

**Titre:** Caractérisation des configurations des écoulements diphasiques par les réseaux de neurones via l'utilisation de l'impédance complexe

**Auteur:** Mounia Berdaï

**Date:** 2003

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Berdaï, M. (2003). Caractérisation des configurations des écoulements diphasiques par les réseaux de neurones via l'utilisation de l'impédance complexe [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.  
Citation: <https://publications.polymtl.ca/7107/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**  
Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/7107/>  
PolyPublie URL:

**Directeurs de recherche:** Alberto Teyssedou  
Advisors:

**Programme:** Non spécifié  
Program:

In compliance with the  
Canadian Privacy Legislation  
some supporting forms  
may have been removed from  
this dissertation.

While these forms may be included  
in the document page count,  
their removal does not represent  
any loss of content from the dissertation.



UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CARACTÉRISATION DES CONFIGURATIONS DES ÉCOULEMENTS  
DIPHASIQUES PAR LES RÉSEAUX DE NEURONES VIA L'UTILISATION DE  
L'IMPÉDANCE COMPLEXE

MOUNIA BERDAÏ  
DÉPARTEMENT GÉNIE PHYSIQUE  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MAÎTRISE  
ÈS SCIENCES APPLIQUÉES (GÉNIE ÉNERGETIQUE)  
Mai 2003





National Library  
of Canada

Bibliothèque nationale  
du Canada

Acquisitions and  
Bibliographic Services

Acquisitions et  
services bibliographiques

395 Wellington Street  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

395, rue Wellington  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

*Your file    Votre référence*

*ISBN: 0-612-86380-8*

*Our file    Notre référence*

*ISBN: 0-612-86380-8*

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

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

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

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

**Canada**

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée :

CARACTÉRISATION DES CONFIGURATIONS DES ÉCOULEMENTS  
DIPHASIQUES PAR LES RÉSEAUX DE NEURONES VIA L'UTILISATION DE  
L'IMPÉDANCE COMPLEXE

Présentée par : BERDAÏ Mounia

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

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

M. ZIKOVSKY, Lubomir, Ph.D., président

M. TEYSSÉDOU, Alberto, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. TAPUCU, Altan, D.Sc.A., membre

*Pour mes très chers parents,*

## Remerciements

Mes remerciements s'adressent en premier lieu au Dr. Alberto Teyssedou qui m'a accueillie au sein de son équipe et qui a dirigé ce travail. Sa disponibilité, ses compétences scientifiques ont été précieuses pour mener à terme cette étude.

Je remercie également les membres de Jury qui ont bien voulu revoir ma thèse et me fournir leurs précieux commentaires.

Je tiens à exprimer ma gratitude au gouvernement du Maroc, à Hydro-Québec et à l'institut de génie nucléaire, pour le soutien financier qu'ils m'ont accordé durant cette période.

Je remercie aussi mes collègues de l'institut génie nucléaire pour l'ambiance amicale qui régnait dans notre équipe. Je leur souhaite une bonne continuation dans leurs travaux de recherche.

Je remercie le service informatique dans la personne de Benoît Charbonneau pour sa disponibilité et sa précieuse collaboration.

Je remercie également Hassan pour son appui et son soutien moral, mon frère Abdelahmid et mes sœurs Zakia et Fadoua pour leurs encouragements continus.

Enfin je tiens à présenter mes vifs remerciements à mes chers parents qui n'ont cessé de me fournir, à chaque moment le soutien et l'appui nécessaires. Je les remercie infiniment.

## Résumé

L'objectif de ce sujet de recherche est de démontrer l'intérêt de l'utilisation conjointe de la partie active et réactive de l'impédance électrique, que ce soit dans la mesure du taux de vide ou dans le cas de l'identification des configurations des écoulements diphasiques. L'autre objectif est de fournir les éléments nécessaires pour la conception d'une sonde servant pour la mesure du taux de vide.

À travers la revue bibliographique effectuée, nous avons constaté que parmi les techniques proposées, on retrouve la technique d'impédance électrique. En effet dans cette technique le champ électrique se trouve fortement influencé par le changement de la topologie de l'écoulement dans la section de passage. Ce changement est reflété par une variation des composantes actives et réactives de l'impédance. Dans les travaux de recherche précédents, la combinaison des deux aspects capacitif et résistif, pour la caractérisation des écoulements diphasiques, n'a pas fait l'objet d'un sujet de recherche. D'où l'idée de notre projet de recherche.

Pour sa concrétisation, nous avons développé un logiciel de simulation qui nous a permis la détermination de ces composantes, tout en couvrant le cas des deux sections de passage, à savoir la section à géométrie carrée et la section à géométrie circulaire.

À travers les simulations réalisées, nous avons pu démontrer la sensibilité de la composante capacitive de l'impédance, pour un changement de la topologie de l'écoulement, correspondant à un même taux de vide et une même résistance.

Dans le cas de la section de passage circulaire, nous avons aussi étudié l'effet de l'ouverture des électrodes sur les valeurs calculées de la capacité électrique.

En parallèle, nous avons effectué une étude analytique pour le choix de la modélisation de l'impédance adaptée à chacune des configurations des écoulements diphasiques.

Concernant l'identification des configurations des écoulements, cet aspect a été couvert dans le passé, par deux approches principales. La première approche consistait à prédire les transitions entre les différentes configurations d'écoulements en utilisant des modèles analytiques. La seconde approche est basée sur l'utilisation des outils expérimentaux, telle que l'analyse statistique des signaux du taux de vide et de pression.

Cependant pour la validation des différentes configurations observées, l'interprétation et l'analyse de l'expérimentateur sont requises. De cette manière la notion "d'objectivité", se perd. D'où l'idée de notre sujet de recherche qui consiste à introduire les machines neuronales pour assurer une identification plus « objective » des configurations des écoulements diphasiques. Dans ce sens, nous avons proposé l'utilisation du réseau "*Multi Layer Perceptron*", *MLP* et du *réseau probabiliste*, *PNN*. Puis, nous avons entamé une étude comparative entre les deux types de réseaux. Au terme de cette étude comparative nous avons conclu que les deux types de réseaux sont efficaces pour l'identification des configurations des écoulements diphasiques avec certaines réserves pour le réseau *MLP*. En effet pour ce dernier, l'obtention de bons résultats suppose un traitement préalable des données.

La machine neuronale proposée possède une autre sortie, c'est le taux de vide. Sa valeur est estimée moyennant le réseau de régression généralisé, "*generalized regression neural network*", GRNN.

L'apprentissage de la machine neuronale, composée par le réseau "*multilayer perceptron*", MLP, le réseau *probabilist neural network* PNN, et le réseau "*generalized regression neural network*", GRNN, est effectué depuis une base de données. Cette dernière est alimentée par les pseudo-signaux générés, de façon aléatoire, par le programme de simulation et ce pour chacune des sections de passage, circulaire et carrée.

Comme ces pseudo-signaux correspondent à des configurations bien identifiées au préalable par l'utilisateur, en principe la problématique "d'objectivité" ne se pose pas, puisque dans la correspondance entre les configurations et les signaux, il n'y a pas de doutes. Mais avant leur utilisation dans le processus d'apprentissage, les pseudo-signaux sont validés au préalable par une analyse statistique basée sur la fonction de densité de probabilité FDP et la fonction de densité de puissance spectrale FDPS.

La machine ainsi construite peut être utilisée pour l'identification des configurations et pour la détermination du taux de vide en temps réel; elle peut être également utilisée pour le calibrage des instruments de mesure du taux de vide.

Face à la problématique posée par les systèmes multi-électrodes, les machines neuronales peuvent constituer une solution bénéfique. En effet l'augmentation de la dimension du vecteur d'entrée représente une solution efficace.

## **Abstract**

The objective of this study is to show the importance of using active and reactive components of the electrical impedance for void fraction measurement and to carry out flow pattern identification. The outcome of this work will also provide the required information for sensor design.

One of the most frequently used technique for measuring the void fraction in a channel is based on the change of electrical conductivity of the mixture caused by the presence of gas bubbles in a liquid medium. In general, this technique consists in applying an electrical potential to the flow by using electrodes. In fact the electrical field is strongly influenced by the changes of the two-phase flow topology in the channel cross-section. The perturbation caused by the presence of bubbles, results in a change of the active and reactive components of the impedance which can be measured via the electrodes.

In this research, numerical simulations software has been developped to study the changes in the electrical field caused by different two-phase flow patterns. The results from these simulations provide the changes of the active and reactive components of the electrical impedance of the two-phase flow medium. Thus, it is possible to study the sensitivity of the capacity changes caused by the spatial distributions of voids (i.e., flow topology) by keeping the average void fraction constant.

In addition, for the case of a test section with a circular cross-section, the effect of the electrodes dimensions is also studied.



Moreover, the proposed modelling technique allows us to simulate the effect of different two-phase flow patterns on the flow impedance. Thus, the simulation of randomly generated flow patterns give us a serie of pseudo void fraction signals.

It is important to mention that up to now, the flow pattern identification has been done by two main approaches. The first approach uses analytical models to predict transitions between the various flow patterns. The second approach is based on the use of the experimental tools, as well as the statistical analysis of the void fraction and pressure signals. However, for the validation of observed various patterns, the interpretation and the analysis of the experimenter are required. In this manner, the concept "of objectivity" is lost.

To avoid the use of subjective criteria in determining the two-phase flow patterns, the above mentioned pseudo void fraction signals are statistically filtered before being used in the learning process of neural machines. The proposed neural machine is composed of a *Multi Layer Perceptron* (MLP), a *Probabilistic Neural Network* (PNN) and a *Generalized Regression Neural Network* (GRNN). A comparative study between MLP and PNN, shows that both systems are suitable for the two-phase flows identification. However, some drawbacks are encountered when a MLP machine is used. In fact, to obtain acceptable results from a MLP network, a preliminary data processing is required.

It is important to mention that the use of a *Generalized Regression Neural Network* (GRNN), allows the estimation of the average void fraction for each flow configuration to be obtained.

The learning process of neural machine is carried out by using the pseudo signals obtained from previous simulations. Each set of pseudo signals correspond to a well defined flow pattern which is objectively selected from the statistical analysis given by the *Probability Density Function* (PDF) and the *Power Spectrum Density Function* (PSDF).

As a final goal, we suggest to extend the applicability of the neural machine, in conjunction with an appropriate void measurement technique, to the on-line characterization of the two-phase flow patterns.

The use of neural networks can also be beneficial for solving the multielectrode problem. In fact, increasing the input vector size of the neural machine, constitutes an effective solution.

## Table des matières

Remerciements .....	iv
Résumé.....	v
Abstract .....	viii
Table des matières .....	xi
Liste des figures.....	xvi
Liste des tableaux .....	xxii
Liste des abréviations et symboles .....	xxv
Chapitre 1: Introduction.....	1
1.1 Les configurations des écoulements diphasiques .....	1
1.2 Besoin de la caractérisation des configurations des écoulements diphasiques .....	3
1.3 Paramètres caractérisant les configurations des écoulements diphasiques et techniques utilisées pour la mesure du taux de vide .....	4
1.4 Objectifs de l'étude .....	6
Chapitre 2: Revue bibliographique.....	9
2.1 Techniques de mesure du taux de vide.....	9
2.1.1 Méthode basée sur les rayons X, $\gamma$ et $\beta$ .....	10
2.1.2 Méthode de résonance magnétique nucléaire .....	12
2.1.3 Méthode acoustique .....	13
2.1.4 Méthode de micro-ondes .....	15
2.1.5 Méthode de fibre optique .....	16
2.1.6 Méthode de la conductivité électrique .....	19
2.1.7 Méthode de l'impédance capacitive .....	23
2.2 Techniques d'identification des configurations des écoulements .....	25

2.2.1	Techniques traditionnelles .....	27
2.2.2	Méthodes objectives pour l'identification des configurations .....	28
2.2.3	Modèles mathématiques pour la prédiction et la détermination des configurations des écoulements .....	32
2.3	Utilisation des réseaux de neurones dans le domaine des écoulements diphasiques.....	33
2.4	Discussion.....	34
Chapitre 3: Théorie de base.....		36
3.1	Modélisation de la configuration l'écoulement dans la section du passage .....	36
3.1.1	Équations de référence.....	38
3.1.2	Méthodes numériques :.....	44
3.2	Impédance équivalente de l'écoulement dans la section de passage .....	48
3.2.1	Hypothèses.....	49
3.2.2	Expression analytique de l'impédance .....	51
3.2.3	Techniques de mesure de capacité.....	59
3.3	Présentation du logiciel de simulations .....	63
Chapitre 4: Choix de la fréquence optimale pour le système de mesure.....		66
4.1	Effet de peau.....	66
4.2	Perte dans les matériaux diélectriques .....	68
4.3	La rigidité diélectrique.....	70
4.4	Effet de la fréquence sur la valeur de mesure de la capacité .....	71
4.5	Discussion.....	72
Chapitre 5: Résultats des simulations : .....		73
5.1	Approche suivie dans la simulation des configurations des écoulements diphasiques.....	73
5.1.1	Conditions de mesure et résultats de Han.....	74

5.1.2 Données de base pour la génération aléatoire des configurations des écoulements .....	77
5.2 Résultats.....	85
5.2.1 Taux de vide .....	85
5.2.2 Valeur de la résistance équivalente du mélange diphasique dans la section de passage ...	90
5.2.3 Valeur de la capacité.....	95
5.2.4 Variation de la capacité en fonction de la topologie de l'écoulement pour un taux de vide fixe	100
5.2.5 Variation de la capacité en fonction de la taille des bulles.....	107
5.2.6 Équipotentiellles des configurations .....	111
5.2.7 Effet de la fréquence du signal d'entrée sur la mesure de l'impédance.....	118
5.2.8 Effet de l'ouverture des électrodes sur les valeurs de la capacité.....	120
5.2.9 Choix de la modélisation appropriée à chacune des configurations des écoulements et choix de la fréquence adéquate pour l'opération.....	126
Chapitre 6: Analyse statistique.....	137
6.1 Analyse par fonction de densité de probabilité FDP .....	137
6.1.1 Définition de la fonction de densité de probabilité FDP .....	138
6.1.2 Historique de l'analyse statistique basée sur la FDP .....	138
6.1.3 Procédure de calcul de la FDP .....	139
6.2 Résultats de l'analyse par FDP .....	142
6.2.1 FDP des pseudo-signaux engendrés pour la section carré.....	142
6.2.2 FDP des pseudo-signaux engendrés pour la section circulaire.....	148
6.2.3 Analyse par FDP des signaux de mesure de Han [7].....	153
6.3 Analyse par fonction de densité de puissance spectrale, FDPS.....	156
6.4 Résultats de l'analyse par FDPS.....	158

6.4.1	FDPS des signaux de Han [7].....	158
6.4.2	FDPS des pseudo-signaux obtenus à partir des simulations.....	162
Chapitre 7: Machine neuronale .....		169
7.1	Différentes architectures des réseaux de neurones .....	170
7.2	Mode d'apprentissage des réseaux de neurones.....	171
7.3	Algorithme d'apprentissage .....	172
7.4	Exemple d'utilisation de réseaux de neurones.....	174
7.5	Description de la machine neuronale utilisée .....	175
7.5.1	Caractéristiques réseaux MLP .....	175
7.5.2	Caractéristiques du réseau probabiliste .....	178
7.5.3	Caractéristiques du réseau de régression généralisée GRNN.....	179
7.6	Objectif de la machine neuronale .....	180
7.7	Choix des caractéristiques du réseau .....	180
7.7.1	Nombre d'entrées .....	180
7.7.2	Données d'estimation et de validation.....	181
7.7.3	Choix du type de normalisation à appliquer aux données d'entrées.....	182
7.7.4	Mode d'apprentissage de la machine neuronale.....	185
7.8	Description de l'application.....	185
7.9	Résultats et discussion .....	188
7.9.1	Effet du moment et du taux d'apprentissage sur les performances de MLP .....	188
7.9.2	Incertitude dans l'identification des configurations des écoulements .....	189
7.9.3	Incertitude dans l'estimation du taux de vide .....	189
7.10	Validation du fonctionnement de la machine neurale, par des mesures réelles.....	193
7.10.1	Conversion des données .....	194

7.10.2	Discussion .....	196
Chapitre 8:	Conclusion.....	198
Chapitre 9:	Recommandations .....	201
Chapitre 10:	Références .....	203
Chapitre 11:	Annexe 1 .....	208

## Liste des figures

Figure 1: Principaux types des configurations des écoulements diphasiques dans un tube vertical. ....	2
Figure 2 : Système de mesure de conductivité proposé par Merilo et al. [21]. ....	20
Figure 3 : Exemple de sondes à base de conductivité pour la mesure du taux de vide local, proposée par Teyssedou <i>et al.</i> [32]. ....	21
Figure 4 : Schéma électrique équivalent de la sonde proposée par Teyssedou <i>et al.</i> [32]. ....	22
Figure 5 : Forme de l'électrode utilisée par Teyssedou et Tye [33] pour la mesure de la capacité. ....	24
Figure 6 : De gauche à droite; FDP de l'écoulement par bulles, FDP de l'écoulement par bouchons et FDP de l'écoulement annulaire. ....	31
Figure 7: Structure de la section de passage pour les deux types de section de passage, circulaire et carrée. ....	37
Figure 8 : Présentation du contour d'intégration entre l'interface liquide et gazeuse. ....	41
Figure 9 : Vue 3D de la section de passage. ....	42
Figure 10: Répartition du potentiel sur l'interface. ....	42
Figure 11: Vue de face de la section de passage du tube d'essai- (a) section de passage circulaire, (b) section de passage carrée. ....	49
Figure 12 : Schéma de l'approche microscopique. ....	52
Figure 13 : Schéma d'une ligne électrique. ....	52
Figure 14: Schéma équivalent d'une conductance $G$ et de la susceptance ( $Y=j\omega C$ , $G=1/R$ ). ....	53
Figure 15: Schéma équivalent de capacité et résistance en série. ....	54



Figure 16 : Évolution du module et de l'argument de l'impédance en fonction du taux de vide. ....	58
Figure 17 : Exemple de circuit de résonance (Huang <i>et al.</i> [11]). ....	60
Figure 18 : Un circuit typique utilisant la méthode de chargement et déchargement Huang <i>et al.</i> [11]. ....	62
Figure 19: Organigramme du programme de génération de pseudo signaux pour la capacité et la résistance. ....	65
Figure 20 : Évolution de la partie réelle et imaginaire de la permittivité, en fonction de la fréquence. ....	69
Figure 21 : Définition du déphasage $\phi$ entre tension et courant électriques. $\phi=90-\varphi$ . ....	70
Figure 22: Signal de l'écoulement par bulles signal (Han [7]). ....	75
Figure 23: Signal de l'écoulement par bouchons (Han [7]). ....	76
Figure 24 : Écoulement annulaire. ....	76
Figure 25: Signal écoulement annulaire (Han [13]). ....	77
Figure 26: Écoulement par bouchons. ....	79
Figure 27: Exemple d'une poche d'air échantillonnée. ....	80
Figure 28 : Exemple d'un bouchon liquide échantillonné. ....	80
Figure 29 : Figure montrant la position angulaire de la bulle son diamètre ainsi que sa distance par rapport au centre de la section de passage. ....	81
Figure 30: Écoulement annulaire échantillonné. ....	83
Figure 31: Organigramme décrivant les principales étapes suivies lors de la génération des différents configurations des écoulements. ....	84
Figure 32: Pseudo-signal du taux de vide pour un écoulement par bulles (section circulaire). ..	87
Figure 33: Pseudo-signal du taux de vide pour un écoulement par bulles (section carrée). ....	87

Figure 34: Pseudo-signal du taux de vide pour un écoulement par bouchons (section circulaire).....	88
Figure 35: Pseudo-signal du taux de vide pour un écoulement par bouchons (section carrée)...	88
Figure 36: Pseudo-signal du taux de vide pour un écoulement annulaire (section circulaire). ...	89
Figure 37: Pseudo-signal du taux de vide pour un écoulement annulaire (section carrée).....	89
Figure 38: Pseudo-signal de résistance pour un écoulement par bulles (section circulaire). ....	92
Figure 39: Pseudo-signal de résistance pour un écoulement par bulles (section carrée).....	92
Figure 40: Pseudo-signal de résistance pour un écoulement par bouchons (section circulaire).....	93
Figure 41: Pseudo-signal de résistance pour un écoulement par bouchons (section carrée).....	93
Figure 42: Pseudo-signal de résistance pour un écoulement annulaire (section circulaire). ....	94
Figure 43: Pseudo-signal de résistance pour un écoulement annulaire (section carrée).....	94
Figure 44: Pseudo-signal de capacité pour un écoulement par bulles (section circulaire). ....	97
Figure 45: Pseudo-signal de capacité pour un écoulement par bulles (section carrée). ....	97
Figure 46: Pseudo-signal de capacité pour un écoulement par bouchons (section circulaire). ...	98
Figure 47: Pseudo-signal de capacité pour un écoulement par bouchons (section carrée).....	98
Figure 48: Pseudo-signal de capacité pour un écoulement annulaire (section circulaire).....	99
Figure 49: Pseudo-signal de capacité pour un écoulement annulaire (section carrée). ....	99
Figure 50 : Exemple de positions de la bulle dans une section de passage circulaire. ....	101
Figure 51: Variation de la capacité en fonction de la position de la bulle pour une section carrée.....	103
Figure 52 : Ouverture des électrodes.....	104
Figure 53: Variation de la capacité en fonction de la position de la bulle (cas section circulaire).....	105

Figure 54: Évolution de la capacité en fonction du diamètre (section carrée). ....	108
Figure 55: Évolution de la capacité en fonction de la taille de bulle (section circulaire).....	109
Figure 56: Répartition des équipotentiels pour une section circulaire pleine d'eau. ....	112
Figure 57: Répartition des équipotentiels pour une section circulaire pleine d'eau contenant une bulle au centre de 0.5 cm de diamètre.....	112
Figure 58 : Répartition des équipotentiels pour une section carrée pleine d'eau. ....	113
Figure 59: Répartition des équipotentiels pour une section carrée pleine d'eau contenant une bulle au centre de 0.5 cm de diamètre.....	113
Figure 60 : Surface de Gauss autour de deux milieux de permittivité différente. ....	114
Figure 61 : Comportement des équipotentiels lorsque une bulle change de position, section circulaire. ....	116
Figure 62: Comportement des équipotentiels lorsque une bulle change de position, section carrée.....	117
Figure 63 : Ouverture des électrodes. Dans ce cas l'ouverture présentée est de $\pi/4$ . ....	120
Figure 64 : Représentation des différentes des ouvertures des électrodes proposées pour l'étude. ....	121
Figure 65 : Les différentes positions de la bulle.....	121
Figure 66: Évolution de la sensibilité du système en fonction de l'ouverture des électrodes....	123
Figure 67: Évolution de la déviation moyenne de toutes les positions de la bulle par type d'ouverture des électrodes. ....	125
Figure 68 : Modèle série.....	136
Figure 69 : Modèle parallèle.....	136
Figure 70: Organigramme du calcul de la FDP.....	141
Figure 71: FDP du pseudo-signal de la résistance cas écoulement par bulles (section carrée). ....	143

Figure 72 : FDP du pseudo-signal de la capacité cas écoulement par bulles (section carrée)...	144
Figure 73 : FDP du pseudo-signal du taux de vide cas écoulement par bulles (section carrée).....	144
Figure 74 : FDP du pseudo-signal de la résistance cas écoulement par bouchons (section carrée).....	145
Figure 75 : FDP du pseudo-signal de la capacité cas écoulement par bouchons (section carrée).....	145
Figure 76 : FDP du pseudo-signal du taux de vide cas écoulement par bouchons (section carrée).....	146
Figure 77 : FDP du pseudo-signal de la résistance cas écoulement annulaire (section carrée).	146
Figure 78 : FDP du pseudo-signal de la capacité cas écoulement annulaire (section carrée). ..	147
Figure 79 : FDP du pseudo-signal du taux de vide cas écoulement annulaire (section carrée).	147
Figure 80:FDP du pseudo-signal de la résistance cas d'écoulement par bulles (section circulaire).....	148
Figure 81: FDP du pseudo-signal de la capacité écoulement par bulles (section circulaire). ...	149
Figure 82: FDP du pseudo-signal du taux de vide cas écoulement par bulles (section circulaire).....	149
Figure 83: FDP pseudo-signal de la résistance cas écoulement par bouchons (section circulaire).....	150
Figure 84: FDP du pseudo-signal de la capacité écoulement par bouchons (section circulaire).....	150
Figure 85: FDP du pseudo-signal du taux de vide cas d'écoulement par bouchons (section circulaire).....	151
Figure 86: FDP pseudo-signal de la résistance cas écoulement annulaire (section circulaire).	152

Figure 87: FDP pseudo-signal de la capacité cas écoulement annulaire (section circulaire). ...	152
Figure 88: FDP pseudo-signal taux de vide cas écoulement annulaire (section circulaire). ....	153
Figure 89: FDP écoulement par bulles section carrée (Han [7]). .....	154
Figure 90: FDP écoulement par bouchons section carrée (Han [7]). .....	154
Figure 91: FDP écoulement annulaire section carrée (Han [7]). .....	155
Figure 92 : FDPS pour un écoulement par bulles (Han [7]). .....	160
Figure 93 : FDPS de l'écoulement par bouchons (Han [7]). .....	160
Figure 94 : FDPS de l'écoulement annulaire (Han [7]). .....	161
Figure 95 : FDPS du pseudo-signal taux de vide cas de l'écoulement par bulles. ....	164
Figure 96 : FDPS du pseudo signal taux de vide, cas de l'écoulement par bouchons. ....	164
Figure 97 : FDPS pseudo-signal taux de vide, cas de l'écoulement annulaire. ....	165
Figure 98 : FDPS du pseudo-signal capacité, cas de l'écoulement par bulles. ....	166
Figure 99 : FDPS du pseudo-signal de capacité, cas écoulement par bouchons. ....	167
Figure 100 : FDPS du pseudo-signal de capacité, cas écoulement annulaire. ....	167
Figure 101: Exemple de neurone. ....	170
Figure 102: Réseau MLP. ....	177
Figure 103: Structure du réseau probabiliste. ....	178
Figure 104: Réseau de régression généralisée. ....	179
Figure 105: Organigramme du déroulement des différentes étapes du programme de la machine neuronale. ....	186
Figure 106: Interface de l'application d'entraînement et de simulation de la machine neuronale. ....	187
Figure 107: Allure de la fonction de performance en fonction du taux d'apprentissage et du moment. ....	188

## Liste des tableaux

Tableau 1: Données de suivi du nombre des itérations en fonction du facteur de sur-relaxation .....	47
Tableau 2: Caractéristiques diélectrique de l'eau et du gaz. ....	48
Tableau 3: Évolution du module et de l'Argument d'impédance, pour structure série et parallèle - cas écoulement par bulle section circulaire. ....	57
Tableau 4: Structure d'impédance adopté au type de la configuration de l'écoulement .....	59
Tableau 5: Fréquence recommandée pour chacune des configurations d'écoulement en fonction de la géométrie de la section de passage. ....	72
Tableau 6: Données de références pour la génération aléatoire d'un écoulement par bulles.....	78
Tableau 7: Données de référence pour la génération aléatoire de l'écoulement par bouchons .....	81
Tableau 8: Données de référence pour la génération aléatoire d'un écoulement annulaire.....	82
Tableau 9: Résultat de la variation de la résistance dans les différents cas de configurations et pour les deux cas de section de passage.....	90
Tableau 10: Résumé de la variation de la capacité pour les différentes configurations d'écoulement et pour les deux sections de passage.....	95
Tableau 11: Variation de la capacité en fonction de la position de la bulle dans le cas d'une section carrée.....	102
Tableau 12: Variation de la capacité en fonction de la position cas section circulaire. ....	105
Tableau 13: Évolution de la capacité en fonction du taux de vide (section carrée). ....	108
Tableau 14: Évolution de la capacité en fonction du taux de vide pour le cas d'une section circulaire. ....	109

Tableau 15: Évolution de la capacité en fonction de la tension appliquée section circulaire. ....	119
Tableau 16: Évolution de la capacité en fonction de la tension appliquée cas le section carrée. ....	119
Tableau 17: Évolution de la sensibilité du système en fonction de l'ouverture des électrodes. ....	123
Tableau 18: Différenec entre les valeurs de capacité en fonction de l'ouverture des électrodes. ....	126
Tableau 19: Évolution de la corrélation entre le taux de vide et le module d'impédance équivalente ainsi que son argument, en fonction de la fréquence. Cas écoulement par bulles (section circulaire). ....	128
Table 20 : Évolution de la corrélation entre le taux de vide et le module d'impédance équivalente ainsi que son argument, en fonction de la fréquence. Cas écoulement par bouchons (section circulaire). ....	129
Tableau 21 : Évolution de la corrélation entre le taux de vide et le module d'impédance équivalente ainsi que son argument, en fonction de la fréquence. Cas écoulement annulaire (section circulaire). ....	130
Tableau 22 : Évolution de la corrélation entre le taux de vide et le module d'impédance équivalente ainsi que son argument, en fonction de la fréquence. Cas écoulement par bulles (section carrée). ....	131
Tableau 23 Évolution de la corrélation entre le taux de vide et le module d'impédance équivalente ainsi que son argument, en fonction de la fréquence. Cas écoulement par bouchons (section carrée). ....	132

Tableau 24 : Évolution de la corrélation entre le taux de vide et le module d'impédance équivalente ainsi que son argument, en fonction de la fréquence. Cas écoulement annulaire (section carrée). .....	133
Tableau 25: Évolution de la fréquence optimale dans le cas de toutes les configurations d'écoulement et pour les deux types de section de passage. ....	134
Tableau 26 : Résumé des fréquences du signal du taux de vide pour chacune des configurations d'écoulement.....	180
Tableau 27 : Résultat de la normalisation basée sur la moyenne et l'écart type. ....	183
Tableau 28 : Résultat de la normalisation basée sur les valeurs maximales et minimales .....	184
Tableau 29 : Incertitude dans l'estimation du taux de vide en se référant aux données d'apprentissage (seulement les données de la simulation) .....	190
Tableau 30 : Incertitude dans l'estimation du taux de vide en se référant aux données de validation (91% sont les données de simulation et 9% sont de Han(1999)).....	191
Tableau 31 : Tableau comparatif entre le réseau MLP et réseau probabiliste.....	193
Tableau 32: Évolution du potentiel mesuré en fonction des différentes configurations.....	194
Tableau 33: Résumé des données de simulation générées pour une section carrée de 16mm de côte.....	196



## Liste des abréviations et symboles

$\alpha$	: Moment de l'algorithme propoagation rétroactive du réseau MLP
$\alpha(x,t)$	: Taux de vide local, à la position $x$ et au temps $t$ .
$\mu$	: Taux d'apprentissage de l'algorithme propagation rétroactive du réseau MLP
$\omega_{ij}$	: Le poids synaptique du synapse reliant l'entrée $i$ et le neurone $j$
$\Delta \omega_{ij}$	: La correction à apporter au poids synaptique du synapse reliant l'entrée $i$ et le neurone $j$
$\varphi_j$	: Fonction d'activation du neurone $j$
$\xi_{av}$	: Fonction du coût à minimiser
$\varepsilon$	: Permittivité du milieu
$\varepsilon_v$	: Taux du vide global
$\sigma$	: Conductivité électrique
$\omega$	: Facteur de succesive sur-relaxation
$A_g$	: Surface occupée par le gaz
$A_l$	: Surface occupée par le liquide
$C$	: Capacité électrique
$d_j$	: Sortie désirée pour le neurone $i$
$e_j$	: Écart entre sortie réelle et sortie désirée
$f_e$	: Fréquence d'échantillonnage
$f_s$	: Fréquence du signal

<b><i>FDP</i></b>	: Fonction de densité de probabilité
<b><i>FDPS</i></b>	: Fonction de densité de puissance spectrale
<b><i>IGN</i></b>	: Institut de génie nucléaire
<b><i>G</i></b>	: Conductance électrique
<b><i>GRNN</i></b>	: “Generalized regression neural network” réseau à régression linéaire généralisée
<b><i>h</i></b>	: Enthalpie de l’écoulement
<b><i>h<sub>f</sub></i></b>	: Enthalpie de la phase liquide
<b><i>h<sub>fg</sub></i></b>	: Chaleur latente de vaporisation
<b><i>j<sub>v</sub></i></b>	: Vitesse superficielle du gaz
<b><i>j<sub>l</sub></i></b>	: Vitesse superficielle du liquide
<b><i>K<sub>e</sub></i></b>	: Facteur d’atténuation
<b><i>LLS</i></b>	: Linear least squares moindre carré linéaire
<b><i>LMS</i></b>	: “Least mean squares” moyenne quadratique
<b><i>m<sub>v</sub></i></b>	: Masse de la phase gazeuse
<b><i>m<sub>l</sub></i></b>	: Masse de la phase liquide
<b><i><math>\dot{m}_v</math></i></b>	: Débit massique de la phase gazeuse
<b><i><math>\dot{m}_l</math></i></b>	: Débit massique de la phase liquide
<b><i>MLP</i></b>	: “Multi layer perceptron » perceptron à multi couche
<b><i>PNN</i></b>	: “Probabilistic neural network” réseau neuronal probabilistique
<b><i>QCV</i></b>	: “Quick closing valve” vannes à fermeture rapide

$\dot{Q}_v$	: Débit volumique de la phase gazeuse
$\dot{Q}_l$	: Débit volumique de la phase liquide
$R$	: Résistance électrique
<b>RBF</b>	: “Radial basis function” réseau à base de fonction radiale
<b>SOM</b>	: “Self Organizing Mapping” réseau de carte auto-organisée
<b>SOR</b>	: “Successive over-relaxation” sur-relaxation successive
$x$	: Titre thermodynamique
$x_s$	: Titre statique
$\hat{x}_s$	: Titre d’écoulement
$V_+$	: Potentiel côté positif
$V_-$	: Potentiel côté négatif
$v_j$	: Entrée au bloque de la fonction d’activation
$V_g$	: Vitesse de la phase gazeuse
$V_l$	: Vitesse de la phase liquide
$y_j$	: Sortie réelle du neurone j

# Chapitre 1: Introduction

L'apparition simultanée du gaz et du liquide dans un canal peut se manifester sous différentes formes, dépendamment des vitesses du liquide et du gaz. Les différentes topologies résultantes, i.e., la distribution géométrique d'une phase par rapport à une autre, est identifiée comme étant la configuration de l'écoulement. Ces configurations des écoulements ont un impact sur la conception et l'exploitation des systèmes dans plusieurs applications industrielles. Avant d'en donner quelques exemples de ces applications, on va commencer par décrire quelques exemples de configurations.

