des petites particules de polyéthylène à masse molaire ultra-haute UHMWPE (d_p~400 μm) de densité très similaire à celle des hydrates (ρ_p=0,86 vs. $\rho_{hydrates}$~0,9) ont été employées afin de reproduire l'effet de la présence des hydrates sous forme de particules inertes et ainsi évaluer la performance des agitateurs en augmentant la concentration en solides afin de simuler la croissance des hydrates dans la cuve. La molécule gazeuse qui, avec l'eau, forme l'hydrate lui confère un caractère hydrophobe, caractéristique qui est également retrouvée chez les particules choisies pour remplacer les hydrates. Le fluide utilisé était de l'eau, comme dans le cas des hydrates de gaz. L'étude a été menée de manière à avoir des résultats complémentaires ou comparables aux expériences menées en cuve de réaction. C'est-à-dire que les mêmes agitateurs ont été utilisés, mais en raison de la taille légèrement plus grande de la cuve transparente, les vitesses utilisées ont été légèrement augmentée dû à la mise à l'échelle afin d'assurer une puissance dissipée par unité de volume constante. Le processus mathématique se fait comme suit :

$$P_1 = Np_1\rho_1 N_1^3 D_1^5 \quad (3.\ 1)\ et\ P_2 = Np_2\rho_2 N_2^3 D_2^5 \quad (3.\ 2)$$

$$Ainsi,\ \frac{P_1}{P_2} = \frac{Np_1\rho_1 N_1^3 D_1^5}{Np_2\rho_2 N_2^3 D_2^5} \qquad (3.\ 3)$$

$$v_1 = \frac{\pi T_1^2}{4} \times H_1 \quad (3.\ 4)\ et\ v_2 = \frac{\pi T_2^2}{4} \times H_2 \quad (3.\ 5)$$

$$Ainsi,\ \frac{v_2}{v_1} = \frac{\frac{\pi T_2^2}{4} * H_2}{\frac{\pi T_1^2}{4} * H_1} \qquad (3.\ 6)$$

Or, comme le nombre de puissance en régime turbulent est constant, que le diamètre de l'agitateur est constant et que la densité de l'eau est constante, les expressions de ratios entre l'état 1 et l'état 2 précédentes se simplifient beaucoup:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{N_1^3}{N_2^3} \qquad (3.\ 7)$$

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2^2}{T_1^2}\frac{H_2}{H_1} \qquad (3.\ 8)$$

$$Il\ faut\ que\ \frac{P_2}{v_2} = \frac{P_1}{v_1}$$

$$Ainsi, \qquad \frac{P_2}{P_1} = \frac{v_2}{v_1} \rightarrow \frac{N_2^3}{N_1^3} = \frac{T_2^2}{T_1^2}\frac{H_2}{H_1}$$

$$Donc\ N_2^3 = \frac{T_2^2 N_1^3}{T_1^2} \rightarrow N_2 = \sqrt[3]{\frac{T_2^2 H_2 N_1^3}{T_1^2 H_1}} \qquad (3.\ 9)$$

Sachant que le diamètre de la cuve de réaction T_1 est de 12,5'' et que celui de la cuve transparente T_2 est de 15'' et que la hauteur de liquide est à H=T:

$$N_2 = \sqrt[3]{\frac{15^2 * 15 * N_1^3}{12{,}5^2 * 12.5}} = \sqrt[3]{1{,}728 N_1^3} = 1{,}2 N_1 \qquad (3.\ 10)$$

Donc, pour travailler à puissance par unité de volume constante, il faut augmenter les vitesses employées avec la cuve de réaction de 20%. Cependant, en raison de la taille de l'agitateur de type Maxblend, la hauteur de liquide a plutôt été fixée à 12'' au lieu de 15'' à 0% de particules. Ainsi, le principe de puissance par unité de volume constant n'a pas été complètement respecté. En fait, plus il y avait du solide, plus il était respecté, puisque la hauteur augmentait proportionnellement, ainsi, dans le pire scénario, la vitesse de rotation était 7,72% trop grande par rapport à ce qu'elle aurait dû être. Ainsi, la puissance par unité de volume, dans le pire scénario est 25% trop grande.

L'étude a été menée jusqu'à 25% massique de solides puisqu'il s'agit d'une fraction de solides difficilement atteignable pour la production d'hydrates en cuve. De plus, à basse fraction massique de particules, l'augmentation de la fraction massique s'est faite par petits incréments de

1%, alors qu'à partir d'une fraction de 5% massique de solides, elle était augmentée par incrément de 5% suivant l'hypothèse que l'effet de la présence de solides devrait se faire ressentir particulièrement à basse teneur en solide ou lors du passage de 0% à quelques pourcents massiques de particules. Le pourcentage massique de solides est défini de la façon suivante :

$$x = \frac{m_p}{m_{eau}+m_p} = \frac{m_p}{m_{tot}} \qquad (3.\ 11)$$

où x est la fraction massique de solides, m_p est la masse de particules, m_{eau} est la masse d'eau et m_{tot} est la masse totale.

Les particules polymériques utilisées étant hydrophobes, il fallait s'assurer de les plonger dans l'eau en les agitant durant plusieurs heures pour les hydrater et s'assurer qu'elles aient un comportement répétable et constant avant de pouvoir faire des mesures. Par ailleurs, en s'hydratant, les particules devenaient une sorte de boue contenant beaucoup d'eau. Il a été mesuré qu'une fois mouillé, chaque kilogramme de particules sèches contenait 1,05 kg d'eau.

Il était souhaité de travailler à masse constante en retirant une masse d'eau équivalente à l'ajout de particules dans la cuve lors de l'augmentation de la fraction massique de solides. Or, les solides ayant été pesés alors qu'ils étaient secs, la masse d'eau retirée de la cuve ne tenait pas en compte l'eau contenue dans les particules solides hydratées. Ainsi, chaque ajout de particules solides résultait en l'augmentation de la masse du milieu à agiter.

3.3 Paramètres contrôlés

Plusieurs paramètres ont été manipulés au cours des expériences. Le Tableau 3.2 les rassemble. Le Tableau 3.3 présente les paramètres maintenus constants.

Tableau 3. 2 : Paramètres manipulés dans les expériences

Paramètre	**Valeur**
Fraction massique de solides	[0; 1; 2; 3; 4; 5; 10; 15; 20; 25] %wt
Type d'agitateur	[PBT; Dispersimax; Maxblend]
Hauteur de l'agitateur par rapport au fond de la cuve	c_{PBT}= [4; 6; 8]'' $c_{Dispersimax}$= [2; 6]'' $c_{Maxblend}$= 1''
Vitesse de rotation	N_{PBT}= [480; 600; 720] RPM $N_{Dispersimax}$= [480; 600; 780] RPM $N_{Maxblend}$= [60; 120; 180] RPM

Tableau 3. 3 : Paramètres constants dans les expériences

Paramètre	Valeur
Masse volumique des particules	ρ_p=860 kg/m^3 ($\rho_{hydrates}$~912 kg/m^3 (Gabitto & Tsouris, 2010))
Présence de contre-pales	Largeur w=1,5'' (0,0381 m) Dégagement w_d=0,5'' (0,0127 m)

Par ailleurs, dans le cas du mobile de mélange de type Dispersimax, les expériences ont été menées avec et sans obstruction au pompage d'air. En effet, un papier collant était appliqué sur les trous de l'arbre de rotation lorsqu'une obstruction à l'aération devait être présente et ce dernier était enlevé dans le cas contraire.

3.4 Prise de données

La turbine à pales inclinées étant la plus utilisée dans les domaines d'entraînement et de suspension de solides, il n'existe pas d'étude de performance de ce mobile de mélange dans des conditions triphasées et c'est aussi vrai pour les agitateurs de types Dispersimax et Maxblend. Afin de mieux comprendre les phénomènes hydrodynamiques liés à la croissance d'hydrates de

gaz et potentiellement améliorer leur taux de production, la présente étude est nécessaire. À cette fin, les techniques classiques d'observation visuelle et de mesure du couple sont utilisées, ainsi que la technique un peu moins classique de tomographie à résistance électrique afin de caractériser la performance des différents agitateurs. De plus, contrairement à la suspension de solides, la technique de pression de jauge ne peut être utilisée dans le cas de particules flottantes et le signal de pression dynamique sera exploité afin d'en déceler d'éventuels changements hydrodynamiques au cours des expériences.

Le système d'agitation de la cuve de la Figure 3.3 est muni d'un couplemètre, de 5 capteurs de pression sur 5 plans différents; un au fond et quatre sur le côté et d'électrodes connectées à un tomographe par résistance électrique (16/plan sur 4 plans). Le couple était mesuré afin d'évaluer la performance des agitateurs d'un point de vue de puissance dissipée selon la présence plus ou moins grande de particules. Il s'agissait de la mesure la plus longue à stabiliser en raison de la thermosensibilité de la viscosité de l'huile utilisée dans le palier de l'arbre de rotation. Ainsi, la collecte de données était choisie sur une période d'au moins 200 secondes au cours de laquelle aucune variation de couple notable n'était observée durant 3 minutes (180 secondes). Puisque la stabilisation du couple était l'étape limitante de la collecte de données, il était supposé que lorsque le couple était stable, tous les autres paramètres l'étaient également. La pression était quant à elle mesurée pour tenter de déceler d'éventuels changements de régime hydrodynamique selon la présence plus ou moins grande de particules solides imitant les hydrates de gaz. La résistivité électrique a été mesurée dans le cadre de la mesure du temps de mélange.

La carte d'acquisition possède les spécifications suivantes :

- Marque : Arduino Mega
- Modèle :Atmega 2560
- Résolution : 12 bits (10 bits + sur-échantillonage (*over-sampling*)); 2,44 Pa

3.4.1 Couple

Le couplemètre possède les spécifications suivantes :

- Marque : Ono Sokki CO., LTD
- Modèle: SS-050
- Intervalle de mesure: [0, 5] Nm
- Incertitude : 1% sur l'intervalle total de mesure

Avant chaque expérience, le couple était réinitialisé à 0.

Les données de couple à vide, sans agitateur, ont été collectées à différentes vitesses afin de pouvoir enlever le couple dû aux pièces mécaniques du système aux données de couple global et ainsi isoler l'effet de l'eau et des particules sur le couple. Bien qu'il aurait été préférable, en termes de précision d'installer le système d'agitation, les données de couple à vide ont été obtenues en faisant tourner le moteur sans agitateur et sans son arbre de rotation qui permet de le fixer au montage expérimental pour des raisons de sécurité puisque l'intégrité physique du système de mélange n'était pas conservée à haute vitesse de rotation. Le Tableau C.1 et la Figure C.1, à l'Annexe C, présentent les données de couple à vide obtenues pour la rotation dans le sens horaire. La collecte de données a été débutée par de petits incréments en raison des basses vitesses de rotation de l'agitateur de type Maxblend. Les données de couple à vide pour les vitesses de rotation intermédiaires, soit les vitesses entre les incréments de 50 RPM employés comme 480, 720 et 780 RPM par exemple, ont été obtenues par interpolation linéaire entre la vitesse supérieure et la vitesse inférieure la plus proche de la vitesse en question.

Afin de traiter le couple, une moyenne du couple sur la période d'échantillonnage choisie a été effectuée. C'est également le cas pour le couple à vide. Ainsi, le couple présenté en résultats est issu de l'opération suivante :

$$T_f = T_m - T_v \qquad (3.\ 12)$$

où T_f est le couple moyen corrigé résultant de la soustraction de T_m, le couple moyen mesuré, et de T_v, le couple à vide.

Les courbes de puissances, soit les courbes du nombre de puissance (Np) pour chaque agitateur en fonction du nombre de Reynolds (Re) ont pu être produites en calculant Np et Re comme suit :

$$Np = \frac{P}{\rho N^3 D^5} \qquad (3.\ 13)$$

où Np est le nombre de puissance, P est la puissance dissipée, ρ est la densité de l'eau, N est la vitesse de rotation et D est le diamètre de l'agitateur. Or,

$$P = 2\pi N T_f \qquad (3.\ 14)$$

Ainsi, Np est calculé de la façon suivante :

$$Np = \frac{2\pi N T_f}{\rho N^3 D^5} \qquad (3.\ 15)$$

Le nombre de Reynolds est quant à lui calculé comme suit :

$$Re = \frac{\rho N D^2}{\mu} \qquad (3.\ 16)$$

où Re est le nombre de Reynolds et μ est la viscosité de l'eau.

Les propriétés physiques, soit la viscosité et la densité de l'eau, ont été considérées constantes pour les besoins des calculs, mais en sachant que cela ajoute un léger biais aux résultats sans toutefois fausser leur analyse.

Ainsi, les données de couple ont été traitées pour obtenir le couple sous sa forme corrigée, soit le couple à vide soustrait aux données de couple collectée; sous sa forme brute par unité de volume; sous sa forme normalisée par rapport aux données de couple avec 0% de particules dans la cuve; et finalement, cette même forme normalisée par unité de volume. Le Tableau 3.4 suivant résume les manipulations du couple.

Tableau 3. 4 : Valeurs de couples calculées pour l'analyse de données

Série de données	**Calcul**	**Explication**
Couple corrigé	T_f	Données corrigées
Couple par unité de volume	$\frac{T_f}{V_m}$	Correction de l'effet de l'augmentation de volume dû à l'ajout de particules humides
Couple corrigé normalisé	$\frac{T_f}{T_{0\%}}$	Observer les données de couple en termes de variations par rapport à un état initial sans particules
Couple normalisé compensant l'augmentation de volume	$\frac{T_f}{T_{0\%}} * \frac{V_{0\%}}{V_m}$	Observer les données de couple en termes de variations par rapport à un état initial sans particules en corrigeant le volume par rapport au volume initial

où $T_{0\%}$ est le couple moyen à 0% de particules, $V_{0\%}$ est le volume de fluide à 0% de particules et V_m est le volume de fluide correspondant à la mesure de T_f.

3.4.2 Pression

Des données de pression sur 5 plans ont été collectées. Au début de chaque expérience, les capteurs étaient remis à 0 pour enlever l'effet de la pression hydrostatique et garder seulement l'influence de l'agitation sur les capteurs de pression. Un capteur était au fond de la cuve, alors que les 4 autres étaient placés sur le côté à équidistance de deux chicanes. Par ailleurs, la pression hydrostatique étant soustraite du signal de pression et les particules flottant à la surface, donc la masse volumique du fluide ne changeant pas, les données de pression obtenues sont directement liées à la pression hydrodynamique. La présence d'air dans le fluide aura comme impact de diminuer la densité, mais également d'augmenter la tête hydrostatique; il est alors considéré que ces effets s'annulent et que la pression hydrostatique est constante, surtout que la quantité d'air dans le fluide est beaucoup plus faible que le liquide et que la quantité de solides. La disposition des capteurs de pression est illustrée à la Figure 3.4. Les spécifications des capteurs sont les suivantes :

- Marque : Motorolla, Inc.
- Modèle : MPX5010DP
- Intervalle de mesure : [0, 10 000] Pa
- Erreur : 5% sur l'intervalle total de mesure
- Fréquence d'acquisition : 5 données/seconde

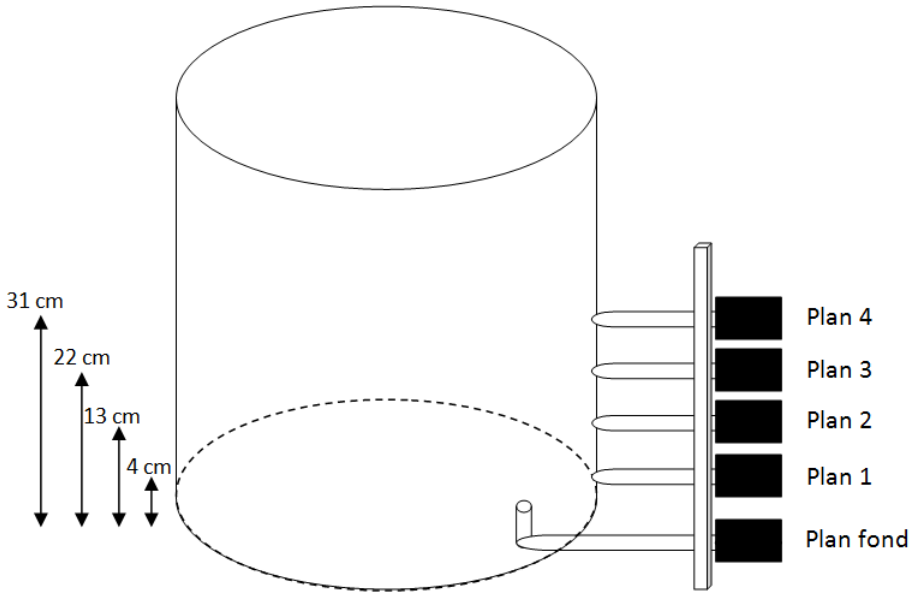


Figure 3. 4 : Schéma présentant la position des capteurs de pression sur la cuve de mélange

Dans tous les cas, les données acquises par le capteur du fond ne sont pas utilisées puisqu'elles ne donnent pas vraiment d'informations pertinentes de plus que le capteur le plus bas placé sur le côté de la cuve. Aussi, dans le cas des agitateurs de types PBT et Dispersimax, seulement les données acquises par les 3 capteurs les plus bas installés sur le côté de la cuve sont utilisées, puisque le capteur de pression le plus haut est trop près de la surface libre. Quant à l'agitateur de type Maxblend, les 4 capteurs installés sur le côté sont utilisés puisqu'ils sont tous fortement sujets au mouvement de cet agitateur en raison de l'hydrodynamique qu'il engendre à cause de sa forme.

Pour la même période de temps déterminée précédemment dans la collecte de données de couple, les données de pression ont été collectées. Pour la collecte des données, le même processus que

pour le couple a été appliqué, c'est-à-dire que la moyenne de la vitesse et la moyenne de la pression de chaque capteur ont été calculées sur cette période.

En plus des données de pression acquises en présence de solides, des blancs d'expérience ont été menés. C'est-à-dire que les mêmes expériences ont été menées sans particules, mais en compensant la masse des particules par une masse équivalente en eau.

Les données de pression ont été traitées et leurs moyennes ont été présentées relativement à la fraction massique de particules afin de tenter de déceler l'impact de l'augmentation de la fraction massique de particules sur l'hydrodynamique. Puis, à partir de ces données, différents traitements ont été effectués et sont présentées au Tableau 3.5 : dans un premier temps, les données brutes moyennes sans modifications; dans un deuxième temps, les données brutes moyennes en soustrayant les données moyennes de blancs correspondantes; dans un troisième temps, les données brutes moyennes normalisées par rapport à la moyenne de pression à 0% de particules, c'est-à-dire les valeurs moyennes de pression divisées par la pression moyenne correspondante à 0%, afin de déceler la variation de pression par rapport à un état initial; et dans un dernier temps, les données de pression brutes moyennes en soustrayant les données moyennes de blancs correspondantes, le tout normalisé par rapport à la moyenne de pression à 0%. Les résultats sont présentés plan par plan.

Tableau 3. 5 : Valeurs de pression calculées pour l'analyse de données

Série de données	**Calcul**	**Explication**
Pression brute	P_m	Données brutes
Pression brute-Blanc	$P_m - P_b$	Isoler l'effet des particules
Pression brute normalisée	$\frac{P_m}{P_{0\%}}$	Observer les données de pression en termes de variations par rapport à un état initial sans particules
Pression brute-blanc normalisée	$\frac{P_m - P_b}{P_{0\%}}$	Obtenir l'effet isolé des particules en termes de variations par rapport à un état de départ

où P_m est la pression moyenne mesurée, P_b est la pression de blanc moyenne correspondante à P_m et $P_{0\%}$ est la pression moyenne à 0% de particules.

3.4.3 ERT

Le tomographe par résistance électrique possède 4 plans de mesure disposés aux mêmes hauteurs que les capteurs de pression. Les spécifications du tomographe sont les suivantes :

- Marque : ITS
- Modèle : p2000+
- Résolution spatiale : 10% du diamètre de la cuve (la configuration n'offre pas de mesures pour de plus petites dimensions que 3 cm)
- Algorithme de résolution : Rétroprojection linéaire
- Fréquence d'acquisition : 20 données/seconde

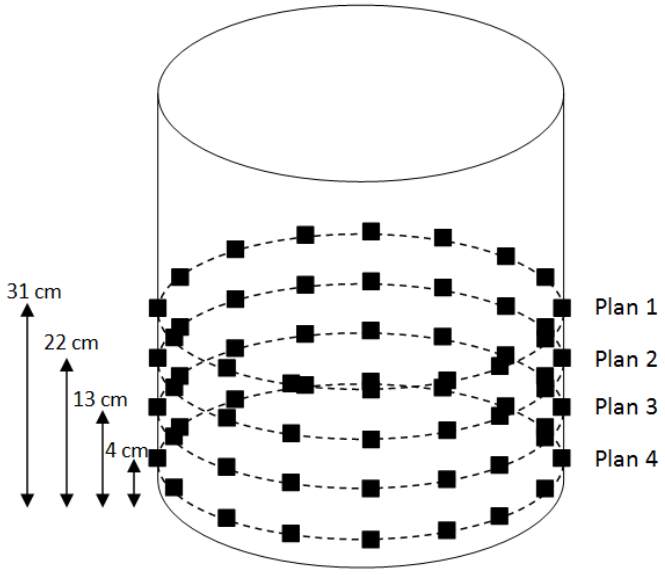


Figure 3. 5 : Schéma présentant la position et l'agencement des électrodes sur la cuve de mélange

La tomographie par résistance électrique a été utilisée uniquement pour les mesures de temps de mélange. Initialement, il était prévu de l'utiliser de façon complémentaire aux données de pression et de couple, mais le problème était que pour utiliser le tomographe, il faut utiliser de l'eau salée pour agrandir la différence de conductivité électrique entre le liquide (l'eau) et les particules. Cependant, les particules étant déjà hydrophobes, elles étaient très difficiles à entraîner dans un milieu très conducteur comme l'eau salée.

Ainsi, à la fin de chaque expérience un traceur était ajouté à chaque vitesse d'agitation et le signal de résistivité électrique sur les 4 plans était collecté et l'idée était de voir les différences de temps de mélange selon la vitesse de rotation et selon la fraction massique de solides. Le traceur consistait en un volume de 75 ml d'eau saturée en sel ajouté au niveau de la surface libre à l'aide d'un entonnoir et d'un tube pour des raisons de sécurité. Après chaque expérience, au moins 10 litres d'eau, soit environ 30% du volume d'eau initial, était ajoutés dans la cuve pour diluer l'ajout de sel et l'excédent d'eau était retiré par le bas de la cuve une fois que les particules étaient remontées à la surface.

En ce qui a trait au traitement de l'information, les données de résistivité étaient d'abord extraites. Par la suite, le temps de mélange était calculé entre l'injection du traceur salin et le deuxième point de mesure du nouvel état stable de résistivité au plan 4, puisqu'il est le plus éloigné du point d'injection. Ce deuxième état est défini alors que les valeurs de résistivités sont inclues dans un intervalle de 0,5% de variations par rapport à la moyenne des résistivités à long terme de cet état, soit plusieurs secondes après l'atteinte du nouvel état de résistivité suite à l'injection d'eau salée. Les Figures 3.6, 3.7 et 3.8 qui suivent présentent un exemple de la méthode d'évaluation du temps de mélange. Le cercle vert représente le point d'injection du traceur, donc le début du test et le cercle rouge représente le point final du test.

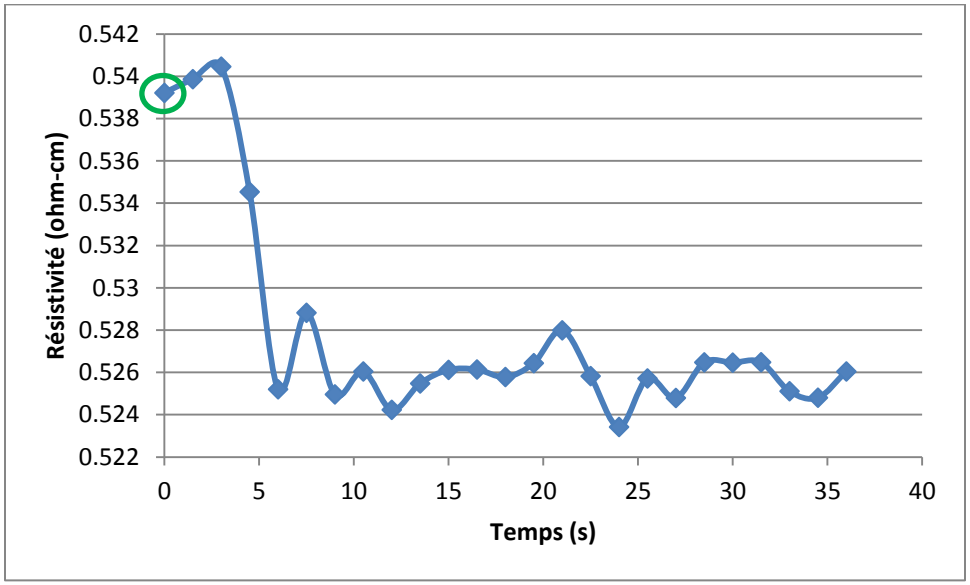


Figure 3. 6 : Signal ERT pour la PBTU placée à 6'' du fond de la cuve à 480 RPM et à 15 %wt de particules (**Plan 1**)

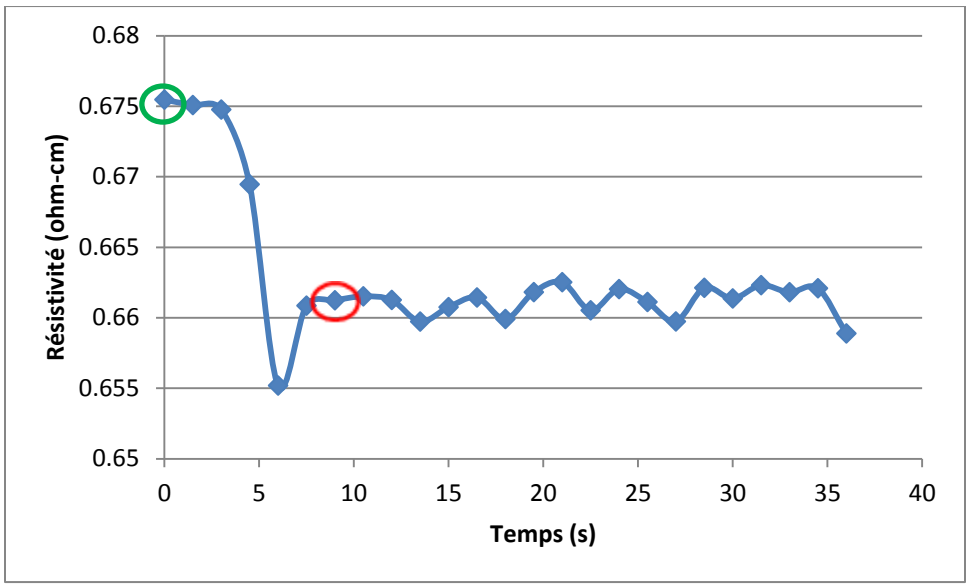


Figure 3. 7 : Signal ERT pour la PBTU placée à 6'' du fond de la cuve à 480 RPM et à 15% wt de particules (**Plan 4**)

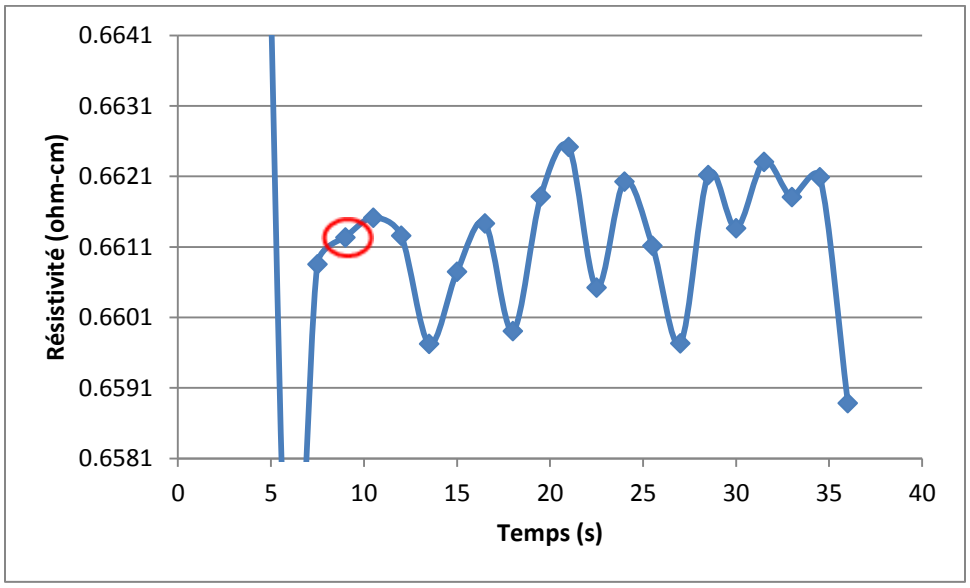


Figure 3. 8 : Signal ERT pour la PBTU placée à 6'' du fond de la cuve à 480 RPM et à 15 %wt de particules agrandi sur la plage d'intérêt (sur ±0.5% de la valeur moyenne des 5 derniers points) (**Plan 4**)

Le point d'injection est considéré comme étant le temps initial de la mesure du temps de mélange. Le point encerclé en rouge est le deuxième point du nouvel état stable qui se trouve à l'intérieur de ±0,5% de variation par rapport à la moyenne de résistivité à long terme; il est donc considéré comme étant le temps final de la mesure du temps de mélange. Le temps de mélange

est obtenu en faisant la soustraction du temps entre ces deux points. L'image initiale ayant été prise à 15 :56 :08 et l'image finale à 15 :56 :17, le temps de mélange est de 9 secondes.

3.4.4 Incertitudes

Pour les données de couple et de pression, la dispersion statistique sur les valeurs moyennes a été calculée par l'écart-type. Dans le cas du couple, l'incertitude de mesure du couple-mètre était supérieure, c'est pourquoi elle a été utilisée comme valeur d'incertitude. Ainsi, une mesure de couple mesurée était teintée de ±0.05 N.m d'incertitude. Puisque les données de couple utiles consistaient en la soustraction du couple mesuré et du couple résiduel, l'incertitude des deux données était additionnée pour donner l'incertitude du résultat final de sorte que :

$$T_f = T_m - T_v$$

$$\Delta T_f = \Delta T_m + \Delta T_v \qquad (3.\ 17)$$

où T_f est le couple résultant de la différence entre le couple mesuré et le couple résiduel, T_m est le couple mesuré, T_v est couple résiduel, ΔT_f est l'incertitude sur T_f, ΔT_m est l'incertitude sur T_m et ΔT_v est l'incertitude sur T_v.

Lorsque normalisé, l'incertitude relative résultante est la somme de l'incertitude relative de T_f et de $T_{0\%}$. Le raisonnement est le même que pour la pression normalisée, comme à l'Équation 3.18.

Pour les données de pression, l'incertitude sur la mesure était de ±500 Pa. Toutefois, les résultats présentés sont les valeurs brutes normalisées par rapport à l'état à 0% de particules comme expliqué à la Section 3.4.2. Ainsi pour avoir l'incertitude finale du résultat de l'opération mathématique employée (voir Tableau 3.5), il faut effectuer le calcul suivant :

$$\frac{\Delta P_r}{P_r} = \frac{\Delta P_m}{P_m} + \frac{\Delta P_{0\%}}{P_{0\%}}$$

$$\Delta P_r = P_r * \left(\frac{\Delta P_m}{P_m} + \frac{\Delta P_{0\%}}{P_{0\%}}\right) \qquad (3.\ 18)$$

où P_r est la pression normalisée, P_m est la pression mesurée (avec la pression hydrostatique incluse), $P_{0\%}$ est la pression mesurée à une fraction massique de particules de 0% (avec la pression hydrostatique incluse), ΔP_r est l'incertitude sur P_r, ΔP_m est l'incertitude sur Pm et $\Delta P_{0\%}$ est l'incertitude sur $P_{0\%}$.

Pour ce qui est des données de temps de mélange, l'incertitude était de 1,5 secondes, puisque cette durée représente la résolution de l'appareil de mesure. En réalité, l'appareil prend des données sur des périodes beaucoup plus petites que 1,5 secondes, mais il rend une valeur de résistivité moyennée à toutes les 1,5 secondes.

3.4.5 N_{jd}

Les données de vitesse à laquelle toutes les particules étaient entraînées dans le liquide ont été obtenues de manière visuelle. Il faut absolument savoir que le N_{jd} utilisé dans le cadre de ce projet est différent de celui traditionnel comme en font foi les explications qui suivent. À chaque fraction massique de solides, à chaque vitesse de rotation utilisée, la surface libre était observée afin de voir s'il restait des particules à la surface. Lorsqu'il n'y en avait pas, il était considéré que la vitesse était supérieure à N_{jd}, alors que lorsqu'il y avait des particules qui n'étaient jamais entraînées, il était considéré que la vitesse était inférieure à N_{jd}. Lorsqu'il n'était pas clair s'il y avait des particules jamais entraînées, il était considéré que la limite d'inclusion des particules était atteinte et que N_{jd} était atteinte.

Lorsque deux vitesses d'agitation différentes étaient considérées comme étant N_{jd} pour un même système d'agitation à une même fraction massique de solides, il était considéré que la relation était linéaire selon l'augmentation de la concentration de solides entre les différents points (Khazam & Kresta, 2008) et les données étaient traitées pour obtenir ces relations linéaires dans le but d'avoir une relation sensée entre N_{jd}, la fraction massique de particules et l'agitateur en soit. Ainsi, les données de N_{jd} les plus certaines étaient gardées et les moins certaines étaient changées selon la pente résultante de la relation linéaire obtenue. Les deux Figures 3.9 et 3.10 suivantes illustrent cette manipulation.

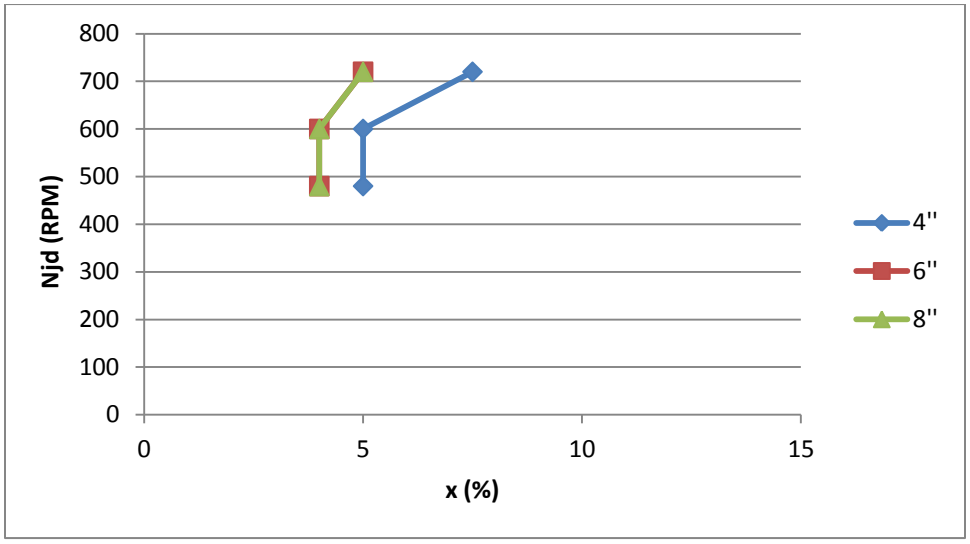


Figure 3. 9 : Résultats de N_{jd} en fonction de la fraction massique de particules avant manipulation des données pour la PBTD

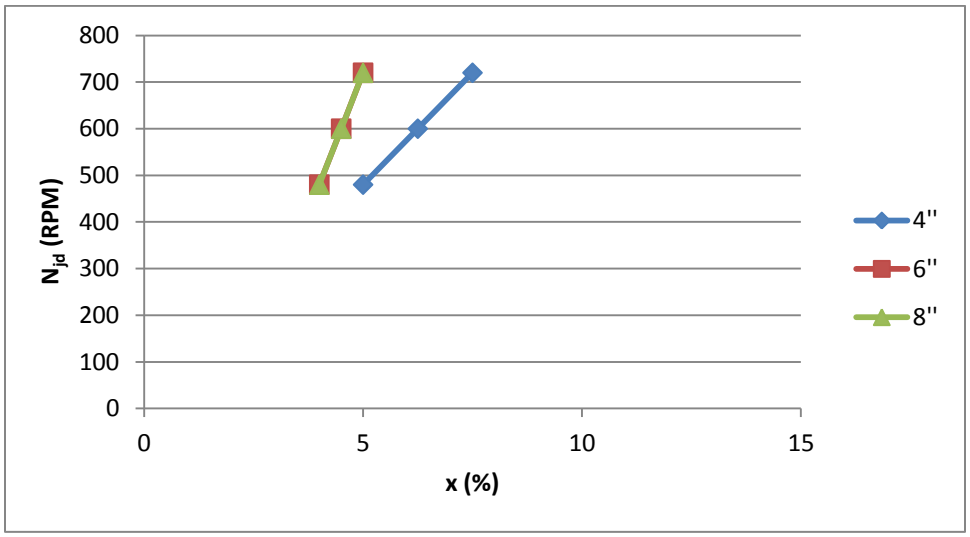


Figure 3. 10 : Résultats de N_{jd} en fonction de la fraction massique de particules après manipulation des données pour la PBTD

Donc, la manipulation qui a été faite ici a tout simplement été de forcer les données à 600 RPM à respecter la pente de la relation linéaire entre les données à 480 et 720 RPM. Sans effectuer cette dernière, il y aurait deux valeurs de N_{jd} pour une même fraction massique de solides, ce qui n'aurait pas de sens. En forçant les données à respecter la relation linéaire, une approximation de N_{jd} est obtenue entre les concentrations de solides étudiées.

3.5 Étude de répétabilité

L'étude de répétabilité a été effectuée sur les données de couple et de pression et le traitement des données a été fait de la même façon qui a été expliquée précédemment. Cette étude à été accomplie avec le système suivant :

Tableau 3. 6 : Paramètres physiques de l'étude de répétabilité

Paramètre	**Donnée**
Type d'agitateur	PBT
Sens de pompage	Haut
Hauteur de l'agitateur	4"
Hauteur de liquide	13"
Vitesses de rotation	[480; 600; 720] RPM

Dans le cadre de cette étude de répétabilité, trois essais consécutifs ont été effectués afin de déterminer si les résultats obtenus dans un essai peuvent être re-obtenus dans un essai subséquent à l'intérieur d'un certain intervalle de confiance.

3.5.1 Couple

L'étude de répétabilité du couple montre que les résultats de couple sont répétables à l'intérieur de l'intervalle de confiance du couple-mètre, soit ±0,05 N.m, comme en fait foi la Figure 3.11.

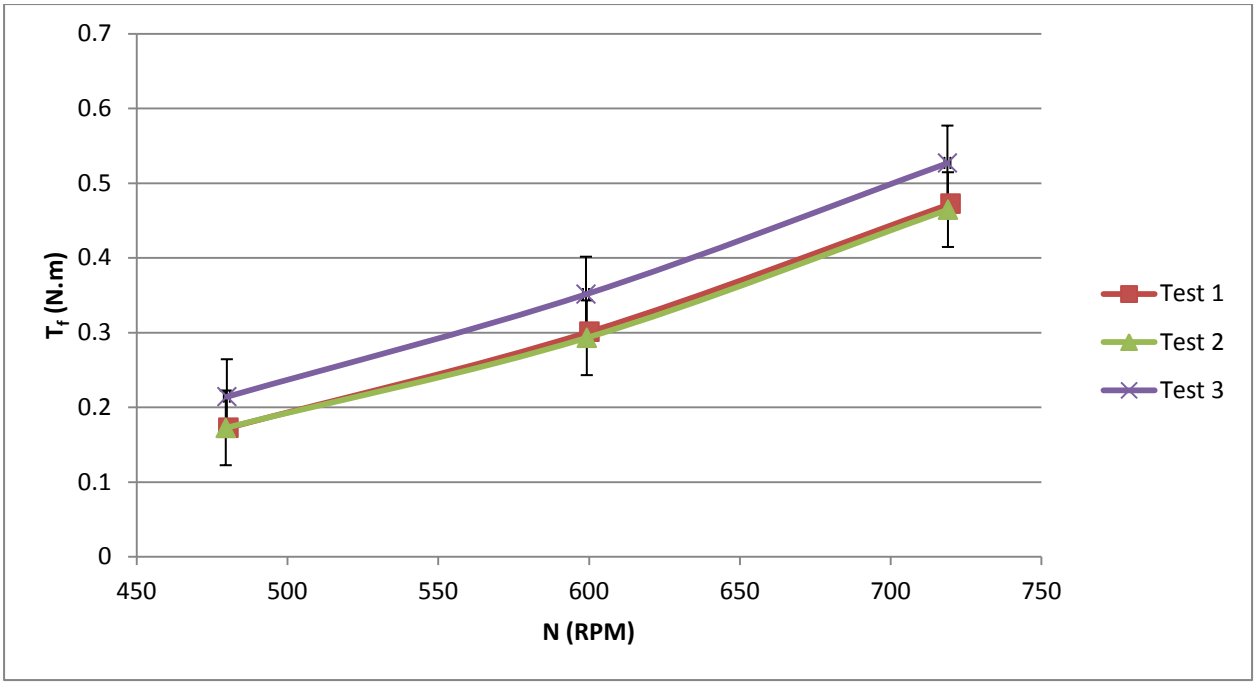


Figure 3. 11 : Résultat de couple de l'étude de répétabilité

Il est possible de voir que le test #3 est un peu différents des tests #1 et #2, mais les données de ces deux derniers sont pratiquement superposables.

3.5.2 Pression

L'étude de répétabilité de la pression montre que les tendances de pression sont répétables à l'intérieur de l'incertitude sur le capteur qui est de 500 Pa. Il faut noter que les données de pression sur les graphiques consistent uniquement en pressions dynamiques et que la pression réelle est beaucoup plus grande. La Figure 3.12 le prouve.

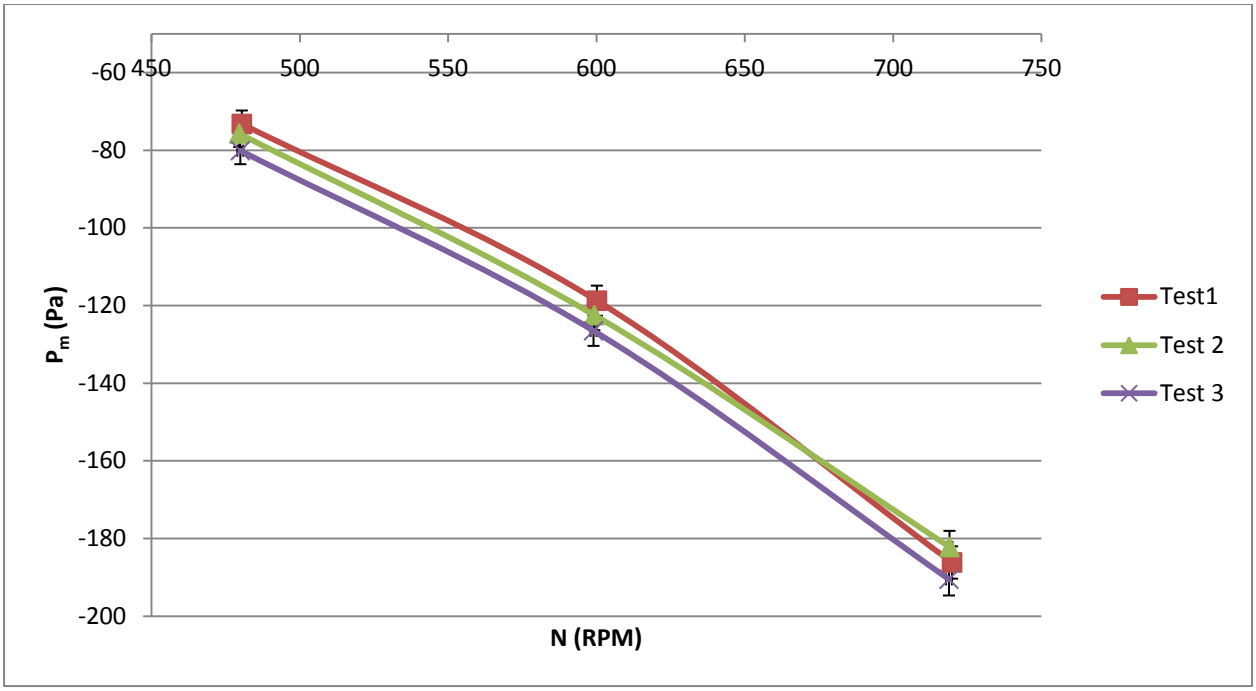


Figure 3. 12 : Résultat de pression au plan 2 de l'étude de répétabilité

En effet, les tendances obtenues lors des trois essais sont pratiquement superposables. De plus, les variations entre les pressions mesurées lors des différents tests sont très petites. La plus grande variation se trouve à 480 RPM entre la donnée de pression du test #1 et du test #3, alors que la variation de pression entre les deux est de 8,6 %. Également, toutes les points sont inclus à l'intérieur des barres d'incertitudes des autres points pour une vitesse donnée.

3.5.3 Temps de mélange

Aucun étude de répétabilité à proprement dite n'a été effectuée pour le temps de mélange puisqu'il s'agit d'une méthode éprouvée et puisque les résultats sont tous très similaires. Pour se convaincre que les temps de mélange sont répétables, il est ici considéré que le système sans particules et avec 1 %wt de particules sont identiques et que leur temps de mélange aux mêmes conditions sont les mêmes. Ainsi, la Figure 3.13 présente les résultats de temps de mélange obtenus à 0 %wt et 1 %wt de particules pour le système de mélange de PBTU à 4'' du fond de la cuve.

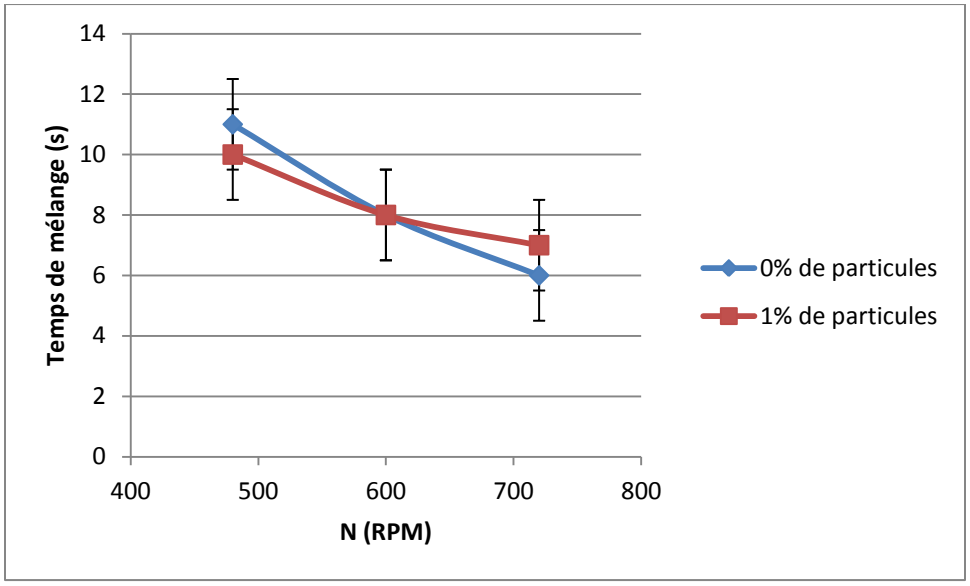


Figure 3. 13 : Données de temps de mélange du système PBTU à 4'' du fond de la cuve pour des fractions massiques de particules de 0 %wt et de 1 %wt

Ainsi, comme prévu, les données de temps de mélange à chaque vitesse d'agitation sont toutes équivalentes en considérant l'incertitude de 1,5 secondes qu'elles portent. La méthode de mesure de temps de mélange est répétable à 1,5 secondes près, soit la valeur de la résolution de l'appareil de mesure.

CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET DISCUSSION

Dans ce chapitre, les résultats issus du traitement des données de couple, de pression et de temps de mélange, ainsi que des observations visuelles seront présentés et analysés. Dans un premier temps, des données typiques de couple, de pression et de temps de mélange seront présentés. Dans un deuxième temps, l'analyse des résultats sera présentée et discutée selon le sens de rotation du mobile d'agitation, la présence ou absence d'obstruction à l'aération, le dégagement du mobile par rapport au fond de la cuve et le type d'agitateur.

4.1 Explication des résultats de couple et de pression

Les résultats de couple sont présentés sous forme normalisée par rapport aux données de couple sans particules, soit à 0% de particules. En effet, il s'agit de voir la variation du couple par rapport à l'état initial afin de dénoter s'il y a un changement de comportement selon l'augmentation de la fraction de solides dans la cuve. En raison des variations de volume inhérentes à l'ajout de particules humides, les résultats sont également présentés sous forme de couple par unité de volume normalisé par rapport à l'état initial, soit le cas à 0% de solides.

Les résultats de pression sont présentés plan par plan, car ce sont eux qui semblent donner le meilleur angle d'analyse. Les graphiques de données brutes normalisées issues du traitement de données apparaissent comme étant les plus éloquents par les autres méthodes de traitement de données. La discussion des résultats s'effectuera par système d'agitation.

4.2 Résultats attendus

En termes de couple, si un nouveau régime hydrodynamique est atteint en raison de la présence croissante de solides, il devrait y avoir une augmentation marquée du couple. Lorsque la fraction massique de solides augmente, la viscosité apparente du mélange a tendance à augmenter et rend le mélange plus ardu. Pour tourner à une vitesse donnée, le mobile d'agitation utilisé aura donc à compenser l'augmentation de la résistance au mouvement associée à l'augmentation de la viscosité par une plus grande puissance dissipée, et donc de plus grandes données de couple mesurées.

En ce qui a trait aux données de pression pariétale, comme il s'agit d'une technique jamais utilisée dans les conditions à l'étude, il est difficile de prévoir précisément les effets d'un

changement de régime d'écoulement. Cependant, la modification du régime hydrodynamique devrait changer la forme des lignes de courant dans la cuve et les données de pression en seraient directement affectées. Ainsi, la tendance des données devraient également en être changée de manière marquée.

L'augmentation de la fraction massique de solides dans la cuve devrait faire croître le temps nécessaire pour atteindre une qualité de mélange donnée. En effet, la croissance de la viscosité apparente liée à l'augmentation de la fraction de solides dans la cuve ajoute de la résistance au mélange. Ainsi, l'atteinte d'un nouveau régime hydrodynamique devrait se traduire par une augmentation des données de temps de mélange.

4.3 Analyse générale et implication des résultats de couple, de pression et de temps de mélange

4.3.1 Couple

De manière générale, les données de couple normalisée et les données de couple par unité de volume montrent très peu de variations par rapport au cas à 0% de particules. En effet, les Figures 4.1 à 4.6 illustrent bien le comportement général du couple.