## **1.1 Les configurations des écoulements diphasiques**

Les écoulements diphasiques peuvent se manifester sous plusieurs formes dépendamment du type de configuration et de la disposition de la conduite. Pour les écoulements verticaux, on distingue principalement les configurations suivantes (Figure 1):

- Écoulement par bulles : ce type de configuration est caractérisé par une distribution uniforme des bulles, dans une phase continue de liquide.
- Écoulement par bouchons : dans ce cas la majorité du gaz est concentrée dans des bulles qui ont un diamètre proche de celui du canal. L'espace séparant ces bulles et les parois du tube est rempli par le liquide. Les bulles de gaz se déplacent uniformément dans le canal et elles sont séparées par des bouchons de liquides. Ces derniers peuvent contenir des bulles de gaz de petits diamètres.

- Écoulement agité : dans cet écoulement, les poches de gaz observées dans l'écoulement par bouchons, se déforment sous forme de filament et le liquide séparant les poches de gaz dans l'écoulement par bouchons se déforme à son tour pour remplir l'espace non occupé par les bulles de gaz.
- Écoulement annulaire : dans ce cas l'écoulement forme un film liquide autour des parois du tube, avec du gaz qui circule au centre. Ce dernier peut dans certains cas contenir des gouttelettes d'eau, résultant de l'arrachement du liquide se trouvant sur l'interface liquide-gaz.

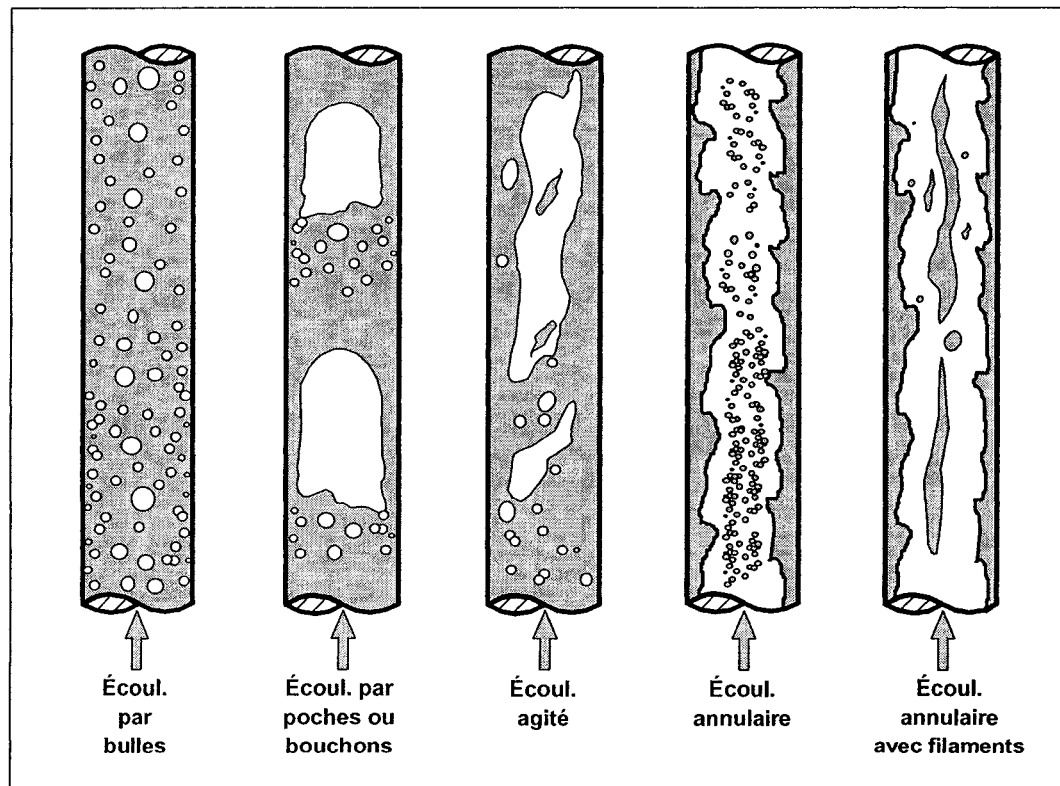


Figure 1: Principaux types des configurations des écoulements diphasiques dans un tube vertical.

Dans le paragraphe suivant on va présenter quelques exemples montrant l'intérêt de l'identification des configurations.

## ***1.2 Besoin de la caractérisation des configurations des écoulements diphasiques***

La caractérisation des écoulements diphasiques, représente un aspect important pour les différentes industries. En effet les configurations des écoulements diphasiques affectent les pertes de charges, le transfert de masse, le comportement thermo-hydraulique, le transfert de chaleur, etc.

Par exemple dans le cas du transport du gaz naturel et du pétrole dans une même canalisation, les pertes de charges vont être affectées par la configuration de l'écoulement. Donc il est important, de connaître le type de configuration pour pouvoir estimer les pertes de charges dans le tube et prévoir les installations de compression nécessaires pour garantir la pression requise par les clients.

Le transfert de masse est fortement influencé par le type de la configuration d'écoulement. En effet le changement des configurations est accompagné par un changement des vitesses des phases et d'un changement dans la topologie de l'écoulement, ce qui introduit des changements au niveau des surfaces d'échange et affecte par la suite le transfert de masse.

Dans les générateurs de vapeur, si l'écoulement devient diphasique et les bulles de vapeur présentes dans l'écoulement atteignent la taille des tubes des GV, alors un assèchement partiel peut avoir lieu.

D'un autre côté, on constate que le taux de vide est fortement corrélé avec l'évolution des différentes configurations des écoulements diphasiques. Ce qui explique sa présence dans la plupart des corrélations utilisées pour la description du comportement thermo-hydraulique des écoulements diphasiques.

Cependant la caractérisation des configurations des écoulements peut s'effectuer moyennant plusieurs paramètres. C'est ce qu'on va essayer de présenter dans les paragraphes suivants.

### ***1.3 Paramètres caractérisant les configurations des écoulements diphasiques et techniques utilisées pour la mesure du taux de vide***

La caractérisation des configurations des écoulements diphasiques peut être effectuée moyennant plusieurs paramètres. Par exemple le titre statique, le titre thermodynamique, ou le titre d'écoulement.

Le titre statique  $x_s$  est défini comme étant le rapport de la masse gazeuse et la masse totale de l'écoulement, comme le montre la formule suivante  $x_s = \frac{m_v}{m_v + m_l}$ .  $m_v$  étant la masse du gaz et  $m_l$  la masse du liquide. La détermination du titre statique nécessite l'isolation de l'écoulement et la mesure de la masse de la partie gazeuse, puis la masse totale. Chose qui n'est pas aussi évidente, surtout dans le cas d'un écoulement dynamique.

Le titre thermodynamique est défini comme étant le rapport de la différence des enthalpies de l'écoulement et l'enthalpie de saturation du liquide divisé par la chaleur

latente de vaporisation. Sa formule est donnée comme suit :  $x = \frac{h - h_f}{h_{fg}}$ . L'utilisation de

cette formule suppose que l'écoulement est en équilibre thermodynamique. Chose qui n'est pas garantie à tous les coups. Ainsi le titre d'écoulement, défini par la formule

suivante  $\hat{x} = \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_v + \dot{m}_l}$  représentant le rapport des débits massiques des deux phases,

reste le plus approprié pour la caractérisation des écoulements diphasiques.

L'autre variable qui peut être utilisée pour la caractérisation de l'écoulement c'est le taux de vide. Dans ce sens on distingue deux types de taux de vide; le taux de vide local et le taux de vide global. Le taux de vide global est défini comme étant le rapport du volume du gaz (ou air) par rapport au volume totale et il est désigné par  $\varepsilon_v$ . Son

expression est donnée par la formule suivante  $\varepsilon_v = \frac{V_g}{V_g + V_l}$  qui peut être approchée

par  $\varepsilon_v = \frac{A_g}{A_g + A_l}$ , dans le cas où la longueur des électrodes est infiniment petite.  $A_g$  et  $A_l$

représentent les sections de passage occupées respectivement par le gaz et par le liquide.

Le taux de vide local est défini comme suit :

$$\alpha(\vec{x}, t_0) = \lim_{\Delta\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta\tau} \int_{t_0 - \Delta\tau}^{t_0 + \Delta\tau} \chi(\vec{x}, t) dt \quad (1.1)$$

Sachant que  $\vec{x}$  représente la position au temps  $t_0$ .  $\chi(\vec{x}, t)$  prend la valeur de 1 quand il s'agit du gaz et 0 quand il s'agit du liquide.

Les vitesses superficielles ou les vitesses apparentes des phases, peuvent être aussi considérées pour l'identification des configurations des écoulements diphasiques. Elles



sont définies comme étant le rapport des débits volumétriques de chacune des phases, par rapport à la surface totale de la section de passage. Ainsi pour l'air (ou le gaz), la

vitesse superficielle s'écrit:  $j_v = \frac{\dot{Q}_v}{A_g + A_l}$ , et pour la phase liquide la vitesse superficielle

s'écrit:  $j_l = \frac{\dot{Q}_l}{A_g + A_l}$ .

Plusieurs études ont été entamées pour la caractérisation des écoulements en se basant sur le titre ou sur les vitesses superficielles. D'autres études ont considéré le signal de pression comme référence pour l'identification des configurations. Cependant la plus part des recherches récentes ont été basées sur l'utilisation du taux de vide, car il s'est avéré que c'est le processus le moins coûteux et le plus simple. D'où la justification de notre choix basé sur la caractérisation des configurations des écoulements en utilisant le taux de vide.

#### **1.4 Objectifs de l'étude**

Suite aux discussions entamées dans les paragraphes précédents, dans cette recherche on s'est proposé d'étudier le comportement du champ électrique en présence d'un milieu diphasique pour des sections de passage ayant des géométries carrée et circulaire.

La réalisation des différents objectifs commence par la définition des hypothèses de simulation. Ensuite la modélisation de l'impédance électrique correspondante à l'écoulement dans la section de passage, que ce soit pour le cas de la section de passage à géométrie circulaire et ou à géométrie carrée. Ceci permettra la détermination de

l'impédance équivalente selon la géométrie de la section de passage, et selon les configurations des écoulements.

Notre logiciel de simulation a pour objectif de calculer et de présenter le comportement de la partie capacitive et résistive de l'impédance en fonction des différentes configurations de l'écoulement. Car en effet l'objectif ultime est de pouvoir élaborer un instrument de mesure capable d'identifier les moindres changements dans la topologie des écoulements dans la section de passage.

La simulation des différentes configurations des écoulements diphasiques, notamment l'écoulement par bulles, par bouchons et annulaire, fait partie des points prioritaires du logiciel. Dans cette génération on va respecter l'aspect aléatoire qui est associé à ses écoulements.

En parallèle on effectuera une évaluation de l'effet de l'ouverture des électrodes sur les mesures obtenues, ainsi qu'une estimation du taux de vide moyenné dans la section de passage. Cette estimation est basée sur un calcul géométrique, déterminé par la configuration en cours.

Enfin les pseudo-sinaux générés par le logiciel de simulation subiront une analyse par la fonction de densité de probabilité (FDP) et par la fonction de densité de puissance spectrale (FDPS) pour les faire valider.

Une machine neuronale sera élaborée pour assurer «l'automatisation» dans l'identification des configurations d'écoulements. L'apprentissage d'une manière « objective » de cette dernière sera effectué à partir des valeurs obtenues des pseudo-sinaux générés par le logiciel de simulation.

Ainsi, la configuration de notre écoulement peut être caractérisée par la valeur de l'impédance électrique, ce qui va constituer une « empreinte » pour chaque configuration.

Pour ce faire on commence dans le chapitre 2, par donner un aperçu sur les principales techniques utilisées pour la mesure du taux de vide et des méthodes utilisées pour l'identification des configurations des écoulements diphasiques.

Dans le chapitre 3, on donne les équations de base et le mode suivi pour le choix de la modélisation adéquate de l'impédance.

Le chapitre 4, donne une idée sur le choix de la fréquence optimale pour la mesure des composantes de l'impédance électrique.

Dans le chapitre 5, on présente quelques résultats des simulations obtenues par le logiciel. Une comparaison avec les résultats réels provenant du laboratoire de l'institut de génie nucléaire, IGN a été aussi effectuée. Nous présentons aussi l'effet de l'ouverture des électrodes, l'impact du changement de la topologie sur la valeur de la capacité  $C$ .

Le chapitre 6, est dédié à l'analyse par FDP et FDPS.

Le chapitre 7, donne les principales caractéristiques de notre machine neuronale. Enfin le rapport est achevé par quelques recommandations et une conclusion résumant les principaux résultats.

## Chapitre 2: Revue bibliographique

Comme nous l'avons mentionné dans les paragraphes précédents, la connaissance des configurations des écoulements diphasiques est un paramètre important pour la plupart des applications industrielles. La connaissance du taux de vide représente le même degré d'importance que la connaissance des configurations des écoulements.

Comme introduction à notre sujet de recherche, on s'est proposé d'effectuer une revue bibliographique des différentes techniques utilisées pour l'identification des configurations des écoulements diphasiques et des techniques utilisées pour la mesure du taux de vide, afin de choisir l'approche la plus appropriée pour notre cas.

### **2.1    *Techniques de mesure du taux de vide***

Le besoin d'instrumentation mesurant avec précision le taux de vide a augmenté ces derniers temps. Ce qui a mené à l'élaboration de divers instruments, basés sur des techniques différentes. Hewitt [10] a abordé les principales techniques utilisées pour la mesure du taux de vide.

Ces techniques peuvent être regroupées sous deux grandes catégories : techniques de mesure du taux de vide local et techniques de mesure du taux de vide global. Dans cette partie nous abordons les principales caractéristiques de ces méthodes ainsi que leurs conditions d'utilisation.

### 2.1.1 Méthode basée sur l'absorption des rayons X et $\gamma$

Dans la technique de mesure basée sur l'absorption, le faisceau des photons généré par la source de rayons  $\gamma$ , subit des atténuations dues à la nature du matériel de la conduite et à la configuration de l'écoulement. Lorsque ce rayon atteint la chambre d'ions, il va rentrer en interaction avec les molécules de gaz présents dans cette chambre. Ce qui donne naissance à des ions et des électrons qui vont être captés respectivement, par une électrode négative et une autre positive. Ceci engendre la création d'un courant électrique proportionnel à l'intensité du rayon, ayant déjà traversé la conduite. Comme la quantité absorbée est fonction du volume occupé par la matière absorbante, on en déduit facilement le taux du vide (Teyssedou *et al.* [30]).

La méthode d'atténuation a été utilisée au début des années 60, pour la mesure du taux de vide. Elle a été largement adoptée car elle n'introduit pas de perturbations dans l'écoulement. Les systèmes de mesure du taux de vide utilisant cette technique sont classifiés en quatre catégories :

- Systèmes utilisant les rayons X. Dans ce cas la source qui génère des rayonnements électro-magnétiques, fournis par un tube à vide, est située dans une gamme de 25-60 keV.
- Systèmes utilisant les rayons  $\gamma$ . Dans ce cas l'énergie de la source des radio-isotope émet des photons avec des énergies entre 40 et 600 keV.
- Les systèmes utilisant les rayons  $\beta$  génèrent un faisceau d'électrons depuis une source (radio-isotope) avec une énergie supérieure à 10 MeV.

- Les systèmes à base de neutrons ont des sources permettent de générer des neutrons avec une énergie de l'ordre de 2 MeV.

La différence entre les quatre catégories, réside dans les lois d'atténuation et dans les équipements nécessaires pour effectuer la mesure.

Les méthodes d'atténuation délivrent la valeur moyenne du taux de vide et elles ont l'avantage de délivrer des mesures sans aucune perturbation de l'écoulement. Les inconvénients associés à ces techniques concernent le temps de détermination de mesure qui s'avère assez long, la dépendance de la mesure du taux de vide du type de la configuration d'écoulement et le besoin de rencontrer les exigences de sûreté requises (Abro *et al.*[1]). Ces deux derniers aspects limitent le champ d'application de cette technique; surtout que pour rencontrer les limites de sûreté il faut utiliser des matériaux spéciaux, ce qui contribue à l'augmentation du coût d'utilisation. Abro *et al.* [1] ont proposé l'utilisation de  $^{241}\text{Am}$  afin de réduire les dimensions des équipements et aussi les énergies nécessaires. D'un autre côté avec cette méthode, les données collectées doivent subir un traitement préalable pour pouvoir exprimer la valeur finale du taux de vide. De cette manière la notion du « temps réel » est perdue. Pour améliorer le temps de réponse, Liu et Wang [17] ont opté pour l'intégration de la méthode de Monte Carlo afin d'améliorer la précision. Cependant avec toutes ces améliorations il faut noter que le choix de la source de radiation dépend des caractéristiques du tube et que la position de la source influe notablement sur la mesure (Abro *et al.*[1]), ce qui a un impact sur les coûts. À ceci il faut ajouter que le système présente une sensibilité envers les fluctuations du taux de vide. En effet Harms [8] a démontré que avec les fluctuations du

vide la valeur de la transmittance radiative augmente, ce qui fait augmenter la valeur estimée du taux de vide par rapport à la valeur réelle.

### 2.1.2 Méthode de résonance magnétique nucléaire

La résonance magnétique nucléaire NMR est connue comme une technique de mesure pour l'étude des interactions moléculaires. Le but, dans les expériences traditionnelles est d'observer les changements des orientations des molécules, en présence d'un champ magnétique uniforme, légèrement modulé dans le temps. Ces changements sont mesurés en terme de déviations de fréquence ou en détectant la fréquence d'inversion du spin, traduisant ainsi les perturbations mineures dans les niveaux de l'énergie (Mansfield [20]). La variation de l'amplitude du signal peut être aussi adoptée pour exprimer le taux de déviation, comme le montre la formule suivante :

$$\omega = B\gamma \quad (2.1)$$

$\omega$  représente la pulsation correspondante à la fréquence de résonance,  $B$  l'amplitude du champ magnétique appliqué et  $\gamma$  constante qui dépend de certaines espèces des spins.

Les techniques de NMR ont été adoptées pour l'étude des propriétés de transport des fluides depuis 1960. Puis par après, dans les années 70, la technique de NMR a été utilisée pour l'étude du comportement hydraulique des fluides (Leblond *et al.* [16]) pour mesurer la vitesse moyenne du fluide ainsi que pour la détermination du profil de vitesse dans les régimes des écoulements laminaires. Ensuite son application a été étendue vers les configurations turbulentes, après l'introduction de la technique spin-echo, qui en

présence d'un gradient constant du champ magnétique permet la mesure de la distribution de la vitesse.

Le principe de base de cette technique est comme suit : quand un noyau possédant un moment angulaire est introduit dans un champ magnétique, il prend des orientations spécifiques. Pour ce faire il a besoin d'une quantité d'énergie de magnétisation qui va dépendre de la nature du milieu et du taux de vide. Donc en mesurant cette quantité d'énergie on serait en mesure d'établir un lien avec le taux de vide.

Pour cette technique il est important d'assurer un temps de relaxation pour la réorientation des molécules, qui devrait être effectuée dans un délai assez petit en comparaison avec le temps de résidence dans la région de mesure. Ceci est réalisable si on dope le liquide avec du sel paramagnétique.

### 2.1.3 Méthode acoustique

Les techniques acoustiques sont apparues pour la mesure du contenu du gaz dans les liquides. Cette technique a été utilisée en diphasique vers la fin des années 40 et durant les années 50. Les instruments utilisant ces techniques peuvent être subdivisés en deux grandes catégories : instruments basés sur la mesure du coefficient d'absorption (Kaatze *et al.* [14]) et instruments basés sur la mesure du coefficient d'atténuation. La technique qui a été largement adoptée dans le domaine diphasique est celle basée sur la mesure de l'atténuation de l'énergie acoustique. Cette perte d'énergie est expliquée principalement par deux événements:



- La formation de courant autour des bulles, résultant du champ sonore. Les courants ainsi formés contribuent dans l'atténuation de l'énergie acoustique.
- La dissipation d'énergie par frottement avec les bulles de gaz.

Pour la mesure de cette atténuation, la technique de réverbération s'avère un bon moyen. Cette dernière consiste dans la génération d'impulsions carrées avec une fréquence bien déterminée. Ce qui permet la création d'un champ sonore uniforme via un émetteur connecté à la section d'essai. Un autre récepteur sert à collecter le signal sonore exprimé en volt et correspondant à l'atténuation exponentielle de l'énergie acoustique. Cette mesure est effectuée après un délai du temps, accordé pour assurer la stabilité de l'écoulement. Ainsi sachant l'atténuation et le facteur d'atténuation  $Ke$  (Gavrilov [5]), on détermine la distribution des bulles.

Le facteur d'atténuation est donné par la formule suivante :

$$K_e = 1.5 \cdot 10^5 \cdot u(R_0) \quad (2.2)$$

Sachant que  $u(R_0)$  est la densité de distribution du nombre des bulles par  $cm^3$  et  $R_0$  est le rayon de la bulle.

Gavrilov [5] a constaté que la densité de distribution volumique  $u(R_0)$  a une tendance de diminuer lorsque le temps d'observation de l'eau stagnante augmente. Ce qui est tout à fait normal, puisque la stagnation va contribuer dans l'atténuation des effets hydrodynamique de l'écoulement.

D'autre part il a démontré qu'en connaissant la vitesse sonore, on serait en mesure de déterminer la concentration du gaz dans l'écoulement comme le montre la formule suivante :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\rho\chi}} \quad (2.3)$$

Sachant que  $\rho$  représente la densité et  $\chi$  le facteur de compressibilité.

Avec cette technique on est en mesure de connaître le taux du vide et la répartition des bulles. Cependant en présence d'un champ ultrasonique assez fort, il y a création d'un courant assez fort ce qui augmente le contenu en gaz et change les caractéristiques de l'eau.

#### 2.1.4 Méthode de micro-ondes

Les méthodes basées sur les micro-ondes ont été largement utilisées dans le passé pour la détermination des constantes diélectriques (Wenger et Smenta [37]). Les premières utilisations remontent aux années 60.

Le principe de base consiste à déterminer la fréquence de résonance dans une cavité de micro-ondes (Wenger et Smenta [37]) qui fait partie de l'écoulement. La fréquence de résonance dépend de la constante diélectrique du milieu et de la géométrie de l'échantillon à analyser. Elle est reliée à la densité moyenne et donc au taux du vide.

Son expression est donnée par la formule suivante :

$$f = f_0 / \sqrt{K} \quad (2.4)$$

Sachant que  $f_0$  représente la fréquence de résonance de la phase liquide toute seule et  $K$  la constante diélectrique du milieu.

Ainsi sachant la fréquence de résonance on peut déterminer la constante diélectrique du milieu et par la suite le contenu en eau dans le milieu.

Cette technique de micro-ondes est utilisée aussi pour la détermination du contenu en eau dans des mélanges diphasiques tel que la margarine. Elle a été utilisée dans l'industrie de papier, pour la mesure du taux de vide et pour la mesure de densité d'hydrogène dans des mélanges liquide-solide.

L'avantage de cette technique est son insensibilité envers le pH, ce qui est requis dans l'industrie du papier. Par contre elle est sensible aux variations de la température ambiante ainsi que l'humidité (Lindberg [18]).

La limitation du système réside dans son incapacité à détecter la fréquence de résonance pour de grand débit. Aussi le temps de réponse du système est limité par le temps pris pour la détection des phases, pour savoir si la fréquence imposée correspond à la fréquence de résonance ou non (Wenger et Smenta [37])

#### 2.1.5 Méthode de fibre optique

Quand une matière est exposée à un rayon lumineux provenant d'une source lumineuse, via une fibre optique, une interaction entre les molécules contenues dans la matière et les photons du faisceau lumineux a lieu. L'intensité lumineuse résultante de cette interaction est acheminée vers le système de détection via la même fibre optique ou une autre fibre en vue d'être mesurée.

L'interaction entre le rayon lumineux et les molécules de la matière à analyser peut se manifester sous 4 formes : absorption, luminescence, dispersion et réflexion.

Dans le cas de l'absorption, certaines fréquences du faisceau lumineux disparaissent lorsque ce dernier traverse une matière bien spécifiée (Narayanswamy et Sevilla [27]).

Dans cette opération l'énergie du photon est transmise aux molécules de la matière, ce qui se concrétise par une perte dans la puissance du rayon lumineux. Cette perte est mesurée par l'absorbance donnée par la formule de Beer-Lambert :

$$A = \log \left( \frac{I_0}{I} \right) = \varepsilon \cdot l \cdot C \quad (2.5)$$

Sachant que  $I_0$  est l'intensité lumineuse de la source d'excitation,  $I$  l'intensité lumineuse détectée,  $\varepsilon$  l'absorptivité molaire,  $l$  longueur d'ondes lumineuse et  $C$  la concentration à déterminer.

Les atomes qui ont absorbé l'énergie du photon voient leur niveau d'énergie progresser. Cette énergie supplémentaire peut être convertie en énergie thermique, ou peut être transmise par coalition à d'autres molécules voisines, comme elle peut être transformée en rayon lumineux : c'est le phénomène de luminescence. Son intensité peut être exprimée comme suit :  $I_l = k' \cdot I_0 \cdot \varepsilon \cdot \theta \cdot l \cdot C$

Sachant que  $l$  est la longueur d'ondes,  $I_0$  l'intensité de la source d'excitation,  $k'$  la fraction de l'émission qui peut être mesurée,  $\theta$  facteur du rendement optique,  $C$  la concentration à mesurer et  $\varepsilon$  l'absorptivité molaire.

Un exemple typique de l'utilisation de la luminescence, se concrétise dans la détection de changement de couleur durant l'addition titrant.

Dans certains cas lorsque le faisceau lumineux rencontre une particule de la matière, à détecter, cette dernière se met à osciller, ce qui crée une certaine perturbation dans l'orientation des rayons lumineux. C'est le phénomène de dispersion.

Par analogie avec la formule de Beer-Lambert pour l'absorbance, la dispersion peut être exprimée comme suit :

$$perte\_par\_dispersion = \log\left(\frac{I_0}{I_s}\right) = K_s C \quad (2.6)$$

Sachant que  $I_s$  est l'intensité du rayonnement dispersé,  $K_s$  constante fonction du facteur de dispersion et  $C$  la concentration à mesurer.

Le phénomène de réflexion a lieu quand le rayon lumineux frappe les surfaces de la frontière. Le facteur de réflexion  $R$  est donné par la fonction de Kubelka-Mank :

$$F(R) = \frac{(1 - R)^2}{2R} = \frac{\varepsilon \cdot C}{S} \quad (2.7)$$

Sachant que  $\varepsilon$  est l'absorptivité molaire,  $S$  coefficient de dispersion et  $C$  la concentration. Un exemple typique de ce procédé, est la détection du changement de couleur dûe pH du papier.

Le système de photo-détection typique est composé d'un convertisseur des signaux lumineux en signaux électriques et d'un amplificateur. Les signaux amplifiés sont acheminés vers un capteur de pic pour les longueurs d'ondes mesurées.

Un exemple de sonde basée sur le principe de réflexion a été présenté par Morris *et al.* [23]. Le système de mesure a été conçu de telle manière à détecter les pics résultants de

la réflexion du rayon lumineux. Le signal ainsi généré est acheminé vers un compteur de pic pour déterminer enfin la valeur moyenne du taux de vide local selon l'équation (1.1). Cependant cette technique présente une certaine sensibilité envers les fluctuations de la température et aussi envers les vibrations mécaniques, ce qui cause des pertes de puissance optiques. Pour contourner cet aspect, Morris *et al.* [23] ont décidé de mettre tous les équipements de mesure dans une boîte thermiquement isolée.

Le choix de cette technique implique la réalisation d'un compromis entre le temps d'intégration qui devrait être assez grand, pour assurer une meilleure précision et la rapidité dans le traitement du signal pour tenir compte des changements dynamiques de l'écoulement.

#### 2.1.6 Méthode de la conductivité électrique

La phase liquide et la phase gazeuse sont caractérisées par des valeurs différentes de conductivité électrique. Donc sachant la conductivité totale du mélange et sachant la conductivité respective de chacune des phases, on serait en mesure de déterminer le taux de vide correspondant au mélange. C'est le principe de la méthode de conductivité électrique.

La méthode de conductivité électrique est utilisée pour fournir le taux de vide global ou le taux de vide local, dépendamment du type de la sonde utilisée.

Pour la mesure du taux de vide global, Merilo *et al.* [21] ont proposé l'adoption d'électrodes parallèles assez larges de forme cylindrique, afin d'assurer une bonne répartition du champ électrique. Cependant cette disposition introduit des accélérations

dans le flux du fluide ce qui peut affecter la vitesse relative des phases. Pour atténuer cet effet, Merilo *et al.* [21] ont proposé l'utilisation d'un champ électrique tournant sur un système de 6 électrodes, ce qui permet d'assurer une bonne répartition du champ dans le volume (Figure 2).

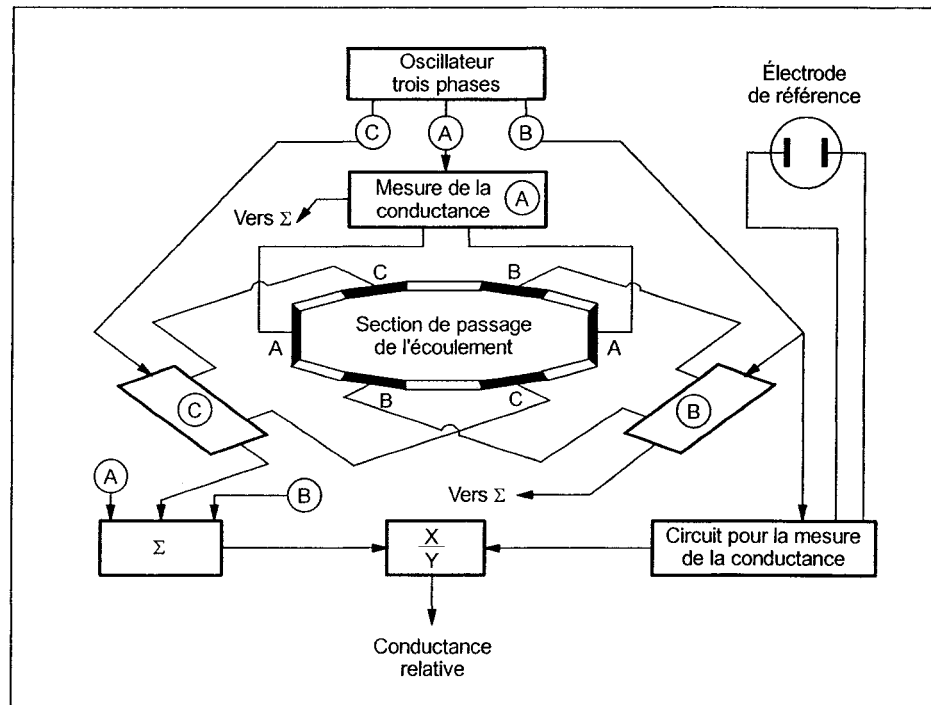


Figure 2 : Système de mesure de conductivité proposé par Merilo et al. [21].