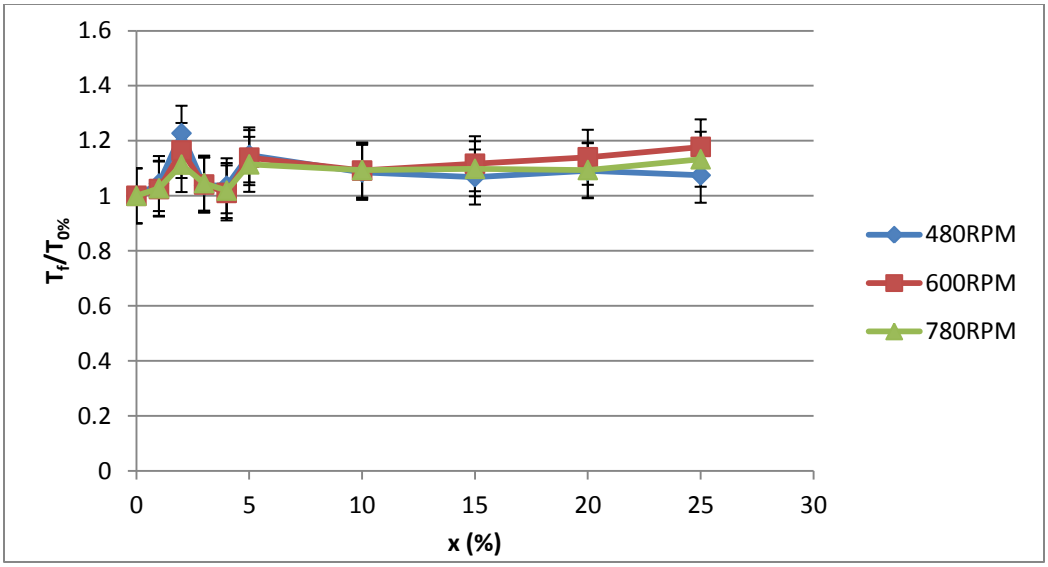


Figure 4. 1 : Données corrigées de couple normalisées par rapport à l'essai à 0% de particules pour l'agitateur de type Dispersimax sans obstruction au pompage d'air à une hauteur de 2'' du fond de la cuve

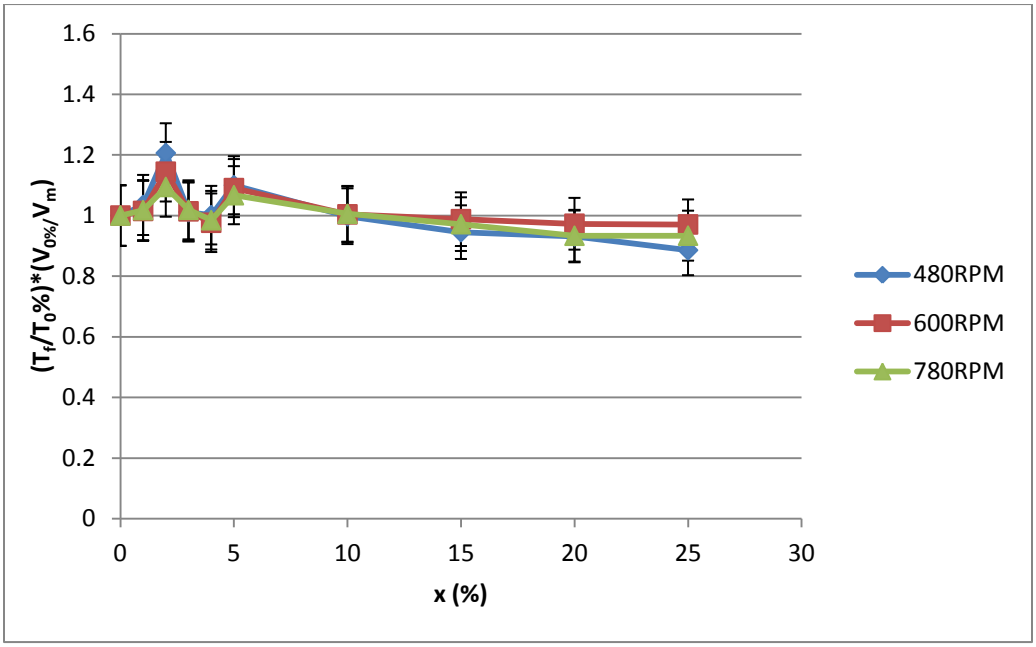


Figure 4. 2 : Données corrigées de couple normalisées par rapport à l'essai à 0% de particules compensant l'augmentation de volume associé à l'ajout de particules humides pour l'agitateur de type Dispersimax sans obstruction au pompage d'air à une hauteur de 2'' du fond de la cuve

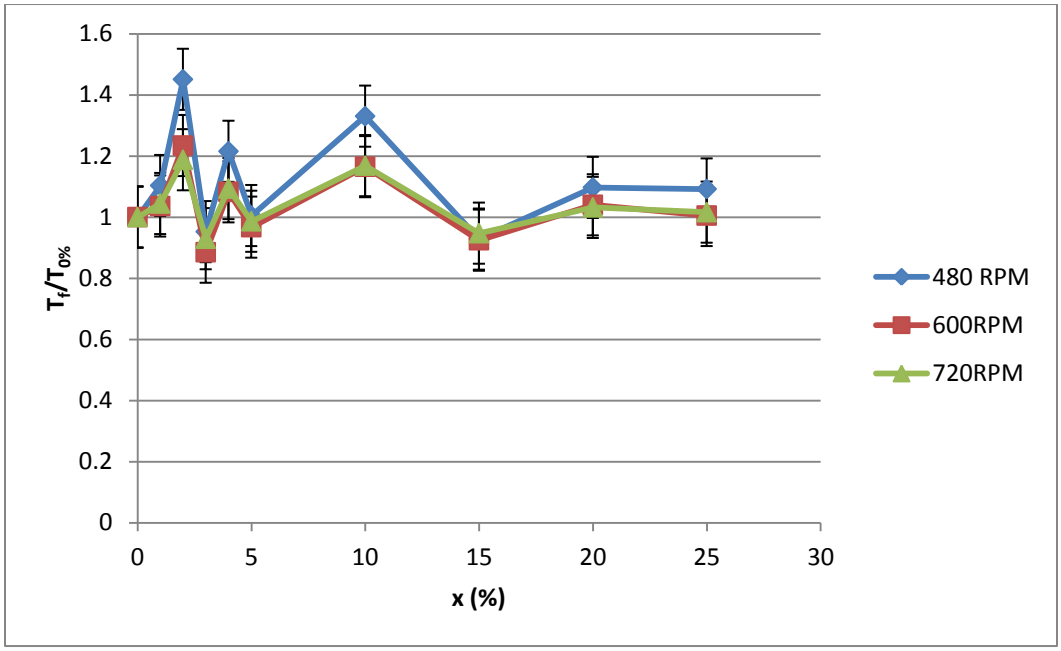


Figure 4. 3 : Données corrigées de couple normalisées par rapport à l'essai à 0% de particules pour la PBT opérée en pompage vers le bas à 4'' du fond de la cuve

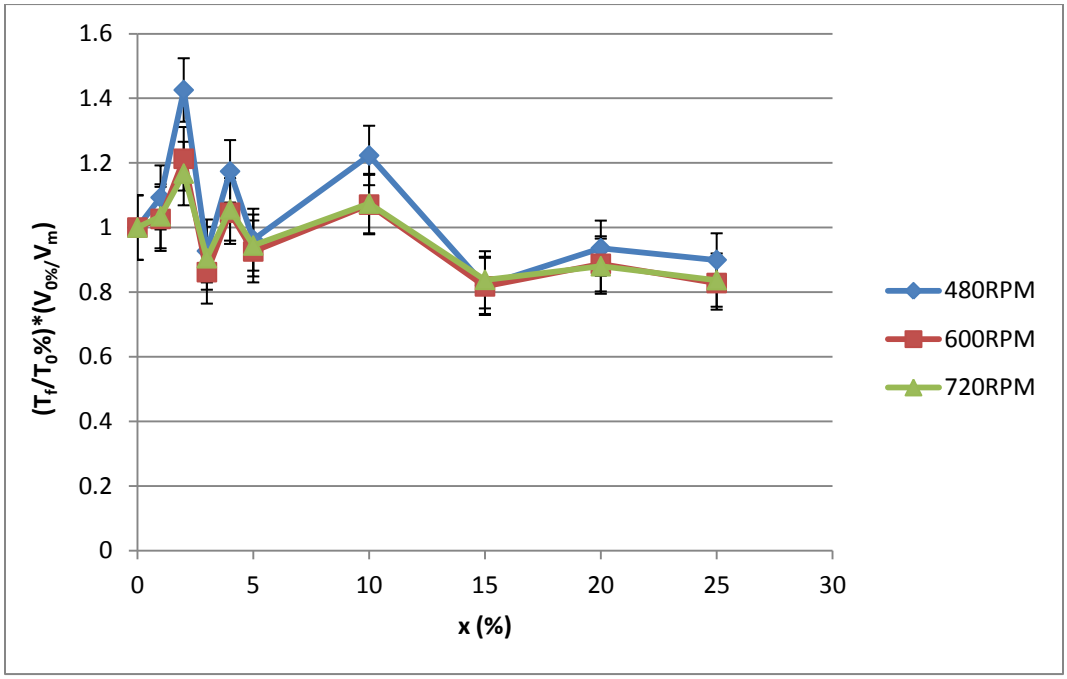


Figure 4. 4 : Données corrigées de couple normalisées par rapport à l'essai à 0% de particules compensant l'augmentation de volume associé à l'ajout de particules humides pour la PBT opérée en pompage vers le bas à 4'' du fond de la cuve

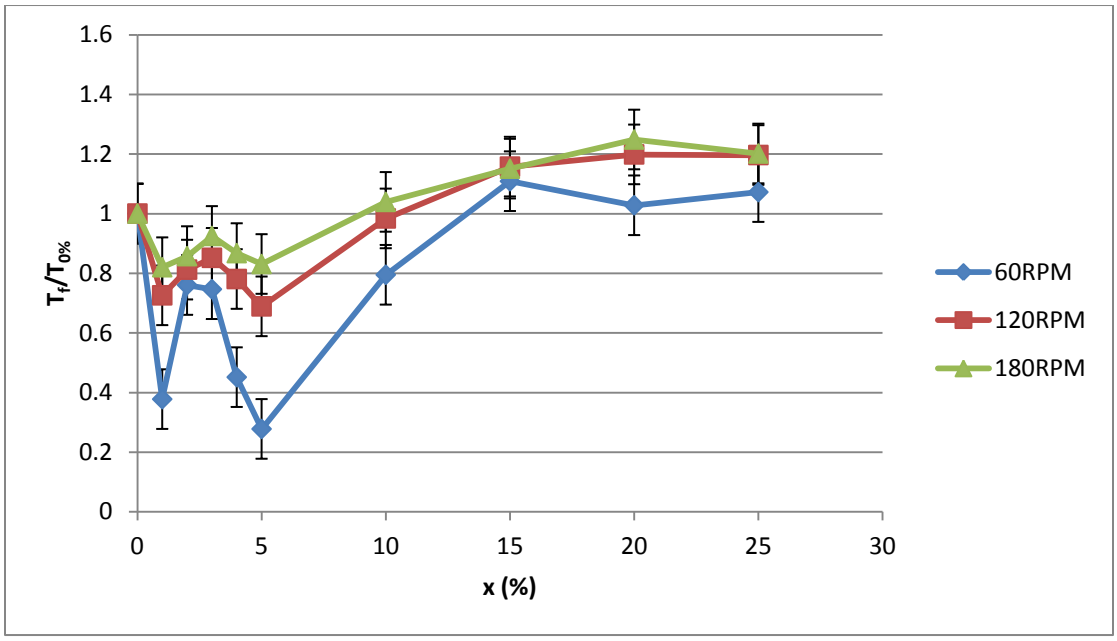


Figure 4. 5 : Données corrigées de couple normalisées par rapport à l'essai à 0% de particules pour le mélangeur Maxblend à 1'' du fond de la cuve

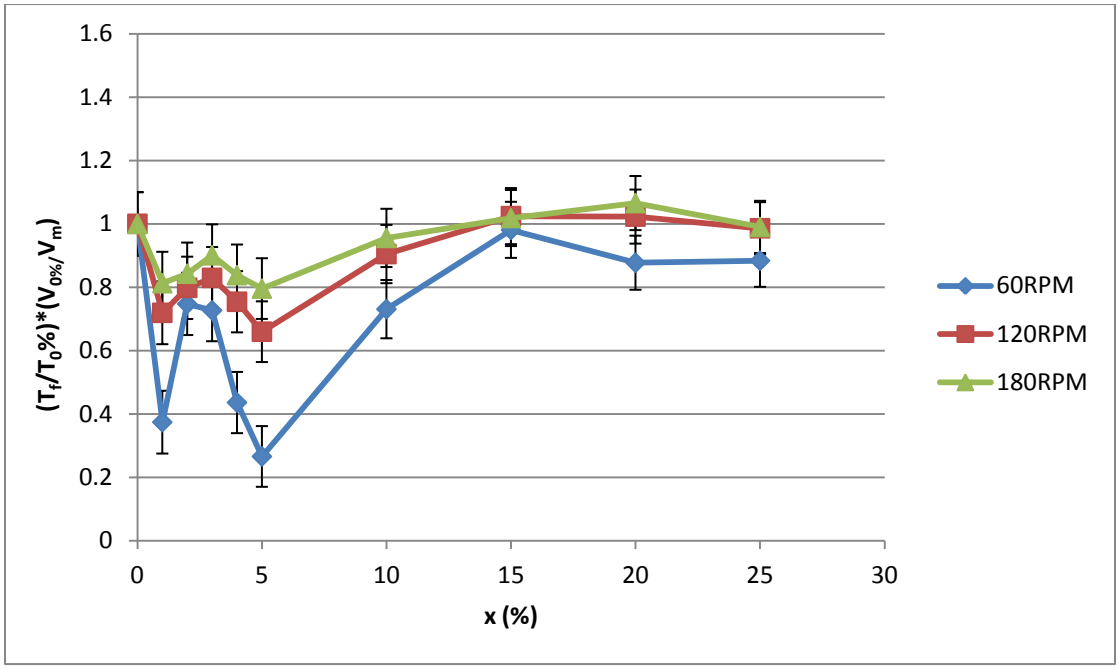


Figure 4. 6 : Données corrigées de couple normalisées par rapport à l'essai à 0% de particules compensant l'augmentation de volume associé à l'ajout de particules humides pour le mélangeur Maxblend à 1'' du fond de la cuve

Les variations de couple sont généralement très faibles et de tels résultats sont dus au fait qu'en régime d'écoulement turbulent, le nombre de puissance est constant. Cependant, ce résultat ne donne aucune indication sur d'éventuels changements dans la rhéologie de la solution. En effet, plus la concentration de particules en cuve augmente, plus la viscosité apparente de la solution augmente. Or, ce phénomène ne peut justement pas s'observer par les données de couple étant donné que le nombre de puissance d'un agitateur en régime d'écoulement turbulent est constant et ne dépend donc pas de la viscosité du fluide, contrairement au régime d'écoulement laminaire. Les Figures 4.1 à 4.6 présentent la tendance générale de couple en fonction de la charge de particules qui aspire à prouver que la performance des agitateurs n'est pas influencée par la présence plus ou moins grande de solides pour la plage de fractions massiques considérée. Évidemment, dans le cas du mélangeur Maxblend, les variations de couple sont considérables. Néanmoins, ce constat est seulement vrai dans le cas de la plus basse vitesse, soit à 60 RPM et la raison est simple. Le moteur est surdimensionné pour être opéré à de si basses vitesses et lorsqu'opéré dans de telles conditions, le contrôle de la vitesse est particulièrement ardu. Ainsi,

puisque les résultats des Figures 4.5 et 4.6 sont présentés en fonction d'un état initial, ces derniers sont alors très sensibles aux données de couple obtenues dans cette situation alors que la vitesse était aussi difficilement contrôlée, le couple étant étroitement lié à la vitesse de rotation. C'est pourquoi le couple normalisé à 60 RPM présente de si grandes variations. De plus, les données de couple sont très petites, ce qui les rend d'autant plus sensible à la donnée par laquelle elles sont normalisées. Les Figures 4.7 et 4.8 présentent les données corrigées de couple du cas du mélangeur Maxblend pour illustrer qu'à 60 RPM, les variations de couple par rapport à l'état initial ne sont pas aussi pourvues de sens qu'à 120 et 180 RPM puisque les tendances de couple aux trois vitesses sont très similaires.

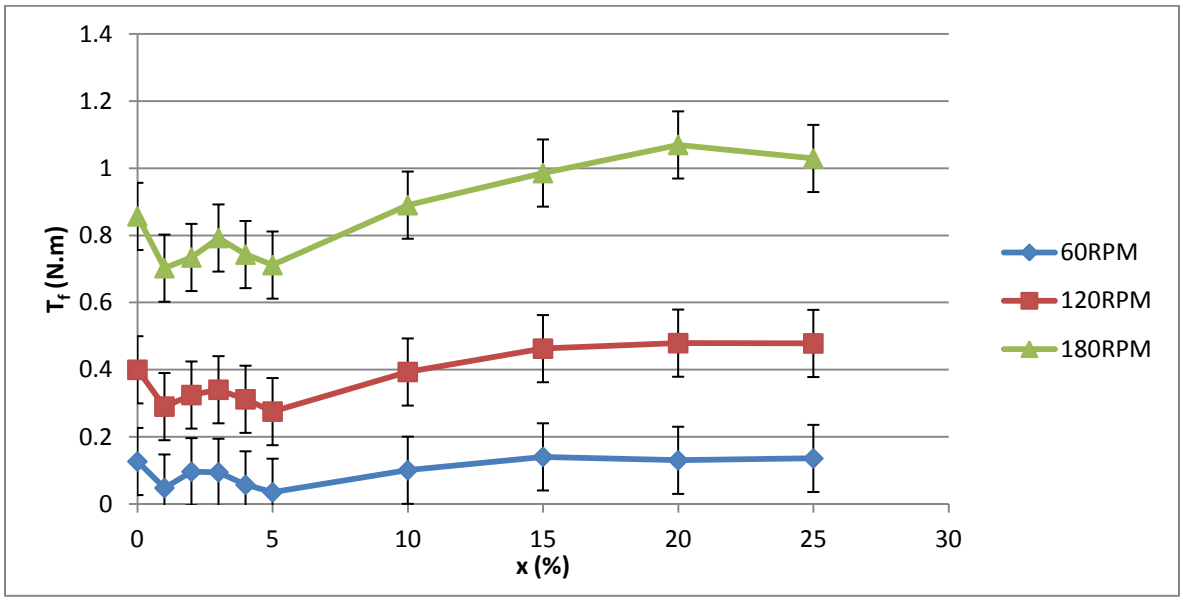


Figure 4. 7 : Données corrigées de couple pour l'agitateur de type Maxblend à une hauteur de 1'' du fond de la cuve

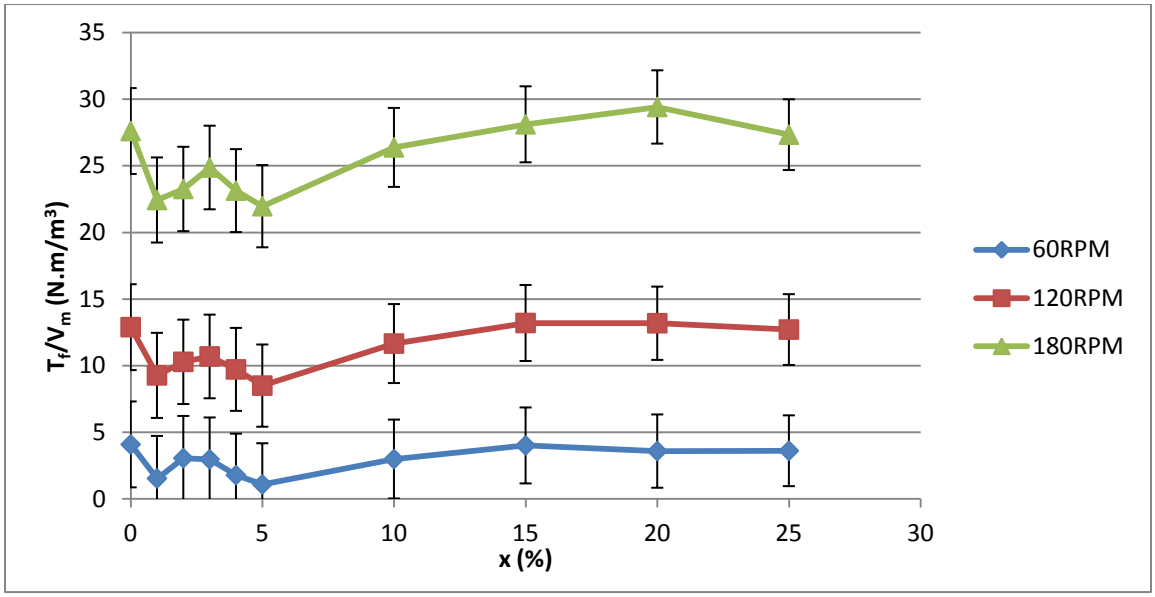


Figure 4. 8 : Données corrigées de couple compensant l'augmentation de volume associé à l'ajout de particules humides pour le mélangeur Maxblend à 1'' du fond de la cuve

4.3.2 Pression

De manière analogue aux données de couple, les données de pression ne présentent pas de tendance qui aurait passée par une variation significative de pression par rapport à la pression en absence de solides qui pourrait porter à croire qu'un changement d'hydrodynamique se passe à un point ou un autre lors de l'augmentation de la fraction massique de particules. En effet, les Figures 4.9, 4.10 et 4.11 illustrent le comportement général de la pression en fonction de la fraction massique de solides.

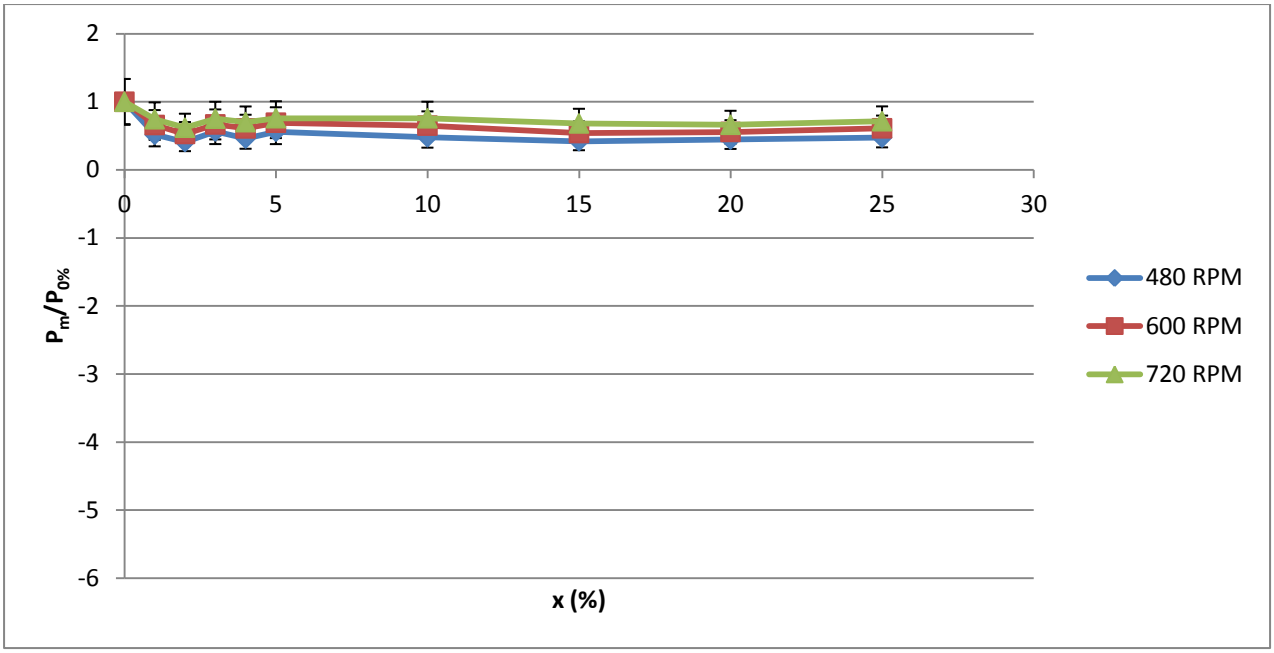


Figure 4. 9 : Données de pression brutes normalisées par rapport à l'état initial de 0% de particules en fonction de la fraction massique de particules pour la PBTU positionnée à 4'' du fond de la cuve (**Plan 1**)

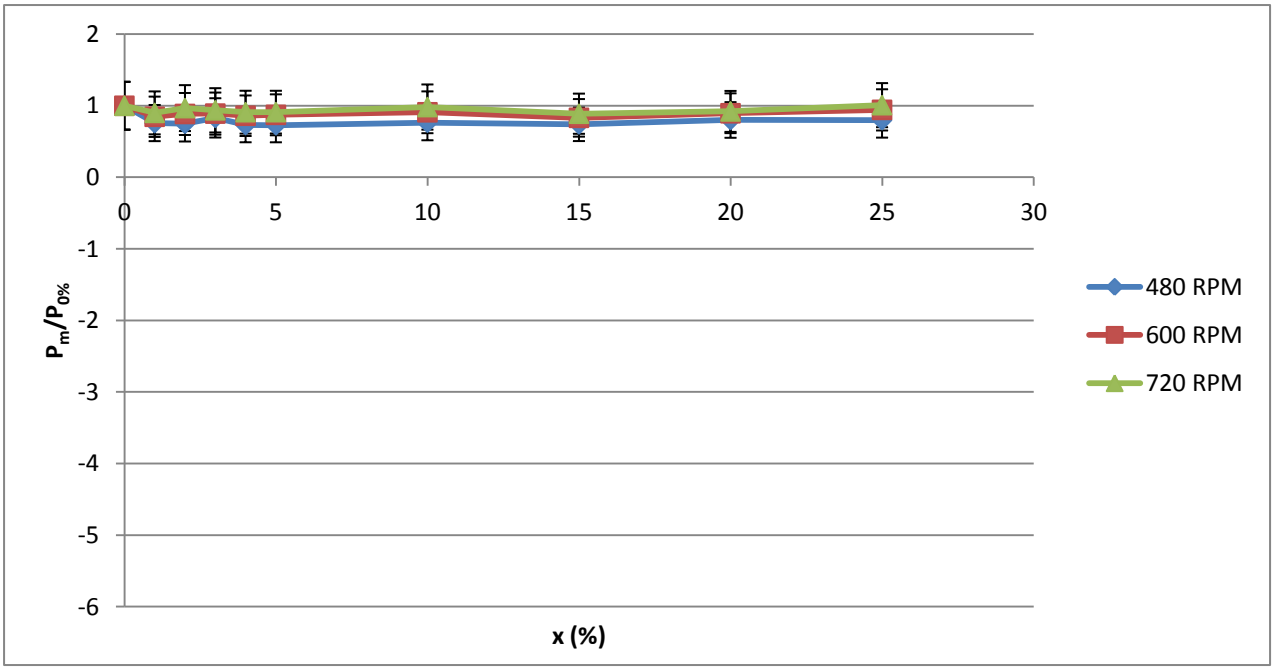


Figure 4. 10 : Données de pression brutes normalisées par rapport à l'état initial de 0% de particules en fonction de la fraction massique de particules pour la PBTU positionnée à 4'' du fond de la cuve (**Plan 2**)

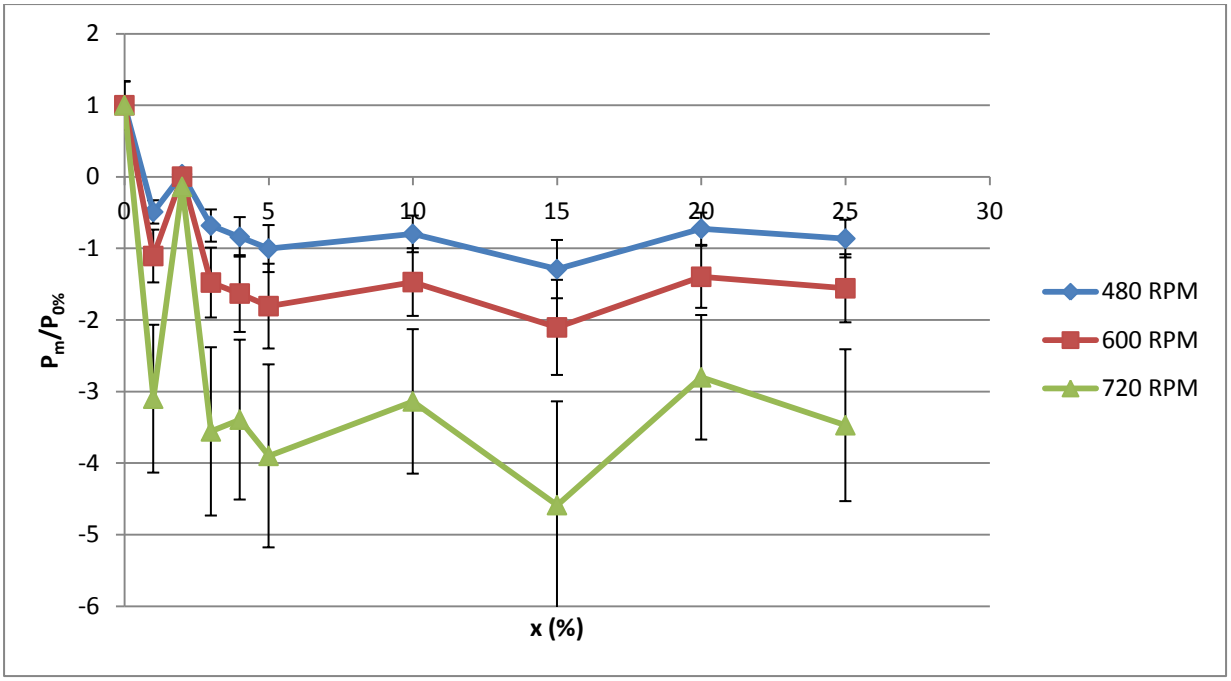


Figure 4. 11 : Données de pression brutes normalisées par rapport à l'état initial de 0% de particules en fonction de la fraction massique de particules pour la PBTU positionnée à 4'' du fond de la cuve (**Plan 3**)

Les résultats des deux premiers plans sont probants par rapport à l'absence de tendance de données de pression selon la présence plus ou moins grande de particules dans la cuve. Cependant, le plan 3 présente des résultats moins éloquents. Il faut toutefois s'apercevoir que les la tendance de pression ne change pas réellement en fonction de la charge de particules. Les données de pression peuvent être erratiques selon la position relative du capteur de pression par rapport à l'agitateur, notamment lorsque le capteur est dans la zone de décharge de l'agitateur. Ce fait est plus amplement discuté à la Section 4.6. Cet effet a tendance à être amplifié lorsque la vitesse est augmentée, ce qui est sensé puisque le chaos en est également augmenté. C'est le phénomène observable à la Figure 4.11.

La présence d'air contribue également au caractère erratique des données de pression, la Figure 4.12 en est particulièrement révélatrice et résume bien ce comportement de la pression aux différents plans.

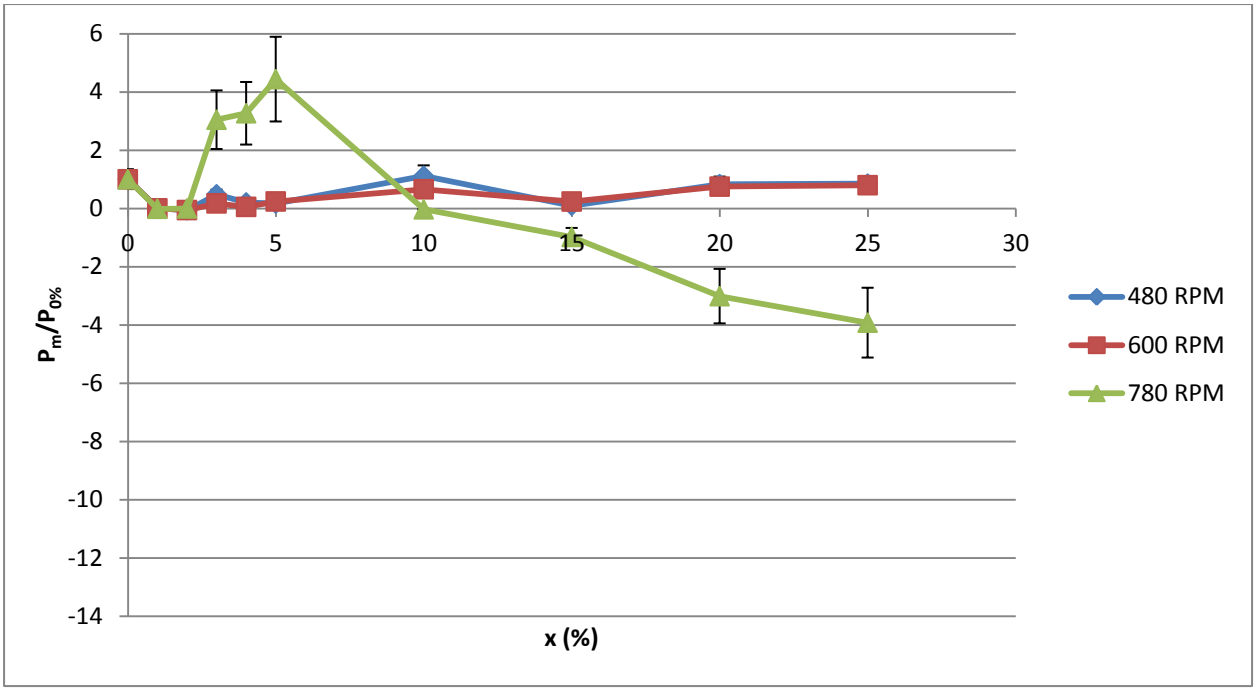


Figure 4. 12 : Données de pression brutes normalisées en fonction de la fraction massique de particules selon l'état initial à 0% de solides pour la turbine Dispersimax **sans obstruction** au pompage d'air à 6'' du fond de la cuve (**Plan 3**)

L'agitateur de type Dispersimax pompe beaucoup d'air dans l'eau à haute vitesse. À la Figure 4.12, il est évident que cette présence d'air influence beaucoup les données de pression alors qu'à plus basse vitesse lorsqu'il y a moins d'air, les variations de pression par rapport à l'état initial sont pratiquement nulles et les tendances sont presqu'identiques.

L'absence de tendances claires autant en regard du couple que de la pression en fonction de la fraction massique de particules semble indiquer qu'aucun changement d'hydrodynamique n'a lieu dans le système de mélange pour les fractions massiques étudiées. Ceci n'est pas nécessairement un phénomène contre-intuitif, surtout en raison de la proximité de la densité de l'eau et des particules, la densité étant une propriété très importante autant en regard du couple et de la pression. Si la viscosité apparente de l'eau avait changé significativement, il y a lieu de croire que les signaux de pression s'en seraient ressentis. L'autre propriété physique principale qui aurait également pu influencer l'hydrodynamique est la viscosité de la boue issue du mélange d'eau et de particules. Si la viscosité apparente avait augmenté de manière significative par

rapport à celle de l'eau, normalement, l'effet aurait été visible du point de vue du couple puisque pour atteindre la même vitesse d'agitation et vaincre le surplus d'inertie dû à l'augmentation de la viscosité, la puissance nécessaire en aurait été augmentée et le couple aussi.

4.3.3 Temps de mélange

En termes de temps de mélange, il n'y a pas non plus d'effet clair de la présence des particules. Dans tous les cas, le temps de mélange à des conditions données est sensiblement le même. Ceci implique qu'aux fractions massiques de solides étudiées, la présence de particules n'influence pas la capacité de l'agitateur à faire son travail. Les Figures 4.13, 4.14 et 4.15 présentent les tendances de temps de mélange observés pour les différents agitateurs de l'étude.

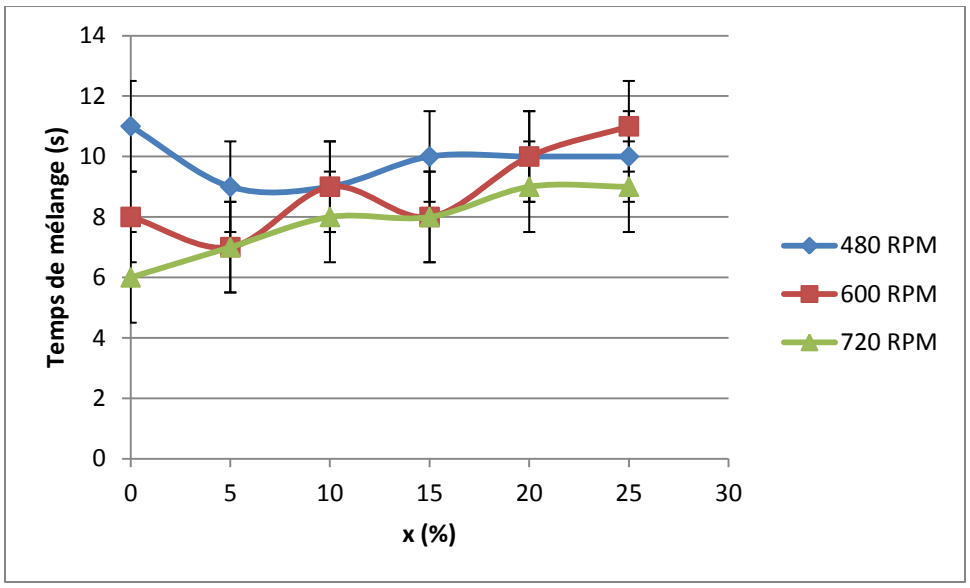


Figure 4. 13 : Temps de mélange en fonction de la fraction massique de solides pour chaque vitesse de rotation (PBTU c=4'')

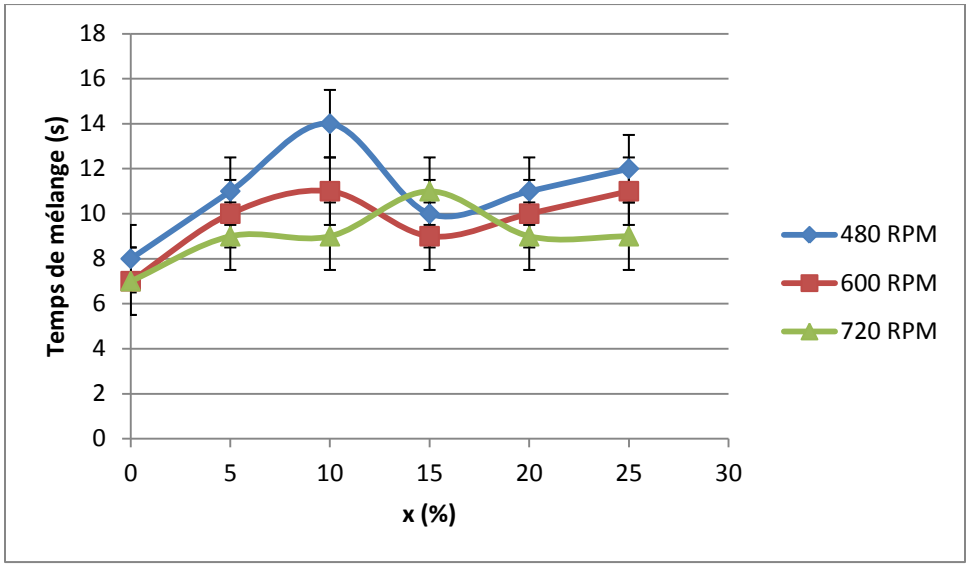


Figure 4. 14 : Temps de mélange en fonction de la fraction massique de solides pour chaque vitesse de rotation (Dispersimax c=2'')

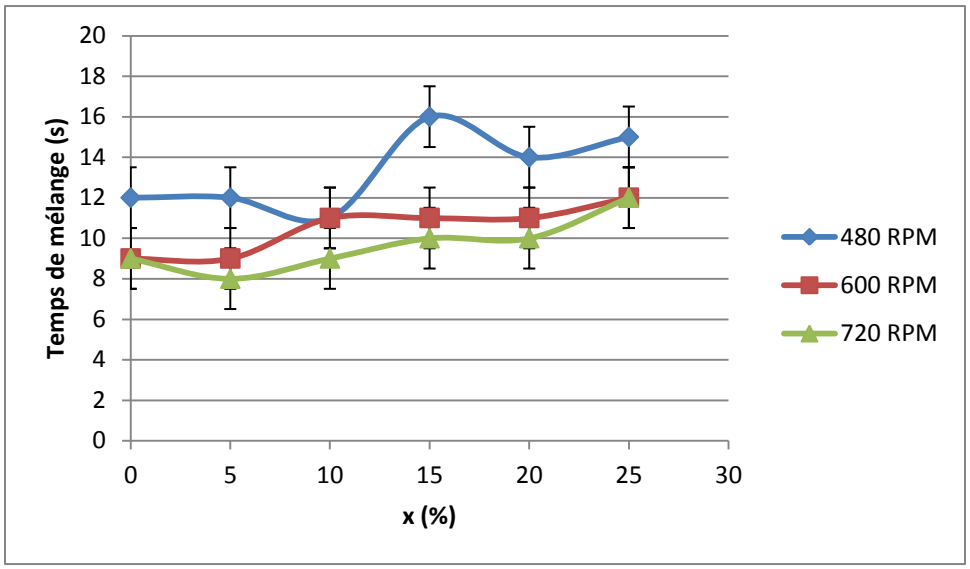


Figure 4. 15 : Temps de mélange en fonction de la fraction massique de solides pour chaque vitesse de rotation (Maxblend c=1'')

S'il y a une petite tendance à la hausse du temps de mélange entre 0 et 25% massique de particules particulièrement à des vitesses de 600 et 720 RPM, il faut considérer le fait que le volume augmente avec l'augmentation de la fraction massique de solides. Ainsi, il est évident

que le temps de mélange varie peu selon la fraction massique de particules dans les cas considérés.

Cependant dans le cas du mobile d'agitation Maxblend, à partir de 15% de particules, les données de temps de mélange à toutes les vitesses augmente significativement. Cette augmentation ne peut toutefois pas être attribuée à la présence croissante de solides en cuve. En effet, les changements importants soudains à partir de 15% massique de solides sont plutôt dus au fait que la grille du mobile d'agitation est complètement immergée sous la surface libre, alors qu'elle ne l'est pas à plus petites fractions de solides. La performance du mélangeur en est directement affectée et les données de temps de mélange en sont une preuve.

À la lumière de ces résultats, il semble que la conclusion logique s'avère être que dans la plage de fractions massiques de particules utilisées, la présence de solides n'influence pas la performance des 3 agitateurs considérés.

Cependant, il faut noter qu'à partir d'une certaine quantité de particules propre à chaque mobile d'agitation à une certaine hauteur celui-ci ne peut tout simplement plus entraîner la totalité des particules. C'est-à-dire qu'une couche de particules flottantes couvre alors la surface libre. Ainsi, dans les cas de la PBT et du mélangeur Maxblend, ceci peut être problématique dans le contexte de formation d'hydrates. En effet, la présence de cette couche de particules a pour effet d'augmenter la résistance à l'entraînement d'air dans la cuve. Puisque la couche de solides se trouve directement entre la surface du liquide et l'air et que la surface libre n'est pas assez instable pour la briser, il est certain que très peu de gaz peut être entraîné par la surface. Et si ce n'est pas un problème pour l'agitateur de type Dispersimax, car il fait entrer l'air dans la cuve à même sa turbine, il est néanmoins l'agitateur qui à le plus de difficulté à entraîner les particules dans l'eau lorsqu'il y en a beaucoup. En plus d'être le mobile d'agitation qui occasionne le moins de turbulence à la surface, donc celui qui a le plus de difficulté à inclure les solides dans la cuve, l'air entraîné par l'agitateur crée un mouvement vers la surface au détriment de l'entraînement de solides flottants.

Dans un contexte de génération d'hydrates de gaz, le tirage de particules et l'entraînement de gaz efficace sont pourtant vitaux de manière égale. Dans un monde idéal, un agitateur aurait la capacité d'entraîner l'air et les particules dans la cuve facilement. Ultimement, il n'est pas nécessairement clair quelle situation est optimale entre le pompage d'air efficace de l'agitateur de

type Dispersimax et sa difficulté à entraîner des particules par rapport à l'efficacité de la PBT employée en pompage vers le haut ou du mélangeur Maxblend en termes d'entraînement de solides et leur inefficacité à entraîner de l'air dans l'eau. Il faudrait idéalement avoir un agitateur qui puisse faire les deux tâches efficacement.

4.4 Effet du sens de rotation (PBT)

Le sens de rotation d'une turbine à pales inclinées influence la direction du pompage de fluide. En suspension de solides, il est généralement conseillé d'opérer l'agitateur en pompage vers le bas (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004). Ainsi, comme il est ici désiré d'entraîner des particules flottantes, intuitivement, le premier réflexe serait d'utiliser le système de mélange de manière opposée, soit en pompage vers le haut. Or, selon les observations qui ont pu être faites, ce raisonnement semble vrai dans certains cas, mais dépendant en fait du positionnement de l'agitateur. En effet, le pompage vers le bas est moins efficace que son homologue lorsque la capacité d'entraînement de solides flottants est considérée. Les Figures 5.16 et 5.17 présentent la limite de capacité d'entraînement total des particules pour les deux directions de pompage. Ceci s'explique par le fait que la turbulence à la surface est le mécanisme principal d'entraînement des particules à la surface. Ainsi, la PBTU à faible immersion a une très grande capacité de déstabilisation de la surface libre qui décroît par contre rapidement en fonction de son niveau d'immersion. Dans le cas de la PBTD, il s'agit du contraire. Lorsque la turbine est placée en fond de cuve et loin de la surface libre, elle peut aussi engendrer beaucoup de turbulence à la surface libre et entraîner les particules flottantes (Khazam & Kresta, Mechanisms of Solids Drawdown in Stirred Tanks, 2008). Cependant, selon les observations visuelles au cours des expériences, lorsque placées selon leur meilleure configuration pour le tirage de particules, la PBTU semble plus efficace que la PBTD.

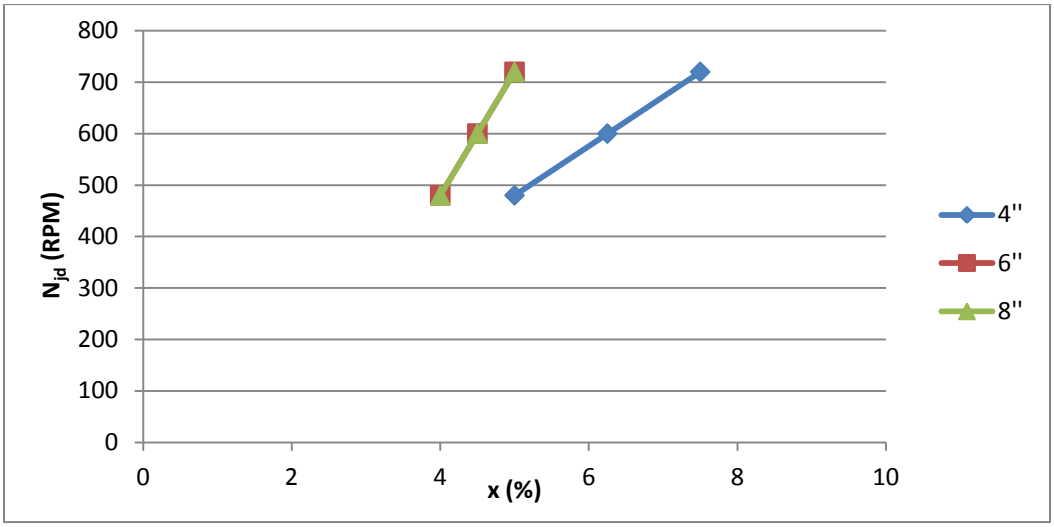


Figure 4. 16 : Graphique présentant N_{jd} en fonction de la charge de particules pour la PBTD à toutes les hauteurs étudiées

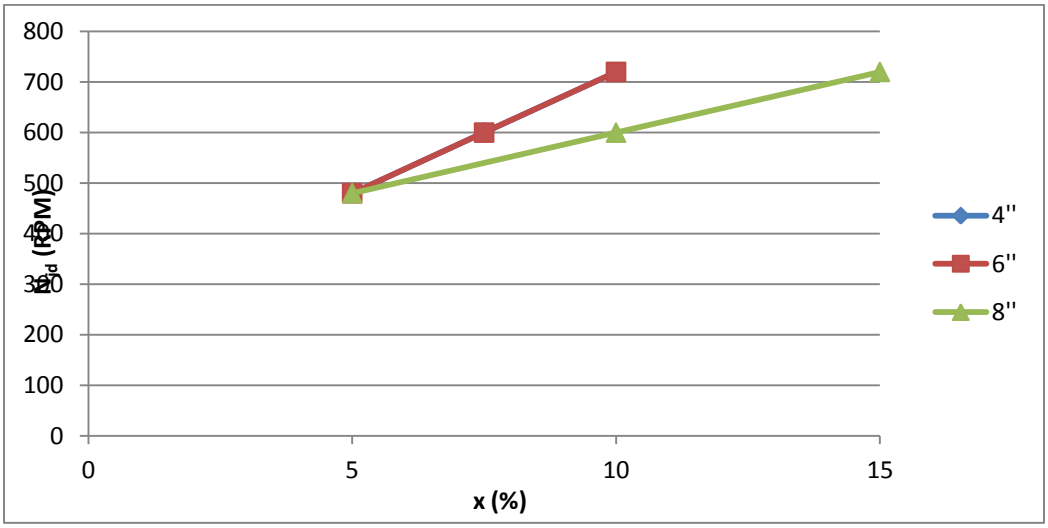


Figure 4. 17 : Graphique présentant N_{jd} en fonction de la charge de particules pour la PBTU à toutes les hauteurs étudiées

Les Figures 5.16 et 5.17 précédentes prouvent que le pompage vers le haut est beaucoup plus efficace que le pompage vers le bas pour l'entraînement de solides flottants, particulièrement lorsque la turbine est positionnée à 6 ou 8''. Lorsque celle-ci se trouve plus près du fond, les résultats sont similaires, alors que l'agitateur utilisé en pompage vers le bas bénéficie de la proximité du fond de la cuve pour avoir des boucles d'écoulement plus efficaces, alors que la turbine employée en pompage vers le haut ne peut bénéficier de la proximité de la surface libre. En général, le pompage vers le haut est plus efficace.

De plus, en pompage vers le bas, la surface libre est généralement beaucoup plus stable qu'en pompage vers le haut. Ainsi, d'après les mécanismes d'aération par la surface et d'après les observations visuelles, l'opération en pompage vers le haut de la PBT est nettement plus efficace pour l'entraînement d'air à partir de la surface libre. En ce qui a trait au temps de mélange, les Figures 4.18 et 4.19 présentent les données de temps de mélange de la PBT selon les deux modes de pompage.

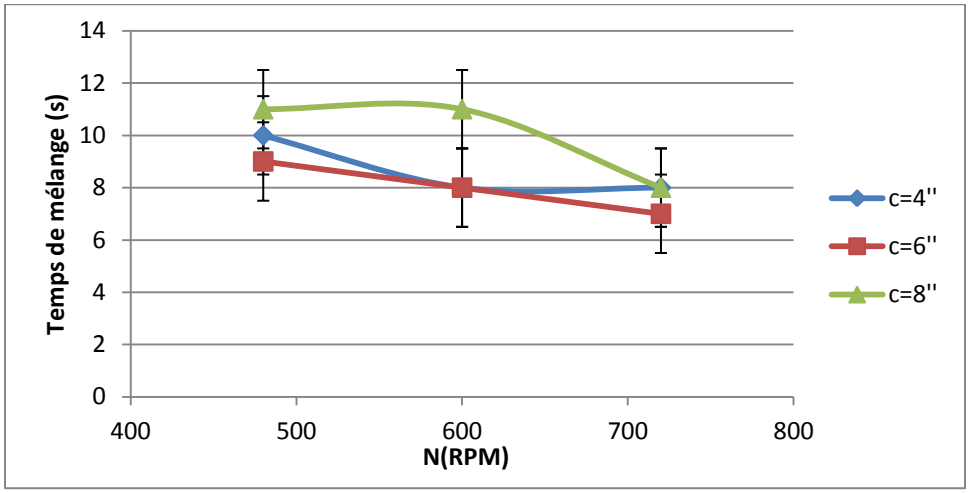


Figure 4. 18 : Temps de mélange de la PBTU en fonction de la vitesse de rotation avec 15 %wt de particules à toutes les hauteurs étudiées

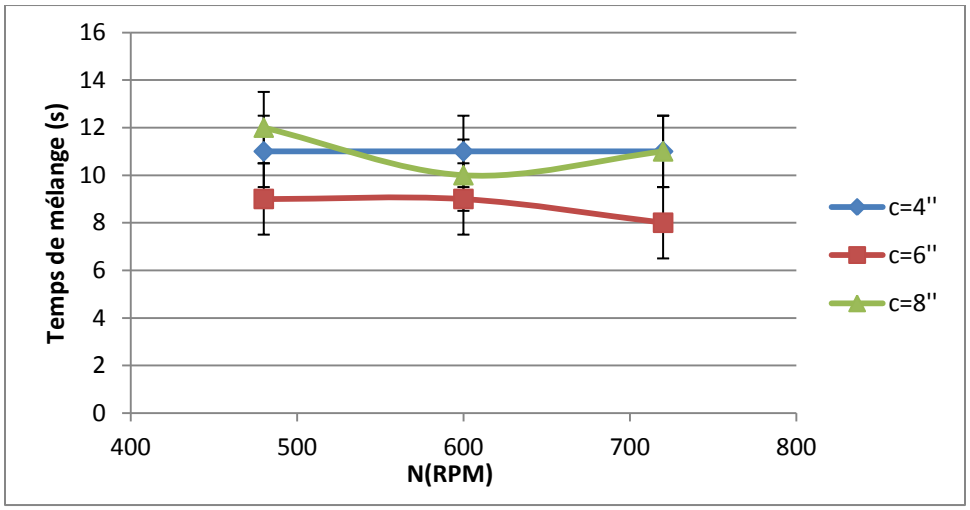


Figure 4. 19 : Temps de mélange de la PBTD en fonction de la vitesse de rotation avec 15 %wt de particules à toutes les hauteurs étudiées

Ces données ne permettent pas d'établir un effet significatif du sens de rotation de la PBT sur le temps de mélange. Les variations de temps de mélange sont très petites et sont du même ordre de grandeur que l'incertitude de la ERT (1,5 secondes).

4.5 Effet de la présence ou de l'absence d'obstruction au pompage d'air (Dispersimax)

La présence d'obstruction à l'aération était tout simplement le résultat de l'application de papier collant sur les trous d'aération de l'arbre de rotation. Par contre, cette obstruction n'empêche pas en totalité le pompage d'air puisque de l'air était assurément pompé à partir du raccord de l'arbre du moteur et celui du système d'agitation. Néanmoins, le pompage d'air en est considérablement réduit.

Une étude du couple en fonction de la vitesse de rotation sur une grande plage de vitesses (350 RPM à 1000 RPM, par incréments de 25 RPM) a été menée afin de comprendre mieux le phénomène de pompage d'air pour les systèmes de mélange avec comme mobile l'agitateur de type Dispersimax à des hauteurs de 2'' et 6'' à partir du fond de la cuve avec et sans obstruction à l'aération. Les résultats sont présentés à la Figure 4.20 suivante.