Le système proposé est composé d'électrodes alimentées par un système de courants alternatifs équilibrés. Avec le changement de configurations, la conductivité globale change aussi. Sa valeur finale est la somme absolue des mesures fournies par les trois dispositifs de mesure. Le lien entre conductivité mesurée et le taux de vide est établi par la loi de Maxwell (Merilo *et al.* [21]) comme suit :

$$\frac{k_m}{k_0} = 1 - \frac{3 \varepsilon_v}{2 + \varepsilon_v} \quad (2.8)$$

Sachant que  $k_m$  est la conductivité du mélange,  $k_0$  la conductivité de la phase liquide toute seule, et  $\varepsilon_v$  le taux de vide.

Un exemple de mesure local du taux de vide, basé sur l'impédance électrique, a été proposé par Teyssedou *et al.* [32]. Dans ce cas la sonde est composée de deux électrodes assez proches entre elles et qui sont excitées par un courant AC ou DC (Figure 3)

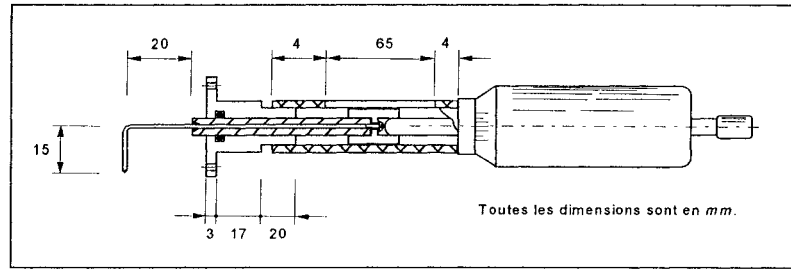


Figure 3 : Exemple de sondes à base de conductivité pour la mesure du taux de vide local, proposée par Teyssedou *et al.* [32].

Le schéma électrique équivalent du circuit de mesure est donné à la Figure 4.

L'impédance équivalente est donnée par la formule suivante :

$$Z = \frac{(\omega L + R)}{(\omega^2 LC + \omega RC + 1)} \quad (2.9)$$

Avec  $L$  l'inductance,  $R$  la résistance,  $C$  la capacité et  $\omega$  la pulsation.

Si on néglige l'inductance  $L$ , à faible fréquence on mesure la résistance électrique  $R$  et à haute fréquence on mesure la capacité électrique  $C$ .



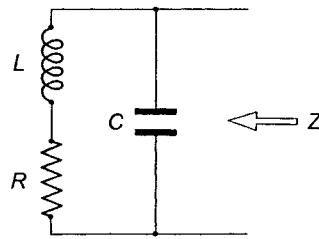


Figure 4 : Schéma électrique équivalent de la sonde proposée par Teyssedou *et al.* [32].

La méthode de conductivité électrique a été aussi adoptée pour la caractérisation de l'écoulement par poches et pour la caractérisation des bulles de Taylor dans le cas d'un écoulement vertical (Moura *et al.* [24]). En effet, avec le signal de conductivité et le signal de pression, les auteurs ont pu mesurer la fréquence de la cellule typique d'un écoulement par bouchons. Ils ont pu aussi déterminer la vitesse moyenne des bulles de Taylor, la longueur du bouchon du liquide, le taux de vide et l'épaisseur du film liquide autour des bulles de Taylor.

La technique de conductivité a été utilisée pour l'identification de l'écoulement par bouchons via des mesures dynamiques du taux de vide qui ont servi de signaux de base pour une analyse par FDP (Whalley et Costigan [36])

Dans sa recherche Merilo *et al.* [21] a constaté que dans le cas des écoulements horizontaux, le film liquide est fortement asymétrique ce qui mène à une conductance plus faible, que si la même quantité d'eau a été uniformément répartie dans la section de passage. Aussi pour un même taux du vide, la conductivité mesurée dans une canalisation horizontale est supérieure à la valeur mesurée dans une canalisation verticale. Ce qui montre la sensibilité de la technique envers la disposition des tubes.

D'autre part, il faut noter que la conductivité électrique est assez sensible au changement de la température, en plus des problèmes de corrosion et de dépôt (au niveau des électrodes) qui peuvent avoir lieu.

### 2.1.7 Méthode de l'impédance capacitive

De la même manière que la méthode de conductivité électrique, les phases liquides et gazeuses sont caractérisées par des permittivités électriques différentes. Donc sachant la permittivité du mélange, mesurée par la capacité électrique et sachant les permittivités respectives de chacune des phases, on saurait la valeur du taux de vide correspondante au mélange.

Cette technique a été adoptée pour contourner certains aspects de la méthode de conductivité électrique. En effet, face aux changements de température, la conductivité de la phase liquide double pour un écart de 25°C, pendant que la permittivité diminue de 15% (Geraets et Borst [6]). D'où le choix de l'utilisation de la capacité comme élément représentatif de la topologie de l'écoulement.

D'autre part, et dans leur recherche concernant la caractérisation des écoulements diphasiques par des électrodes capacitatives, Teyssedou et Tye [33] ont fait remarqué que dans cette technique la forme de l'électrode influe considérablement sur la mesure. Ce qui explique le développement de plusieurs formes d'électrodes. Teyssedou et Tye [33] ont opté pour une forme assez particulière telle qu'elle est montrée sur la Figure 5.

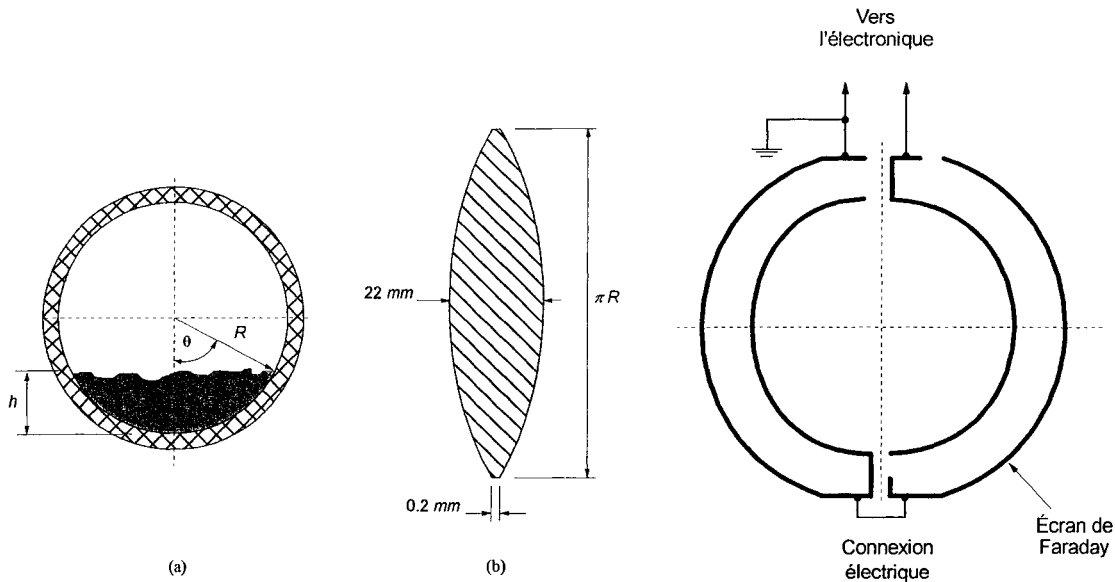


Figure 5 : Forme de l'électrode utilisée par Teyssedou et Tye [33] pour la mesure de la capacité.

Cette forme d'électrodes permet d'avoir une réponse linéaire entre la capacité et le taux de vide, pour des taux de vide inférieur à 70%. Ainsi l'instrument développé a servi pour la détermination de la vitesse de propagation des bouchons et la fréquence du bouchon dans un écoulement à contre courant.

L'utilisation de la sonde capacitive a été étendue même au domaine de la tomographie médicale et par après à la tomographie diphasique (Moura *et al.* [24]). En effet vers les années 80, la technique de tomographie a fait son apparition, pour faciliter la compréhension et la reconstruction des procédés complexe. Moura *et al.* [24] l'ont adopté pour la reproduction des configurations des écoulements stratifiés d'un mélange air-eau. Les résultats obtenus avec la technique de reconstruction d'images, projection rétroactive ou "*back projection*", étaient satisfaisants.

En résumé et à travers la revue précédente, il ressort que les sondes à base de conductivité et de capacité électriques, se distinguent des autres techniques par les aspects suivants :

- Comme les écoulements diphasiques à une dimension utilisent les équations moyennées dans les surfaces, les techniques d'impédances s'avèrent appropriées puisqu'elles permettent la mesure du taux de vide facilement sans aucun calcul compliqué ou traitement préalable de l'information. Cependant ces techniques nécessitent une calibration minutieuse.
- La nature des électrodes utilisées pour la mesure ne perturbe pas le développement de l'écoulement puisque la méthode des impédances est non intrusive.
- Pas de limitation pour le temps de réponse, si on néglige le temps du filtrage visant l'élimination des effets parasites. Ceci facilite l'identification en temps réel et rend la méthode plus précise.

Ainsi l'utilisation des électrodes à base d'impédance électrique est encourageante puisqu'elle est sensible aux changements des différentes configurations d'écoulement et aux changements du taux de vide.

## ***2.2 Techniques d'identification des configurations des écoulements***

L'identification de la configuration d'écoulement est importante pour l'exploitant car elle permet l'identification et la prise de décision ainsi que l'anticipation de situation indésirable. Par exemple dans l'industrie nucléaire, avec l'augmentation de puissance le

flux de chaleur du combustible au caloporteur augmente. À un certain seuil l'écoulement monophasique peut se transformer en écoulement diphasique; c'est le commencement de l'ébullition nucléée. Configuration qui peut être appréciée dans certains cas d'exploitation, pour favoriser le transfert de chaleur. Mais pour certaines valeurs du taux de vide la configuration de l'écoulement peut nuire tant au transfert de chaleur (flux de chaleur critique) qu'à la perte de charges. Ce qui implique un besoin de l'identification des configurations des écoulements en temps réel.

Traditionnellement l'identification des configurations des écoulements diphasiques a été basée sur les observations visuelles. Ce qui reste quand même un peu relatif, puisque la constatation dépend de l'expérimentateur.

Suite aux recherches récentes, qui ont été effectuées dans le domaine diphasique, d'autres techniques ont vu le jour. Ce qui a permis de distinguer trois catégories de méthodes:

- Méthodes traditionnelles
- Méthodes objectives
- Approches basées sur la modélisation pour la prédiction des configurations des écoulements diphasiques

Dans les prochains paragraphes on abordera en détail chacune de ces catégories.

### 2.2.1 Techniques traditionnelles

Traditionnellement l'identification de la configuration des écoulements diphasiques a été effectuée en se basant sur des observations ou sur des enregistrements vidéo à haute vitesse.

Les cartes de configurations, ont été élaborées par la suite pour faciliter la tâche d'identification. Les premières ont fait leur apparition vers 1958 grâce à Govier (Vince et Lahey [34]). Ces cartes sont conçues à partir des mesures collectées du laboratoire. Puis par après des corrélations ont été établies entre les variables représentatives et le comportement du système. Le système d'axe utilisé pour la représentation dépend du concepteur de la carte. Dans certains cas on a utilisé des variables qui caractérisent l'écoulement telles que les vitesses superficielles des phases comme dans le cas de la carte de Govier (Vince et Lahey [34]). Dans d'autres cartes on a opté pour les débits volumiques en fonction du nombre de Froude, c'est le cas de Griffith et Wallis (Vince et Lahey [34]). D'autres chercheurs ont utilisé d'autres variables plus complexes telle que l'énergie spectrale et la fréquence des signaux de mesures (Teyssedou et Han [31]).

L'inconvénient des cartes de configuration est marqué par la difficulté d'identification des configurations des écoulements lors des transitions et par leur dépendance des conditions d'exploitation.

### 2.2.2 Méthodes objectives pour l'identification des configurations

La notion « d'objectivité » a été évoquée pour « surmonter » la relativité dans les constatations et interprétation, lors de l'identification des configurations des écoulements.

L'objectivité a été définie dans le *granddictionnaire.com*, comme étant une opération où l'occurrence d'erreur est relativement faible. À cette définition on peut ajouter qu'un indicateur est considéré objectif s'il caractérise à chaque moment la configuration d'écoulement diphasique d'une manière « claire », surtout dans les transitions entre les différentes configurations d'écoulements. Ce qui semble être en concordance avec la définition proposée par Vince et Lahey [34].

Parmi les techniques qui ont été utilisées pour assurer l'objectivité, on trouve les techniques statistiques. La première utilisation des analyses statistiques remonte à 1970. Elle a été initiée par Hewitt, Telles et Dukler (Vince et Lahey [34]), qui ont examiné certaines caractéristiques statistiques des signaux de mesure. La problématique rencontrée est l'imprécision dans la mesure du taux de vide, dues aux fluctuations dans les signaux de mesure. Par après, Jones et Zuber [13] ont opté pour l'utilisation des signaux de taux de vide délivrés par des capteurs de mesure à base de rayon  $\gamma$  comme moyen pour l'identification des configurations des écoulements. Les essais ont eu lieu dans des conduites rectangulaires verticales contenant un mélange air-eau. L'objet de leur étude était de déterminer le lien entre le taux de vide et les configurations des écoulements diphasiques à partir des signaux de mesure. Par une analyse de FDP, ils

sont arrivés à montrer que cette dernière peut être utilisée pour caractériser objectivement et qualitativement les configurations des écoulements diphasiques. Ainsi par cette analyse il a été possible de déterminer d'autres paramètres tels que : l'épaisseur du film liquide, le taux de vide dans les poches d'air et la longueur des bulles dans le cas d'un écoulement par bouchons. Vince et Lahey [34] ont constaté que la caractérisation par le nombre des modes de la FDP n'est pas suffisante pour une identification objective. Dans leur analyse [34] des différentes techniques utilisées pour l'identification des configurations des écoulements, ils ont conclu que les méthodes statistiques telle que la FDP, accompagnée spécialement de la variance, peut être considérée comme un bon indicateur pour la caractérisation des configurations des écoulements diphasiques.

En 1969, Nishikawa a utilisé pour la première fois le signal de pression (Nishikawa *et al.* [26]) pour la caractérisation des écoulements diphasiques. Ce choix découle du fait que ce signal est accessible, facile à mesurer et ne nécessite aucun traitement préliminaire. Ainsi Nishikawa *et al.* se sont concentrés sur l'analyse de la partie fluctuante du signal de mesure (Nishikawa *et al.* [26]). L'inconvénient de l'approche qu'il a adoptée c'est que dans la partie fluctuante interviennent d'autres effets tel que la fluctuation due au débit de l'écoulement ainsi que d'autres effets externes non liés à l'écoulement (vibrations mécaniques). Ces effets biaisent l'information qui nous intéresse, qui est le taux de vide. En 1971, Akgawa a opté pour l'utilisation de la pression différentielle à la place de la pression absolue (Akgawa *et al.* [2]). De cette manière il a été possible d'éliminer l'effet des paramètres externes, puisque leur effet est le même le long de toute



la canalisation. Cependant il faut noter que cette technique a toujours présenté une certaine sensibilité envers la position des capteurs de pression.

La même technique a été utilisée par Han [7], pour l'identification des configurations des écoulements, à partir de l'analyse des parties fluctuantes des signaux de pression et du taux de vide. Elle a consolidé ses résultats en utilisant une analyse statistique basée sur la FDP et la FDPS. Son étude a été achevée par l'élaboration d'une carte de configuration basée sur le taux de l'énergie spectrale et de la fréquence du signal correspondant au type de la configuration de l'écoulement. Le taux de l'énergie spectrale est fonction de l'amplitude du signal ainsi que de l'énergie dissipée par l'écoulement. Cette dernière est calculée selon l'expression de Kocamustafaogullari et Lopez de Bertolamo (Han [7]).

L'analyse de bruit du signal du détecteur de neutrons, basée sur l'analyse statistique, a été utilisée au début des années 80 pour l'identification des configurations des écoulements et pour la prédiction de l'ébullition. En effet il a été constaté que les variations des états thermo-hydrauliques du caloporteur ont une influence sur la composante continue et la composante fluctuante des signaux collectés par les SPND, "*Self Powered Neutron Detector*".

Lubbesmeyer et Leoni [19] et Kozma *et al* [15] ont analysé le signal délivré par SPND en se basant sur un ensemble de paramètres statistiques dont la valeur moyenne du signal, la variance des mesures, le coefficient d'asymétrie et le coefficient d'aplatissement. Par après, ils ont établi des corrélations entre les différentes

configurations d'écoulement et les signaux de mesure. Une validation par FDP a été effectuée pour consolider les résultats obtenus.

À travers cette analyse, les auteurs ont confirmé les résultats obtenus par Jones et Zuber [13] correspondants aux allures des FDP de toutes les configurations des écoulements. Pour l'écoulement par bouchons, il possède une FDP caractérisée par une distribution bimodale et une large variance. Cette variance traduit le caractère oscillatoire causé par les poches d'air générées d'une façon périodique. Le coefficient d'aplatissement, qui est associé à cette configuration d'écoulement est plus petit que 3.

Pour les autres configurations, écoulement par bulles et écoulement annulaire, ils ont trouvé qu'elles sont caractérisées par une FDP comportant un pic aux alentours des valeurs faibles du taux de vide pour le cas d'un écoulement par bulles et par un pic dans les alentours des grandes valeurs du taux de vide dans le cas d'un écoulement annulaire. Au terme de cette étude, les auteurs ont pu établir un lien entre les configurations des écoulements et les formes des FDP qui leur correspondent (Figure 6).

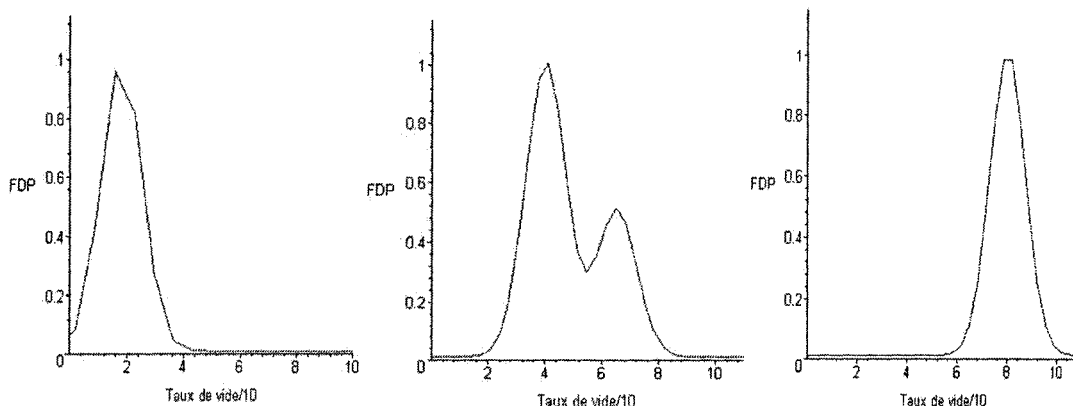


Figure 6 : De gauche à droite; FDP de l'écoulement par bulles, FDP de l'écoulement par bouchons et FDP de l'écoulement annulaire.

Dans le domaine de la tomographie médicale l'utilisation des systèmes multi-electrodes a été largement adoptée. En effet leur utilisation permet une meilleure reconstruction du contenu du milieu compris entre les différentes électrodes couvrant la section de passage.

Certains chercheurs dans le domaine diphasique se sont inspirés de cette technique pour l'identification des configurations de écoulements. Xie et Plaskowski [38] ont opté pour l'utilisation de 8-électrodes capacitatives pour l'identification de la configuration de l'écoulement. Pour ce faire, ils ont construit des pseudo-signaux à partir des mesures collectées des différentes électrodes capacitatives et ce pour des configurations d'écoulements bien déterminées. Ainsi les mesures collectées en temps réel à partir des différentes électrodes vont constituer des pseudo-siganux qui vont être comparés aux signaux de référence pour pouvoir effectuer l'identification des configurations des écoulements diphasiques.

### 2.2.3 Modèles mathématiques pour la prédiction et la détermination des configurations des écoulements

L'utilisation de modèles analytiques a montré de bons résultats dans l'identification des configurations des écoulements. Cependant les modèles mathématiques proposés sont valables dans des conditions bien déterminées, telles qu'un écoulement stationnaire (de point de vue statistique), adiabatique, etc. Les modèles mathématiques ont été développés pour résoudre le problème de l'identification des transitions entre les

différentes configurations des écoulements. L'ensemble des modèles proposés a été basé sur l'utilisation des vitesses superficielles du liquide et du gaz. Han [7] a présenté une revue détaillée de l'ensemble des modèles proposés dans ce contexte dont certains ont été axés sur la modélisation de la FDP des signaux de mesure.

### **2.3 Utilisation des réseaux de neurones dans le domaine des écoulements diphasiques**

Les réseaux de neurones ont connus une large application dans le domaine de la tomographie médicale et le domaine du traitement des images.

Leur utilisation a été un peu timide dans le domaine diphasique. En effet, leur utilisation a été restreinte à l'identification des configurations des écoulements. En 1998 Ishii *et al.* [12] ont adopté les réseaux de neurones pour la caractérisation des structures d'interface dans les écoulements diphasiques. Pour ce faire, ils ont procédé à une étude comparative entre réseaux "*multilayer perceptron*" (MLP) et "*self organizing mapping*" (SOM.) Une fois les réseaux sont conçus, ils ont procédé à la validation croisée en utilisant une partie des données de même nature que celles utilisées pour l'apprentissage. Alors ils se sont aperçus que le système n'arrive pas à bien identifier certaines configurations. En effet dans le réseau MLP, malgré que l'apprentissage soit supervisé, la généralisation n'est pas assurée à tous les coups. En plus (comme on va le voir plus tard au chapitre Chapitre 7:) le traitement préalable des données a une grande influence sur le résultat de l'identification.

Concernant les réseaux SOM, comme leur processus d'apprentissage n'est pas supervisé, il est normal de constater certains dysfonctionnements dans l'étape d'identification des configurations des écoulements.

## **2.4 Discussion**

L'adoption des cartes de configurations pour la caractérisation de la topologie des écoulements diphasiques ne peut être utilisée qu'à titre indicatif. En effet ces cartes présentent certaines limitations puisqu'elles sont valables pour des conditions assez précises de pression et de débit, sans oublier leur forte dépendance du type de la géométrie de la conduite. D'un autre côté l'identification des transitions entre les différentes configurations n'est pas évidente dans le cas des cartes.

L'utilisation des modèles mathématiques, peut être une bonne alternative puisque c'est une méthode plus précise permettant d'assurer l'objectif désiré qui est « l'objectivité » dans l'identification. Cependant elle exige la connaissance de plusieurs paramètres et l'accomplissement de plusieurs conditions, sans oublier le taux d'erreur introduit à cause de la modélisation.

Par contre il a été démontré que l'utilisation de la FDP accompagnée de ses 4 moments statistiques est un moyen efficace pour l'identification des configurations des écoulements diphasiques. D'où sa large utilisation pour la consolidation des différentes techniques. Cependant l'intervention de l'utilisateur est nécessaire pour confirmer les observations.

Afin de pallier à telle situation, l'utilisation des réseaux de neurones, peut être une solution efficace au problème, surtout si on garantit un apprentissage « objectif ».

## Chapitre 3: Théorie de base

Pour comprendre l'effet qu'exerce le changement d'une configuration sur la distribution des lignes du champ électrique et sur l'impédance électrique, il est nécessaire de passer par une modélisation du champ électrique imposé à un milieu diphasique. C'est ce qu'on se propose de présenter dans les prochains paragraphes, pour le cas d'une section de passage à géométrie circulaire et à géométrie carrée.

### ***3.1 Modélisation de la configuration de l'écoulement dans la section du passage***

L'accomplissement des objectifs spécifiés dans les paragraphes précédents, nécessite la modélisation du type de la topologie d'écoulement présente dans la section de passage. En d'autres termes la modélisation de l'impédance représentant le milieu dans la section de passage. Pour ce faire, nous avons considéré l'équation de Laplace avec l'équation de continuité, découlant du théorème de Gauss. Étant donné que les conditions limites et les conditions aux frontières changent en continu, la résolution analytique de l'équation Laplace s'avère lourde. D'où le choix de l'utilisation de la méthode numérique puisqu'elle permet l'intégration des différentes conditions dans le programme de calcul. Le système des équations ainsi obtenues, peut être résolu par toutes les méthodes numériques : la méthode des différences finies, des éléments finis, etc. La méthode

utilisée pour la résolution de l'équation de Laplace est la technique des différences finies.

La Figure 7 montre un exemple de coupe transversale correspondant à un écoulement par bulles dans la section de passage à géométrie circulaire et géométrie carrée.

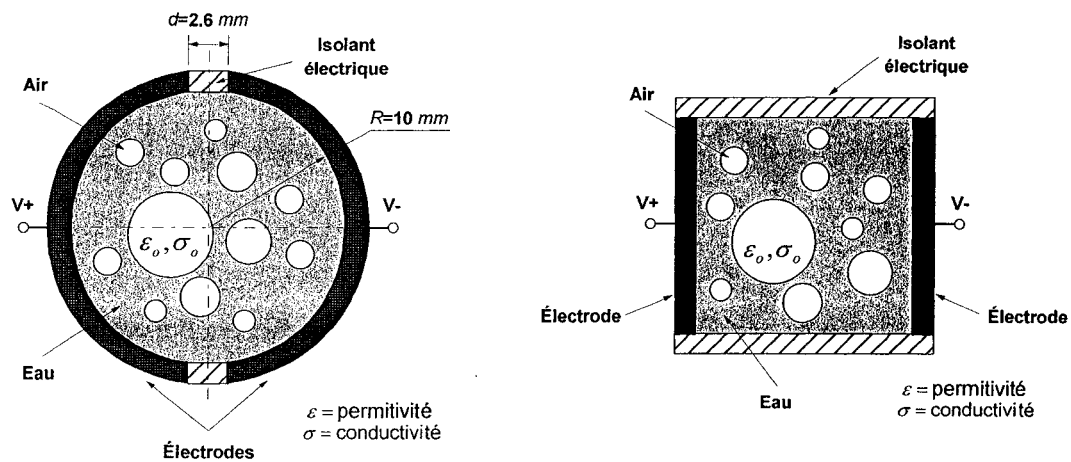


Figure 7: Structure de la section de passage pour les deux types de section de passage, circulaire et carrée.

Dans les deux figures on distingue cinq zones :

- Une zone liquide.
- Une zone gazeuse.
- L'interface entre la partie liquide et la partie gazeuse.
- La partie couverte par les électrodes.
- La partie couverte par l'isolant séparant les deux électrodes.

L'objectif de la modélisation est de pouvoir recalculer les valeurs de la composante capacitive et résistive de l'impédance qui va caractériser le type de configuration de



l'écoulement. Pour ce faire on détermine la répartition du potentiel dans la section de passage ce qui nous permettra la détermination des composantes de l'impédance.

### 3.1.1 Équations de référence

Dans un écoulement diphasique, la distribution spatiale de l'air et du liquide change en fonction de la configuration d'écoulement. Ainsi l'air se trouve concentré au centre du canal et le liquide sur la paroi.

Dans notre approche, le mélange eau-air est assimilé à un diélectrique caractérisé par une permittivité moyenne  $\varepsilon$  et une conductivité moyenne  $\sigma$ . Ces valeurs moyennes vont changer avec le changement de la configuration de l'écoulement.

Ceci d'un part, d'autre part on sait que le comportement des diélectriques en présence de champ électrique est régi par les équations de Poisson et celle de Laplace qui découlent du théorème de Gauss. Ces équations nous permettent la détermination de la répartition du potentiel dans la section de passage.

Dans notre mélange d'eau-air, on suppose qu'il n'y a pas de charges libres donc la répartition volumique des charges est nulle. Dans ce cas, le système peut être décrit par l'équation de Laplace.

$$\nabla \cdot (\varepsilon(r, \theta) \nabla V(r, \theta)) = 0 \quad (3.1)$$

Sachant que  $\varepsilon$  est la permittivité du milieu qui dépend de la position du point dans le maillage et  $V$  est le potentiel dans le point de coordonnées  $(r, \theta)$ . Cette équation permet de déterminer la répartition du potentiel et par conséquent celle du champ électrique qui

est donné par l'équation suivante  $\vec{E} = -\vec{\nabla}(V(r, \theta))$ .  $r$  et  $\theta$  sont les coordonnées cylindriques correspondant à un point du domaine et  $\vec{\nabla}$  est l'opérateur gradient.

Comme la topologie de l'écoulement dans la section de passage est hétérogène, la distribution spatiale de la permittivité ( $\epsilon$ ) dans la section de passage n'est pas clairement identifiée. Or on a démontré que notre écoulement peut être réparti en cinq zones différentes (Figure 7). Dans ce cas :

- À l'intérieur des régions liquides et gazeuses, l'équation de Laplace devient comme suit :  $\nabla^2 V = 0$ .
- Sur l'interface entre liquide et gaz, la répartition du potentiel se fera selon le théorème de Gauss.
- Sur la partie isolante, la variation du potentiel est considérée comme étant linéaire, car la résistivité de l'isolant est assez élevée.

Analytiquement, l'équation de Laplace peut être résolue par plusieurs techniques. Ces dernières peuvent être obtenues en utilisant l'une des méthodes suivantes : séparation de variables, développement en série ou la méthode intégrale.

La forme générale de la solution s'écrit comme suit :

$$V(\rho, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} (A_n \rho^n + B_n \rho^{-n}) (C_n \cos(n\phi) + D_n \sin(n\phi)) \quad (3.2)$$

Sachant que  $n$  est un entier,  $A_n$ ,  $B_n$ ,  $C_n$ ,  $D_n$  sont des constantes qui dépendent des conditions aux frontières,  $\rho$  et  $\theta$  sont les coordonnées cylindriques correspondant à un point du domaine.

Comme nous l'avons expliqué au début du chapitre, dans le cadre de notre projet nous avons opté pour la solution numérique. Ainsi on discrétise l'équation de Laplace dans les différentes zones de la section de passage tenant compte de la topologie de l'écoulement et de la disposition des électrodes. Dans les parties suivantes on présente l'équation détaillée pour chacun des milieux.

Pour un point situé à l'intérieur de l'un des deux milieux, gazeux ou liquide, la structure est considérée comme étant homogène. Donc la permittivité  $\varepsilon$  est considérée comme constante, sachant que ses variations en fonction de la température sont négligeables. Alors dans ces espaces, la forme discrétisée de l'équation se présente comme suit :

$$V_{ij} = \frac{1}{4} (V_{i+1,j} + V_{i-1,j} + V_{i,j+1} + V_{i,j-1}) \quad (3.3)$$

Le potentiel sur les électrodes est constant, comme le montre la Figure 7 : une électrode est portée à  $V_+$  et l'autre à  $V_-$ . Ainsi sur l'ensemble des points faisant partie de l'électrode de gauche, le potentiel est le même et il est porté à  $V_+$  et pour les points faisant partie de l'électrode de droite leur potentiel est porté à  $V_-$ .

Dans la partie isolante, la valeur du potentiel électrique est considérée comme étant linéaire. En effet la partie isolante est assimilée à un conducteur à forte résistance. Donc le potentiel, le long de cette partie isolante va se comporter linéairement par rapport aux potentiels sur les deux électrodes. Comme la partie isolante est assez courte, elle va être assimilée à un segment horizontal. Dans ce cas l'équation discrétisée s'écrit comme suit :

$$V_{ij} = \frac{i \cdot h}{L} (V_+ - V_-) + V_+ \quad (3.4)$$

Sachant que  $h$  est le pas du maillage,  $L$  la longueur de la partie isolante,  $V_+$  et  $V_-$  représentent les potentiels sur les deux électrodes et  $i$  l'indice du point du maillage.

Sur l'interface eau-air, le potentiel sur l'interface est déterminé en se référant à l'équation de continuité du déplacement électrique. Ainsi pour une unité de longueur l'équation de continuité s'écrit :

$$\oint \vec{D} \cdot d\vec{l} = \oint \varepsilon \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0 \quad (3.5)$$

Sachant que  $\varepsilon$  est la permittivité du milieu et  $l$  représente le contour d'intégration (Figure 8 et Figure 9).

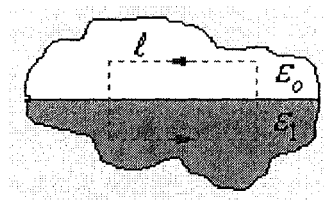


Figure 8 : Présentation du contour d'intégration entre l'interface liquide et gazeuse.

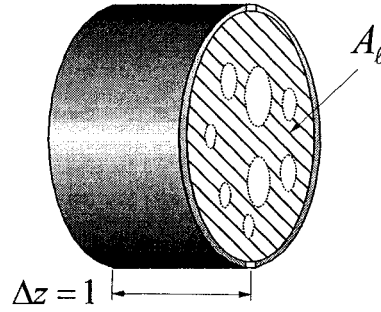


Figure 9 : Vue 3D de la section de passage.