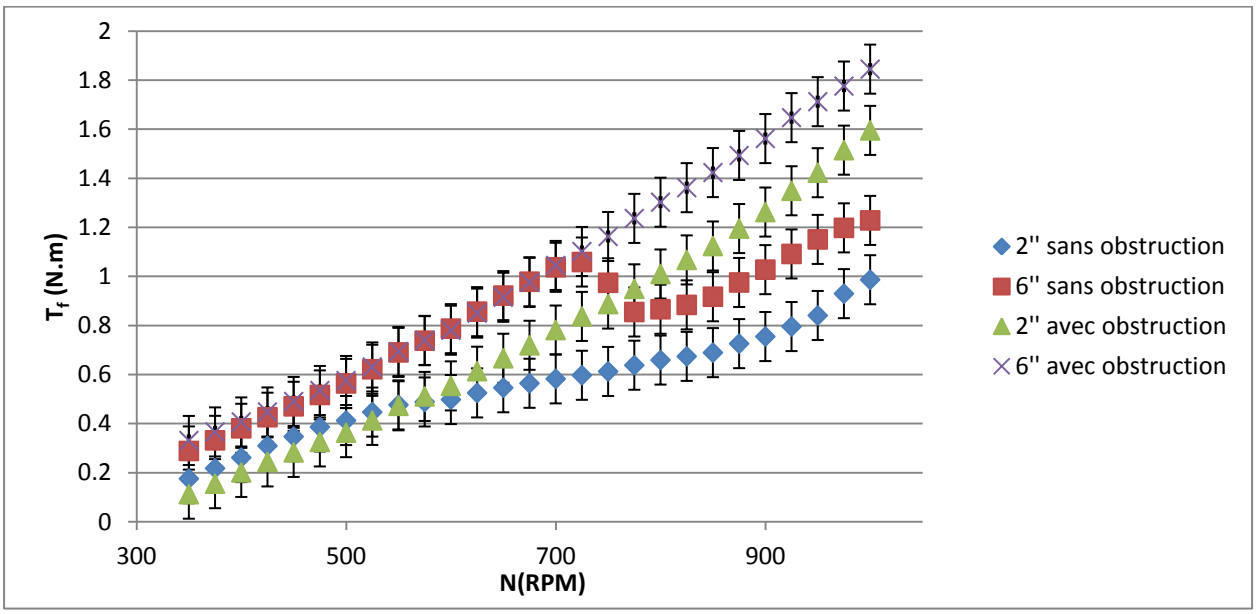


Figure 4. 20 Couple en fonction de la vitesse de rotation pour l'agitateur de type Dispersimax avec et sans obstruction à l'aération, et pour deux hauteurs à partir du fond de la cuve

Les tendances générales de couple de la Figure 4.20 sont généralement proportionnelles à la vitesse de rotation de l'agitateur. Il s'agit d'un résultat sensé puisque plus le mobile d'agitation tourne rapidement, plus le fluide exerce une force importante de résistance au mouvement de l'agitateur.

Dans le cas d'absence d'obstruction à l'aération, l'atteinte d'un seuil d'aération marqué par une diminution de la pente de la courbe est évidente. En cas de présence d'obstruction à l'aération, les courbes sont beaucoup plus continues, si bien qu'il est difficile d'établir si un tel seuil est atteint en se basant uniquement sur les courbes. Par ailleurs, lorsque les trous d'aération sont obstrués, les courbes de couple affichent des tendances quasi-identiques sur la totalité de l'intervalle de vitesses étudiée. Sachant que de l'air s'infiltre malgré la présence d'obstruction à l'aération, il est probable que l'atteinte du seuil d'aération s'effectuerait, mais à une vitesse beaucoup plus élevée, en dehors de la plage de vitesse étudiée ici.

Les courbes associées au mobile d'agitation avec et sans obstruction à l'aération pour une hauteur donnée sont pratiquement superposées avant l'atteinte du seuil d'aération. En effet, pour une hauteur de 6'', les deux courbes sont pratiquement superposables jusqu'à environ 700 RPM et pour une hauteur de 2'', jusqu'à environ 600 RPM. En absence d'obstruction à l'aération, lorsque le seuil d'aération est atteint, le comportement des courbes avec et sans obstruction commence à diverger. Les courbes en présence d'obstruction à l'aération semblent continuer leur tendance à peu près linéaire. En absence d'obstruction à l'aération, les courbes franchissent clairement un seuil d'aération qui se traduit par une transition plus ou moins longue selon la hauteur de l'agitateur entre les régimes de pompage liquide et aéré.

Sans obstruction à l'aération, la transition entre les régimes de pompage est très évidente et courte à 6'' du fond de la cuve et est plus subtile, mais plus longue à une hauteur de 2''. Ceci pourrait être dû au fait qu'il est plus difficile d'amener de l'air en fond de cuve en raison de sa masse volumique par rapport à celle de l'eau. Par contre, lorsque la turbine est placée près du fond de la cuve, la transition semble débuter à de plus faibles vitesses. Après la transition, les courbes de couple pour les deux hauteurs d'agitateurs suivent à peu près la même tendance.

Même s'il est impossible de conclure sur l'atteinte d'un seuil d'aération en cas de présence d'obstruction à l'aération avec ces courbes, les observations visuelles permettent d'affirmer que

le seuil est bel et bien atteint. Cependant, la transition entre les régimes de pompage est très graduelle et il n'est pas clair si la transition est terminée sur ces courbes et donc si le régime de pompage aéré est complètement atteint.

La diminution retrouvée dans les données de couple pour l'agitateur à 6'' du fond sans obstruction serait due au fait qu'une très grande quantité d'air serait pompée à partir de 700 RPM. Il s'agit du seuil d'aération de l'agitateur. À cette vitesse, l'agitateur commence à pomper de l'air de manière importante et le régime d'opération liquide observé à de plus faibles vitesses devient un régime aéré qui se poursuit avec l'augmentation de la vitesse. Le même principe est observable pour l'agitateur en fond de cuve sans obstruction au pompage d'air. Lorsque de grandes quantités d'air sont pompées dans l'eau, l'agitateur perd de l'efficacité de pompage de fluide et finit par reprendre le dessus dans les mêmes ordres de vitesses que lorsque l'agitateur est placé à 6'' du fond de la cuve.

L'effet de la présence plus ou moins grande d'air dans la cuve est particulièrement visible dans le cas des données de pression. Les Figures 4.21 à 4.26 présentent les données de pression pour deux systèmes identiques avec l'agitateur de type Dispersimax à la différence que dans un cas, le pompage d'air est obstrué et que dans l'autre, il ne l'est pas.

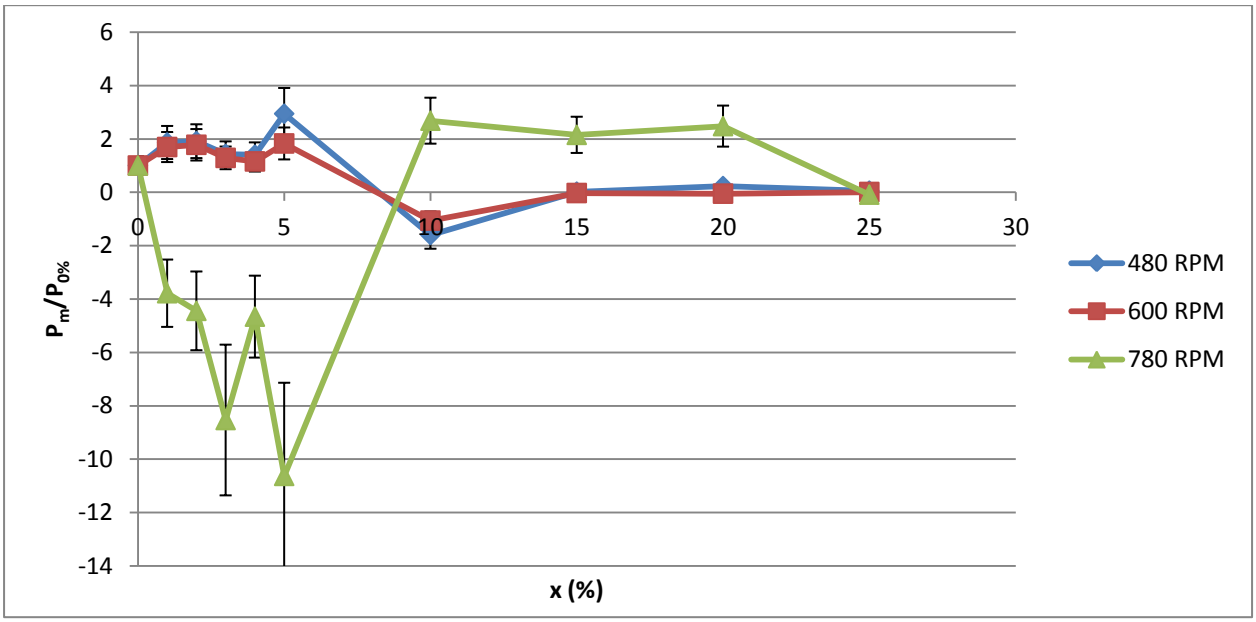


Figure 4. 21 : Données de pression en fonction de la charge de particules normalisées selon l'état à 0% de solides dans le cas de l'agitateur de type Dispersimax positionné à 6'' du fond de la cuve **sans obstruction** au pompage d'air (**Plan 1**)

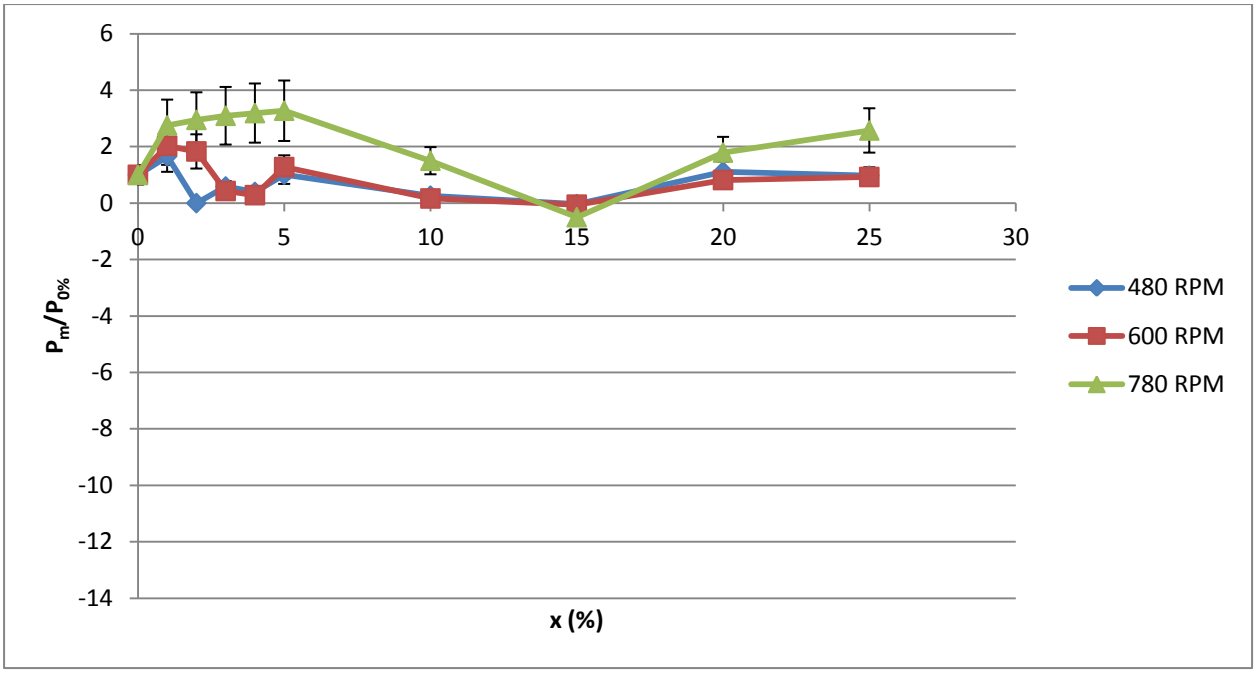


Figure 4. 22 : Données de pression en fonction de la charge de particules normalisées selon l'état à 0% de solides dans le cas de l'agitateur de type Dispersimax positionné à 6'' du fond de la cuve **sans obstruction** au pompage d'air (**Plan 2**)

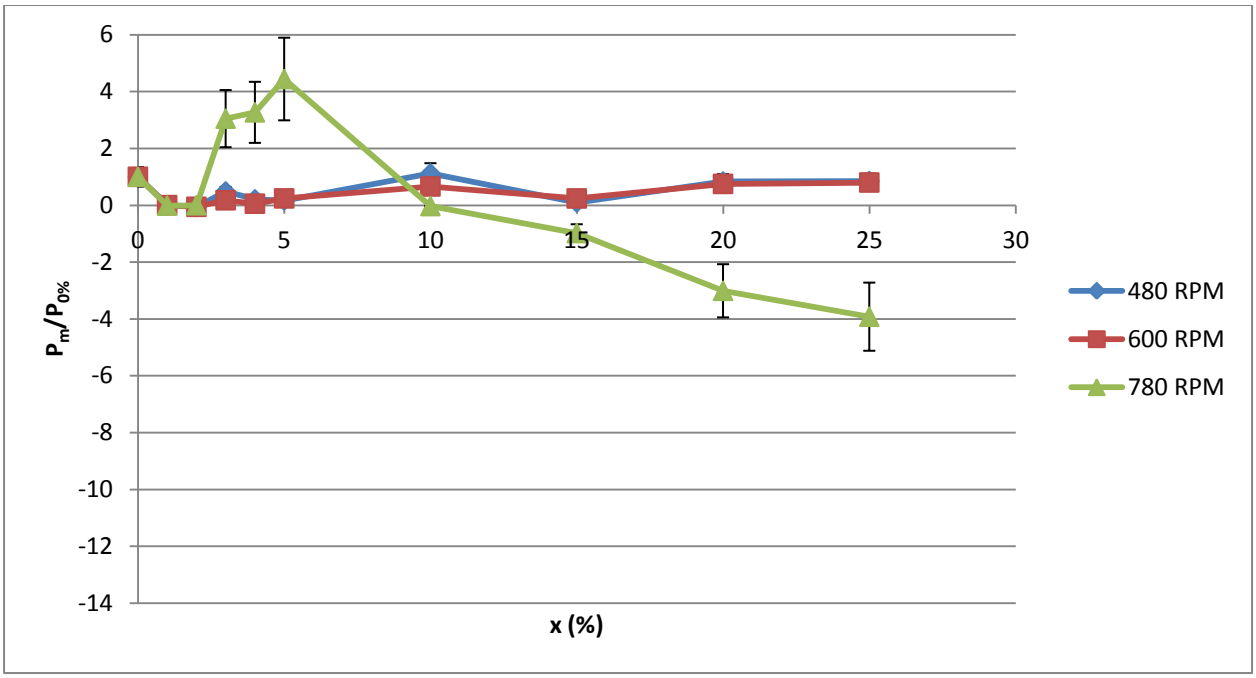


Figure 4. 23 : Données de pression en fonction de la charge de particules normalisées selon l'état à 0% de solides dans le cas de l'agitateur de type Dispersimax positionné à 6'' du fond de la cuve **sans obstruction** au pompage d'air (**Plan 3**)

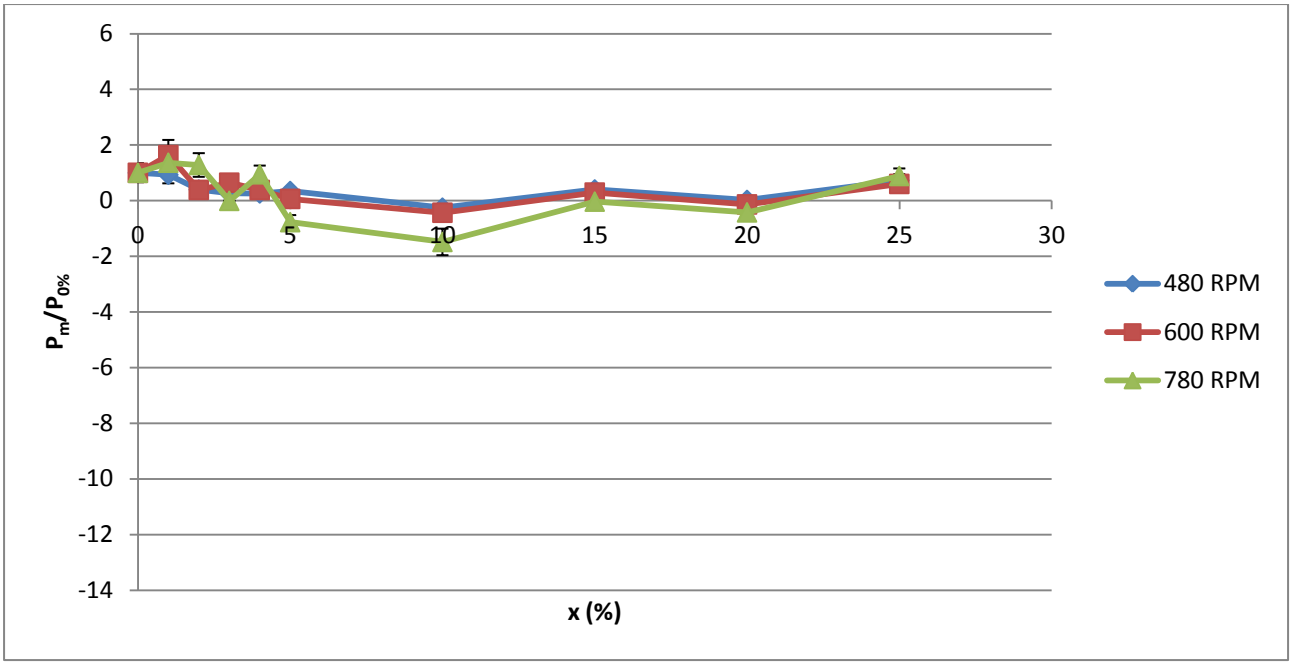


Figure 4. 24 : Données de pression en fonction de la charge de particules normalisées selon l'état à 0% de solides dans le cas de l'agitateur de type Dispersimax positionné à 6'' du fond de la cuve **avec obstruction** au pompage d'air (**Plan 1**)

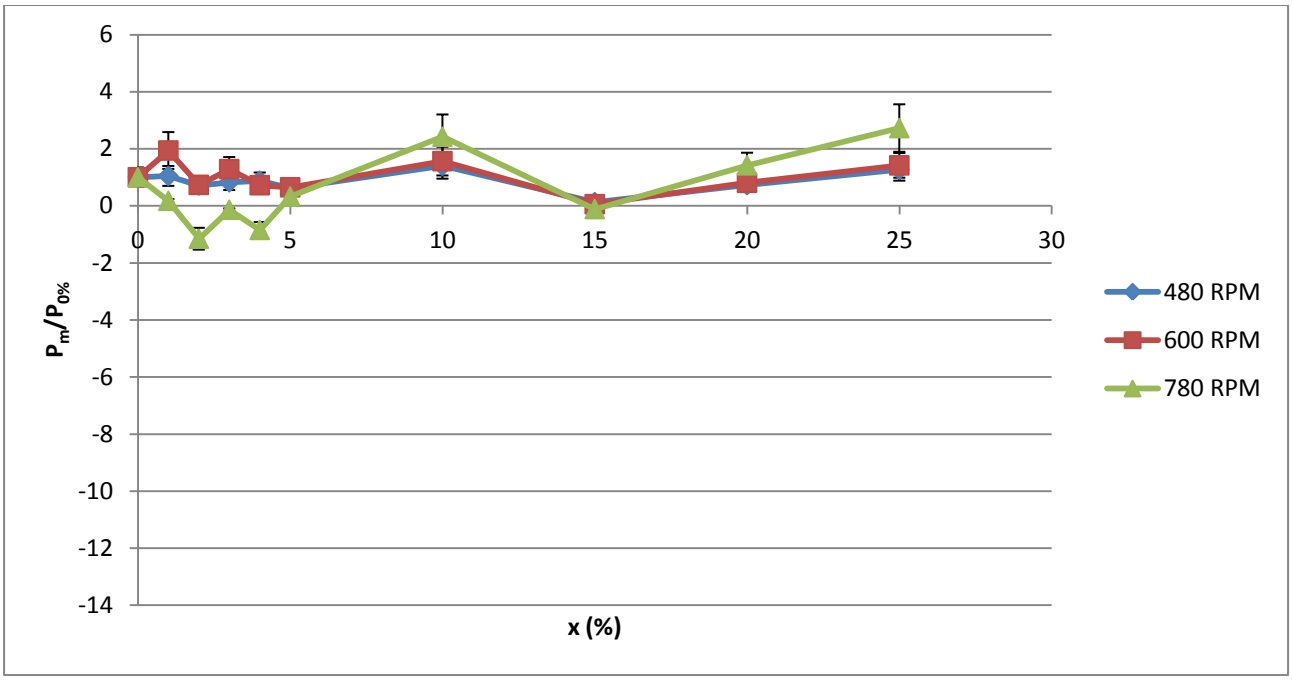


Figure 4. 25 : Données de pression en fonction de la charge de particules normalisées selon l'état à 0% de solides dans le cas de l'agitateur de type Dispersimax positionné à 6'' du fond de la cuve **avec obstruction** au pompage d'air (**Plan 2**)

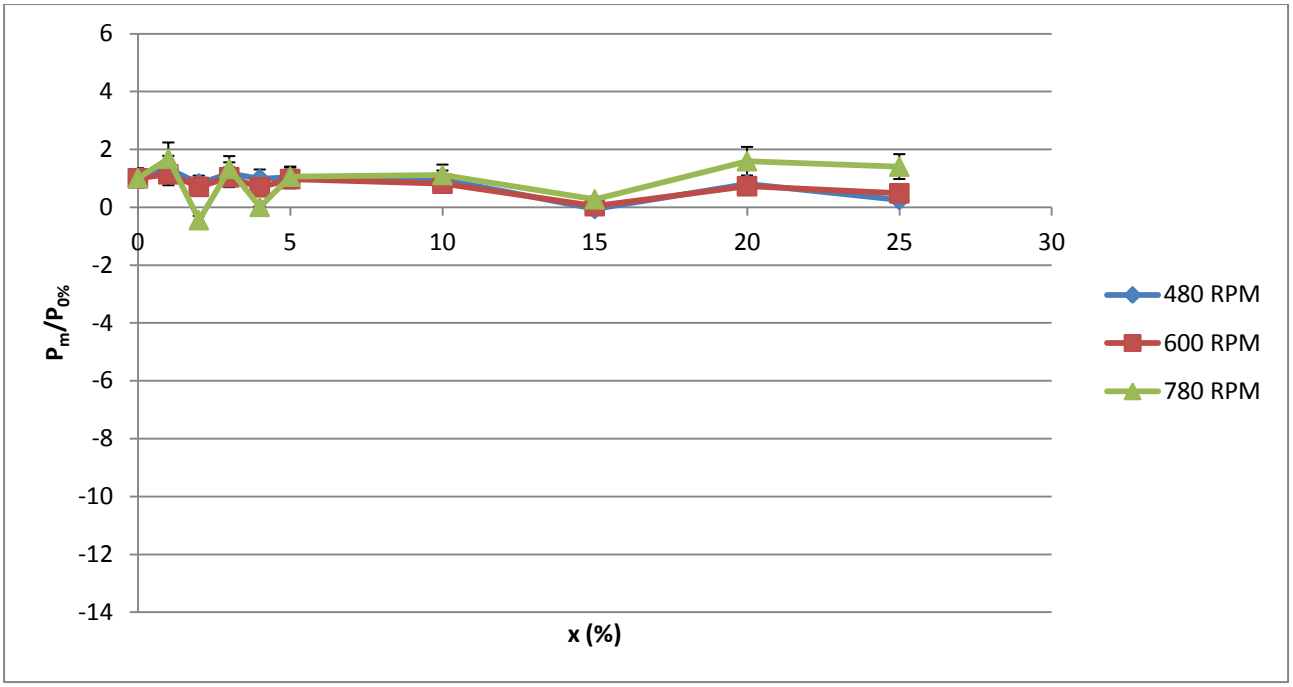


Figure 4. 26 : Données de pression en fonction de la charge de particules normalisées selon l'état à 0% de solides dans le cas de l'agitateur de type Dispersimax positionné à 6'' du fond de la cuve **avec obstruction** au pompage d'air (**Plan 3**)

Les Figures 4.21 à 4.26 illustrent, du point de vue des données de pression, quel impact l'obstruction à l'aération peut avoir, principalement à haute vitesse. En effet, la vitesse de 780 RPM est l'état qui engendre le plus de différences entre les deux systèmes d'agitation comme en fait foi la Figure 4.20 et c'est précisément à cette vitesse de rotation que les données de pression sont les plus dissemblables.

Par ailleurs, lorsque l'agitateur de type Dispersimax positionnée à 6'' du fond de la cuve est employé à 780 RPM, les Figures 4.21, 4.22 et 4.23 montrent que sans obstruction à l'aération, le mobile entraîne beaucoup plus d'air qu'en présence d'obstruction à l'aération. Or, en concentration croissante de particules, notamment à partir de 10% massique de solides, leur comportement tend à se rapprocher et est essentiellement le même du point de vue du couple à partir de 15% de particules solides. Aux autres vitesses, les comportements avec et sans obstruction à l'aération sont sensiblement les mêmes ce qui est extrêmement cohérent avec le graphique de la Figure 4.20 présentée précédemment. Ceci impliquerait qu'en présence accrue de

particules, l'agitateur n'arrive pas à tirer autant d'air dans le liquide alors que rien ne semble engendrer ce comportement. Le graphique de couple en fonction de la vitesse pour ces différents cas est présenté à l'annexe A.

En termes d'entraînement de solides, le mobile de mélange de type Dispersimax avec obstruction à l'aération semble un peu meilleure que le même système de mélange dont le pompage d'air n'est pas obstrué. Les Figures 4.27 et 4.28 suivantes présentent la limite de capacité d'entraînement total des particules pour les deux cas.

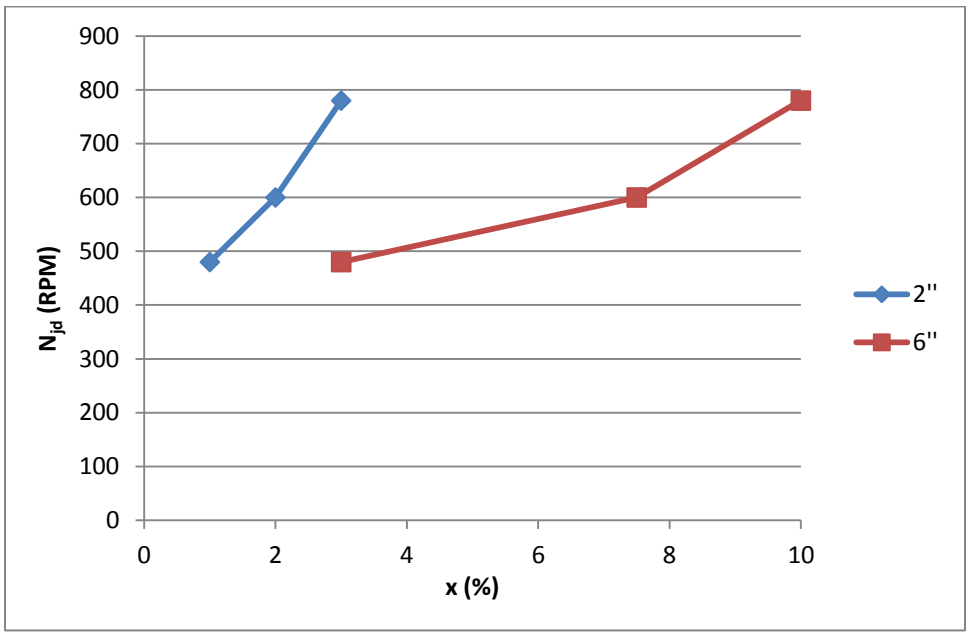


Figure 4. 27 : Graphique présentant N_{jd} en fonction de la charge de particules pour la turbine Dispersimax **avec obstruction** au pompage d'air à toutes les hauteurs étudiées

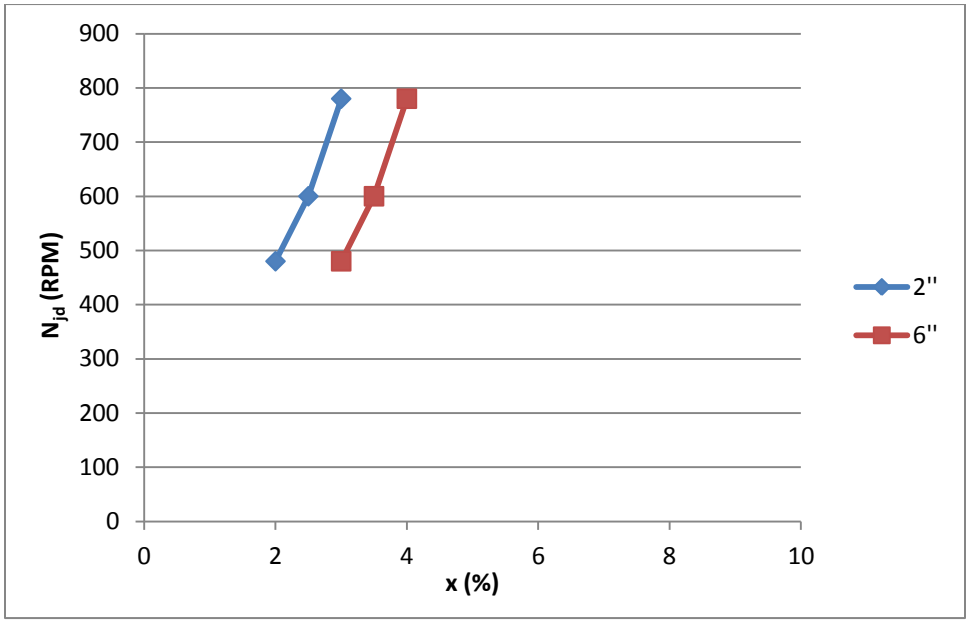


Figure 4. 28 : Graphique présentant N_{jd} en fonction de la charge de particules pour la turbine Dispersimax **sans obstruction** au pompage d'air à toutes les hauteurs étudiées

Aux Figures 4.27 et 4.28 précédentes, la turbine de type Dispersimax semble être plus efficace en termes d'entraînement de solides flottants lorsque sa capacité à pomper de l'air est réduite, particulièrement à une hauteur de 6'' du fond de la cuve. Il s'agit d'un résultat sensé puisque l'air entrant dans le système par le bas engendre un mouvement vers le haut par gradient de masse volumique et les particules, possédant une densité inférieure à celle de l'eau, seront poussées vers la surface libre. De plus, étant hydrophobes, les particules ont également plus d'affinité avec l'air, ce qui les rend d'autant plus susceptible de suivre le mouvement des bulles d'air et donc d'aller vers la surface.

En ce qui concerne le temps de mélange, les deux Figures 4.29 et 4.30 présentent la comparaison entre l'opération de la turbine Dispersimax avec et sans obstruction au pompage d'air.

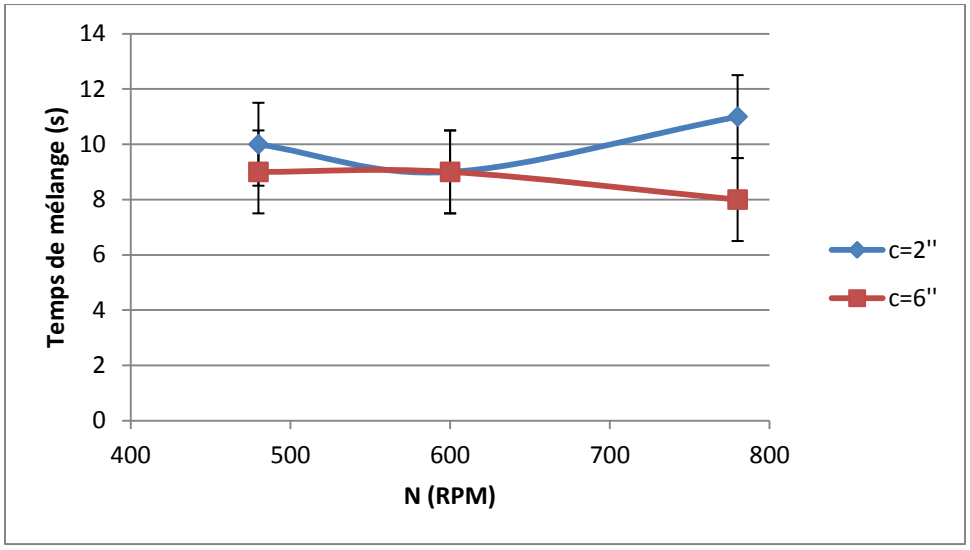


Figure 4. 29 : Temps de mélange de la turbine de type Dispersimax **sans obstruction** à l'aération en fonction de la vitesse de rotation avec 15 %wt de particules à toutes les hauteurs étudiées

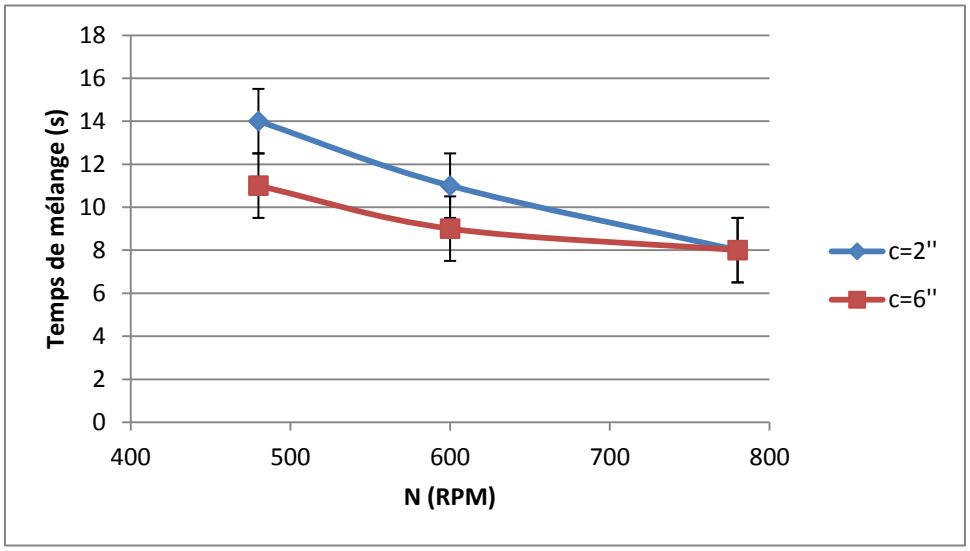


Figure 4. 30 : Temps de mélange de la turbine de type Dispersimax **avec obstruction** à l'aération en fonction de la vitesse de rotation avec 15 %wt de particules à toutes les hauteurs étudiées

Avec ces dernières Figures 4.29 et 4.30, il est impossible de définir si la présence ou l'absence d'obstruction au pompage d'air a un impact sur le temps de mélange puisque les différences ne sont pas significatives par rapport à la résolution de 1,5 secondes de la ERT lorsque l'agitateur est placé à 6'' du fond de la cuve. Lorsque celui-ci est plus profond, la présence d'obstruction à

l'aération à basse vitesse d'agitation semble avoir pour effet de ralentir le mélange. En effet, la présence d'air à 480 RPM semble avoir un effet positif sur la rapidité du mélange.

4.6 Effet de la hauteur de l'agitateur

Le changement de hauteur d'un agitateur a eu un effet important sur les données de pression collectées en raison de sa position relative aux capteurs. Les différences de hauteur d'agitateurs devraient aussi se ressentir sur le couple. Plus l'agitateur est haut, plus les mouvements latéraux sont susceptibles d'être importants, ce qui peut avoir un impact indésirable sur la qualité des données de couple collectées.

Le phénomène de variation de couple attendu en fonction du changement de hauteur n'est cependant pas observé de manière claire dans le cas de l'agitateur PBT autant en mode de pompage vers le haut ou vers le bas. Dans le cas de l'agitateur de type Dispersimax sans obstruction au pompage d'air, le contraire est observé. En effet, en fond de cuve, soit à 2'' du fond, l'agitateur présente des données de couple plus faibles que dans le cas du même système de mélange à 6'' du fond. Ceci pourrait, en partie, être dû au fait qu'à 6'' du fond, l'agitateur a plus de facilité à pomper de l'air dans la boue, ce serait pourquoi la différence entre les deux systèmes se voit principalement à la plus grande vitesse utilisée, vitesse pour laquelle le pompage d'air est le plus aisé. Pour le même système de mélange avec obstruction au pompage d'air, le même phénomène est observé pour les mêmes raisons.

L'effet de la hauteur de l'agitateur sur les données de pression est important. En effet, la position relative des capteurs par rapport à l'agitateur influence la manière dont les capteurs ressentent l'effet de l'écoulement, principalement en raison du fait que selon la hauteur de l'agitateur, les capteurs ne se retrouvent pas au même endroit sur la boucle d'écoulement. Un capteur près de la zone de décharge de l'agitateur ne subira pas le même genre de signal qu'un autre capteur situé plus loin de l'agitateur.

L'observation visuelle permet toutefois d'apprécier certains effets des changements de hauteur des agitateurs. Par exemple, la PBT opérée en pompage vers le bas permet d'entraîner beaucoup plus d'instabilité lorsque placée à 4'' du fond par rapport à lorsqu'elle est placée à 6'' ou 8'' et le même type de relation existe entre la position à 6'' par rapport à 8''. Ainsi, lorsque placée plus bas dans la cuve, la PBT opérée en pompage vers le bas brise plus aisément la surface libre et a

donc un potentiel plus grand d'entraînement de particules et d'air. Le contraire est observé lorsque celle-ci est utilisée en pompage vers le haut (voir Figures 4.16 et 4.17).

En ce qui a trait à la turbine Dispersimax, le bris de la surface libre n'est pas aussi important en termes d'aération en raison de sa capacité de pompage d'air, même si c'est un bon indicateur de sa capacité à entraîner des solides flottants. La surface libre est plus instable lorsque l'agitateur de type Dispersimax est positionnée à 6'' du fond de la cuve par rapport à lorsqu'il est placée à 2'' du fond et l'entraînement de particules flottantes en est plus aisée (voir Figures 4.27 et 4.28). Par ailleurs, en raison de l'air pompé par cet agitateur et de l'hydrophobicité des particules, une mousse se forme à la surface libre. Or, lorsque placé à 6'', l'agitateur arrive à détruire cette mousse avec une efficacité qui n'est pas retrouvée lorsqu'il est placé en fond de cuve. C'est donc dire qu'à cette position, l'agitateur ne peut générer assez de cisaillement pour la briser.

Pour ce qui est du temps de mélange, les Figures 4.18, 4.19, 4.29 et 4.30 précédentes résument la comparaison entre les résultats de temps de mélange pour un même système d'agitation positionné à différentes hauteurs.

Il est encore un fois impossible de discerner un effet significatif du changement de la hauteur d'un agitateur sur le temps de mélange en raison de la résolution du tomographe qui est de 1,5 secondes. Il semble toutefois y avoir une petite tendance à la baisse du temps de mélange lors que la PBT est positionnée à 6'' du fond, mais les variations entre les temps de mélange des agitateurs aux différentes hauteurs sont plus petites que la résolution de la ERT, ce qui rend ladite tendance plus qu'incertaine. Le même phénomène semble avoir lieu dans le cas de l'agitateur de type Dispersimax lorsque celui est également positionné à 6'' du fond de la cuve.

4.7 Effet de l'agitateur

En termes d'entraînement de solides flottants, il semble évident que la turbine de type Dispersimax est beaucoup moins désirables que la PBT ou le mélangeur Maxblend. Néanmoins, il n'est pas clair quel est le meilleur agitateur entre ces deux derniers. La Figure 4.31 présente la limite de capacité d'entraînement total des particules pour le meilleur scénario de chaque agitateur.

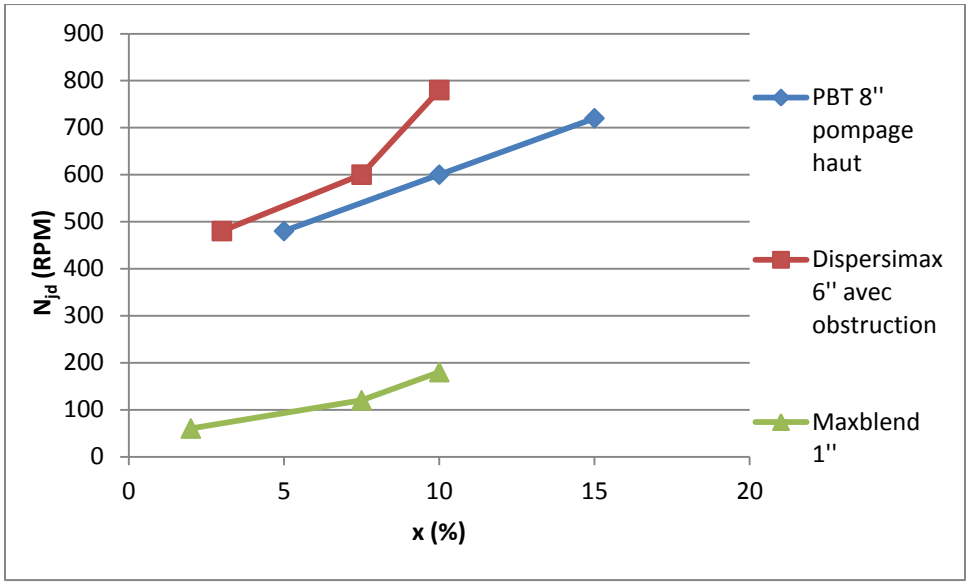


Figure 4. 31 : Graphique présentant N_{jd} en fonction de la charge de particules pour chaque système d'agitation dans ses conditions de tirage de solides flottants

Notez bien que N_{jd}, ici, est présenté selon la fraction massique de solides. Ainsi, chaque vitesse d'opération d'un mobile représente un N_{jd} à une fraction massique de solides précise, d'où les trois points sur chaque courbe des Figures 4.31 et 4.32. À une vitesse donnée, à la plus grande fraction massique de solides pour laquelle la vitesse est suffisamment grande pour entraîner la totalité des particules dans la phase liquide, on dira que cette vitesse est le N_{jd} de la fraction massique en question. Par exemple, dans la Figure 4.31, la courbe de la PBT indique qu'à 5% de particules, N_{jd} est de 480 RPM, c'est donc dire que cette vitesse est insuffisante pour entraîner toutes les particules à des fractions massiques de solides plus élevées. De manière analogue, une vitesse de 720 RPM permet d'entraîner la totalité des particules sous la surface libre jusqu'à une fraction massique de 15% de solides.

En stricts termes de vitesses, la PBT aurait ainsi le meilleur potentiel d'entraînement de particules, suivie de l'agitateur de type Maxblend et finalement de la turbine Dispersimax. Cependant, comme les agitateurs ne sont pas utilisés aux mêmes vitesses, il faut analyser en parallèle la puissance dissipée par chaque agitateur à ces vitesses afin d'établir si un agitateur est plus efficace qu'un autre. La Figure 4.32 présente la puissance dissipée par chaque agitateur pour tourner à N_{jd} en fonction de la fraction massique de particules.

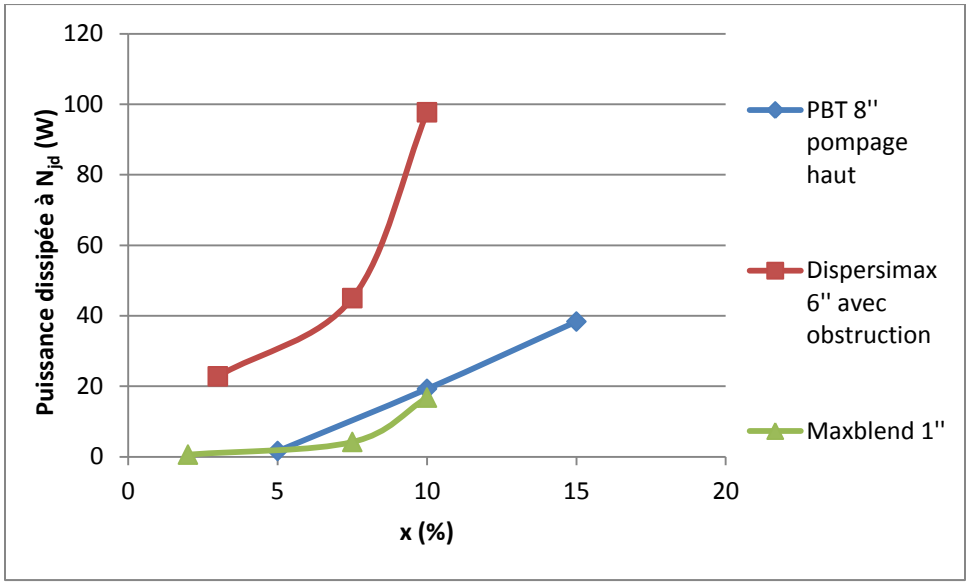


Figure 4. 32 : Graphique présentant la puissance dissipée par chaque agitateur dans ses conditions optimales de tirage de particules flottantes qui tourne à N_{jd} en fonction de la fraction massique de particules

Selon la Figure 4.32 précédente, il est évident que la turbine de type Dispersimax n'est pas efficace pour l'entraînement de solides flottants alors qu'elle est l'agitateur qui a le plus de difficulté à les entraîner et l'agitateur qui consomme le plus d'énergie pour ce faire. Selon les tendances entamées dans ce graphique, à basse fraction massique de solides, le mélangeur Maxblend est un peu plus efficace que la PBT, mais qu'à partir d'un certain point, le mobile de mélange de type Maxblend commence à consommer beaucoup de puissance alors que la tendance de la PBT est constante et donc, à de plus grandes fractions massiques, en termes stricts d'entraînement de solides, la PBT serait la plus efficace, mais sous les 10% de fraction massique, le mélangeur Maxblend serait le meilleur mobile de mélange.

Du point de vue de l'aération, l'observation a permis d'établir plusieurs constats. D'abord, la turbine de type Dispersimax est la plus efficace en raison de sa capacité à pomper de l'air par l'arbre de rotation. L'agitateur de type Maxblend est également efficace en aération lorsque celui-ci n'est pas submergé puisqu'il arrive à briser presqu'entièrement la surface libre, mais une fois submergé lorsque le volume augmente en raison de la formation d'hydrates de gaz par exemple, il perd très rapidement son efficacité. Finalement, l'agitateur le moins efficace pour l'aération est la PBT. En effet, contrairement au mélangeur Maxblend, la PBT n'est jamais très efficace pour entraîner de l'air dans la cuve et perd aussi rapidement le peu d'efficacité qu'elle a lorsque le

volume augmente, ce qui est dû à la présence de contre-pales. Donc, en stricts termes d'aération, la turbine Dispersimax est la meilleure, suivie de l'agitateur de type Maxblend et de la PBT.

Pour ce qui est du temps de mélange, le Tableau 4.1 résume les résultats pour les mêmes systèmes d'agitation étudiés dans cette section.

Tableau 4. 1 : Temps de mélange pour les 3 systèmes d'agitation dans leur meilleure configuration pour l'inclusion de solide flottants

Système de mélange	**Vitesse de rotation (RPM)**	**Temps de mélange (s) (±1,5s)**
Maxblend (c=)1"	60	16
	120	8
	180	7
PBTU (c=8")	480	11
	600	11
	720	8
Dispersimax avec obstruction à l'aération (c=6")	480	11
	600	9
	780	8

Le Tableau 4.1 présente très peu de différences en termes de temps de mélange entre les différents systèmes de mélange analysés. En effet, la seule différence significative se trouve dans les résultats du mélangeur Maxblend à 60 RPM, vitesse à laquelle son contrôle est ardu. La qualité du résultat de temps de mélange en est assurément affectée. Pour le reste, les données de temps de mélange collectées sont très semblables et si jumelées aux puissances dissipées présentées à la Figure 4.32, les mêmes conclusions peuvent être émises que dans le cas de l'entraînement de solides.

CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'objectif de ce projet était de reproduire les conditions hydrodynamiques de la phase de croissance d'hydrates de gaz afin d'en caractériser la performance de trois mobiles d'agitation en différentes configurations selon 2 principaux critères. Premièrement, il fallait évaluer leur capacité de tirage de particules flottantes (draw-down) de masse volumique similaire à celle des hydrates de CO_2. Deuxièmement, il fallait évaluer leur capacité d'aération de la cuve. Le problème est entier puisque la présence de gaz dans la cuve est nécessaire à la génération d'hydrates de gaz, mais est également néfaste en raison de l'affinité du gaz avec les hydrates. De plus, le mouvement de l'air vers le haut de la cuve en raison de sa faible masse volumique entraîne les solides vers la surface libre, ce qui amoindrit la qualité du mélange. Le taux de réaction en est directement affecté, car les hydrates flottants ont dès lors très peu de surface de contact avec le milieu réactionnel. L'étude repose principalement sur des données de couple et de pression pariétale obtenues à différentes vitesses pour une plage de fractions massiques de particules allant de 0 à 25%, soit d'environ 0 à 29% volumique.

Les trois agitateurs qui ont été employés sont une turbine à 6 pales inclinées à 3 hauteurs différentes (en pompage vers le haut et vers le bas), un agitateur de type Dispersimax à 2 hauteurs différentes (avec et sans obstruction à l'aération) et un mobile de mélange Maxblend. Chaque agitateur était employé à 3 vitesses de rotation différentes.

Les données de couple ont d'abord été analysées et celles-ci tendent à montrer qu'en fonction de la fraction massique de particules, la performance des agitateurs ne change pas pour la plage de concentration de particules étudiées. Les données de pression ont par la suite été analysées et supportent les allégations avancées suite au traitement des résultats de couple en raison de faibles variations de pression qui pointent vers la conservation de l'hydrodynamique de l'état initial alors qu'aucune particule n'était présente dans la cuve. Les résultats de temps de mélange supportent également l'hypothèse selon laquelle les conditions hydrodynamiques ne changent pas au cours de l'exécution de la série d'expériences considérée par l'absence de variation significative du temps de mélange selon la fraction massique de particules solides.

Néanmoins, il a été possible de caractériser visuellement la capacité des différents agitateurs à tirer les particules solides dans l'eau et d'observer leur capacité de briser la surface libre pour potentiellement entraîner de l'air. Également, le phénomène de pompage d'air de l'agitateur de

type Dispersimax a pu être observé à l'aide d'une étude de couple. Finalement, il a été établi que pour conserver son efficacité de tirage de particules et d'aération, la grille du mobile d'agitation de type Maxblend doit en tout temps rester partiellement au dessus de la surface libre.

Plusieurs travaux futurs devraient être effectués en regard au présent projet. Par exemple, une étude similaire pourrait être menée avec une cuve à fond semi-elliptique puisqu'il est conçu pour être opéré avec une telle géométrie que celle-ci ressemblerait davantage à la cuve de réaction vouée à la génération d'hydrates de gaz. Également, l'étude pourrait être poussée à des concentrations de particules beaucoup plus grandes afin d'évaluer la performance des agitateurs lorsque les propriétés rhéologiques du milieu de mélange changent. De plus, la même étude, en totalité ou en partie, pourrait être reconduite dans la cuve de production d'hydrates avec un apport de CO_2 afin de mesurer le coefficient de transfert du CO_2 dans l'eau (k_La) de chaque agitateur selon la fraction massique de particules et donc leur capacité à aérer le système en présence de solides. Aussi, le même type d'étude pourrait être conduite en insérant la composante de production de chaleur afin d'évaluer les systèmes de mélange en regard à leur capacité de dissipation d'énergie thermique. Finalement, une étude de production d'hydrates de CO_2 pourrait être effectuée avec un système d'agitation complexe, soit avec deux agitateurs montés sur le même arbre afin d'exploiter leurs forces respectives puisqu'il est évident que chaque mobile d'agitation est individuellement inadapté pour la génération efficace d'hydrates de gaz par leur difficulté à entraîner du gaz dans le liquide, pour tirer les solides flottants ou encore une combinaison des deux. Il est par ailleurs possible d'ajouter un troisième agitateur au système mixte susmentionné. En effet, il pourrait y avoir un mobile radial en fond de cuve pour la dispersion gazeuse, un mobile axial opéré en pompage vers le haut près de la surface et enfin un mobile axial opéré en pompage vers le bas pour assurer une meilleure rétention d'air (Bao, Hao, Gao, Shi, & Smith, 2005).

CHAPITRE 6 BIBLIOGRAPHIE

Bakker, A., & Frijlink, J. J. (1989). The Drawdown and Dispersion of Floating Solids in Aerated and Unaerated Stirred Vessels. *Chemical Engineering Research and Design, 67*, 208-210.

Bao, Y., Hao, Z., Gao, Z., Shi, L., & Smith, J. M. (2005). Suspension of Buoyant Particles in a Three Phase Stirred Tank. *Chemical Engineering Science, 60*, 2283-2292.

Barthelmes, G., Pratsinis, S. E., & Buggisch, H. (2003). Particle Size Distributions and Viscosity of Suspensions Undergoing Shear-Induced Coagulation and Fragmentation. *Chemical Engineering Science, 58*, 2893-2902.

Belandria, V. (2012). *Hydrate Phase Equilibria Study of CO2 Containing Gases in Thermodynamic Promoter Aqueous Mixtures.* Fontainebleau: Mines ParisTech.

Bera, T. K. (2012, Octobre 29). *Electrical Impedance Tomography*. Récupéré sur Yonsei: http://web.yonsei.ac.kr/seoj/eit.htm

Bertrand, F. (2015). *Mécanique des fluides appliquée.* Montréal: École Polytechnique de Montréal.

Bhattacharya, S., Hebert, D., & Kresta, S. (2007). Air Entrainment in Baffled Stirred Tanks. *Chemical Engineering Research and Design, 85*(5), 654-664.

Cabaret, F. (2012). Chapter 9: Solid-liquid mixing. *GCH6112a: Conception des opérations industrielles d'agitation et de mélange*, 7. Montréal: École Polytechnique de Montréal.

Castellani, B., Morini, E., Filipponi, M., Nicolini, A., Palombo, M., Cotana, F., & Rossi, F. (2014). Clathrate Hydrates for Thermal Energy Storage in Buildings: Overview of Proper Hydrate-Forming Compounds. *Sustainability, 6*, 6815-6829.

Chapman, C. M., Nienow, A. W., Cooke, M., & Middleton, J. C. (1983). Particle-Gas-Liquid Mixing in Stirred Vessels Part III: Three Phase Mixing. *Chemical Engineering Research and Design, 61*(3), 167-181.

Chen, P.-C., Chen, C. C., Fun, M. H., Liao, O. Y., Jiang, J. J., Wang, Y. S., & Chen, C. S. (2004). Mixing and Crystallization Kinetics in Gas-Liquid Reactive Crystallization. *Chemical Engineering Technology, 27*(5), 519-528.

Daimaru, T., Fujii, M., Yamasaki, A., & Yanagisawa, Y. (2004). Energy Saving Potential for Natural Gas Hydrate Transportation. *Prepr. Pap.-Am. Chem. Soc., Div. Fuel Chem., 49*(1), 190.