Ce qui mène à l'équation discrétisée suivante :

$$V_0 = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_1 + \varepsilon_0} V_1 + \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_0} V_3 + \frac{1}{4} V_2 + \frac{1}{4} V_4 \quad (3.6)$$

Avec  $\varepsilon_0$  la permittivité de l'air et  $\varepsilon_l$  la permittivité du liquide.  $V_0$  représente le potentiel sur l'interface air-liquide, au centre du maillage.  $V_1$  et  $V_3$  représentent les potentiels respectivement dans la partie gazeuse et la partie liquide.  $V_2$  et  $V_4$  représentent les potentiels sur l'interface air-liquide, de part et d'autre du centre de maillage (Figure 10).

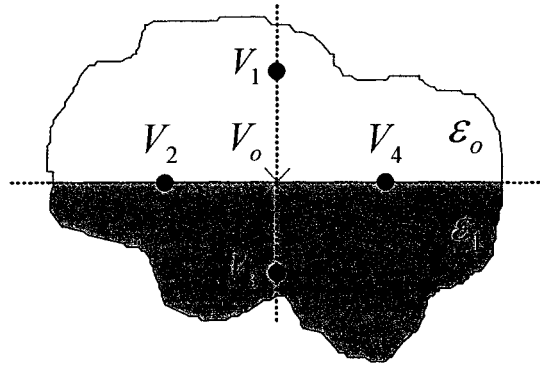


Figure 10: Répartition du potentiel sur l'interface.

Pour l'estimation de la valeur de la capacité électrique du système il est nécessaire de déterminer la charge électrique. Cette dernière représente la quantité de charges

déposées sur les surfaces internes des électrodes, sous l'effet du champ électrique appliqué. La quantité de charges est déduite d'après le théorème de Gauss

$$Q = \oint_S \epsilon \vec{E} \cdot \vec{ds}.$$

Ainsi la capacité par unité de longueur est de la forme :

$$C = Q/(V_+ - V_-) \quad (3.7)$$

La résistance du milieu, par unité de longueur, est déterminée à partir de la géométrie de la configuration d'écoulement dans la section de passage. Sa formule est donnée comme suit :

$$R = l/(\sigma \cdot S) \quad (3.8)$$

Avec  $S$  la surface de la partie liquide,  $\sigma$  représente la conductivité du milieu liquide et  $l$  longueur de calcul. Dans nos calculs, la conductivité de l'air a été négligée.

En résumé les équations utilisées sont comme suit :

- Le potentiel dans les points de l'interface gaz-liquide vérifie l'équation suivante :

$$V_{ij} = \frac{1}{4} (V_{i+1,j} + V_{i-1,j} + V_{i,j+1} + V_{i,j-1})$$

- Sur l'interface l'équation régissant la continuité du potentiel pour les points vérifiant cette condition, se présente comme suit :

$$V_0 = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0}{\epsilon_1 + \epsilon_0} V_1 + \frac{1}{2} \frac{\epsilon_1}{\epsilon_1 + \epsilon_0} V_3 + \frac{1}{4} V_2 + \frac{1}{4} V_4$$

- La capacité électrique du système est donnée par la formule suivante :

$$C = Q / (V_+ - V_-)$$

Sachant que :

$$Q = \oiint_S \epsilon E \cdot ds \quad (3.9)$$

- La résistance est calculée comme suit :  $R = l / (\sigma \cdot S)$

### 3.1.2 Méthodes numériques :

Pour répondre à nos besoins en terme de calcul de capacité et de modélisation de l'impédance de l'écoulement, on a opté pour la méthode des différences finies appliquée à un maillage de type cartésien.

Pour optimiser le taux de convergence nous avons fait appel à la technique de sur-relaxation. En effet cette méthode vise à introduire dans la solution un facteur « intermédiaire » qui est le paramètre de sur-relaxation. D'où le nom de “successive overrelaxation” SOR. La méthode est convergente si le facteur de sur-relaxation est compris entre 0 et 2. Entre 0 et 1 on parle de sous-relaxation. Le choix optimal de ce facteur est dicté par la formulation de Chebyshev.

$$\omega = \frac{2}{1 + \sqrt{1 - \rho_{Jacobi}^2}} \quad (3.10)$$

où  $\rho_{Jacobi}$  représente le rayon spectral de l'itération. Pour un problème formulé en coordonnées cartésiennes le rayon spectral de l'itération de Jacobi peut s'exprimer comme suit :

$$\rho_{Jacobi} = \frac{\cos(\frac{\pi}{J}) + \left(\frac{\Delta x}{\Delta y}\right)^2 \cos(\frac{\pi}{L})}{1 + \left(\frac{\Delta x}{\Delta y}\right)^2} \quad (3.11)$$

Sachant que  $J$  et  $L$  représentent le nombre de nœuds dans la partie horizontale, et  $L$  le nombre de points dans la partie verticale. Dans notre cas comme les deux nombres sont égaux, alors le paramètre se réduit à  $\rho_{Jacobi} = \cos(\frac{\pi}{N})$ . La convergence asymptotique n'est atteinte qu'après un nombre  $N$  d'itérations.

Tenant compte de l'accélération de Chebyshev l'algorithme proposé est le suivant :

$$V_{new} = (1 - \omega)V_{old} + \omega V_{calculé} \quad (3.12)$$

Avec :

$$\omega^{(n+1/2)} = \frac{1}{(1 - \rho_{Jacobi}^2 \omega^{(n)} / 4)} \quad (3.13)$$

$V_{old}$  représente le potentiel donné par l'itération antérieure.  $V_{calculé}$  représente le potentiel calculé selon les équations (3.3) à (3.6).

D'autres méthodes peuvent être utilisées pour la résolution de l'équation de Laplace; telle que la méthode de Monte Carlo, la méthode spectrale et la méthode variationnelle ainsi que la méthode des éléments finies. La méthode spectrale est utilisée pour des géométries assez régulières et elle converge plus rapidement que les méthodes de différence finies.

Pour le choix optimal du paramètre  $\omega$  nous étions amenés à effectuer une série d'essais visant à vérifier que le paramètre optimal est celui donné par l'algorithme de Chebechev.



Pour une section circulaire et pour un écoulement tout liquide, les résultats des tests sont résumés dans le Tableau 1.

Pour leur élaboration nous avons procédé d'abord à fixer le potentiel sur les électrodes à  $\pm 100V$ . On a par la suite considéré un maillage de  $100 \times 100$  points et on a réalisé les essais pour une configuration d'écoulement où il y a une seule phase liquide. Ainsi pour chaque valeur du facteur de SOR, le programme détermine le nombre d'itérations nécessaires pour atteindre le critère de convergence fixé.

Tableau 1: Données de suivi du nombre des itérations en fonction du facteur de sur-relaxation

Coefficient de sur-relaxation ( $\omega$ )	<i>Nb itérations</i>
0.1	3080
0.5	2820
0.8	3178
1	3036
1.2	3339
1.6	395
1.6	3167
1.8	3108
1.9	2978
1.96	2929
2	9959

Du Tableau 1 il ressort que la valeur optimale pour le facteur de sur-relaxation, c'est à dire qui assure le moindre nombre d'itérations, est celle donnée par l'algorithme de Chebechev.

### 3.2 Impédance équivalente de l'écoulement dans la section de passage

Tout matériel peut être décrit par ses propriétés telle que la conductance, la permittivité et la perméabilité. Dans notre modélisation on se propose de considérer ces propriétés afin de décrire les changements provoqués par la topologie de l'écoulement se trouvant dans la section de passage.

L'écoulement que nous avons considéré dans notre étude est un mélange d'eau et d'air.

Les caractéristiques des composantes de l'écoulement sont résumées dans le Tableau 2.

Tableau 2: Caractéristiques diélectrique de l'eau et du gaz.

	<i>Eau</i>	<i>Air</i>
$\sigma$	0.05 S/m	négligeable
$\varepsilon$	$87 \times \varepsilon_0$	$8.8566.10^{-12}$ F/m

$\varepsilon_0$  représente la permittivité de l'air. La perméabilité  $\mu$ , de l'air est de l'ordre de  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m. Celle de l'eau est inférieure que ces valeurs et donc elle est négligeable.

L'effet de chacun des paramètres est traduit par une composante électrique bien identifiée :

- $\sigma$  est représentée par la conductance ou la résistance électrique,

- $\mu$  est représentée par l'inductance électrique,
- $\varepsilon$  est représentée par la capacité électrique.

### 3.2.1 Hypothèses

Dans notre simulation nous avons considéré un tube entouré de deux électrodes (Figure 11), une est mise à la terre et l'autre est excitée par un signal de pulsation  $\omega_{opt}$  correspondant à la fréquence du signal d'excitation.

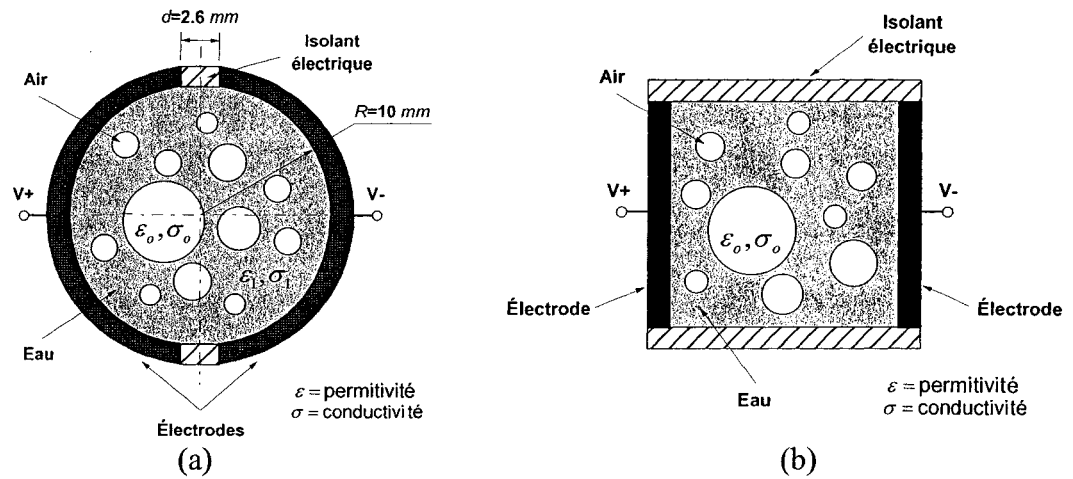


Figure 11: Vue de face de la section de passage du tube d'essai- (a) section de passage circulaire, (b) section de passage carrée.

- Les deux électrodes sont séparées par une partie isolante.
- Le rayon du tube d'essai est de  $1 \text{ cm}$ , cas de section circulaire et  $2 \text{ cm}$  de côté pour la section carrée.
- Le maillage possède  $100 \times 100$  points dans la section de passage,
- La permittivité relative de l'eau est de 87.
- La conductivité de l'eau est de  $0.05 \text{ S/m}$ .

- La profondeur de peau<sup>1</sup> est négligeable.
- La perméabilité des deux milieux est négligeable. De ce fait l'inductance ne figure pas dans la modélisation du système. Aussi le champ magnétique induit par la présence du champ électrique est très faible et il est négligeable.
- D'autre part, il a été démontré que avec l'augmentation de la température il y a augmentation de la résistance électrique de l'eau. Cependant, l'effet de la température sur la conductivité sera ignoré dans notre étude.

D'après une étude qui a été entamée par Mizuno et Naito [22], il a été démontré que le champ électrique affecte la distribution de la température dans l'isolant et par suite les propriétés du matériel. Étant donné que cet effet est important pour des intensités de champ élevé et que dans notre cas nous allons utiliser des champs à faible intensité, cet effet est négligeable.

Dans les tests qui ont été menés dans le passé au laboratoire de *IGN*, il a été démontré que l'utilisation du courant continu génère une polarisation de l'eau menant ainsi à la constitution d'un film autour des électrodes. C'est ce qui explique « la stagnation » des mesures, même en présence de changements dans les configurations d'écoulement. D'où l'utilisation de signal sinusoïdal pour l'élimination de cette polarisation.

Aux voisinages des électrodes et pour des champs électriques très élevés, il a été démontré qu'il y a formation de bulles à cause des échauffements locaux (Aka-Ngnui et Beroual [3]). Ces bulles perturbent la structure de l'écoulement. Cependant ces perturbations seront négligées lors de cette étude.

---

<sup>1</sup> Pour plus de détail sur l'effet de peau voir 4.1

Aussi dans le cadre de notre étude on va négliger les chutes de potentiel électrique, dues à la résistance électrique des électrodes. L'inductance équivalente du milieu séparant les deux électrodes sera aussi négligeable

### 3.2.2 Expression analytique de l'impédance

L'effet de changement des configurations des écoulements diphasiques sur le comportement du champ électrique se manifestera par le changement dans la distribution des lignes équipotentielles. Ceci va affecter la valeur de l'impédance électrique, d'où la nécessité de modéliser l'impédance globale. Pour ce faire, on peut utiliser deux approches :

- Approche macroscopique
- Approche microscopique

Dans l'approche microscopique on détermine les différentes caractéristiques électriques (résistance et capacité) correspondantes à la configuration de l'écoulement dans chacune des cellules, du maillage qui a été réalisé pour la résolution numérique de l'équation de Laplace. Le principe de l'approche consiste dans la détermination de la capacité  $C$  et de la résistance  $R$  au niveau de chacune des cellules (Figure 12). Puis, à effectuer la combinaison de ces différentes valeurs, de résistance et de capacité, en fonction de la structure du maillage afin de déterminer la valeur de capacité et de résistance équivalente pour toute la structure. La détermination de  $C$  et de  $R$  au niveau de chacune des cellules s'avère être une approche difficile, vue que la charge électrique par cellule est non définie surtout qu'on a supposé pas de charge libre dans le milieu.

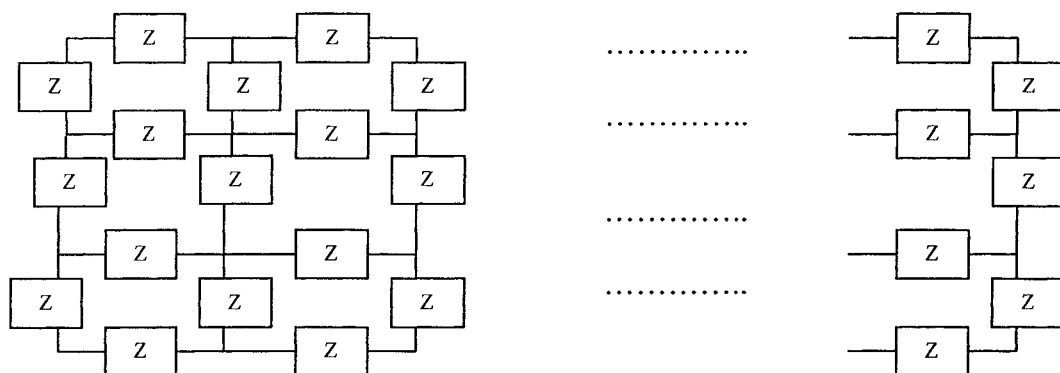
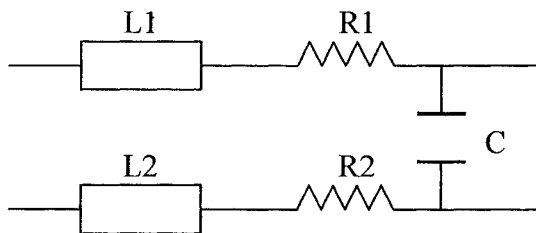


Figure 12 : Schéma de l'approche microscopique.

Dans l'approche macroscopique, on s'est inspiré de la modélisation des lignes de transport électrique. Donc par similitude avec les lignes de transport électrique l'espace entre les deux électrodes (assimilées à 2 lignes de transport; voir Figure 13 ), constitue un diélectrique caractérisé par une permittivité « équivalente » qui se traduit par la valeur de la capacité électrique du système.



L1 et L 2 sont les inductances respectives de la ligne 1 et de la ligne 2.  
 R1 et R2 sont les résistances respectives de la ligne 1 et de la ligne 2  
 C est la capacité mutuelle entre ligne 1 et ligne 2

Figure 13 : Schéma d'une ligne électrique.

Or ce milieu diélectrique n'est pas parfait, il possède une conductance qui doit être estimée. La disposition des deux éléments,  $C$  et  $G$ , peut être effectuée en parallèle (Figure 14) ou en série (Figure 15).

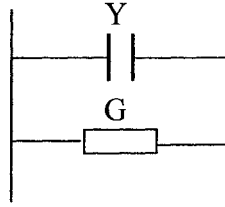


Figure 14: Schéma équivalent d'une conductance  $G$  et de la susceptance ( $Y=j\omega C$ ,  $G=1/R$ ).

La capacité, caractérisant le milieu séparant les deux électrodes est calculée numériquement suivant l'approche proposée dans le paragraphe précédent et ce pour les différentes configurations d'écoulements.

La résistance, inverse de la conductance caractérisant le milieu est à son tour déterminée pour les différentes configurations d'écoulement suivant l'approche mentionnée précédemment.

Ainsi en fonction de la disposition des deux éléments  $R$  et  $C$ , l'expression finale de

l'impédance pour laquelle on a opté se présente comme suit :  $Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{R} + j\omega C$ . Ceci

mène à l'équation suivante :

$$Z = \frac{R}{[1 + (RC\omega)^2]} [1 - jRC\omega] \quad (3.14)$$

Sachant que  $R$  est la résistance,  $C$  la capacité et  $\omega$  la pulsation du signal d'excitation.



Ainsi le module de l'impédance peut s'écrire comme suit :

$$\|Z\| = \frac{R\sqrt{1+(RC\omega)^2}}{[1+(RC\omega)^2]} \quad (3.15)$$

Et l'angle de phase est donné par la formule suivante :

$$\arg Z = \arctg(-RC\omega) \quad (3.16)$$

La structure en série de la résistance et de la capacitance (Figure 15), peut aussi servir pour la caractérisation de l'écoulement dans la section de passage.

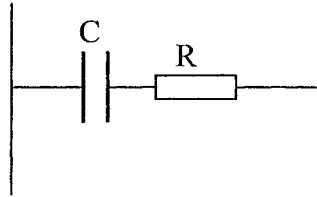


Figure 15: Schéma équivalent de capacité et résistance en série.

Dans ce cas l'impédance peut s'écrire comme suit :

$$Z = R + \frac{1}{j\omega C} \quad (3.17)$$

ce qui donne :

$$\|Z\| = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (3.18)$$

et

$$\arg(Z) = \arctg\left(\frac{-R}{\omega C}\right) \quad (3.19)$$

Des expressions précédentes pour le module et l'argument de l'impédance, il découle que :

- Pour de faibles fréquences,  $\|Z\| \approx \left(\frac{1}{\omega C}\right)$  et  $\arg(Z) \longrightarrow -\frac{\pi}{2}$
- Pour de grandes valeurs de fréquences on a  $\|Z\| \approx R$  et  $\arg(Z) \longrightarrow 0$

Une comparaison entre les deux approches, modélisation série et modélisation parallèle, a été effectuée. Le paramètre de comparaison considéré est *le coefficient de corrélation* entre, d'un côté, le module de l'impédance et les valeurs du taux de vide et d'un autre côté, l'argument de l'impédance et le taux de vide.

La comparaison a pour objectif de déterminer la structure la plus appropriée pour chacune des configurations des écoulements et chacune des sections de passage.

Le facteur de corrélation a été déterminé selon la formule suivante :

$$\rho_{X,Y} = \frac{Cov(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (3.20)$$

avec

$$Cov(X,Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \mu_x)(Y_i - \mu_y) \quad (3.21)$$

$\mu_x$  étant la moyenne de la série  $X$  et  $\mu_y$  étant la moyenne de la série  $Y$  et  $n$  étant le nombre des données des deux séries.  $\sigma_x$  et  $\sigma_y$  sont les écarts types calculés pour chacune des séries de données.

Ainsi on a calculé pour un ensemble de fréquences et pour chacune des modélisations, le facteur de corrélation entre le taux de vide (simulé) et le module de l'impédance et la corrélation entre le taux de vide et l'argument de l'impédance. Dans le Tableau 3, nous avons présenté les résultats correspondants à un écoulement par bulles pour une fréquence variant de  $100\text{Hz}$  à  $50.7\text{MHz}$ .

D'après ce tableau on constate que l'adoption du modèle « série » implique qu'il y a une bonne corrélation (valeur de corrélation proche de 1) simultanément entre le module de l'impédance et le taux du vide et d'autre part, entre l'argument de l'impédance et le taux du vide. Par contre avec le modèle parallèle, une seule « bonne » corrélation est garantie. Il s'agit de la corrélation entre le module de l'impédance et le taux du vide. La corrélation entre le taux du vide et l'argument de l'impédance est très faible. Or à travers notre sujet de recherche, on cherche à ce que les deux effets, à savoir capacitif et résistif qui apparaissent dans le module et l'argument de l'impédance de la structure, soient représentés. D'où notre décision d'opter pour la modélisation série dans le cas d'un écoulement par bulles.

La Figure 16 montre le comportement du module et de l'argument de l'impédance en fonction du taux de vide pour une fréquence de  $100\text{Hz}$ , dans le cas d'un écoulement par bulles.

Tableau 3: Évolution du module et de l'Argument d'impédance, pour structure série et parallèle - cas écoulement par bulle section circulaire.

Fréquence	modèle parallèle		modèle série	
	coef_corr_imp	coef_corr_arg	coef_corr_imp	Coef_corr_arg
<b>100.00</b>	0,996026178	0,680261087	0,80074854	-0,891352294
<b>1,000.00</b>	0,996026178	0,480241087	0,80074854	-0,891352294
<b>3,000.00</b>	0,996026178	0,480241087	0,80074854	-0,891352294
<b>10,000.00</b>	0,996026178	0,480241089	0,80074855	-0,891352294
<b>50,000.00</b>	0,9960269	0,480241137	0,80074871	-0,891352294
<b>100,000.00</b>	0,996026225	0,480241286	0,80074921	-0,891352294
<b>500,000.00</b>	0,996027351	0,48024606	0,80076523	-0,891352294
<b>1,500,000.00</b>	0,996036074	0,480285796	0,80089864	-0,891352294
<b>9,500,000.00</b>	0,995392345	0,48947775	0,80663776	-0,891352294
<b>10,500,000.00</b>	0,995007411	0,482303335	0,80790732	-0,891352294
<b>30,500,000.00</b>	0,956842231	0,492260839	0,8509009	-0,891352294
<b>40,500,000.00</b>	0,927121613	0,496930041	0,87757547	-0,891352294
<b>40,700,000.00</b>	0,926552458	0,497013469	0,87810064	-0,891352294
<b>50,700,000.00</b>	0,900699439	0,500668632	0,90300348	-0,891352294

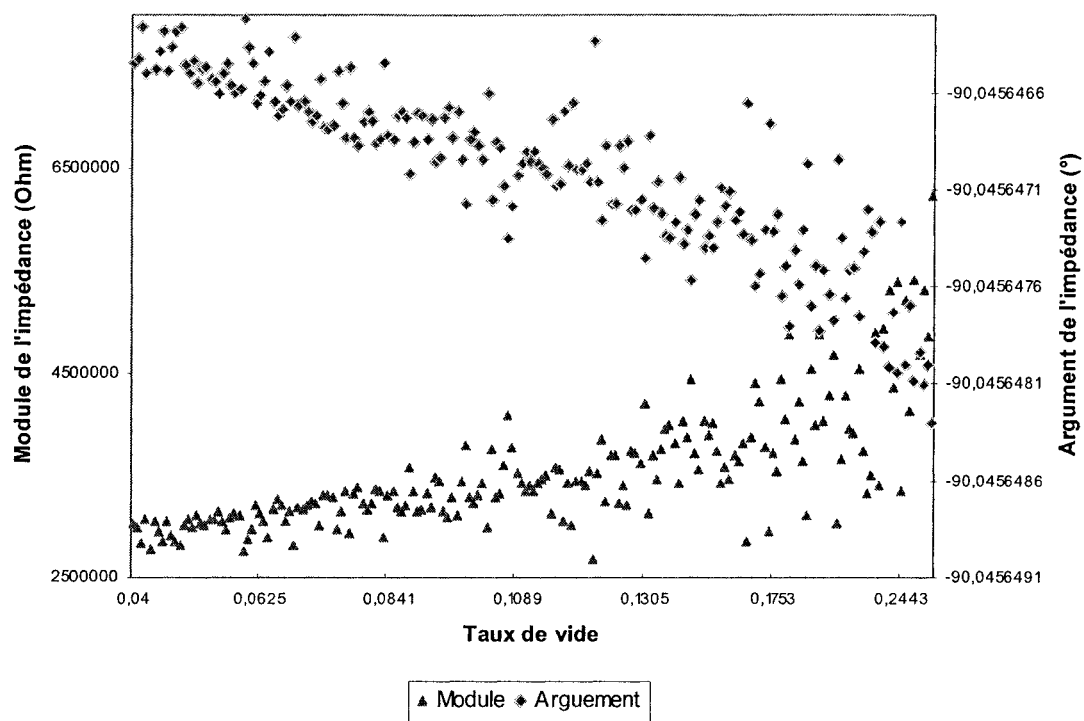


Figure 16 : Évolution du module et de l'argument de l'impédance en fonction du taux de vide.

Les cas des autres configurations d'écoulement est traité dans la section 5.2.9. Le résumé de ces résultats se trouve dans le Tableau 4.

Tableau 4: Structure d'impédance adopté au type de la configuration de l'écoulement

	<i>Section circulaire</i>	<i>Section carrée</i>
<i>Écoulement par bulles</i>	Série	Série
<i>Écoulement par bouchons</i>	Série	Série
<i>Écoulement annulaire</i>	parallèle	Parallèle

### 3.2.3 Techniques de mesure de capacité

Les capteurs capacitifs sont largement utilisés dans tous les domaines de l'industrie. Ils sont utilisés pour la mesure de pression, la mesure du niveau, la mesure du déplacement, la mesure de densité, etc...La valeur à mesurer est souvent assez faible et elle est de l'ordre de quelques  $pF$ . Ce qui nécessite l'utilisation d'instruments à grande sensibilité et faible dérive. Les instruments de mesure de la capacité, doivent donc assurer une faible dérive, une haute sensibilité et une bonne stabilité.

Parmi les circuits de mesure de capacité électrique, on trouve le circuit basé sur la résonance (Huang *et al.* [11]). L'approche consiste à ajuster la fréquence du circuit de telle manière à ce que ce dernier se met en résonance, c'est à dire une phase nulle. Un circuit typique de mesure est montré dans la Figure 17.

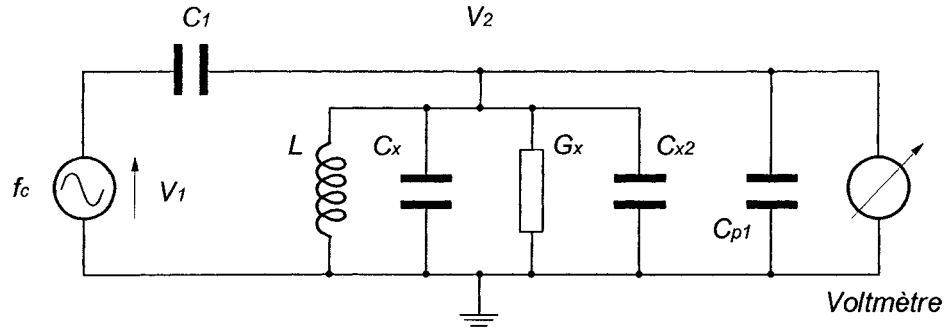


Figure 17 : Exemple de circuit de résonance (Huang *et al.* [11]).

Une fois le circuit est en résonance, la valeur de la capacité,  $C_x$ , est déduite à partir de l'équation suivante :

$$(2\pi f_c)^2 L(C_1 + C_x + C_{x2} + C_{p1}) = 1 \quad (3.22)$$

Avec  $C_1$  la capacité connue,  $C_{x2}$  et  $C_{p1}$  les capacités parasite,  $L$  l'inductance connue et  $f_c$  la fréquence de résonance.

La conductance  $G_x$  est déterminée selon l'équation suivante :

$$\frac{G_x}{(j2\pi f_c + G_x)} = \frac{V_2}{V_1} \quad (3.23)$$

et aussi

$$G_x = \frac{I_r}{V_1} \quad (3.24)$$

Donc sachant le courant  $I_r$  qui passe dans le circuit on peut déterminer la capacité caractérisant le procédé et la conductance qui lui est associée en fonction de la fréquence de résonance.

Cependant il faut noter que les circuits utilisant l'approche de la résonance nécessitent des étapes préliminaires à la mesure, telle que l'ajustement de la fréquence de résonance, le temps nécessaire pour effectuer les étapes préliminaires, ainsi que l'impact du changement de la fréquence sur la permittivité. Ceci limite le champ d'application de cette approche, surtout pour la mesure en temps réel.

La méthode de chargement et de déchargement est une autre technique de mesure de capacité (Huang *et al.* [11]). Cette dernière diffère des autres techniques par le fait qu'elle permet la détermination de la capacité à partir du détecteur de charges électriques. Ainsi la capacité à déterminer est chargée via un switch CMOS, puis elle est déchargée dans un détecteur de charge via un autre switch qui permettra par la suite la détermination de la valeur de la capacité.

La Figure 18 montre un exemple de circuit utilisé par cette technique. Le circuit utilisé par cette technique permet de réduire l'effet de dérive. Mieux encore la mesure de la capacité inconnue n'est pas affectée par la conductance parasite qui lui est associée en parallèle. Par contre la stabilité du système est limitée à cause de la capacité parasite.



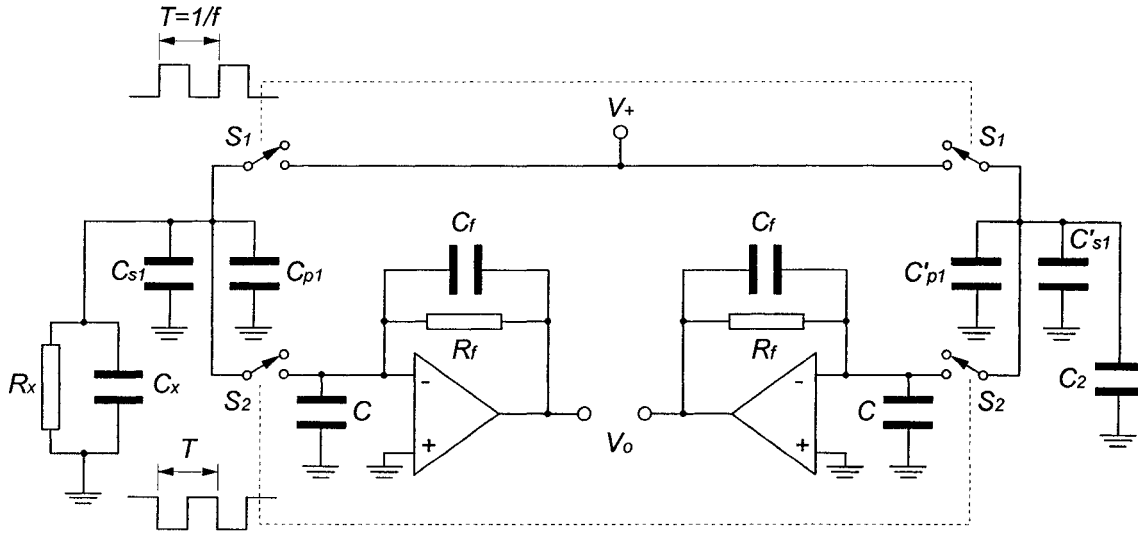


Figure 18 : Un circuit typique utilisant la méthode de chargement et déchargement  
Huang *et al.* [11].

La procédure consiste à charger la capacité inconnue  $C_x$  au potentiel  $V_+$  via le switch  $S_1$ . Par après on la décharge dans un détecteur de charge via un second switch  $S_2$ .  $C_{p1}$ ,  $C_{s1}$ ,  $C'_{p1}$  et  $C'_{s1}$  sont des capacités parasites.

Dans un cycle de chargement et déchargement de la capacité  $C_x$ , la quantité de charge électrique accumulée est  $Q = V_+ \cdot C_x$ . Le courant de décharge moyen est donné par

$I_m = V_+ \cdot C_x \cdot f$ ,  $f$  étant la fréquence du contrôle de l'horloge. La différence de potentiel

entre l'entrée et la sortie est donnée par l'expression

$$V_o = f \cdot V_+ \cdot R_f \left[ (C_x - C_2) + (C_{s1} - C'_{s1}) + (C_{p1} - C'_{p1}) \right].$$

$R_f$  représente la résistance du détecteur et  $C_2$  représente la capacité de référence. Donc sachant la valeur de  $V_o$  et des autres capacités, on serait en mesure de déterminer la valeur de la capacité inconnue  $C_x$ .

D'autres méthodes existent pour la détermination de la capacité électrique, telles que la méthode du circuit oscillant et la méthode du pont de Wheatstone.

### ***3.3 Présentation du logiciel de simulations***

Pour atteindre les objectifs attendus, une série de programmes a été développée. Ces programmes sont capables de générer pour chacune des configurations des écoulements diphasiques, la distribution des équipotentielles correspondantes. Dans le logiciel, on a intégré une procédure pour la génération aléatoire des différentes configurations et on a aussi tenu compte de la possibilité d'excitation avec un signal sinusoïdal. Nous avons aussi développé un module pour une section de passage à géométrie circulaire et un autre pour une section de passage à géométrie carrée.

L'application développée possède comme données d'entrées : le type de la configuration à simuler, le diamètre du tube, le nombre de nœuds choisis pour le maillage de la section de passage, les amplitudes du potentiel d'excitation sur les deux électrodes, la longueur des électrodes, la fréquence d'échantillonnage pour le signal d'entrée, la permittivité de l'eau et de l'air.

Tenant compte de ces données, l'application génère aléatoirement des bulles d'air avec des tailles et positions différentes et ce pour chacune des configurations des écoulements considérées. Elle permet aussi de déterminer la distribution du potentiel et du champ électrique dans la section de passage comprise entre les électrodes. Enfin elle permet aussi la détermination de la valeur de la capacité électrique totale correspondante à la section de passage entre les deux électrodes.

La valeur de la résistance électrique totale, dans la section de passage, est aussi déterminée en fonction de la géométrie de l'écoulement.. Une fois ceci est effectué la détermination du module et de l'argument de l'impédance électrique en fonction de la fréquence optimale, devient possible.

La valeur estimée du taux de vide est aussi possible sachant la topologie de l'écoulement dans la section de passage.

L'organigramme de la Figure 19 résume l'ensemble des étapes suivies dans le programme de calcul.

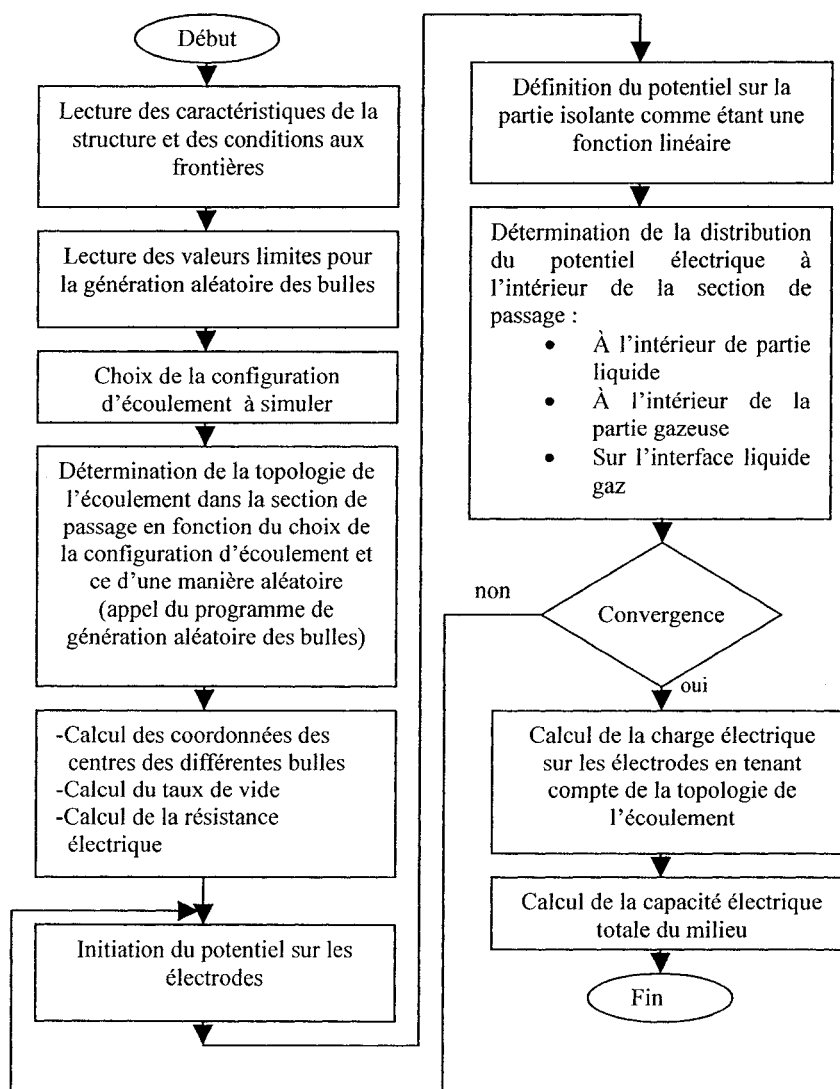


Figure 19: Organigramme du programme de génération de pseudo signaux pour la capacité et la résistance.

## Chapitre 4: Choix de la fréquence optimale pour le système de mesure

L'utilisation d'un signal sinusoïdal ressort de la nécessité d'éviter la polarisation au niveau des électrodes. D'un autre côté, l'utilisation de la fréquence est imposée par la technique choisie pour la mesure de la capacité. Une des techniques qu'on peut adopter dans ce cas est la technique de chargement et de déchargement. Dans ce cas le choix d'une fréquence optimale s'impose pour assurer une meilleure mesure lors de l'élaboration de l'instrument de mesure.

L'optimalité dans le choix suppose la combinaison entre différents aspects. Entre autres, la considération des contraintes imposées par la méthode utilisée dans la mesure de la capacité électrique  $C$ , ainsi que la considération de l'effet de peau  $\delta$  qui est affectée par la fréquence. Le choix définitif doit aussi garantir une bonne corrélation entre l'impédance mesurée et le taux de vide<sup>2</sup>.

### 4.1 Effet de peau

L'effet de peau est un phénomène traduisant la concentration des densités de courant, généralement condensées sur les faces du conducteur exposé à la source de ces courants. Les charges électriques se concentrent sur une couche assez mince, proche de la surface du conducteur. La profondeur de cette couche est mesurée par  $\delta$ , appelée profondeur de

---

<sup>2</sup> Cet aspect sera traité en détail par la suite à la section 5.2.9

l'effet de peau. Ainsi l'épaisseur de l'effet de peau, traduit le mode de répartition, dans la section de passage, du champ électrique et donc du courant électrique. Cette répartition affecte aussi la distribution des lignes équipotentiels. Dans le cas des lignes du transport électrique, ceci influe sur les pertes de charge électriques (potentiel). Dans notre cas, cet effet risque d'affecter l'impédance électrique globale représentant le type de configuration de l'écoulement diphasique. L'épaisseur de cette couche est donnée par :

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon f}} \quad (4.1)$$

Sachant que  $f$  est la fréquence en  $Hz$ ,  $\mu$  la perméabilité relative du milieu et  $\epsilon$  la permittivité relative du milieu. Ainsi la couche de concentration du champ électrique deviendrait plus mince si la fréquence, la perméabilité ou la conductivité augmentent.

Pour éviter qu'un tel effet puisse avoir lieu, on a le choix entre deux options :

- s'assurer que la profondeur de l'effet de peau soit égale au rayon de la section de passage de notre tube. Ce qui correspond à une fréquence assez faible.
- ou bien négliger cet effet en rendant la fréquence la plus élevée possible.

C'est cette dernière option qui semble être la plus appropriée, puisque dans notre cas on serait amené à utiliser des fréquences non négligeables, pour la détermination de la capacité électrique du système. Cependant la fréquence choisie doit demeurer inférieure aux fréquences affectant le comportement de la permittivité (Figure 20).

De cette manière on va garantir que la répartition de la densité du courant, des lignes de champ et des équipotentielles ne sera affectée que par le changement de la configuration de l'écoulement et elle ne sera affectée par aucun autre événement hors celui engendré par l'écoulement.

#### **4.2 Perte dans les matériaux diélectriques**

La présence du champ électrique variable dans le temps mène à l'induction de pertes électriques dans le milieu en question. Ces pertes peuvent être classifiées en deux catégories. Pertes causées par le courant de fuite et pertes causées par l'absorption diélectrique. Les deux types de pertes dépendent de la fréquence d'exploitation.

En effet, avec l'augmentation de la fréquence, les forces de frottement, de rappel ainsi que celles dues à l'agitation des atomes et molécules augmentent leur opposition à l'orientation des dipôles présents dans la structure. Ceci a une double conséquence. D'abord, le travail développé pour contrecarrer les forces de friction consomme de l'énergie prélevée au champ électrique. Cette énergie se dissipe dans le milieu sous forme de chaleur. Ensuite, l'existence de ces forces mène à l'introduction d'un certain retard dans l'orientation des dipôles. Ce qui se traduit par un déphasage non négligeable entre les champs  $\vec{D}$  et  $\vec{E}$ . Pour traduire ce déphasage, la permittivité réelle est remplacée par une grandeur complexe dont la partie imaginaire traduit les pertes énergétiques.

$$\vec{D} = \epsilon^* \cdot \vec{E} \quad (4.2)$$

avec  $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$

Sachant que  $\varepsilon'$  représente la partie réelle de la permittivité et  $\varepsilon''$  la partie imaginaire de la permittivité. La permittivité en fonction de la fréquence est donnée par la Figure 20.

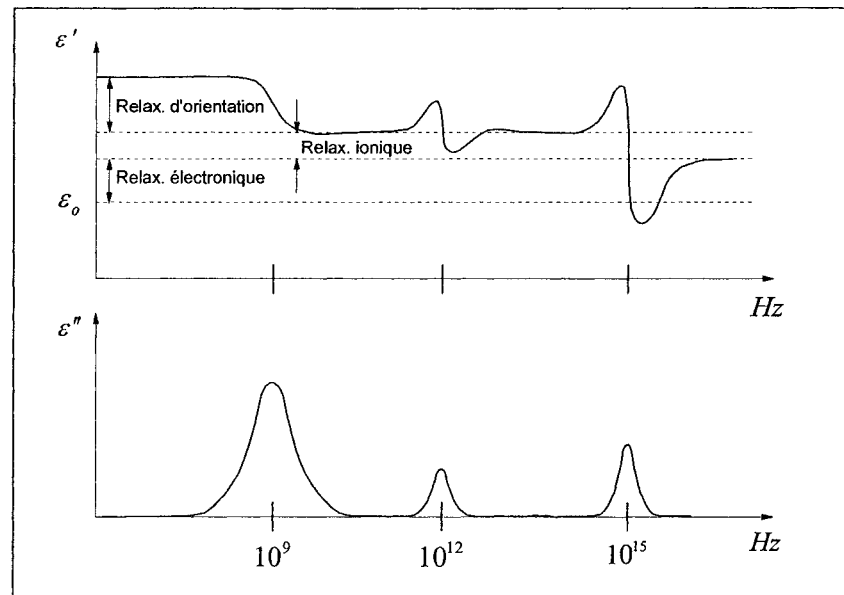


Figure 20 : Évolution de la partie réelle et imaginaire de la permittivité, en fonction de la fréquence.

D'après cette figure, il ressort qu'à partir de certaines fréquences la permittivité commence à chuter et les pertes commencent à augmenter, ce qui s'explique par une réduction de la capacité.

Ces pertes dues à l'absorption électrique et au courant de fuite peuvent être mesurées par le facteur de perte traduisant le déphasage entre le courant et le potentiel aux bornes de la capacité. En effet, quand un courant alternatif passe à travers une capacité, le déphasage entre le courant et la tension est différent de  $90^\circ$ , la valeur du déphasage



théorique. Cette différence dans le déphasage traduit les pertes constatées dans le milieu.

Pour un diélectrique parfait sans pertes, le facteur de puissance s'écrit sous forme de :

$$\cos \phi = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot R \cdot C \cdot 10^{-9} \quad (4.3)$$

Où  $f$  est la fréquence en Kilocycles/s,  $C$  capacité en  $\mu F$ ,  $R$  valeur de la résistance en  $\Omega$  et  $\Phi$  angle de déphasage (Figure 21).

Dans notre cas, nous nous sommes intéressés à cette notion de pertes dans un objectif de déterminer le choix optimal de la fréquence permettant d'améliorer la qualité de détection en fonction de la nature de la topologie de l'écoulement dans les différentes sections de passage des tubes.

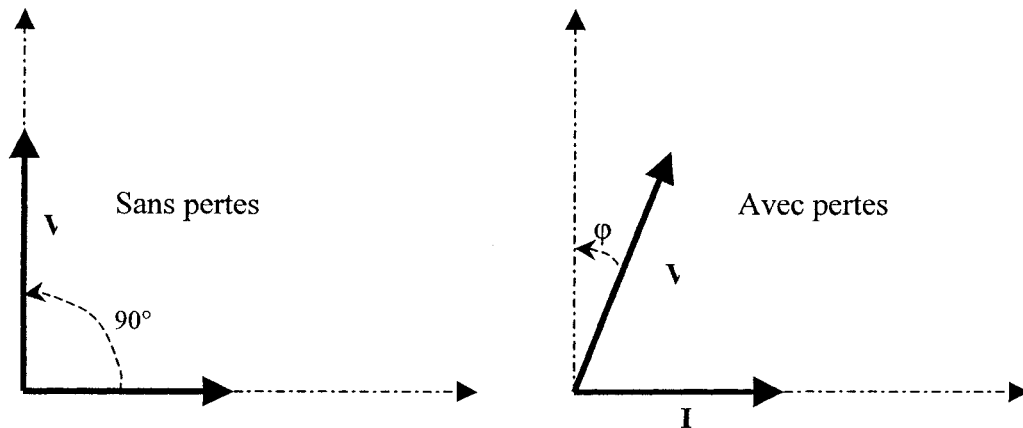


Figure 21 : Définition du déphasage  $\phi$  entre tension et courant électriques.  $\phi=90-\phi$ .

### 4.3 La rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique est exprimée comme étant la différence de potentiel maximale

qu'une matière isolante ou un diélectrique peut supporter sans risque de

claquage. Elle s'exprime en volts par millimètre d'épaisseur. Par exemple la rigidité électrique de l'air est de l'ordre de 3KV/mm.

Dans notre cas on a tenu à signaler ce phénomène pour en tenir compte dans le choix de la matière et des dimensions de l'isolant, séparant les deux électrodes, afin d'éviter tout risque de court-circuit entre les deux électrodes. En effet avec l'augmentation de la fréquence, la permittivité de l'isolant diminue, ce qui mène à la diminution de la rigidité diélectrique.

#### ***4.4 Effet de la fréquence sur la valeur de mesure de la capacité***

La capacité électrique est une caractéristique du système; elle ne dépend ni du potentiel ni de la fréquence du signal. Cependant pour sa mesure, la plus part des circuits proposés déterminent une impédance comprenant entre autres la capacité électrique; donc l'intervention de la fréquence est inévitable. Un exemple de ces circuits de mesure, est le circuit utilisant la méthode de chargement et du déchargement (voir chapitre précédent).

Le choix de la fréquence doit garantir une certaine corrélation dans les mesures. Ceci revient à assurer un bon coefficient de corrélation entre, d'une part le module de l'impédance et le taux de vide et d'autre part, entre l'argument et le taux de vide. Dans ce sens on a entamé une étude analytique dont les résultats se trouvent répertoriés dans la section 5.2.9.

Par exemple pour le cas d'un écoulement par bulles dans une section à géométrie circulaire, il résulte que la corrélation est assurée avec le taux du vide, simultanément

par le module de l'impédance et son argument, pour toutes les fréquences et particulièrement pour les fréquences élevées et ce pour une modélisation type série. Les principaux résultats de l'analyse entamée à la section 5.2.9., sont présentés dans le Tableau 5.

Tableau 5: Fréquence recommandée pour chacune des configurations d'écoulement en fonction de la géométrie de la section de passage.

	<i>Section circulaire</i>	<i>Section carrée</i>
<i>É. par bulles</i>	$\geq 50.7\text{MHz}$	$\geq 50.7\text{MHz}$
<i>É. Par bouchons</i>	$\geq 50.7\text{MHz}$	$\geq 50.7\text{MHz}$
<i>É. annulaire</i>	$< 10.5\text{MHz}$	$\geq 50.7\text{MHz}$

#### 4.5 Discussion

En conclusion dans ce chapitre nous proposons l'utilisation d'une fréquence élevée pour garantir une bonne précision dans la mesure de la capacité. Cependant, afin de rester toujours conforme aux hypothèses, la fréquence choisie devrait rester dans des marges acceptables, c'est à dire inférieure aux *GHz*.

## **Chapitre 5: Résultats des simulations :**

Dans ce chapitre on se propose de fournir un résumé des résultats obtenus lors des simulations effectuées. Ainsi, on commence par donner une idée sur l'approche suivie dans les simulations, puis on présente l'effet de la topologie sur la valeur de la capacité et ce dans les deux cas de sections de passage. À savoir la section à géométrie circulaire et la section à géométrie carrée.

Dans le cadre des simulations que nous avons entamées, nous avons constaté que l'ouverture des électrodes, pour le cas de section circulaire, a une influence sur les valeurs de la capacité. Une étude dans ce sens a été effectuée pour la détermination de l'ouverture la plus appropriée.

Aussi une étude pour la détermination de la fréquence optimale d'opération, sera présentée dans le cadre de ce chapitre.

### ***5.1 Approche suivie dans la simulation des configurations des écoulements diphasiques***

La procédure que nous avons suivie pour la simulation des différentes configurations d'écoulement consiste à effectuer un « échantillonnage » de chacune des configurations pour un ensemble fini de cas. Ces derniers ont été simulés, un par un, pour décrire la configuration de l'écoulement en question.

Les configurations que nous avons considérées sont : l'écoulement par bulles, l'écoulement par bouchons et l'écoulement annulaire.

Ces écoulements sont supposés avoir lieu dans des sections à géométrie carrée et à géométrie circulaire.

Pour la génération des ces configurations, il fallait définir la gamme de variation des tailles des bulles et le mode de leur formation. Pour ce faire nous nous sommes référés aux essais effectués par Han [7]. Les résultats de ses mesures vont servir de référence pour comparer le comportement des pseudo-signaux générés par notre logiciel de simulation avec les signaux collectés lors des essais.

#### 5.1.1 Conditions de mesure et résultats de Han

Han [7] a effectué une série de mesures dans une section d'essais à géométrie carrée, à l'Institut de génie nucléaire au laboratoire de thermohydraulique. La section de test est constituée d'un canal de  $2m$  de longueur et  $161.3mm^2$  de section de passage. La température de l'eau a été maintenue constante à  $20\pm 0.5^\circ C$  durant toutes les expériences. Pour couvrir toutes les configurations possibles, Han a varié le flux massique de l'eau de  $1000Kg/m^2s$  à  $2000Kg/m^2s$  et le débit de l'air a varié de 0 à  $9.175m^3/h$ . L'objectif de ces essais était d'effectuer l'identification des configurations des écoulements diphasiques à partir des fluctuations des signaux de pression et du taux de vide. Les données collectées provenaient des capteurs de pression et des électrodes électriques.

Dans notre cas, nous avons opté pour l'utilisation des mesures provenant des électrodes électriques comme référence pour les comparaisons qui suivent. Les signaux délivrés par ces électrodes sont fournis en terme de potentiel. Pour convertir cette information en taux de vide, nous avons procédé comme suit. Lorsque la différence du potentiel est

considérable, on a associé à cette configuration l'écoulement annulaire où le taux de vide est élevé. Pour une différence de potentiel faible, cette dernière correspond à un écoulement à dominance liquide (pour plus de détail voir 7.10.1).

La Figure 22, montre le cas du signal de la différence du potentiel normalisé.

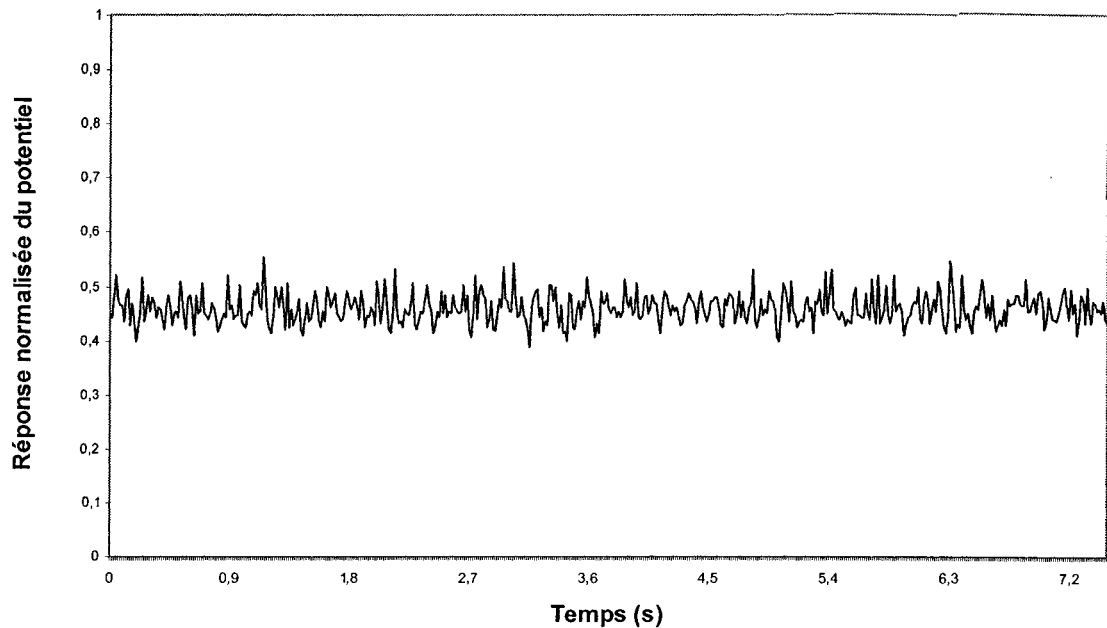


Figure 22: Signal de l'écoulement par bulles signal (Han [7]).

Pour les écoulements par bouchons, les expériences effectuées au laboratoire montrent que, les signaux collectés ont une composition spectrale maximale à une fréquence d'environ 5Hz. Les écoulements par bouchons ont tendance à se comporter comme les signaux périodiques (Figure 23). Cette périodicité est due au passage des bouchons de liquide séparés par des bulles de Taylor ayant différentes longueur (Han [7]).

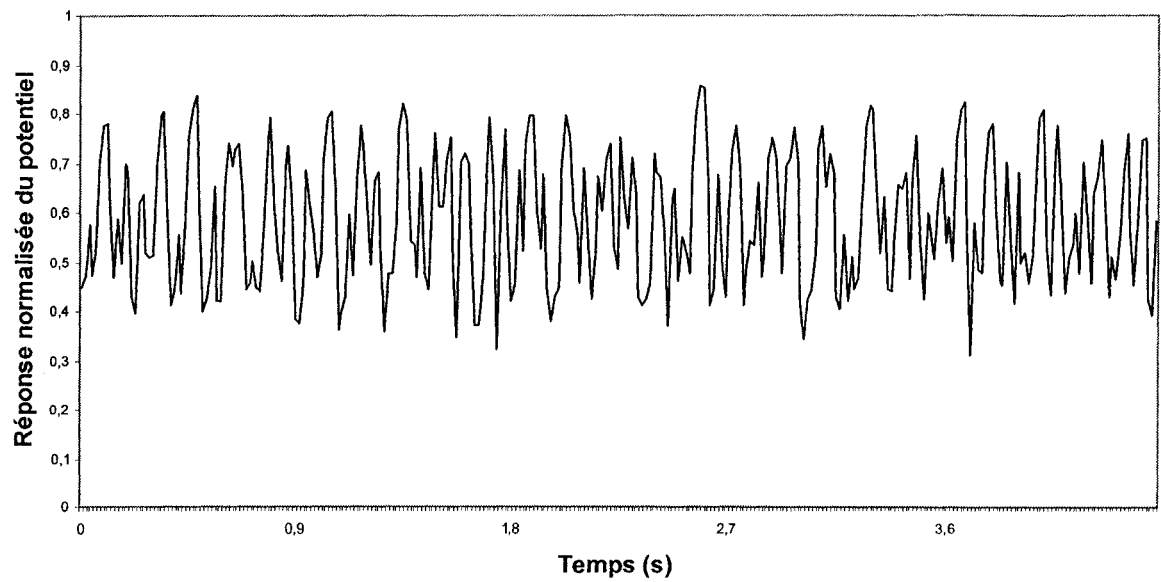


Figure 23: Signal de l'écoulement par bouchons (Han [7]).

L'écoulement annulaire est un écoulement caractérisé par une couche mince de liquide entourant la paroi du tube, tandis que le centre du tube est occupé par le gaz pouvant contenir ou non des gouttelettes de liquide (Figure 24).



Figure 24 : Écoulement annulaire.

Lors des tests qui ont été entamés dans l'étude de Han [7], on a constaté que les signaux collectés des écoulements annulaires ont une fréquence de l'ordre de 12Hz et un comportement oscillatoire dont la valeur moyenne du taux de vide avoisine 80%. (Figure 25).

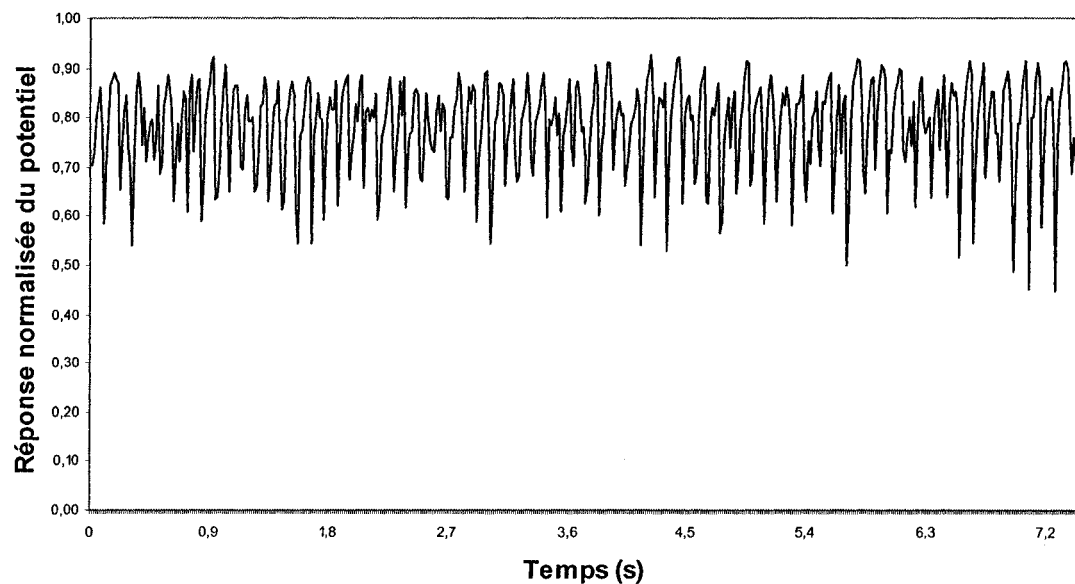


Figure 25: Signal écoulement annulaire (Han [13]).

### 5.1.2 Données de base pour la génération aléatoire des configurations des écoulements

La génération *aléatoire* des différentes configurations rentre dans le cadre du renforcement de notre approche orientée « objective » dans l'identification des configurations des écoulements diphasiques. Cependant pour procéder à cette génération, il a fallu choisir une référence. La notre c'était les essais effectués par Han et qui ont eu lieu dans le laboratoire de IGN.



Pour les écoulements par bulles, le programme commence par la génération d'un nombre aléatoire des bulles dont le diamètre et la position varient librement dans un intervalle de diamètres, telles qu'elles sont observées dans les situations réelles. Chaque bulle est caractérisée par, la distance séparant son centre de celui de la section de passage, par sa position angulaire par rapport à l'horizontale et par son propre rayon.

Les données utilisées par notre logiciel pour l'écoulement par bulles sont présentées dans le Tableau 6.

Tableau 6: Données de références pour la génération aléatoire d'un écoulement par bulles.

<i><b>Écoulement par Bulles</b></i>	<i><b>min</b></i>	<i><b>Max</b></i>
<i><b>Nombre de bulles par section</b></i>	1	7
<i><b>Distance par rapport au centre (cm)</b></i>	0	0.8
<i><b>Angle de bulles (rad)</b></i>	0	6.28
<i><b>Rayon de bulles (cm)</b></i>	0.2	0.35

Une fois les bulles sont générées, le logiciel contrôle d'un côté s'il n'y a pas de chevauchement entre bulles et d'un autre côté, que toutes les bulles sont bien à l'intérieur de la section de passage considérée. Dans le cas contraire on procède à la réduction des diamètres des bulles ou à leur élimination.

Une fois le processus de génération de bulles est terminé la détermination des valeurs de résistance, de capacité et du taux de vide devient possible, sachant la topologie créée.

Quand à l'écoulement par bouchons, celui-ci est caractérisé par des poches d'air qui sont généralement suivies par des bouchons de liquide. Ce dernier contient généralement des bulles de petites tailles (Figure 26).

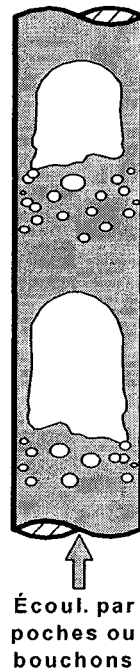


Figure 26: Écoulement par bouchons.

Pour la génération de cette configuration on fait appel à la Figure 26. Un exemple de l'échantillonnage de cette configuration est montré dans les Figure 27 et Figure 28.

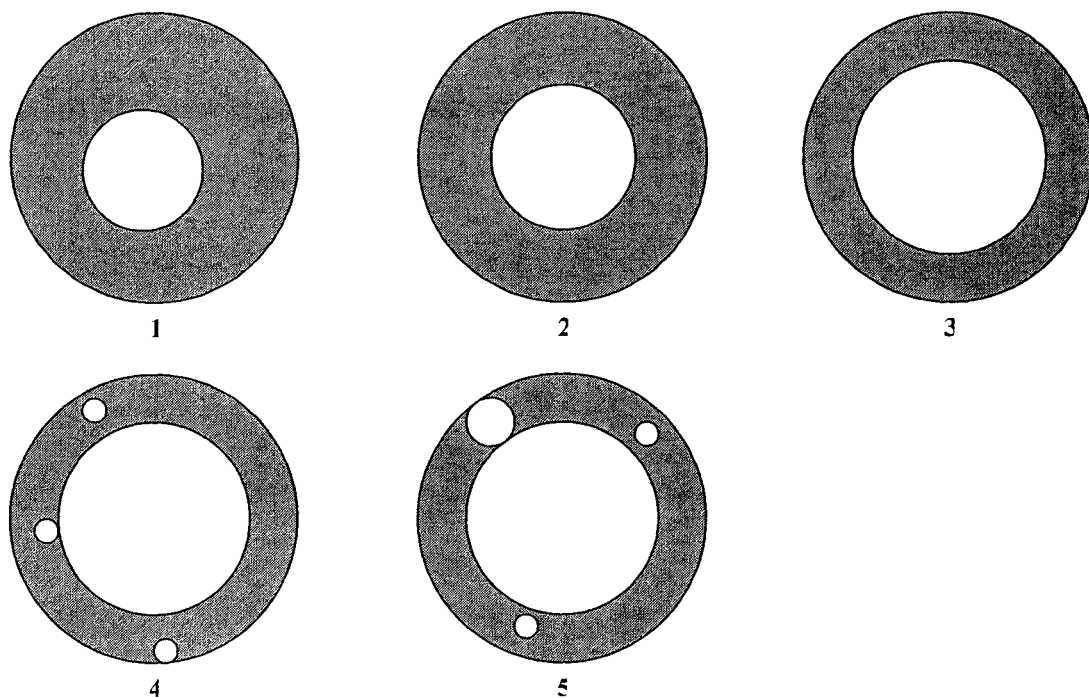


Figure 27: Exemple d'une poche d'air échantillonnée.

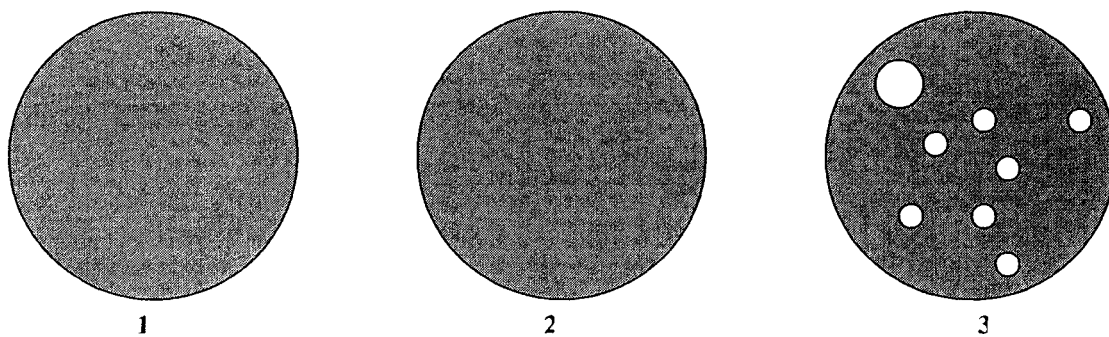


Figure 28 : Exemple d'un bouchon liquide échantillonné.