Daniel-David, D., Broseta, D., Guerton, F., Torré, J.-P., & Dicharry, C. (2013). Hydrate Growth at the Interface between Water and CO2/CH4 Mixtures: Influence of Pressure, Temperature, Gas Composition and Water-Soluble Surfactants. *The 7th Trondheim CCS Conference*. Trondheim: Sintef Energi.

Dohi, N., Takahashi, T., Minekawa, K., & Kawase, Y. (2004). Power Consumption and Solids Suspension Performance of Large-Scale Impellers in Gas-Liquid-Solid Three-Phase Stirred Tank Reactors. *Chemical Engineering Journal, 97*(2-3), 103-114.

Douïeb, S. (2012). *Étude de l'influence de l'écoulement sur les cinétiques de cristallisation (germination et croissance) en solution. Applications à des substances pharmaceutiques (germination) et aux hydrates de dioxyde de carbone (croissance).* Montréal: École Polytechnique de Montréal-Université Libre de Bruxelles.

Douïeb, S., Fradette, L., Bertrand, F., & Haut, B. (2015). Impact of the Fluid Flow Conditions on the Formation Rate of CO2 Hydrates in a Semi-Batch Stirred Tank Reactor. *AIChE Journal*.

Douzet, J., Galfré, A., Brantuas, P., & Herri, J.-M. (2014). CO2 Capture by Using Hydrates: 3) Sizing the Gas/Liquid Transfer in Bubble Column. *The 8th International Conference on Gas Hydrates* (pp. 4-14). Pékin: HAL archives ouvertes.

Egenolf-Jonkmanns, B., Bruzzano, S., & Deerberg, G. (2011). Properties and Application of Additive Enhanced CO2 Hydrates. *7th International Conference on Gas Hydrates.* Edinburgh: ICGH.

Ersland, G., & Graue, A. (2010). Natural Gas Hydrates. Dans P. Polocnik, *Natural Gas* (pp. 147-162). Bergen: Intech.

Fradette, L., Thomé, G., Tanguy, P. A., & Takenaka, K. (2007). Power and Mixing Time Study Involving a Maxblend Impeller with Viscous Newtonian and Non-Newtonian Fluids. *Chemical Engineering Research and Design, 85*(11), 1514-1523.

Fusion Fluid Equipment, LLC. (2015). *Pitch Blade Turbine Impellers*. Récupéré sur Fusion Fluid Equipment: http://www.fusionfluid.com/FusionFluidEquipmentLLC/html/impellers_pbturbine.html

Gabitto, J. F., & Tsouris, C. (2010). Physical Properties of Gas Hydrates: A Review. *Journal of Thermodynamics, 2010*, 1-12.

Guntzburger, Y. (2012). *Une méthode expérimentale d'évaluation globale du pompage d'un agitateur*. Montréal: École Polytechnique de Montréal.

Guntzburger, Y., Fontaine, A., Fradette, L., & Bertrand, F. (2013). An experimental method to evaluate global pumping in a mixing system: application to the Maxblend™ for Newtonian and non-Newtonian fluids. *Chemical Engineering Journal, 214*, 394-406.

Hameur, H., Bouzit, M., & Helmaoui, M. (2012). Hydrodynamic Study Involving a Maxblend Impeller with Yield Stress Fluids. *Journal of Mechanical Science and Technology, 26*(5), 1523-1530.

Hashem, M. (2012). *Study on the Homogenization Speed in a Tank Equipped with Maxblend Impeller*. Montréal: École Polytechnique de Montréal.

Heriot Watt Institute of Petroleum Engineering. (2015). *Why are Gas Hydrates Important?* Récupéré sur Centre for Gas Hydrates Research: http://www.pet.hw.ac.uk/research/hydrate/hydrates_why.cfm

Hidalgo-Millan, A., Zenit, R., Palacios, C., Yatomi, R., Horiguchi, H., Tanguy, P. A., & Ascanio, G. (2012). On the Hydrodynamics Characterization of the Straight Maxblend impeller with Newtonian Fluids. *Chemical Engineering Research and Design, 90*(9), 1117-1128.

Hofinger, J. (2012). *Micro- and Macromixing Studies in Two- and Three-Phase (Gas-Solid-Liquid) Stirred Chemical Reactors*. Birmingham: University of Birmingham Research Archives.

Holden, P. J., Wang, M., Mann, R., Dickin, F. J., & Edwards, R. B. (1998). Imaging Stirred-Vessel Macromixing Using Electrical Resistance Tomography. *AIChE Journal, 44*(4), 780-790.

Hong Duc, N., Chauvy, F., & Herri, J.-M. (2007). CO2 Capture by Hydrate Crystallization - A Potential Solution for Gas Emission of Steelmaking Industry. *Energy Conversion and Management, 48*(4), 1313-1322.

IEA Greenhouse Gas R&D Programme. (2004). *Gas Hydrates for Deep Ocean Storage of CO2.* Paris: Aker Kvaerner.

International Energy Agency-IEA. (2013). *Technology Roadmap-Carbon Capture and Storage.* Paris: IEA.

Iranshari, A., Devals, C., Heniche, M., Fradette, L., Tanguy, P. A., & Takenaka, K. (2007). Hydrodynamics Characterization of the Maxblend Impeller. *Chemical Engineering Science, 62*(14), 3641-3653.

Jafari, R. (2010). *Solid Suspension and Gas Dispersion in Mechanically Agitated Vessels.* Montréal: École Polytechnique de Montréal.

Jun, G., & Marsh, K. N. (2003). Calorimetric Determination of Enthalpy or Formation of Natural Gas Hydrates. *Chinese Journal of Chemical Engineering, 11*(3), 276-279.

Kasat, G. R., & Pandit, A. B. (2005). Review on Mixing Characteristics in Solid-Liquid Solid-Liquid-Gas Reactor Vessels. *The Canadian Journal of Chemical Engineering, 83*(4), 618-643.

Kashchiev, D., & Firoozabadi, A. (2002). Nucleation of Gas Hydrates. *Journal of Crystal Growth, 243*, 476-489.

Khazam, O., & Kresta, S. M. (2008). Mechanisms of Solids Drawdown in Stirred Tanks. *The Canadian Journal of Chemical Engineering, 86*(4), 622-634.

Khazam, O., & Kresta, S. M. (2009). A novel Geometry for Solids Drawdown in Stirred Tanks. *Chemical Engineering Research and Design, 87*(3), 280-290.

Lee, Q. F. (2004). *Electrical Reistance Tomography.* Récupéré sur Chmltech: www.chmltech.com/ert/ert.pps

Lin, W., Dalmazzone, D., Fürst, W., Delahaye, A., & Fournaison, L. (2011). Thermodynamic Studies of CO2-TBAB-Water System. *7th International Conference on Gas Hydrates.* Edinburgh: ICGH.

Lirio, C. F., & Pessoa, F. L. (2013). Enthalpy of Dissociation of Simple and Mixed Carbon Dioxide Clathrate Hydrate. *Chemical Engineering Transactions, 32*, 577-582.

Liu, N., Gong, G., Liu, D., & Xie, Y. (2008). Effects of Additives on Carbon Dioxide Hydrate Formation. *6th Internation Conference on Gas Hydrates.* Vancouver: ICGH.

Manas-Zloczower, I. (1997). Analysis of Mixing in Polymer Processing Equipment. *Rheology Bulletin, 66*(1).

Micale, G., Carrara, V., Grisafi, F., & Brucato, A. (2000). Solids Suspension in Three-Phase Stirred Tanks. *Chemical Engineering Research and Design, 78*(3), 319-326.

Micale, G., Grisafi, F., & Brucato, A. (2002). Assessment of Particle Suspension Conditions in Stirred Vessels by Means of Pressure Gauge Technique. *Chemical Engineering Research and Design, 80*(8), 893-902.

Mixel agitators. (2015). *Agitation propellers and impellers*. Récupéré sur Mixel Agitators - The Art of Mixing: http://www.mixel.fr/en/expertise/les-mobiles-dagitation2/

Moucha, T., Linek, V., & Prokova, E. (2003). Gas Hold-Up, Mixing Time and Gas-Liquid Volumetric Mass Transfer Coefficient of Various Multiple-Impeller Configurations: Rushton Turbine, Pitched Blade and Techmix Impeller and their Combinations. *Chemical Engineering Science, 58*(9), 1839-1846.

Murthy, B. N., Ghadge, R. S., & Joshi, J. B. (2007). CFD Simulations of Gas-Liquid-Solid Stirred Reactor: Prediction of Critical Impeller Speed for Solid Suspension. *Chemical Engineering Science, 62*(24), 7184-7195.

Murthy, B. N., Kasundra, R. B., & Joshi, J. B. (2008). Hollow Self-Inducing Impellers for Gas-Liquid-Solid Dispersion: Experimental and Computational Study. *Chemical Engineering Journal, 141*(1-3), 332-345.

National Research Council. (2004). *Charting the Future of Methane Hydrate Research in the United States.* Washington, DC: The National Academies Press.

Özcan-Taskin, G. (2006). Effect of Scale on the Draw Down of Floating Solids. *Chemical Engineering Science, 61*(9), 2871-2879.

Özcan-Taskin, G., & McGrath, G. (2001). Draw Down of Light Particles in Stirred Tanks. *Institution of Chemical Engineers, 79*(7), 789-794.

Özcan-Taskin, G., & Wei, H. (2003). The Effect of Impeller-to-Tank Diameter Ratio on Draw Down of Solids. *Chemical Engineering Science, 58*(10), 2011-2022.

Pakzad, L. (2007). *Using Electrical Resistance Tomography (ERT) and Computational Fluid Dynamics (CFD) to Study the Mixing of Pseudoplastic Fluids with a Scaba 6SRGT Impeller.* Toronto: Ryerson University.

Pandit, A. K. (2013). *Drawdown of Floating Solids in Liquid by Means of Mechanical Agitation: Effect of System Geometry.* Dayton: University of Dayton.

Paul, E. L., Atiemo-Obeng, V. A., & Kresta, S. M. (2004). *Handbook of Industrial Mixing.* Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.

Poletto, M., & Joseph, D. D. (1995). The Effective Density and Viscosity of a Suspension. *Journal of Rheology, 39*(2), 323-343.

Post Mixing Optimization and Solutions, LLC. (2013, Février). *Impellers*. Récupéré sur Post Mixing Optimization and Solutions: http://www.postmixing.com/mixing%20forum/impellers/impellers.htm

Rajnauth, J., Barrufet, M., & Falcone, G. (2013). Potential Industry Applications Using Gas Hydrate Technology. *The West Indian Journal of Engineering, 35*(2), 15-21.

Rasouli, M., Bertrand, F., & Chaouki, J. (2014). A multiple radioactive particle tracking technique to investigate particulate flows. *AIChE Journal, 61*(2), 384-394.

Ricaurte, M., Torré, J.-P., Broseta, D., Diaz, J., & Dicharry, C. (2011). CO2 Removal from a CO2-CH4 Gas Mixture by Hydrate Formation: Evaluation of Additives and Operating Conditions. *7th International Conference on Gas Hydrates.* Edinburgh: ICGH.

Saghatoleslami, N., & Bakhtiari, H. R. (2006). Experimental Investigation of Power Consumption, Mass Transfer Coefficient and Flow Regime in Gas-Liquid Dispersion Systems. *Iranian Journal of Chemical Engineering, 3*(2), 3-12.

Sardeing, R., Ferrand, F., Poux, M., Avrillier, P., & Xuereb, C. (2003). Hydrodynamics and Gas Dispersion Characterization in a System Equipped with a New Gas-Inducing Impeller. *Engineering in Life Sciences, 3*(1), 31-37.

Scondo, A., & Sinquin, A. (2011). Effect of Additives on CO2 Capture from Simulated Flue Gas by Hydrates Formation in Emulsion. *7th Internation Conference on Gas Hydrates.* Edinburgh: ICGH.

Selima, Y. S., Fangary, Y. S., & Mahmoud, N. A. (2008). Determination of Minimum Speed Required for Solids Suspensions in Stirred Vessels Using Pressure Measurements. *The Canadian Journal of Chemical Engineering, 86*(4), 661-666.

Shandong OUMI Machinery Manufacturing Co.,Ltd. (2015). *SLD Double Helical Ribbon Impeller*. Récupéré sur Oumi Machinery For a better mixing: http://www.oumiagitator.com/Powder-mixing_Impeller/Powder_mixing_Impeller_1.html

Sloan, E. D. (2004). Introductory Overview: Hydrate Knowledge Development. *American Mineralogist, 89,* 1155-1161.

SPX Corporation. (2015). *3.4" A310 Impeller with 5/16" bore 316 SS*. Récupéré sur Lightnin: http://store.lightninmixers.com/catalog/parts/a310-impeller/34-a310-impeller-516-bore-316-ss

Subramanian, N. H., Manigandan, P., Jeevan, R. G., & Radhakrishnan, G. (2009). Ion Chromatographic Determination of Residual Phase Transfer Catalyst in Active Pharmaceutical Ingredient. *Journal of Chromatographic Science, 47*, 540-544.

Tagawa, A., Dohi, N., & Kawase, Y. (2006). Dispersion of Floating Particles in Aerated Stirred Reactors: Minimum Impeller Speeds for Off-Surface and Ultimately Homogeneous Solid Suspension and Solids Concentration Profiles. *Industrial & Engineering Chemistry Research, 45*(2), 818-829.

Tohidi, B., Danesh, A., & Todd, A. C. (1997). On the Mechanism of Gas Hydrate Formation in Subsea Sediments. *American Chemical Society, Division of Fuel Chemistry, 42*(2), 485-487.

Tsz-Chung Mak, A. (1992). *Solid-Liquid Mixing in Mechanically Agitated Vessels.* Londres: University of London.

University of Michigan. (2008). *Impeller Types*. Récupéré sur Mixing in Chemical Reactors: http://www.umich.edu/~elements/01chap/html/reactors/mixing/impeller.htm

Wang, F., Marashdeh, Q., Fan, L.-S., & Warsito, W. (2010). *Electrical Capacitance Volume Tomography: Design and Applications.* Récupéré sur Sensors: http://www.mdpi.com/1424-8220/10/3/1890

Wang, M., Dorward, A., Vlaev, D., & Mann, R. (1999). Measurements of Gas-Liquid Mixing in a Stirred Vessel Using Electrical Resistance Tomography (ERT). *1st World Congress on Industrial Process Tomography* (pp. 78-83). Buxton: UMIST.

Xu, S.-A., Feng, L.-F., Gu, X.-P., Wang, K., & Hu, G.-H. (2000). Gas-Liquid Floating Particle Mixing in an Agitated Vessel. *Chemical Engineering Technology, 23*(2), 103-113.

ANNEXE A – ARRÊT D'AÉRATION DE LA TURBINE DISPERSIMAX

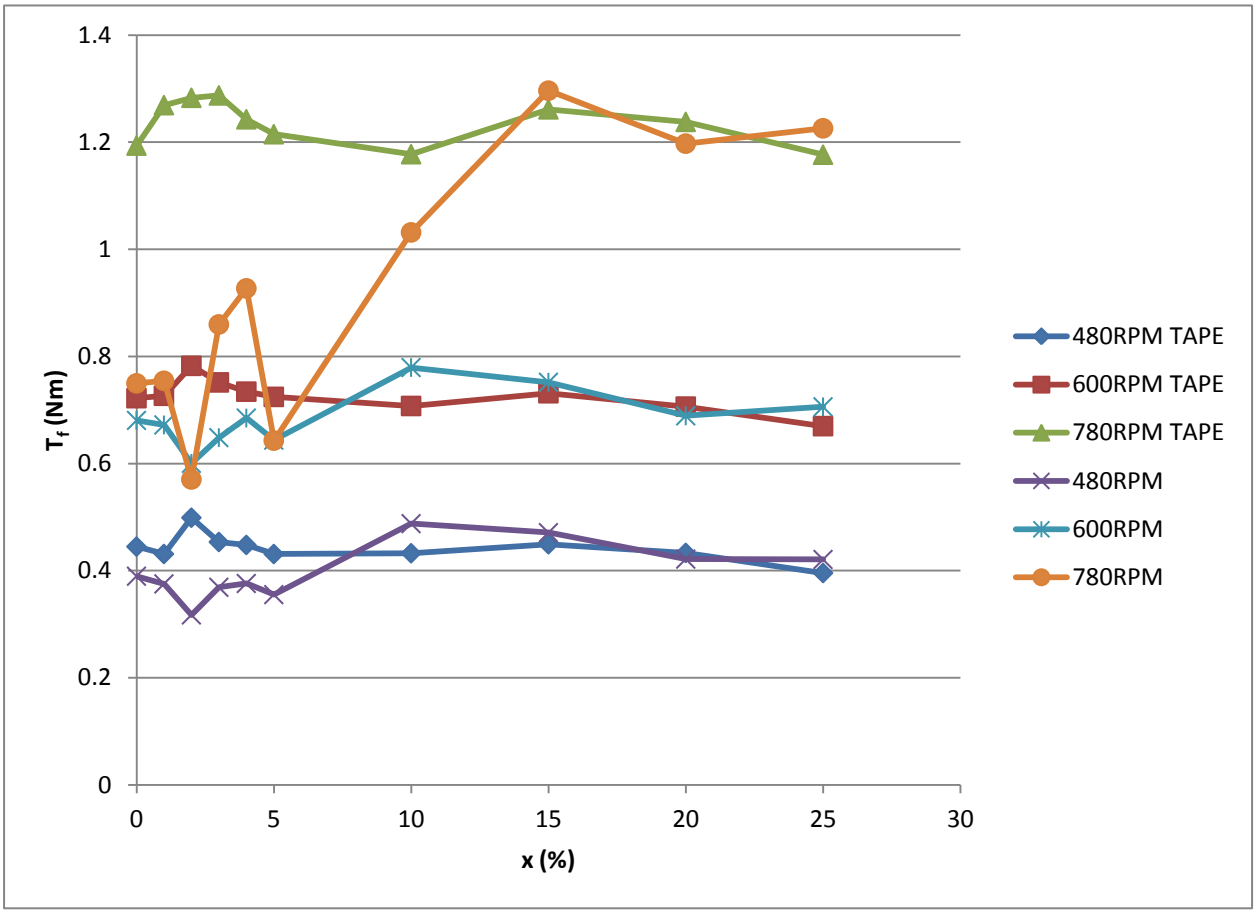


Figure A. 1 : Signal de couple moyen de l'agitateur de type Dispersimax positionné à 6'' du fond de la cuve en fonction de la fraction massique de solides pour chaque vitesse de rotation utilisée dans les expériences et pour les cas de présence et d'absence d'obstruction à l'aération

Il est clairement évident qu'à plus basses vitesses (480 et 600 RPM), les signaux de couple pour le mobile de mélange Dispersimax avec et sans obstruction au pompage d'air sont très similaires. À 780 RPM, pour des fractions massiques de solides inférieures à 10%, le couple du système de mélange sans obstruction à l'aération est significativement plus faible que le même système en présence d'obstruction à l'aération. À partir de 15%, le signal de pression de la turbine Dispersimax sans obstruction au pompage d'air rejoint celui du même système de mélange avec la présence d'une obstruction à l'aération.

ANNEXE B – COURBES DE PUISSANCE

B.1 Courbes de puissance théoriques

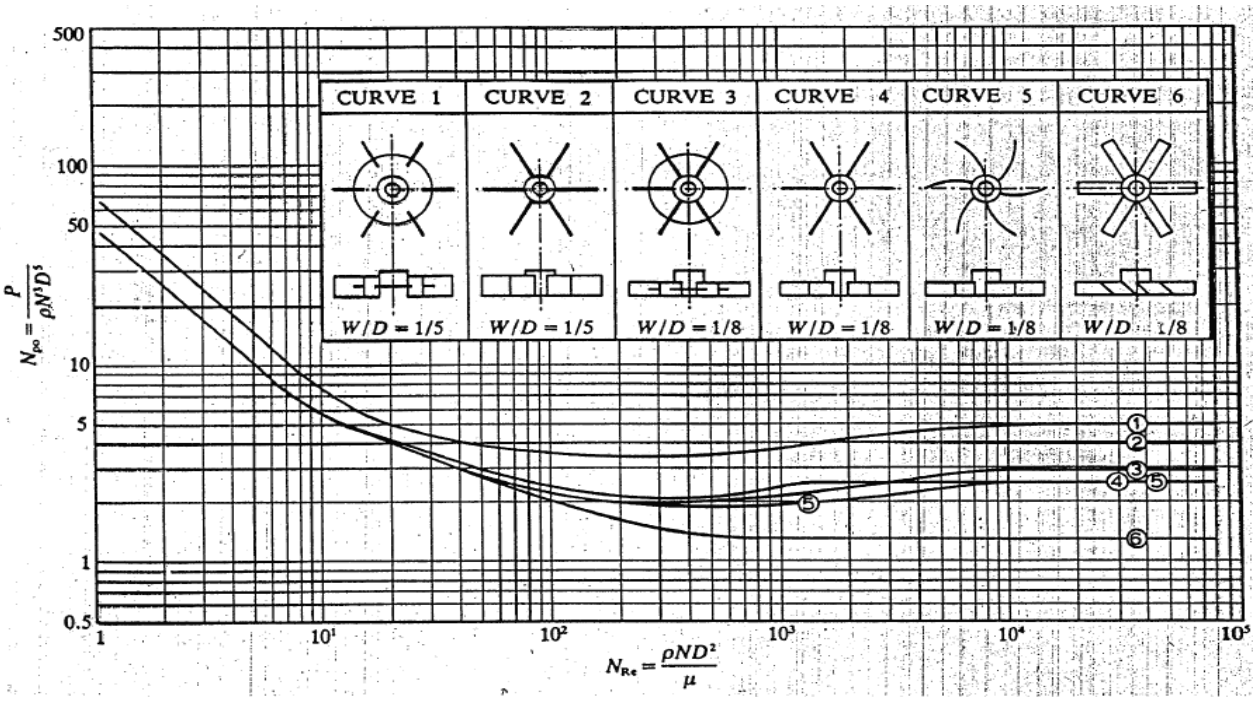


Figure B. 1 : Courbes de puissance de turbines typiques (Bertrand, 2015)

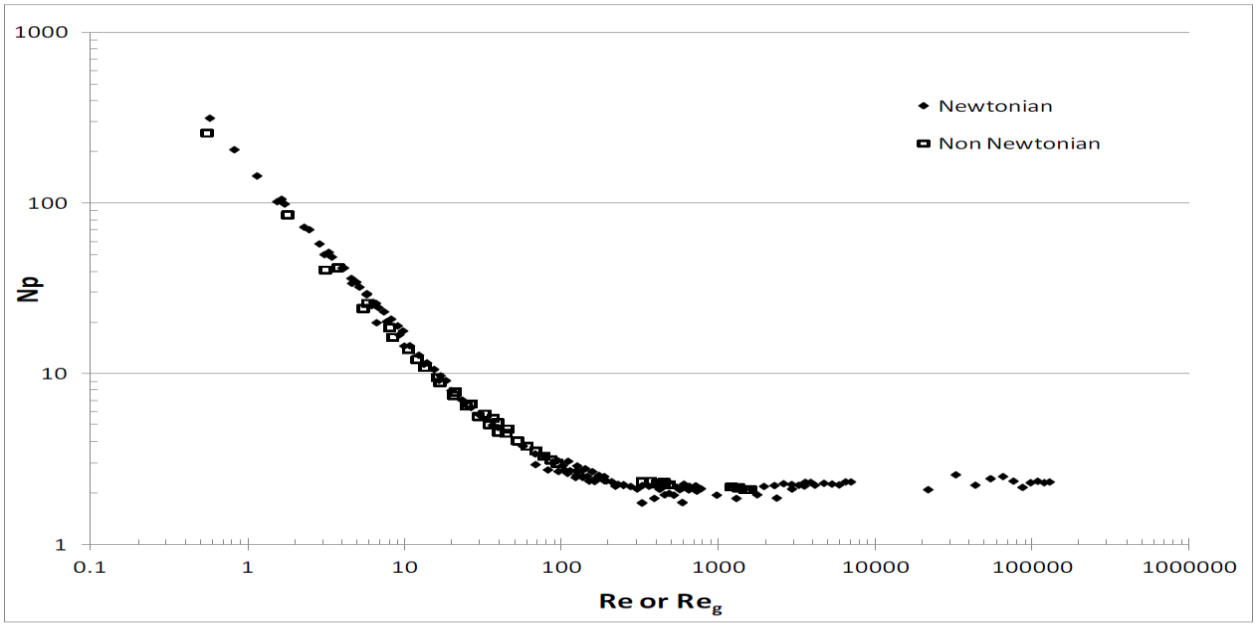


Figure B. 2 : Courbe de puissance du mélangeur Maxblend dans les cas de fluides newtoniens et non-newtoniens (Guntzburger, Fontaine, Fradette, & Bertrand, 2013)

B.2 Dispersimax

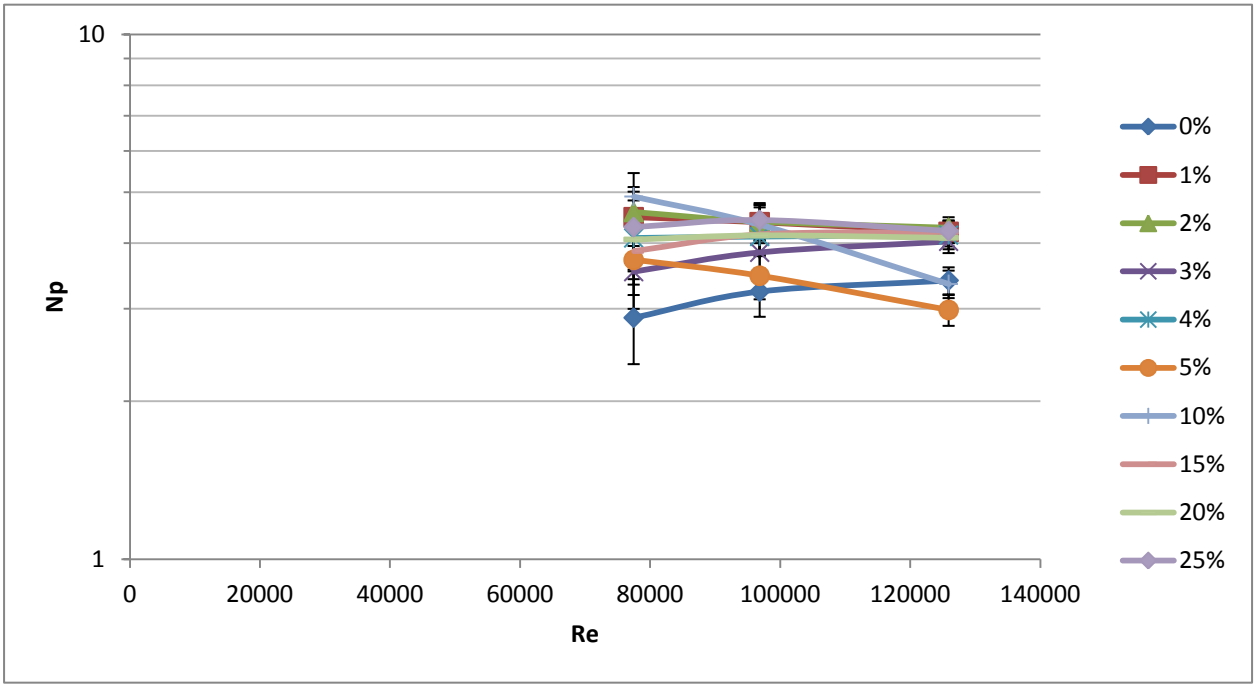


Figure B. 3 : Courbes de puissance de la turbine Dispersimax à 2'' du fond de la cuve avec obstruction au pompage d'air aux différentes fractions massiques de particules

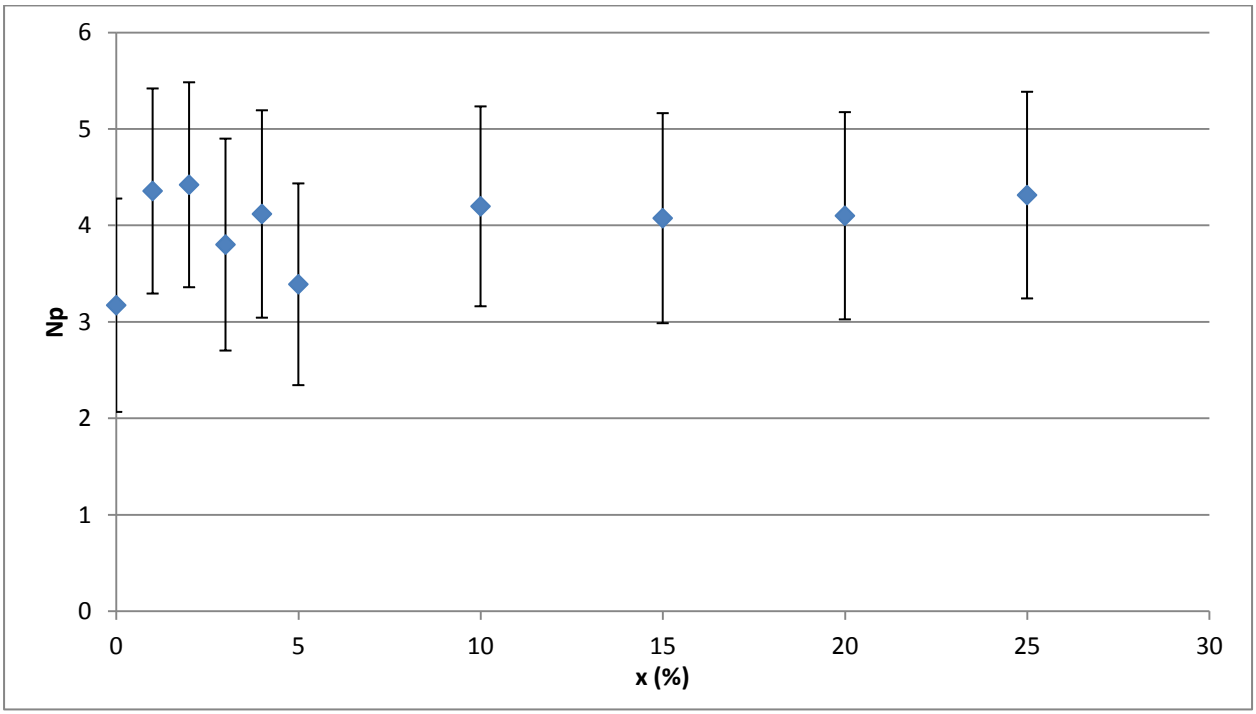


Figure B. 4 : Nombre de puissance moyen en fonction de la fraction massique pour Re>75000 (Dispersimax 2'' avec obstruction au pompage d'air)

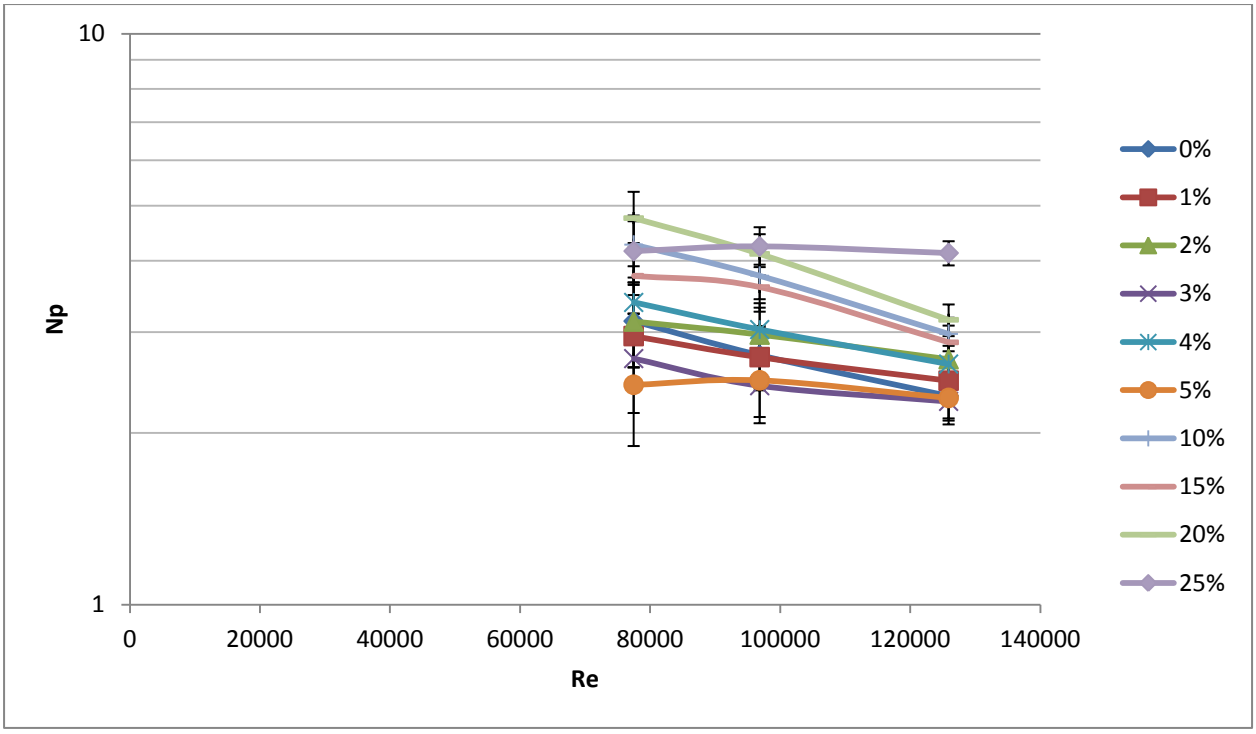


Figure B. 5 : Courbes de puissance de la turbine Dispersimax à 2'' du fond de la cuve sans obstruction au pompage d'air aux différentes fractions massiques de particules

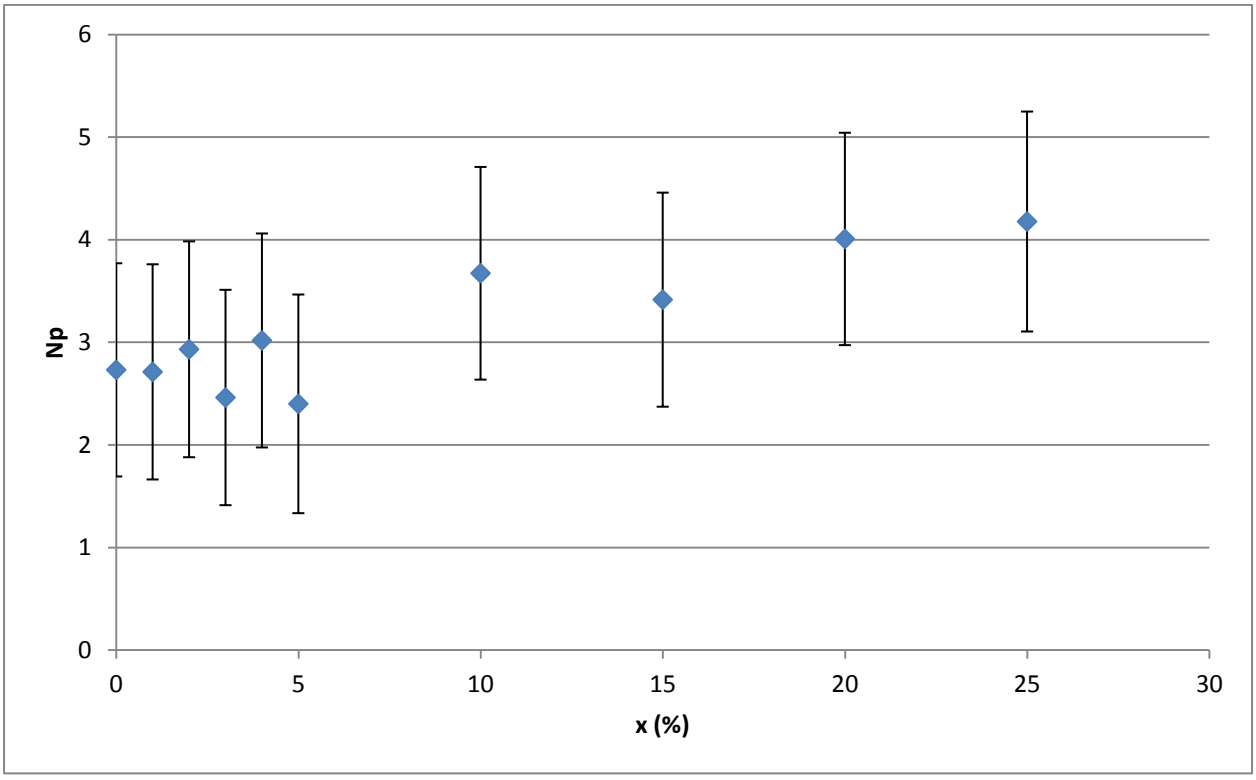


Figure B. 6 : Nombre de puissance moyen en fonction de la fraction massique pour Re>75000 (Dispersimax 2'' sans obstruction au pompage d'air)

En observant les Figures B.3, B.4, B.5 et B.6, il est possible de s'apercevoir qu'à basse teneur en solides, le nombre de puissance de la turbine Dispersimax est plus faible sans obstruction au pompage d'air et que les deux cas sont similaires à hautes fractions massiques de particules. Il s'agit d'une observation sensée puisqu'il a déjà été mentionné dans le corps du texte que la présence de solides diminue grandement la rétention d'air dans le liquide ce qui permet à la turbine de pomper plus de liquide que d'air, entraînant ainsi une augmentation du nombre de puissance. C'est également pourquoi le nombre de puissance est plus faible à basses concentrations de solides. Évidemment, la turbine non obstruée pompe plus d'air à la base.

Également, les nombres de puissance concordent bien avec ce qui est attendu dans la théorie (voir Figure B.1) En effet, la valeur théorique du nombre de puissance se trouve autour de 3 et c'est environ ce qui est obtenu à 0% de particules. En moyenne, les valeurs de Np sont un peu plus élevées (voir Figure B.4 et B.6.) en raison de la présence de particules, alors que les courbes de puissance théoriques de la Figure B.1 ont été construites en l'absence de solides.

B.3 PBT

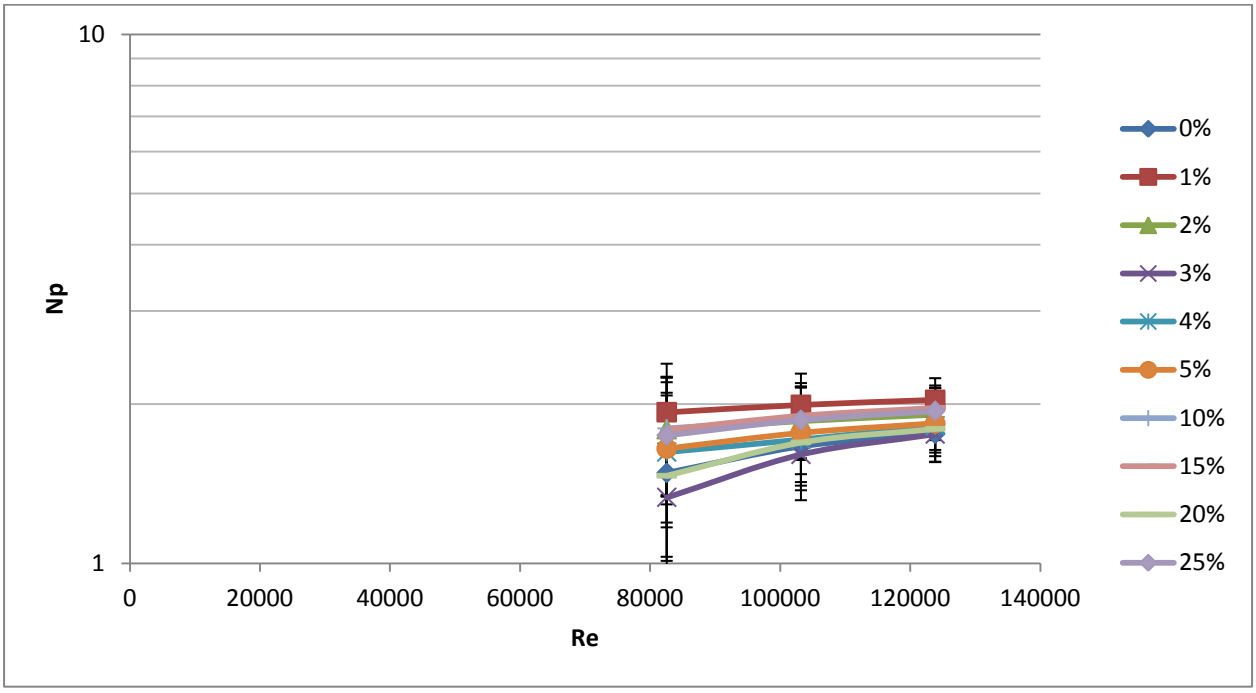


Figure B. 7 : Courbes de puissance de la PBTD à 6'' du fond de la cuve aux différentes fractions massiques de particules

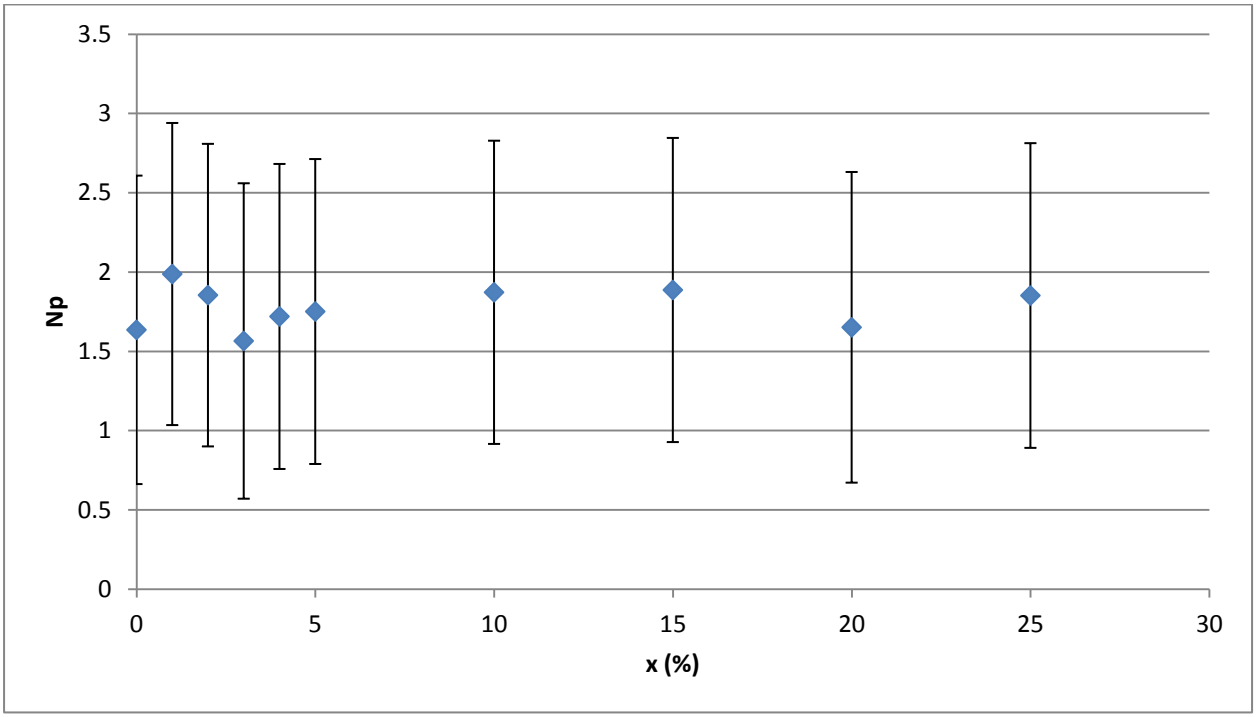


Figure B. 8 : Nombre de puissance moyen en fonction de la fraction massique pour Re>75000 (PBTD 6'')

Comme pour l'agitateur de type Dispersimax, les valeurs du nombre de puissance obtenue pour la PBT concordent avec ce qui est attendu théoriquement (voir Figure B.1). En effet, la valeur du nombre de puissance devait être autour de 1.5, ce qui est à peu près obtenu lorsqu'il n'y a pas de particules, soit à une fraction massique de solides de 0%. Encore une fois, en moyenne, les valeurs de Np sont légèrement supérieures (voir Figure B.8), mais ceci est dû à la présence de solides dans le liquides.

B.4 Maxblend

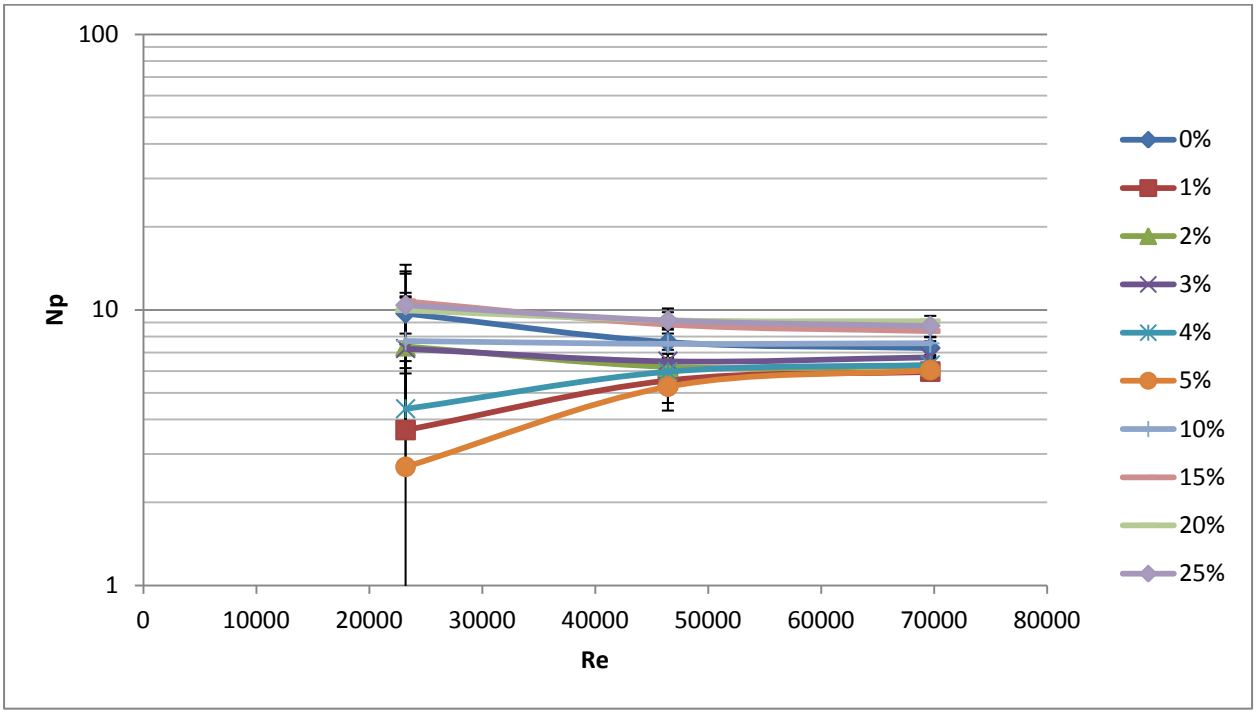


Figure B. 9 : Courbes de puissance du mélangeur Maxblend à 1'' du fond de la cuve aux différentes fractions massiques de particules

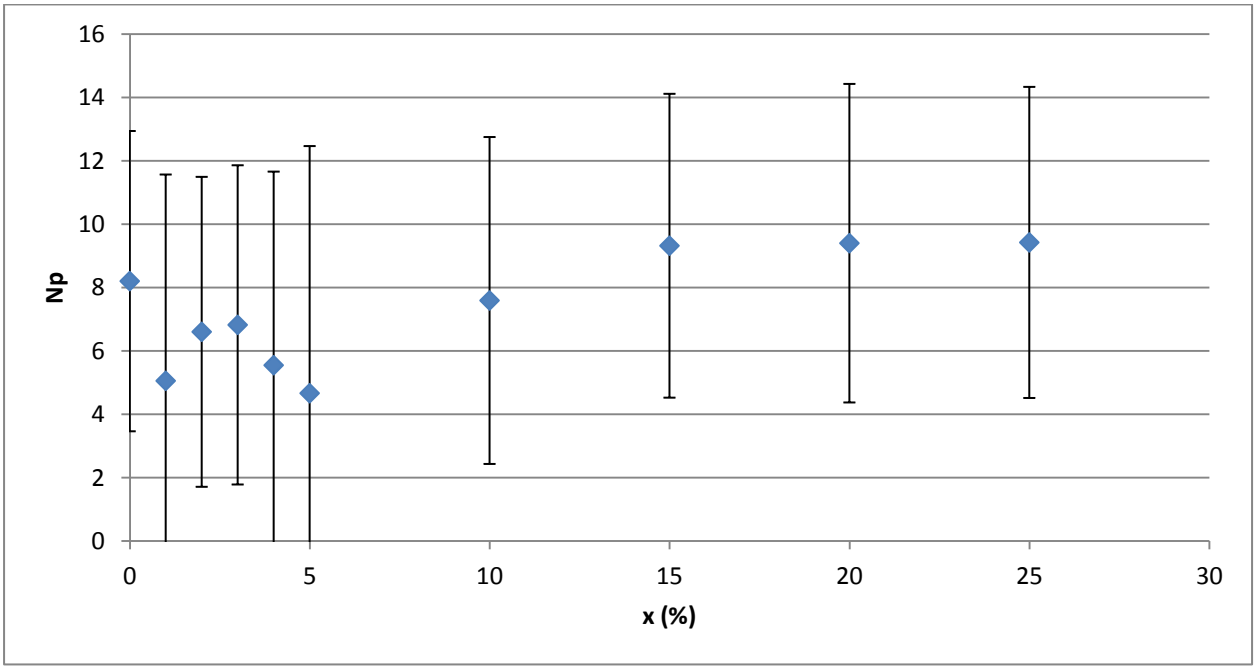


Figure B. 10 : Nombre de puissance moyen en fonction de la fraction massique pour Re>20000 (Maxblend 1'')

En théorie, les valeurs de nombre de puissance du mélangeur Maxblend devraient être près de 2 (voir Figure B.2). Ce n'est pas ce qui a été obtenu expérimentalement ici (voir Figure B.9). En effet, les plus faibles valeurs de Np trouvées ont été de 5 (voir Figure B.10), ce qui est déjà plus de deux fois plus élevé que la valeur théorique de la Figure B.2. Il ne s'agit pas d'un résultat surprenant, surtout en raison du fait que dans le cadre du présent projet, cet agitateur n'était pas utilisé dans sa configuration standard. En effet, le mélangeur Maxblend est supposé être utilisé dans une cuve à fond semi-elliptique et c'est dans cette configuration que la courbe théorique de puissance a été élaborée, alors que les données des Figures B.9 et B.10 ont été obtenues dans une cuve à fond plat.

ANNEXE C – DONNÉES DE COUPLE À VIDE

Tableau C. 1 : Données de couple à vide en selon la vitesse de rotation en sens horaire

Vitesse de rotation (RPM)	**Couple à vide (N.m)**
34.72	0.27
63.50	0.32
92.44	0.37
121.92	0.40
151.81	0.42
202.72	0.46
253.18	0.48
300.96	0.50
351.79	0.52
402.91	0.53
450.56	0.54
501.30	0.56
551.89	0.55
599.32	0.56
650.17	0.56
701.08	0.56
749.38	0.57
800.44	0.57

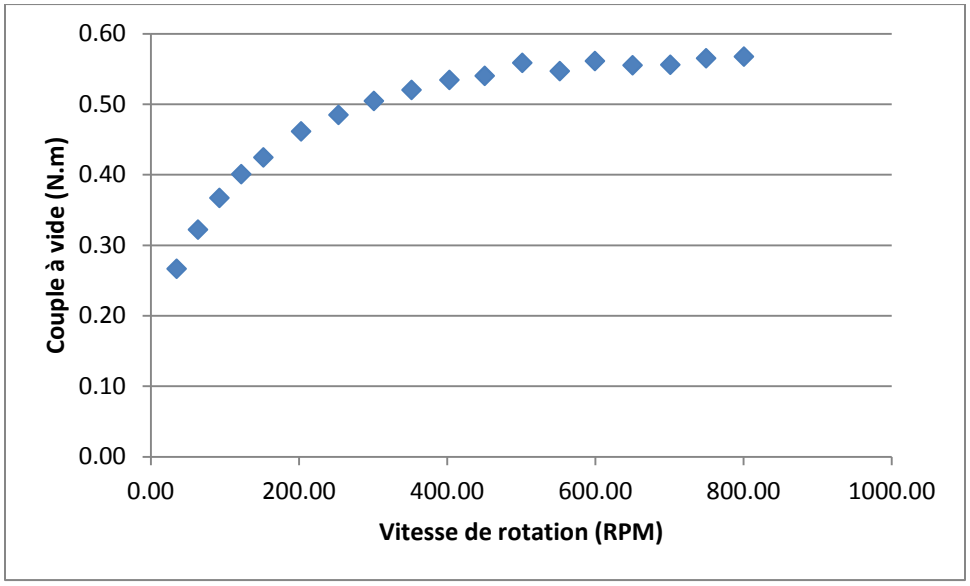


Figure C. 1 : Couple à vide en fonction de la vitesse de rotation en sens horaire

Puisque la turbine à pales inclinées est turbines est utilisées en pompage vers le haut et en pompage vers le bas, les données de couple à vide en sens antihoraire ont aussi été collectées et présentées au Tableau 4.4, mais seulement pour les vitesses à l'étude pour la PBT.

Tableau C. 2 : Données de couple à vide en selon la vitesse de rotation en sens antihoraire

Vitesse de rotation (RPM)	**Couple à vide (N.m)**
480.20	0.53
599.59	0.55
719.43	0.57