Le Tableau 7 résume les données de référence considérées pour la création d'une poche d'air qui est considérée comme une suite de bulles d'air dont le diamètre évolue de manière à former une poche d'air complète. Les bulles sont déterminées de manière

identique que pour l'écoulement par bulles en tenant compte du diamètre, de la position angulaire et de leur distance par rapport au centre de la section de passage (Figure 29).

Tableau 7: Données de référence pour la génération aléatoire de l'écoulement par bouchons.

<i><b>Écoulement par Bouchons</b></i>	<i><b>min</b></i>	<i><b>max</b></i>
<i><b>Rayon bulle centrale (cm)</b></i>	0.45	0.65
<i><b>Nombre de bulles</b></i>	2	3
<i><b>Distance de bulles (cm)</b></i>	0	0.8
<i><b>Angle des bulles (rad)</b></i>	0	6.28
<i><b>Rayon des bulles (cm)</b></i>	0.2	0.35

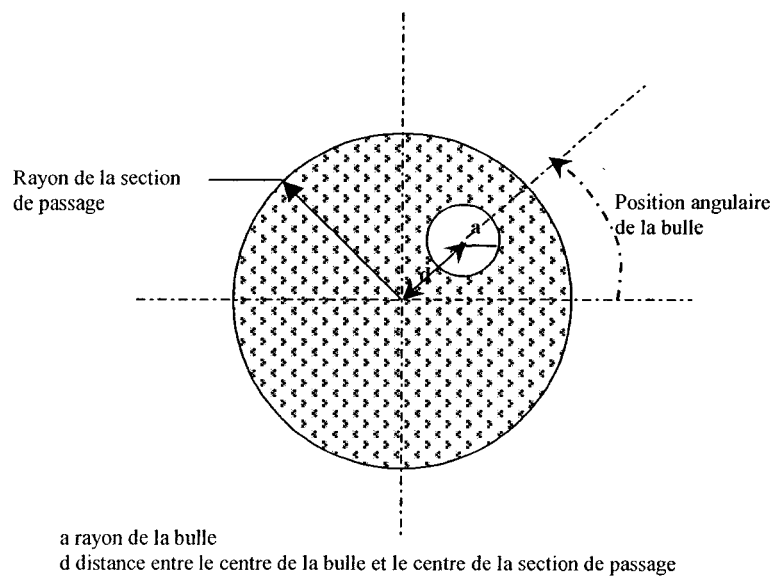


Figure 29 : Figure montrant la position angulaire de la bulle son diamètre ainsi que sa distance par rapport au centre de la section de passage.

L'écoulement annulaire est un écoulement caractérisé par un film liquide autour de la paroi du tube avec des vagues à l'interface air-eau. Donc pour un observateur placé à un niveau fixe de la section de passage, il va constater le passage d'une suite de bulles dont la taille avoisine le diamètre du tube. La Figure 30 montre un exemple d'échantillonnage d'un écoulement annulaire. Le Tableau 8 résume les données utilisées pour la génération de ce type d'écoulement.

L'organigramme de la Figure 31, résume l'ensemble des étapes suivies pour la génération des différentes configurations.

Tableau 8: Données de référence pour la génération aléatoire d'un écoulement annulaire.

<b><i>Écoulement annulaire</i></b>	<b><i>Min</i></b>	<b><i>max</i></b>
<b><i>Rayon bulle centrale (cm)</i></b>	0.65	0.8
<b><i>Nombre de bulles</i></b>	1	1
<b><i>Distance de bulles (cm)</i></b>	0	0.25
<b><i>Angle de bulles (rad)</i></b>	0	33.88

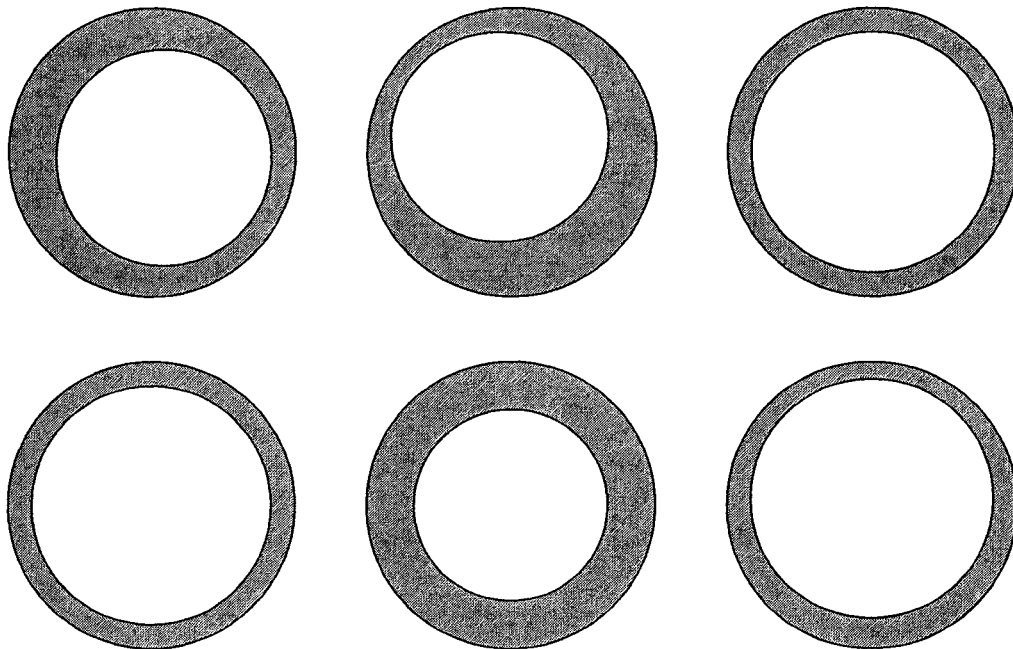


Figure 30: Écoulement annulaire échantillonné.

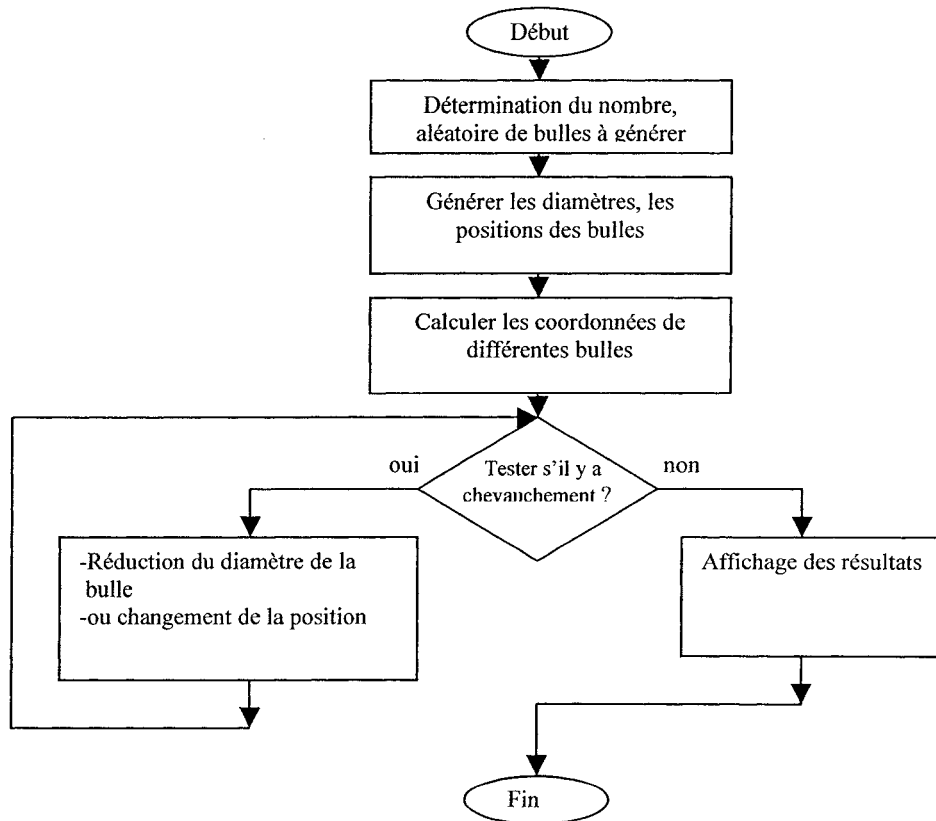


Figure 31: Organigramme décrivant les principales étapes suivies lors de la génération des différents configurations des écoulements.

## **5.2 Résultats**

À partir des données de simulations, fournies par le logiciel de calcul, nous avons reconstruit les équipotentiels et les « pseudo-signaux » d'impédance caractérisant chacune des configurations d'écoulement et ce dans le cas de la section de passage circulaire et la section de passage carrée.

### **5.2.1 Taux de vide**

Via notre logiciel de simulation nous avons calculé pour chacune des configurations, le taux de vide en fonction de la structure géométrique de la topologie de l'écoulement correspondante. Le taux de vide ainsi estimé, représente une proportion entre la surface occupée par l'air et la section de passage de la conduite. Les deux surfaces sont connues puisque la configuration à simuler est déterminée au préalable par le logiciel.

En balayant toutes les configurations : débutant par l'écoulement par bulles, passant par l'écoulement par bouchons jusqu'à l'écoulement annulaire et sur un échantillon d'environ 10000 simulations, nous avons constaté que le taux du vide estimé, pour le cas de la section circulaire, variait entre 4% et 82.4%. Pour le cas de la section carrée, il était entre 3% et 78%.

Dans ce qui suit on présente les pseudo-signaux obtenus à partir des simulations effectuées. Afin de faciliter la comparaison entre les deux cas de section de passage, dans les graphiques on a tenu à présenter la valeur normalisée des pseudo-signaux.



Les figures allant de la Figure 32 à la Figure 37 résument le comportement du pseudo-signal du taux de vide pour les configurations d'écoulement par bulles, par bouchons et annulaire et ce dans les deux cas de sections de passage, à savoir, section de passage à géométrie circulaire et section de passage à géométrie carrée.

La formule de normalisation est donnée par :  $\varepsilon_{normalisée} = \frac{\varepsilon_{calculée} - \varepsilon_{min}}{\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}}$ .

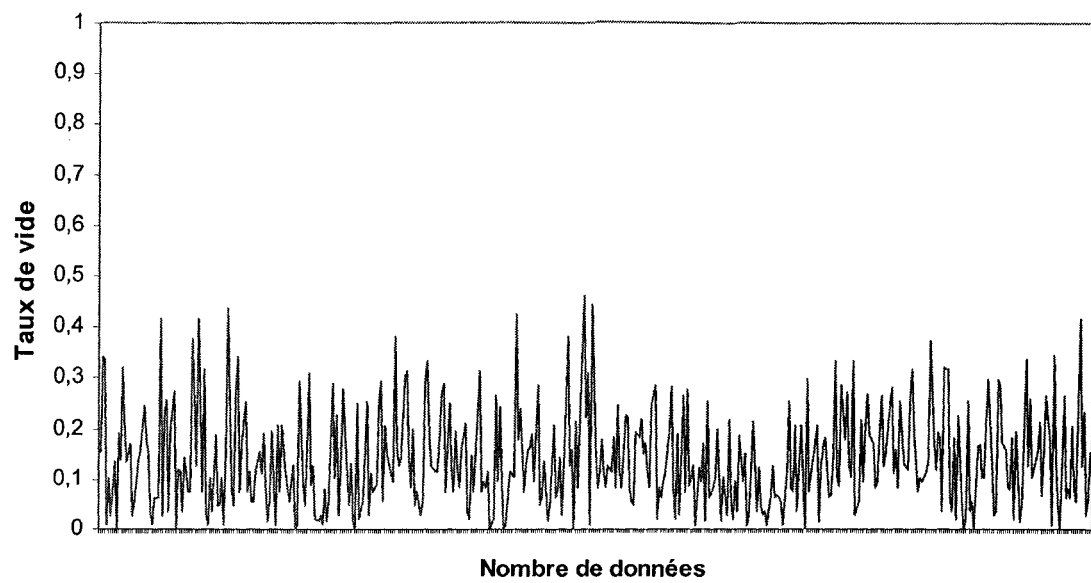


Figure 32: Pseudo-signal du taux de vide pour un écoulement par bulles (section circulaire).

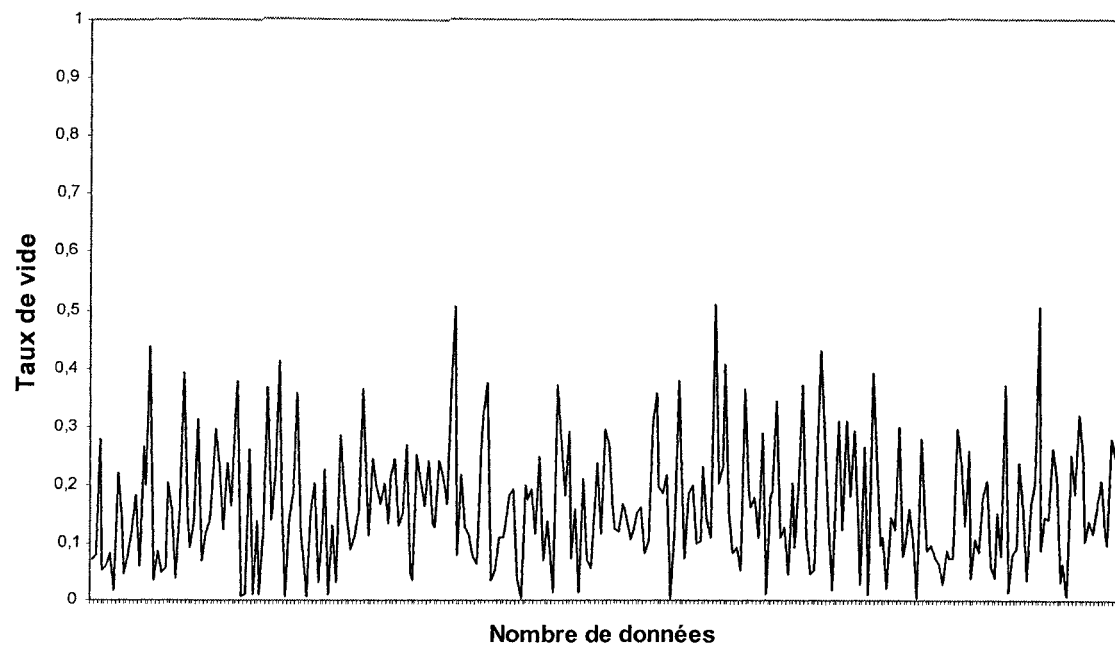


Figure 33: Pseudo-signal du taux de vide pour un écoulement par bulles (section carrée).

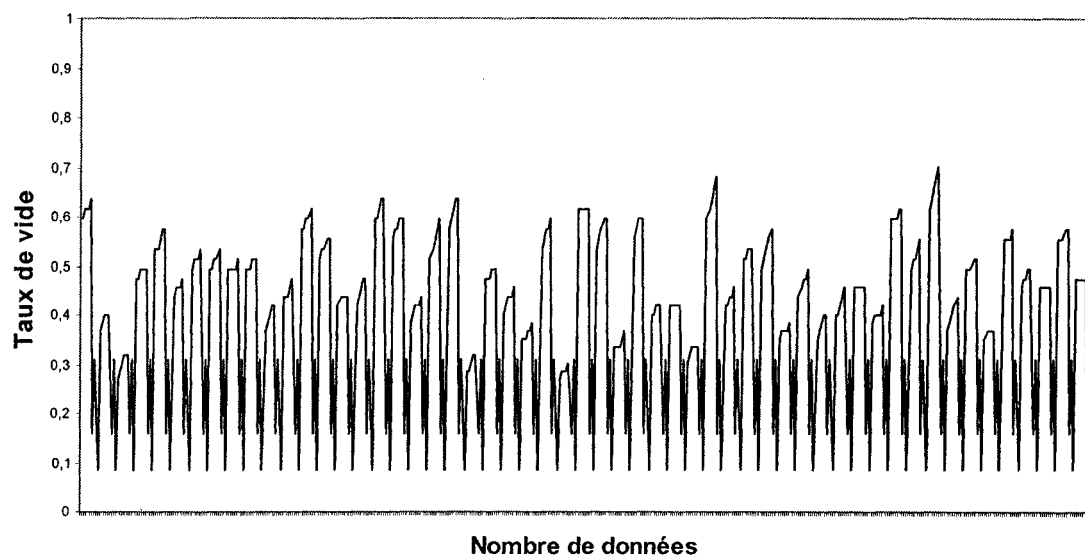


Figure 34: Pseudo-signal du taux de vide pour un écoulement par bouchons (section circulaire).

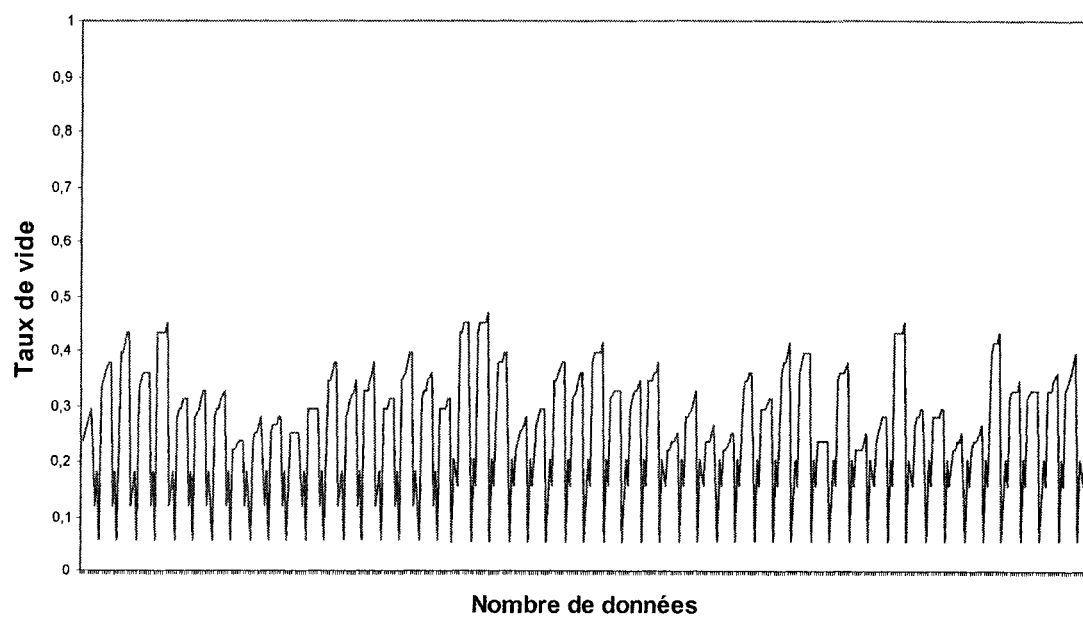


Figure 35: Pseudo-signal du taux de vide pour un écoulement par bouchons (section carrée).

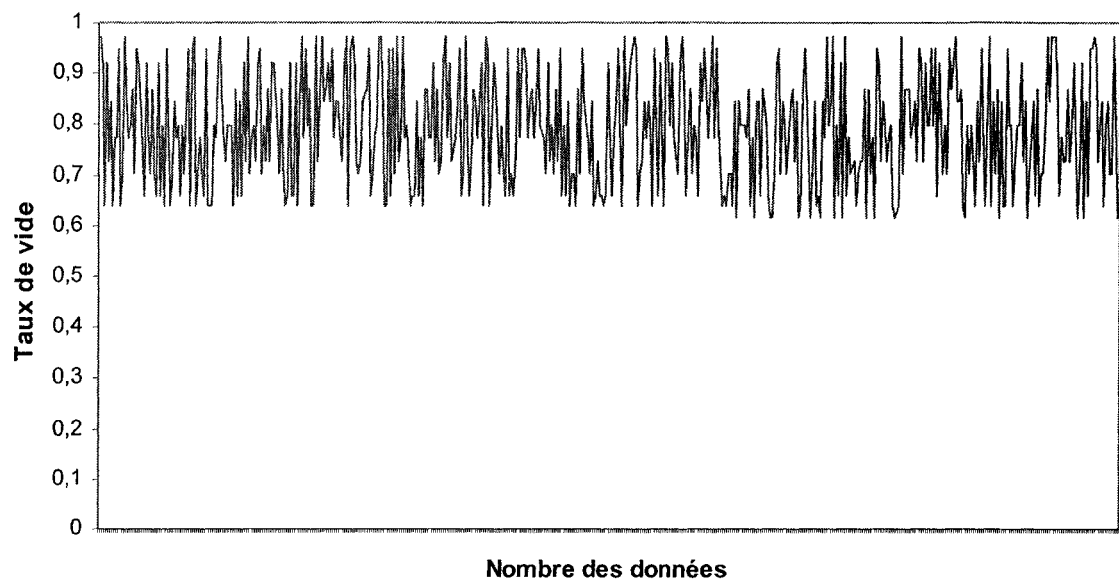


Figure 36: Pseudo-signal du taux de vide pour un écoulement annulaire (section circulaire).

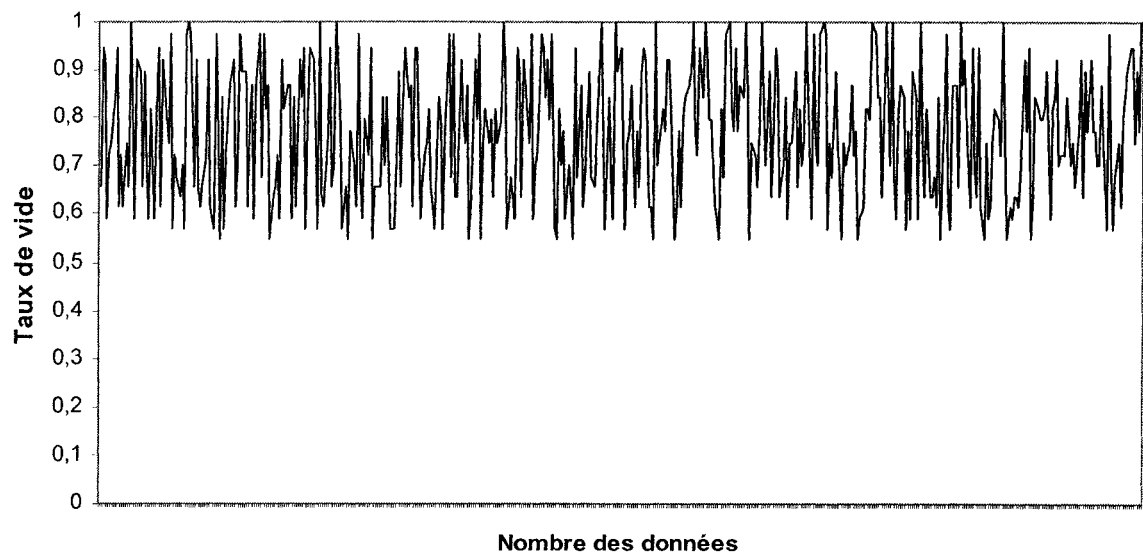


Figure 37: Pseudo-signal du taux de vide pour un écoulement annulaire (section carrée).

À la lumière des résultats obtenus on constate que l'allure des signaux obtenus, par les programmes de simulation, ressemble à celles des essais qui ont été menés dans le IGN (Figure 22 à Figure 26). Cependant une validation de ces données par l'analyse de FDP et FDPS doit être effectuée pour la consolidation des résultats. C'est l'objet du Chapitre 6:.

### 5.2.2 Valeur de la résistance équivalente du mélange diphasique dans la section de passage

Pour le calcul de la résistance globale correspondante à la configuration dans la section de passage nous avons fait appel à la loi de Ohm, basée sur la connaissance des surfaces occupées par chacune des phases, selon l'équation 3.8. La valeur fournie par le logiciel est calculée en  $\Omega/m$ . Le Tableau 9, résume les valeurs minimales et maximales de la résistance calculée selon la géométrie de la topologie de l'écoulement, pour chacune des sections de passage et chacune des configurations des écoulements diphasiques.

Tableau 9: Résultat de la variation de la résistance dans les différents cas de configurations et pour les deux cas de section de passage.

<i>Configuration</i>	<i>Section circulaire (<math>\Omega/m</math>)</i>	<i>Section carrée (<math>\Omega/m</math>)</i>
<b><i>Bulles</i></b>	6.63< valeur calculée <9.33	5.16< valeur calculée <6.79
<b><i>Bouchon</i></b>	7.02< valeur calculée <11.84	5.29< valeur calculée <6.63
<b><i>Annulaire</i></b>	9.95< valeur calculée <16.94	6.96< valeur calculée <9.8

Dans ce qui suit on présente les pseudo-signaux obtenus à partir des simulations effectuées. Dans ces simulations on a tenu à respecter le caractère aléatoire dans la génération des bulles. La normalisation utilisée est donnée par la formule suivante

$$R_{normalisée} = \frac{R_{calculée} - R_{min}}{R_{max} - R_{min}}.$$

Les figures allant de la Figure 38 à la Figure 43 résument le comportement du pseudo-signal de la résistance pour les configurations d'écoulement par bulles, par bouchons et annulaire pour les deux cas de sections de passage, à savoir section de passage à géométrie circulaire et section de passage à géométrie carrée.

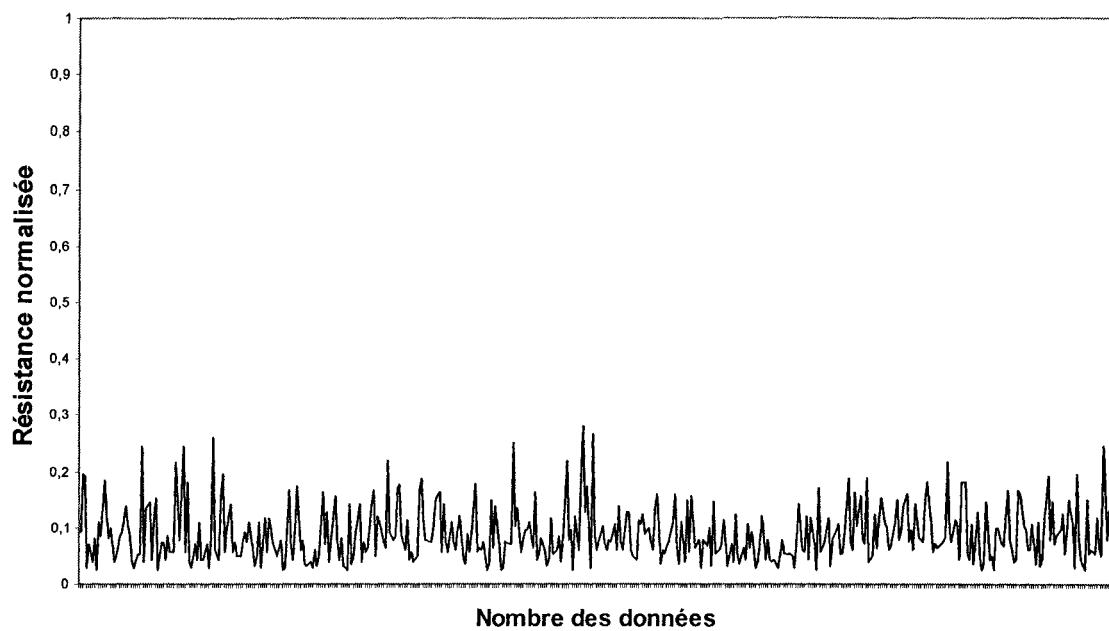


Figure 38: Pseudo-signal de résistance pour un écoulement par bulles (section circulaire).

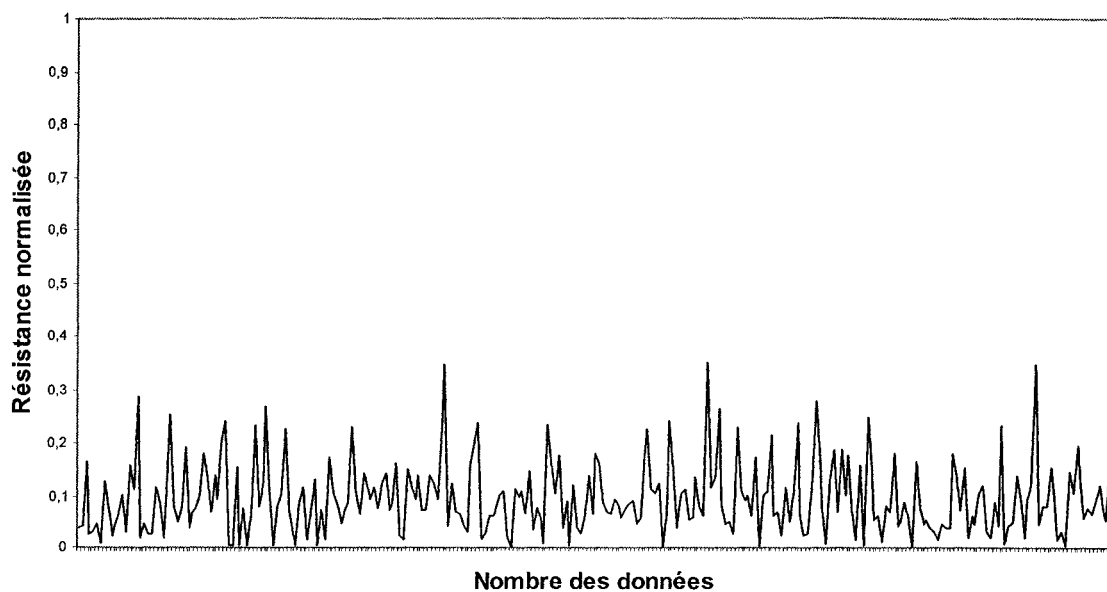


Figure 39: Pseudo-signal de résistance pour un écoulement par bulles (section carrée).

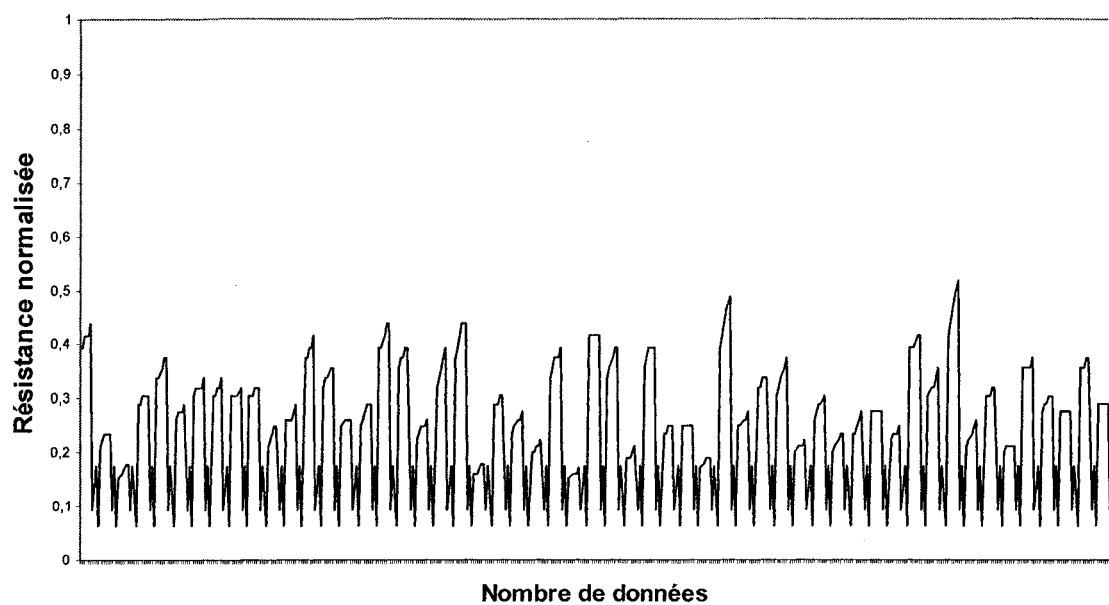


Figure 40: Pseudo-signal de résistance pour un écoulement par bouchons (section circulaire).

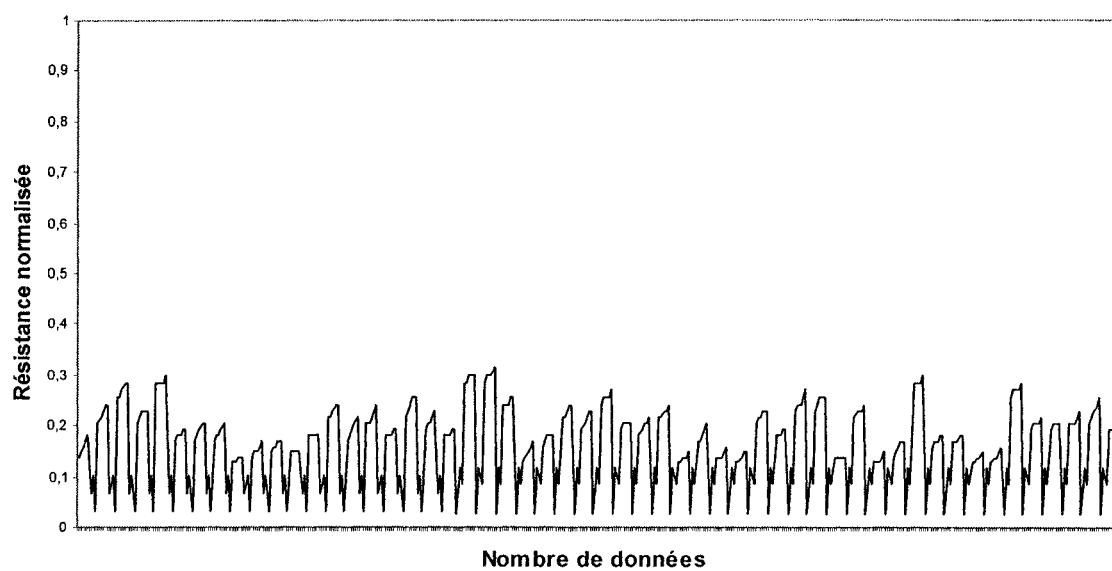


Figure 41: Pseudo-signal de résistance pour un écoulement par bouchons (section carrée).



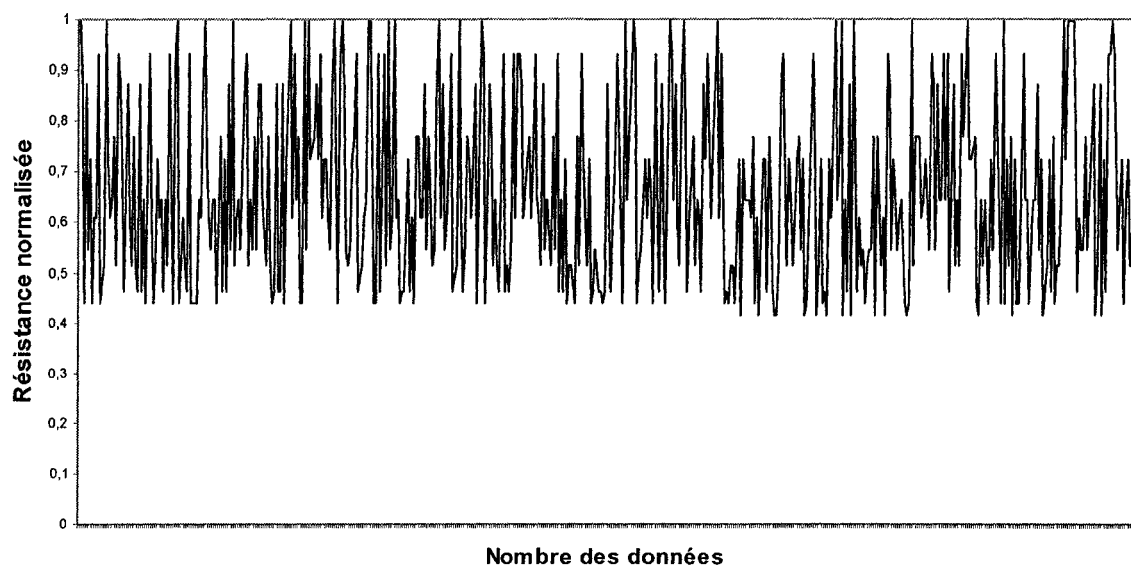


Figure 42: Pseudo-signal de résistance pour un écoulement annulaire (section circulaire).

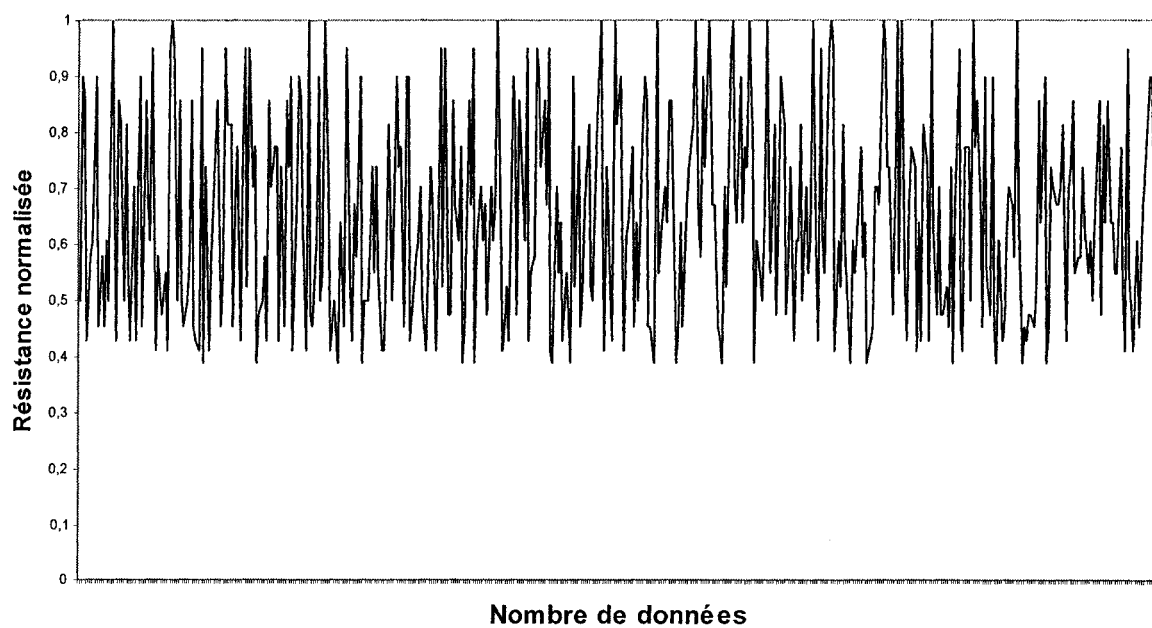


Figure 43: Pseudo-signal de résistance pour un écoulement annulaire (section carrée).

Suite aux résultats des simulations obtenues, il s'est avéré que le signal de résistance a un comportement identique à celui du taux de vide. En effet quand le taux de vide augmente, la résistance augmente aussi. Ce résultat est attendu puisqu'il y a une forte corrélation entre les deux signaux.

### 5.2.3 Valeur de la capacité

Dans le calcul de la capacité globale correspondante à la section de passage, nous avons fait appel aux équations présentées dans le chapitre 3, basées sur le calcul de la distribution du potentiel dans la section de passage et la détermination des quantités de charges électriques sur chacune des électrodes. Cependant la valeur fournie par le logiciel est calculée par unité de longueur, c'est-à-dire en  $F/m$ . Le Tableau 10 résume les valeurs minimales et maximales de la capacité électrique, pour chacune des sections de passage et chacune des configurations des écoulements diphasiques.

Tableau 10: Résumé de la variation de la capacité pour les différentes configurations d'écoulement et pour les deux sections de passage.

<i>Configuration</i>	<i>Section carrée (F/m)</i>	<i>Section circulaire (F/m)</i>
<b><i>Bulles</i></b>	6.45 e-10 < valeur calculée < 1.03 e-9	2.55e-10 < valeur calculée < 5.96 e-10
<b><i>Bouchon</i></b>	7.87e-10 < valeur calculée < 8.94 e-10	2.67 e-10 < valeur calculée < 4.58 e-10
<b><i>Annulaire</i></b>	6.44 e-10 < valeur calculée < 8.10 e-10	2 e-10 < valeur calculée < 2.78 e-10

Dans ce qui suit on présente les pseudo-signaux obtenus à partir des simulations effectuées. Dans les graphiques, on a tenu à présenter les pseudo-signaux normalisés, afin de faciliter la comparaison entre les deux cas de section de passage. La formule adoptée est la suivante :

$$C_{normalisée} = \frac{C_{calculée} - C_{min}}{C_{max} - C_{min}} \quad (5.1)$$

Les figures allant de la Figure 44 à la Figure 49 résument le comportement du pseudo-signal de la capacité pour les configurations d'écoulement par bulles, par bouchons et annulaire et ce dans les deux cas de sections de passage, à savoir section de passage à géométrie circulaire et section de passage à géométrie carrée.

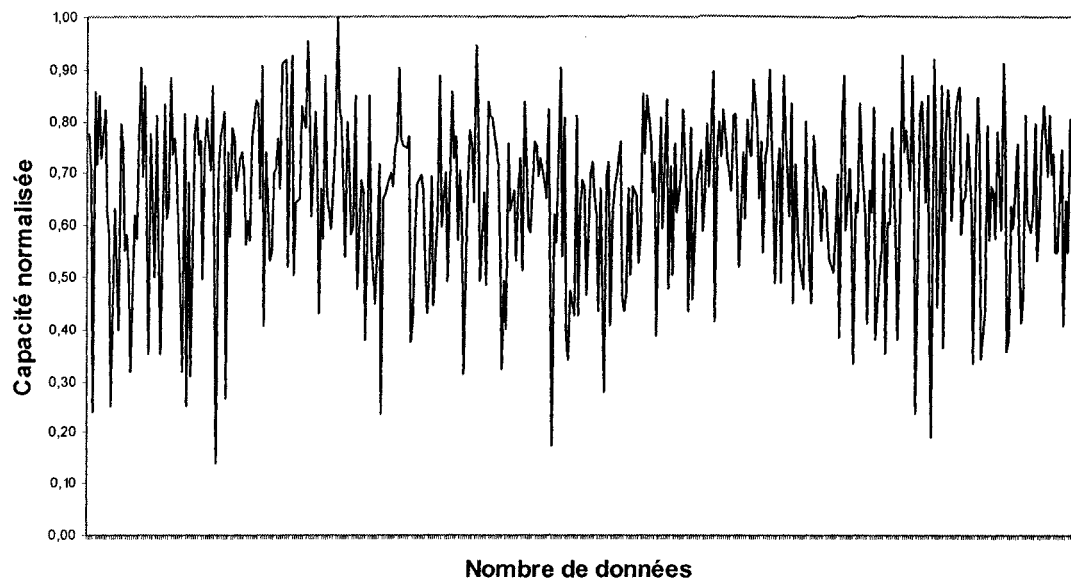


Figure 44: Pseudo-signal de capacité pour un écoulement par bulles (section circulaire).

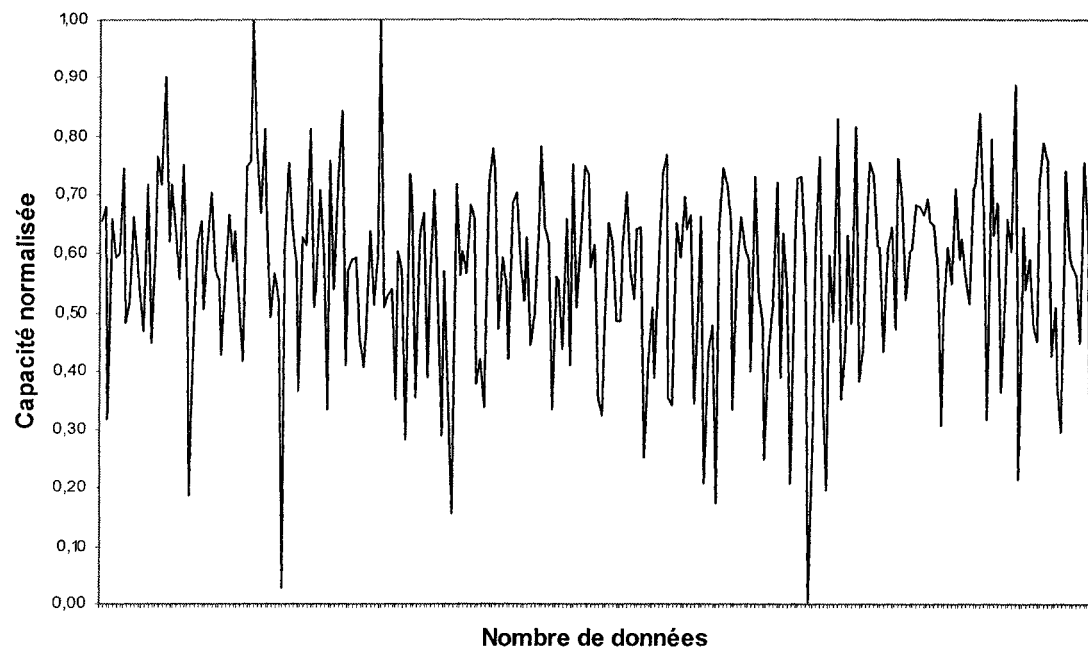


Figure 45: Pseudo-signal de capacité pour un écoulement par bulles (section carrée).

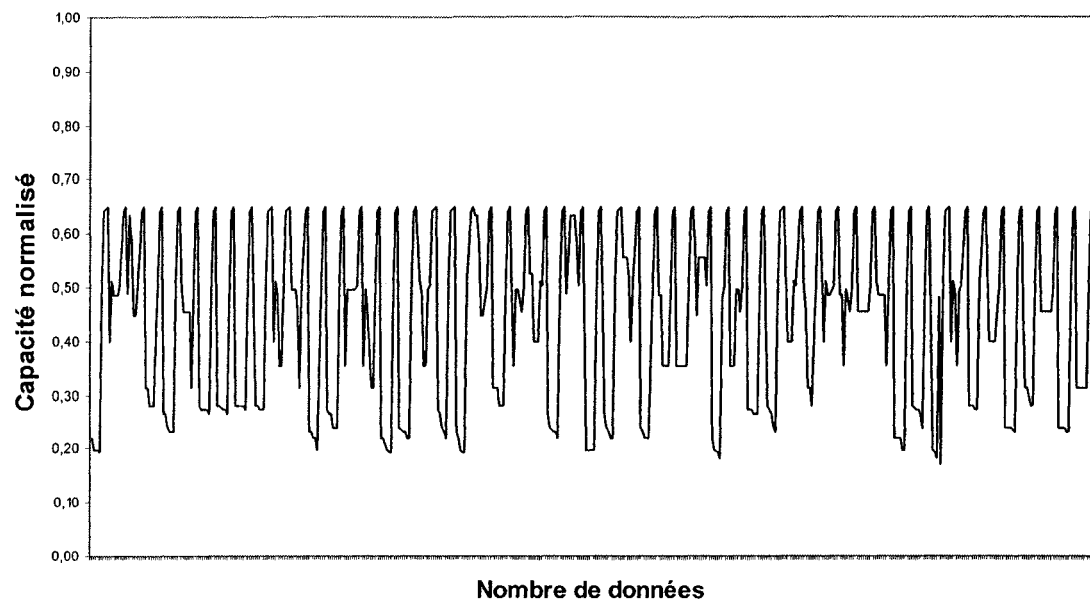


Figure 46: Pseudo-signal de capacité pour un écoulement par bouchons (section circulaire).

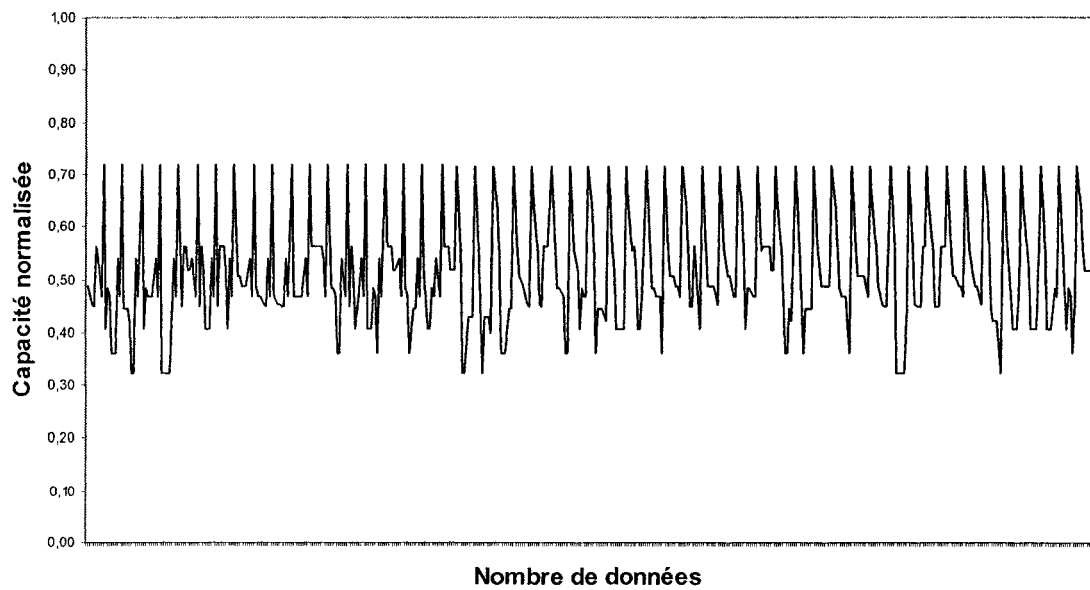


Figure 47: Pseudo-signal de capacité pour un écoulement par bouchons (section carrée).

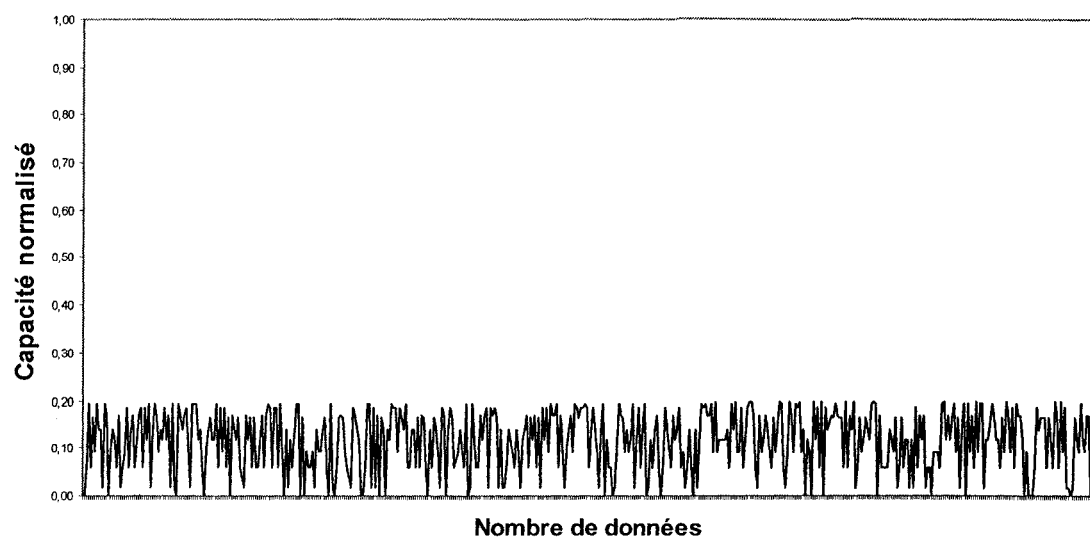


Figure 48: Pseudo-signal de capacité pour un écoulement annulaire (section circulaire).

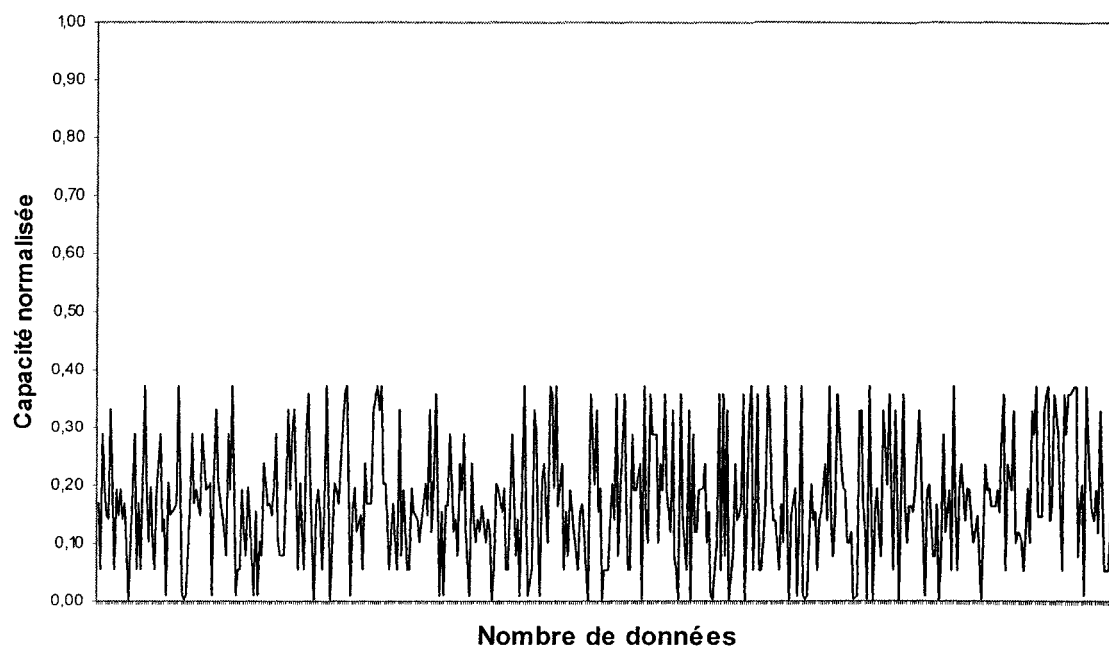


Figure 49: Pseudo-signal de capacité pour un écoulement annulaire (section carrée).

Pour l'écoulement par bulles et l'écoulement annulaire, le signal de capacité se comporte comme un signal aléatoire. D'autre part on constate que la valeur moyenne de la capacité décroît lorsqu'on passe d'une configuration d'écoulement par bulles à un écoulement par bouchons puis à annulaire. Cet aspect sera abordé en détail dans les paragraphes qui suivent (voir section 5.2.5).

D'un autre côté, on constate que le signal de la capacité est caractérisé par une grande fluctuation expliquée par la sensibilité de cette composante envers la topologie de l'écoulement, comme on va le constater dans les prochaines sections (voir section 5.2.4).

#### 5.2.4 Variation de la capacité en fonction de la topologie de l'écoulement pour un taux de vide fixe

À partir de certains exemples, on a constaté que la topologie de l'écoulement influe sur la valeur de la capacité. D'où l'idée d'étudier l'effet de la topologie de l'écoulement sur la valeur de la capacité. Pour ce faire plusieurs simulations ont été entamées pour montrer cet effet et ce pour un même taux de vide.

La procédure suivie dans ces essais consiste à déplacer le long de la circonférence de la section de passage, une bulle d'air de 0.5 *cm* de diamètre et qui est placée à 0.2 *cm* par rapport au centre de la section (Figure 50). L'objectif est de voir l'impact de la position sur la valeur de la capacité électrique.

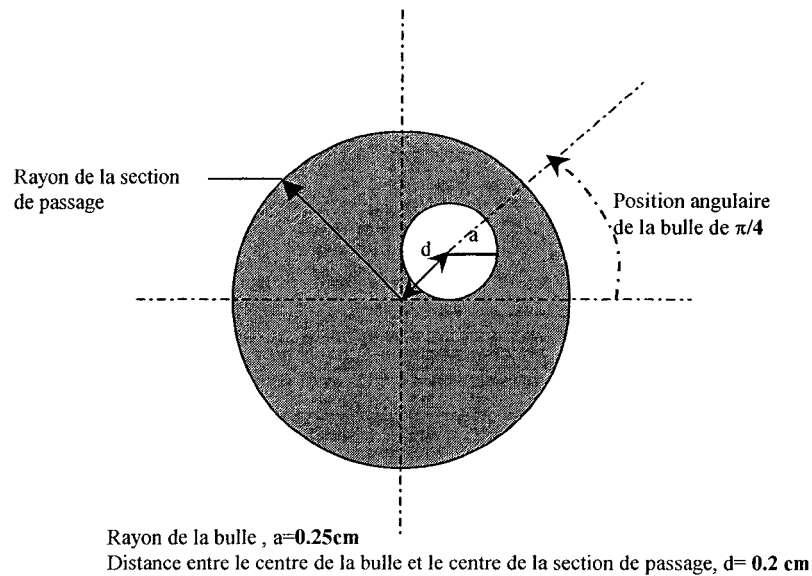


Figure 50 : Exemple de positions de la bulle dans une section de passage circulaire.

Dans le cas de la section carrée, pour ce test on a considéré un taux de vide de l'ordre de 19.63% et d'une section carrée de 2 cm de coté. Les résultats obtenus, pour chacune des positions de la bulle, comme indiqué dans la Figure 50, sont résumés dans le Tableau 11. Dans la Figure 51 nous avons présenté la variation relative de la valeur de la capacité donnée par l'expression suivante :

$$\Delta C = C_0 - C_{\text{calculé}} \quad (5.2)$$

Sachant que  $C_0$  représente la valeur de la capacité correspondante à la bulle de 0.5 cm quand elle est placée au centre de la section de passage.

Le but de cette présentation est de mettre en relief l'impact de la position d'une bulle sur la valeur de la capacité.



Tableau 11: Variation de la capacité en fonction de la position de la bulle dans le cas d'une section carrée.

<i>Position angulaire de la bulle (rad)</i>	<i>Capacité (F/m)</i>
0	8.509E-10
$\pi/4$	8.1639E-10
$\pi/2$	8.1447E-10
$3\pi/4$	8.1575E-10
$4\pi/4$	8.1696E-10
$5\pi/4$	8.1738E-10
$6\pi/4$	8.1511E-10
$7\pi/4$	8.1693E-10

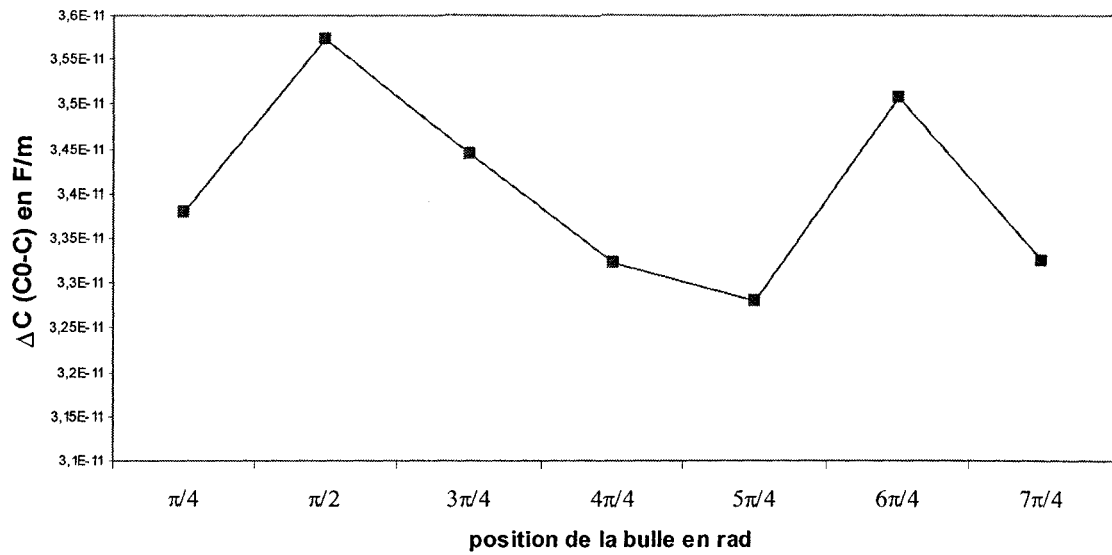


Figure 51: Variation de la capacité en fonction de la position de la bulle pour une section carrée.

D'une manière similaire à la section carrée, nous avons entamé les mêmes tests pour la section circulaire. Cependant pour ce cas nous étions amenés à fixer l'ouverture des électrodes. Cette dernière est désignée par l'angle  $\varphi$  formé entre la bissectrice de l'électrode et un des deux bouts de cette dernière (Figure 52).

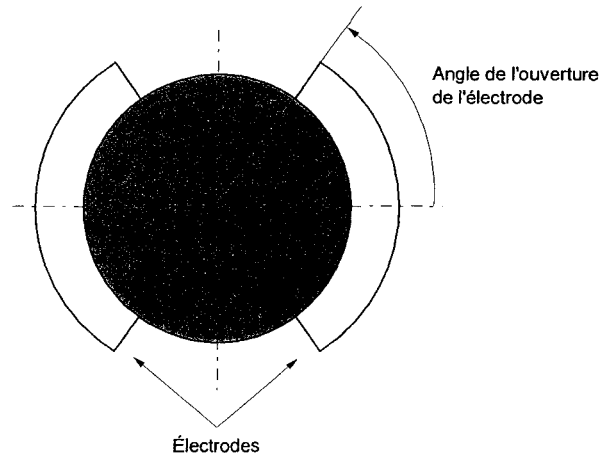


Figure 52 : Ouverture des électrodes.

Le test a été entamé pour un taux de vide de l'ordre de 25% et une ouverture de l'électrode de l'ordre de  $\pi/4$ . Pour l'ensemble des tests, nous avons suivi les mêmes configurations que celles proposées à la Figure 50. Les résultats obtenus se trouvent résumés dans le Tableau 12.

Tableau 12: Variation de la capacité en fonction de la position cas section circulaire.

<i>Position de la bulle</i> <i>(rad)</i>	<i>Capacité</i> <i>(F/m)</i>
0	2,0308E-09
$\pi/4$	2,0187E-09
$\pi/2$	2,0236E-09
$3\pi/4$	2,0148E-09
$4\pi/4$	2,0196E-09
$5\pi/4$	2,0192E-09
$6\pi/4$	2,0234E-09
$7\pi/4$	2,0156E-09

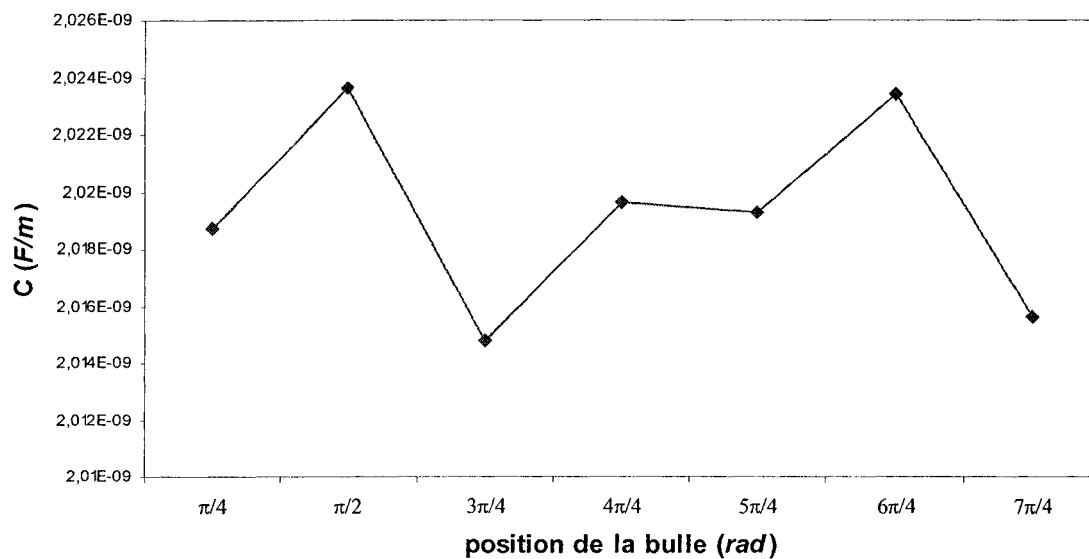


Figure 53: Variation de la capacité en fonction de la position de la bulle (cas section circulaire).

À la lumière des résultats obtenus, il s'avère que le changement de la position de bulle affecte la distribution des lignes de champ et par suite celle du potentiel (Figure 51 et Figure 53). Cette distribution des lignes équipotentiels va se traduire par une variation dans la répartition des charges électriques déposées sur les électrodes, à cause du changement de l'espace occupé par l'eau (permittivité élevée) entre les deux électrodes. Ce qui mène à la variation de la capacité électrique. D'où l'allure de la Figure 51 et Figure 53. Cependant, d'après les graphiques précédents, la variation de la capacité est diamétralement symétrique. À titre d'exemple pour le cas de la section de passage circulaire, une bulle à  $\pi/4$  génère une capacité similaire à une bulle positionnée à  $5\pi/4$ . Ce résultat est bien illustré dans la Figure 53. Pour le cas de la section à géométrie carré (Figure 51), cette symétrie existe, avec un léger taux d'erreur entre les différentes positions. Cette différence peut être expliquée par le type de la section de passage et la forme des électrodes considérées.

L'autre constatation concerne la valeur de la capacité du centre et celles engendrées par la même bulle mais placée à proximité des électrodes. En effet dans les deux types de sections de passage on constate que la valeur de la capacité avec une bulle ayant la même dimension et qui est placée au centre de la section de passage est plus grande qu'au cas où la même bulle est placée dans d'autres positions. Cette observation découle de la constatation suivante. Quand une bulle change de position, la topologie d'écoulement change aussi, ce qui mène à un changement dans la répartition de la permittivité et ainsi à un changement dans la répartition des équipotentiels. Ce

changement de position va aussi affecter l'espace d'eau perçue par les électrodes et par la suite la répartition des charges électriques. D'où l'explication de la constatation.

#### 5.2.5 Variation de la capacité en fonction de la taille des bulles

Dans cette partie on se propose d'étudier le comportement de la capacité face à un changement de la taille d'une bulle d'air placée au centre de la section de passage.

La procédure suivie dans ces essais consiste à amplifier la dimension d'une bulle de 0.2 à 0.9cm de rayon tout en restant au centre de la section de passage. L'objectif est de voir l'impact du changement de la taille de la bulle sur la valeur de la capacité électrique. Cet effet sera étudié pour les deux types de sections de passage, à savoir la section de passage circulaire et la section de passage carrée. Pour le cas de la section carrée, les résultats obtenus sont résumés dans le Tableau 13.

Tableau 13: Évolution de la capacité en fonction du taux de vide (section carrée).

<i>Taille bulle (cm)</i>	<i>Capacité ( F/m)</i>
0.2	9.7513E-10
0.3	9.3076E-10
0.4	8.7137E-10
0.5	8.509E-10
0.6	7.5089E-10
0.7	8.0489E-10
0.8	6.4605E-10
0.9	6.949E-10

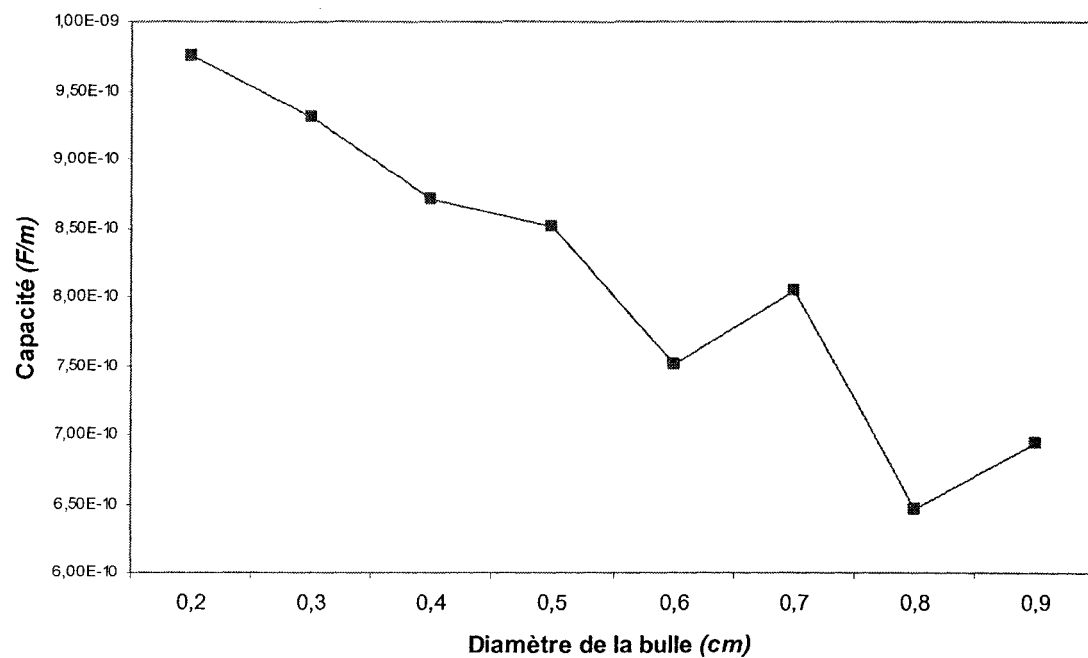


Figure 54: Évolution de la capacité en fonction du diamètre (section carrée).

Les résultats concernant la section de passage circulaire sont regroupés dans le Tableau 14.

Tableau 14: Évolution de la capacité en fonction du taux de vide pour le cas d'une section circulaire.

<i>Taille bulle (cm)</i>	<i>Capacité (F/m)</i>
0.2	2.1601E-09
0.3	2.1297E-09
0.4	2.0814E-09
0.5	2.0308E-09
0.6	1.9337E-09
0.7	1.8482E-09
0.8	1.6896E-09
0.9	1.5089E-09

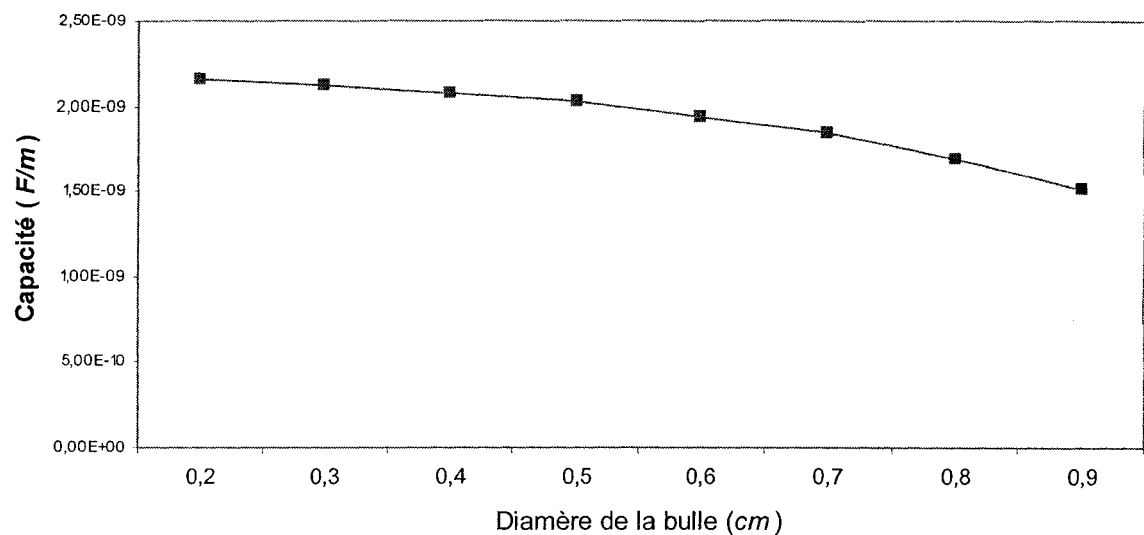


Figure 55: Évolution de la capacité en fonction de la taille de bulle (section circulaire).



D'après Figure 54 et Figure 55, on constate que la valeur de la capacité décroît au fur et à mesure que le taux du vide augmente. En effet avec l'augmentation du vide, la permittivité moyenne ainsi que la quantité de charges électriques sur les électrodes diminuent, ce qui engendre la réduction de la valeur de la capacité. D'un autre côté on sait que la capacité entre deux plaques de surface  $S$ , distantes entre elles d'une distance  $d$ , a une capacité de la forme :

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot S \cdot \epsilon_r}{d} \quad (5.3)$$

Sachant que  $\epsilon_r$  représente la permittivité relative du diélectrique séparant les deux plaques.

Soit  $\epsilon_m$  la permittivité relative au mélange eau-air; cette permittivité peut être exprimée comme étant la moyenne pondérée des permittivités des deux milieux, air et eau, par le taux de vide. Ainsi on peut écrire que :

$$\epsilon_m = \epsilon_v \epsilon_a + (1 - \epsilon_v) \epsilon_e \quad (5.4)$$

Sachant que  $\epsilon_m$  est la permittivité du mélange,  $\epsilon_v$  représente le taux du vide,  $\epsilon_a$  représente la permittivité de l'air, et  $\epsilon_e$  représente la permittivité de l'eau.

D'après la formule (5.4), on constate que si le taux de vide augmente, alors la permittivité relative du mélange eau-air va diminuer et par conséquent la valeur de la capacité va diminuer, conformément à l'équation précédente. D'autre part l'augmentation du vide va faire augmenter la surface de la bulle et donc réduire la surface du diélectrique. D'où l'allure des graphiques obtenus.

### 5.2.6 Équipotentiellles des configurations

La distribution des lignes du champ est très sensible à la configuration de l'écoulement et à la disposition des bulles. Pour montrer cet effet, nous nous sommes proposés de présenter le cas d'une configuration avec un écoulement tout liquide dans le cas des deux sections de passage (Figure 56 et Figure 58). Le second cas concerne un écoulement liquide possédant une bulle au centre de  $0.5\text{ cm}$  (Figure 57 et Figure 59).

Comme notre écoulement est constitué d'un mélange d'eau et d'air, donc la distribution de la permittivité n'est pas homogène et sa valeur va dépendre fortement du type de la configuration d'écoulement. Ce qui va influencer sur la répartition du potentiel à l'intérieur de la section de passage.

Alors en fonction de la position des bulles, les lignes du champ vont prendre des orientations différentes (Figure 56 à Figure 59).

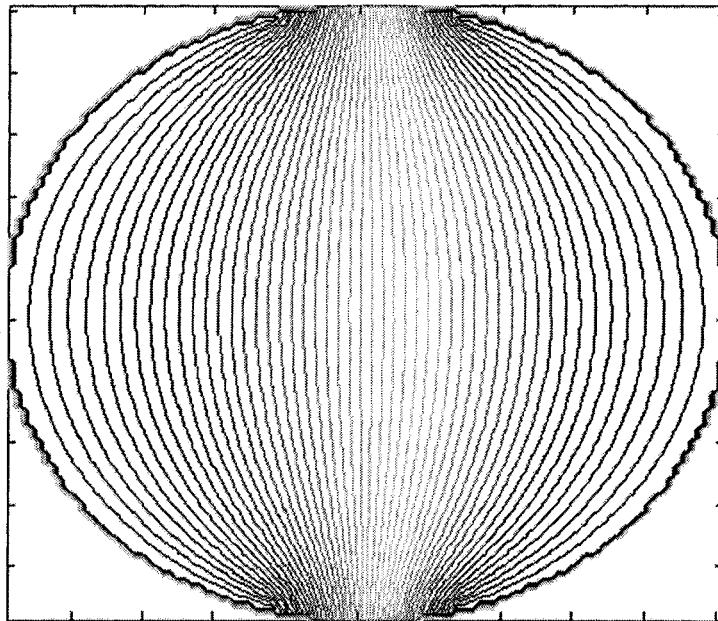


Figure 56: Répartition des équipotentiels pour une section circulaire pleine d'eau.

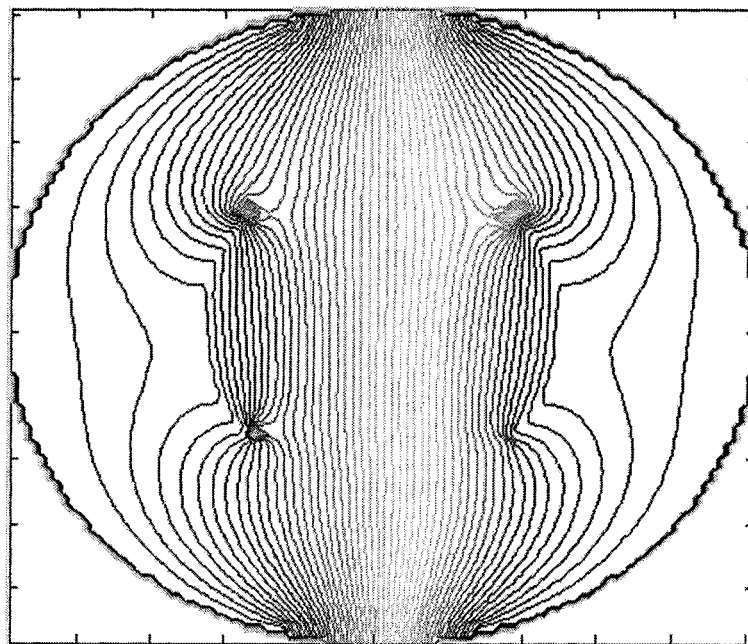


Figure 57: Répartition des équipotentiels pour une section circulaire pleine d'eau contenant une bulle au centre de 0.5 cm de diamètre.

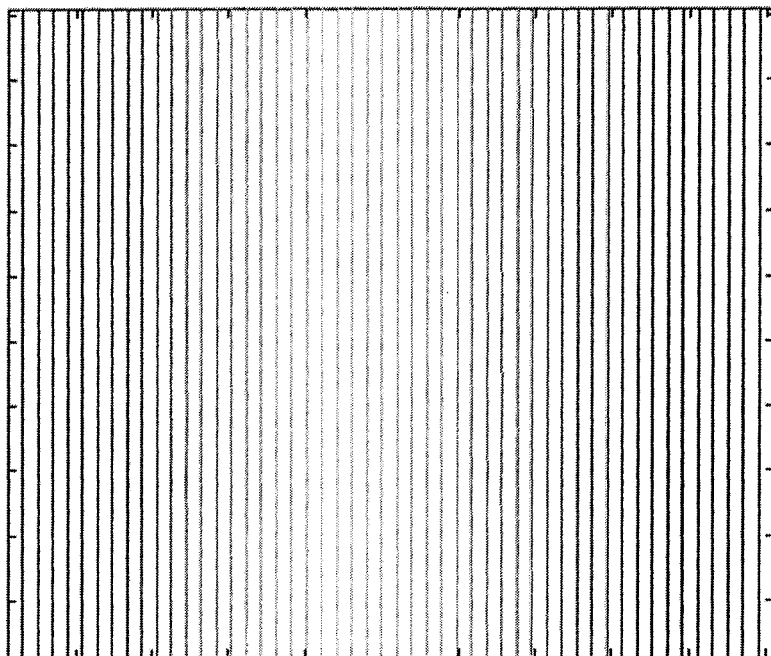


Figure 58 : Répartition des équipotentiels pour une section carrée pleine d'eau.

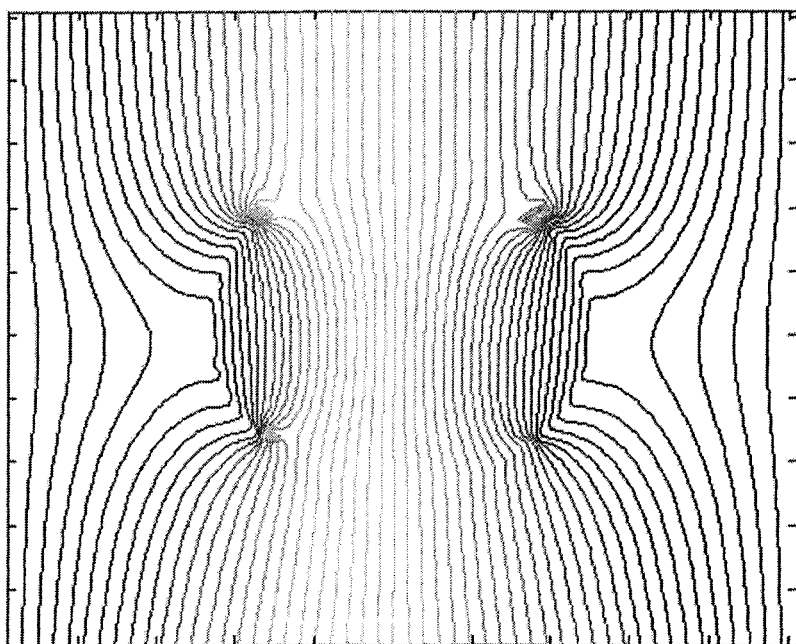


Figure 59: Répartition des équipotentiels pour une section carrée pleine d'eau contenant une bulle au centre de 0.5 cm de diamètre.

Dans les deux types de sections de passage on constate que sur l'interface, entre la partie gazeuse et la partie liquide, les lignes des équipotentielles subissent une légère déviation. Cette déviation trouve son explication dans l'écart de permittivité entre les deux milieux. Considérons une surface de Gauss  $dS$ , composée de deux bases  $dS_1$ ,  $dS_2$  et d'une surface latérale (Figure 60).

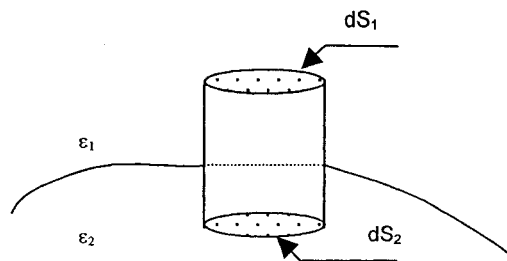


Figure 60 : Surface de Gauss autour de deux milieux de permittivité différente.

D'après le théorème de Gauss, il ressort que  $\oint_S \vec{D} \cdot \vec{n} ds = \text{charge interne dans } S$

avec  $\vec{n}$  représentant le vecteur normal et  $\vec{D}$  le déplacement électrique. Or dans notre cas on suppose qu'on ne possède pas de charges électriques libres dans l'écoulement, et que la densité superficielle des charges est nulle, alors dans ce cas l'intégral précédent peut s'écrire comme suit  $\oint_S \vec{D} \cdot \vec{n} dS = 0$

$$\oint_S \vec{D} \cdot \vec{n} dS = 0$$

$(\vec{D}_2 - \vec{D}_1) \cdot \vec{n} = 0$ . Ce qui mène à

$$\epsilon_1 E_{n1} = \epsilon_2 E_{n2} \quad (5.5)$$

Avec  $\varepsilon_l$  est la permittivité dans l'eau,  $\varepsilon_2$  la permittivité dans l'air,  $E_{n1}$  le champ électrique selon la normale dans la partie liquide, et  $E_{n2}$  le champ électrique selon la normale à la surface dans la partie gazeuse.

Il ressort que le champ dans la partie liquide serait différent du celui de la partie gazeuse et par la suite la répartition du potentiel serait aussi affectée. D'où l'allure de Figure 57 et Figure 59.

La Figure 61 et la Figure 62 montrent l'effet du déplacement d'une bulle dans la section du passage, sur la distribution des équipotentiellles. La bulle est de  $0.2cm$  de diamètre et elle est placée à  $0.5cm$  du centre de la section de passage. Les positions angulaires considérées sont  $\pi/4$ ,  $3\pi/4$  et  $\pi/2$ .

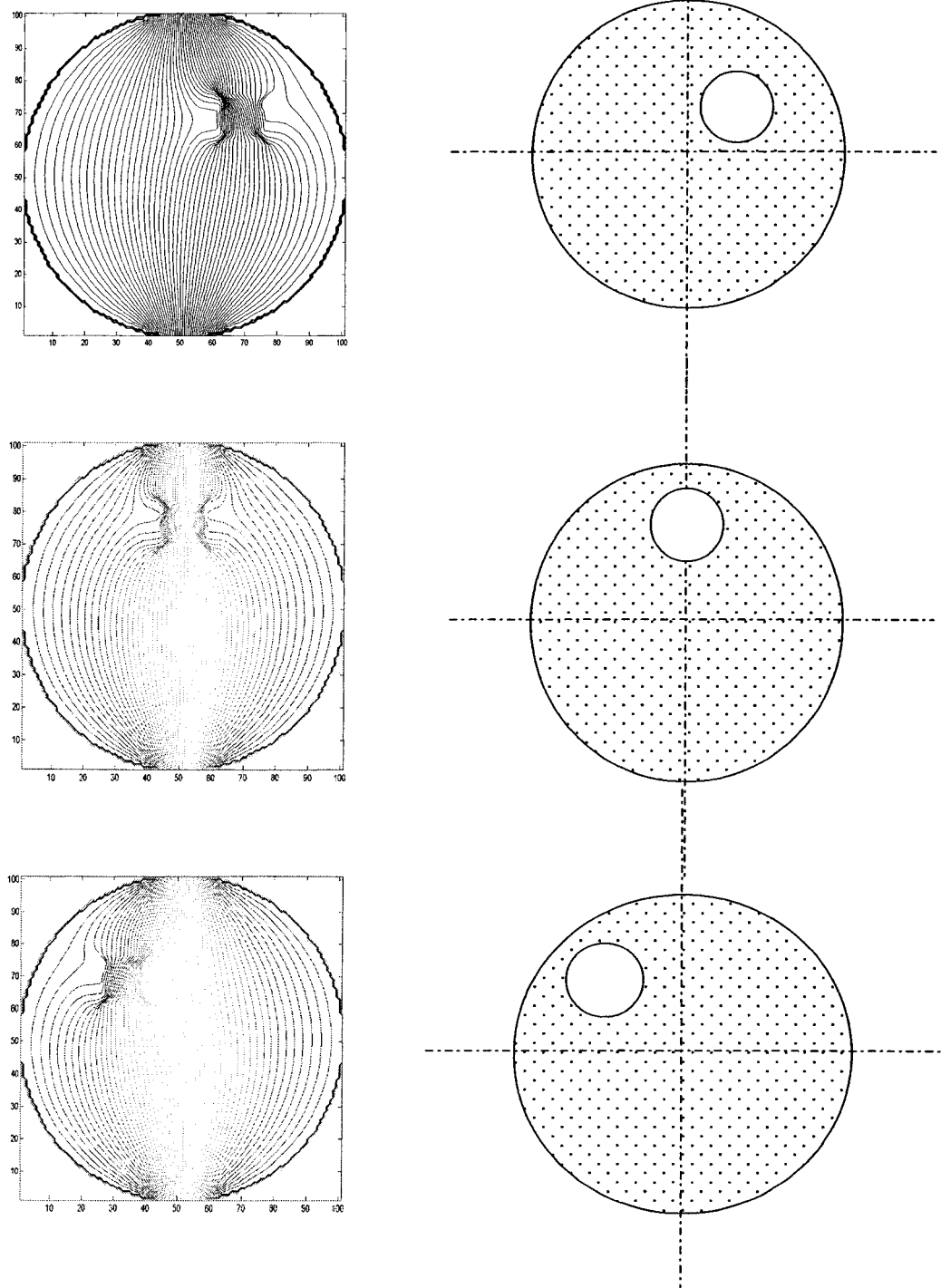


Figure 61 : Comportement des équipotentiels lorsque une bulle change de position, section circulaire.

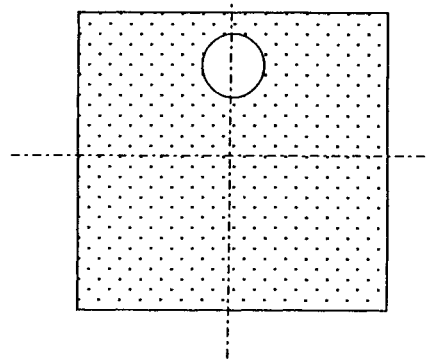
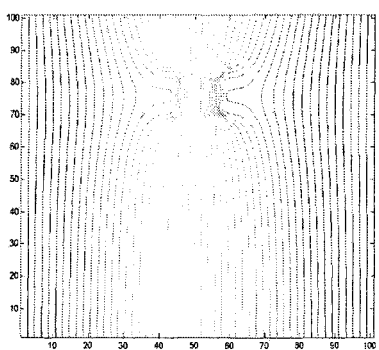
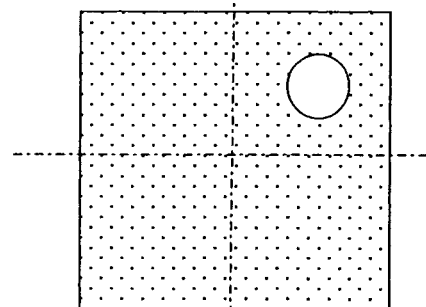
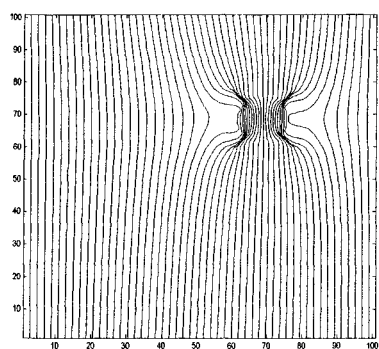
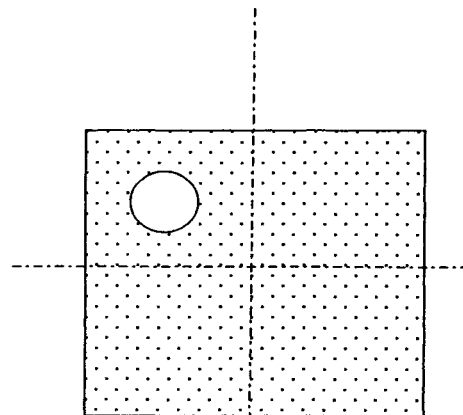
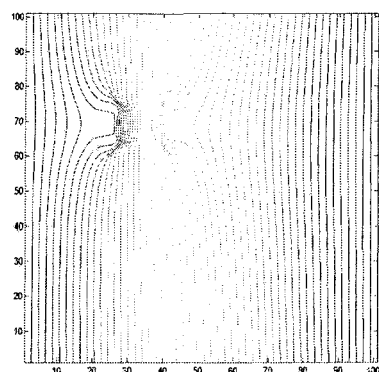


Figure 62: Comportement des équipotentielle lorsque une bulle change de position, section carrée.



### 5.2.7 Effet de la fréquence du signal d'entrée sur la mesure de l'impédance

Le signal du potentiel, appliqué aux électrodes, peut s'écrire comme suit :

$$V(t) = V_{\max} \sin(2\pi f_s t) \quad (5.6)$$

Sachant que  $f_s$  est la fréquence du signal,  $V_{\max}$  l'amplitude du signal de potentiel et  $t$  le temps.

D'après le théorème de Shanon la fréquence d'échantillonnage doit être supérieure ou égale à 2 fois la fréquence originale du signal. Soit  $f_e$  cette fréquence d'échantillonnage,  $f_e = kf_s$  sachant que  $k$  est le facteur d'échantillonnage, supérieur ou égal à 2 et qui représente aussi le nombre de points échantillonnés par période. Ainsi le signal échantillonné pour un entier  $n$ , peut s'écrire comme suit :

$$V_n = V_{\max} \sin(2\pi f_s \frac{n}{kf_s}) = V_{\max} \sin(2\pi \frac{n}{k}).$$

Donc on constate que les valeurs discrètes du

signal sont indépendantes de la fréquence originale du signal et ne dépendent que du facteur d'échantillonnage. Ce résultat est confirmé par les simulations effectuées qui confirment que la valeur de la capacité représente une caractéristique du système et qui est inchangeable. Dans l'ensemble de ces simulations nous avons considéré une section de passage remplie juste d'eau. Les résultats correspondants à la section circulaire, sont résumés dans le Tableau 15.

Tableau 15: Évolution de la capacité en fonction de la tension appliquée section circulaire.

**Section circulaire**

<i>Valeur de la capacité (F/m)</i>	<i>Potentiel appliqué (V)</i>
1.41691E-09	100
1.41729E-09	50
1.41754E-09	70
1.41713E-09	60

Les résultats correspondant à la section carrée sont résumés dans le Tableau 16.

Tableau 16: Évolution de la capacité en fonction de la tension appliquée cas le section carrée.

**Section carrée**

<i>Valeur de la capacité (F/m)</i>	<i>Potentiel appliqué (V)</i>
1.03144E-09	50
1.03144E-09	70
1.03144E-09	100
1.03144E-09	80

Les données obtenues pour la section carrée et la section circulaire, confirment que le potentiel appliqué n'a pas d'effet sur la valeur de capacité électrique. Ce qui est tout à fait normal puisque la capacité est une caractéristique du système qui dépend des dimensions des armatures et de la nature du diélectrique (voir l'équation 5.3).

### 5.2.8 Effet de l'ouverture des électrodes sur les valeurs de la capacité

Lorsqu'on opte pour une section circulaire, la question du choix de l'ouverture des électrodes s'impose, ainsi que leurs dimensions optimales. Par ouverture d'électrodes on se réfère à l'angle que fait l'extrémité de l'électrode avec la bissectrice de l'électrode (Figure 63).

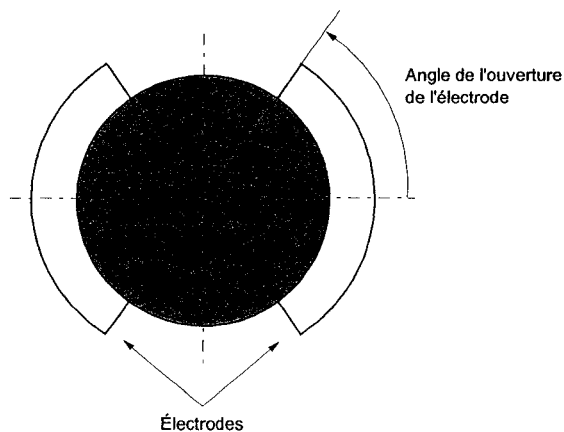


Figure 63 : Ouverture des électrodes. Dans ce cas l'ouverture présentée est de  $\pi/4$ .

Pour effectuer ce choix optimal, on s'est proposé d'étudier dans cette partie la sensibilité du système envers la dimension des électrodes et ce pour un ensemble de configuration d'écoulement.

Pour montrer cet effet, des tests ont été menés pour une section d'essai de type circulaire et une bulle de rayon  $0.5\text{ mm}$ , et ce pour les différentes ouvertures d'électrodes. Les tests consistent à voir pour chaque ouverture d'électrode, l'effet du déplacement d'une bulle d'air dans la section de passage et l'impact de la position angulaire de la bulle, sur la

valeur de capacité. En d'autres termes évaluer le changement de la capacité pour un même taux de vide et en fonction du changement de l'ouverture des électrodes.

Les ouvertures des électrodes concernées sont  $\pi/6, \pi/4, \pi/3, 5\pi/12$  (Figure 64)

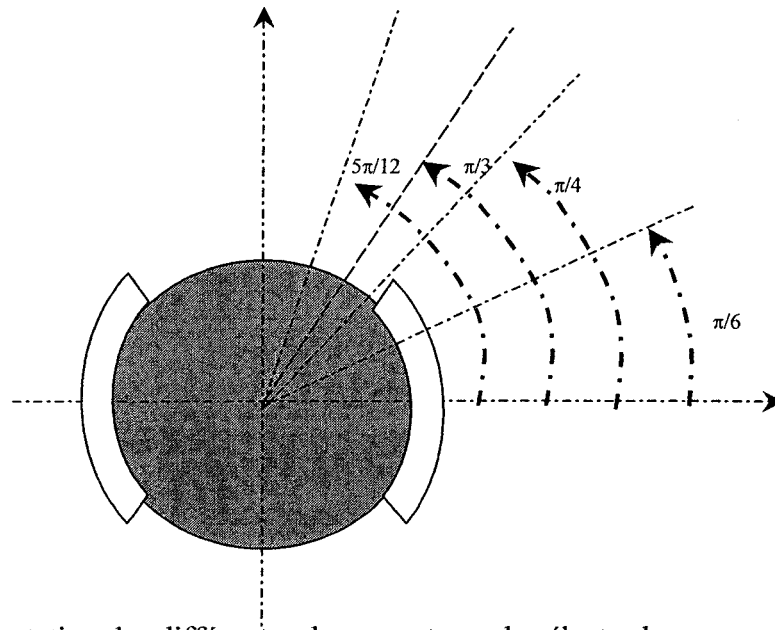


Figure 64 : Représentation des différentes des ouvertures des électrodes proposées pour l'étude.

Les positions étudiées de la bulle sont  $\pi/4, \pi/2, 3\pi/4, \pi, 5\pi/4, 6\pi/4, 7\pi/4$  (Figure 65)

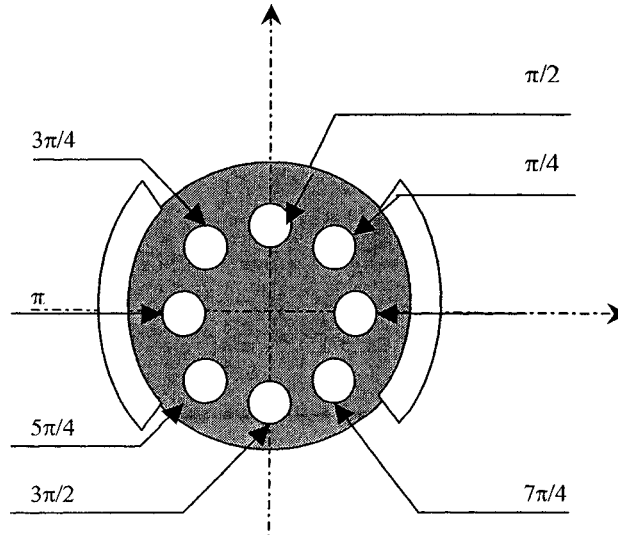


Figure 65 : Les différentes positions de la bulle.

L'écart entre les différentes mesures a été formulé en terme de sensibilité. Cette dernière nous l'avons défini comme suit:

$$s = \frac{\text{valeur capacité / position} - \text{valeur capacité / centre}}{\text{valeur capacité / centre}} \quad (5.7)$$

« *valeur capacité/centre* » représente la valeur de la capacité pour une bulle placée au centre de la section de passage. Les résultats obtenus sont résumés dans le Tableau 17.

Tableau 17: Évolution de la sensibilité du système en fonction de l'ouverture des électrodes.

Position bulle ( $\theta$ )	Ouverture d'électrode ( $\varphi$ )			
	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/3$	$5\pi/12$
$\pi/4$	-7.22%	-9.33%	-5.67%	-10.74%
$\pi/2$	-2.11%	-8.02%	-5.74%	-10.55%
$3\pi/4$	-6.44%	-9.09%	-5.31%	-10.10%
$4\pi/4$	-12.42%	-10.33%	-5.36%	-9.84%
$5\pi/4$	-6.96%	-9.42%	-5.43%	-10.56%
$6\pi/4$	-2.21%	-8.03%	-5.61%	-10.51%
$7\pi/4$	-6.42%	-8.86%	-5.39%	-9.92%

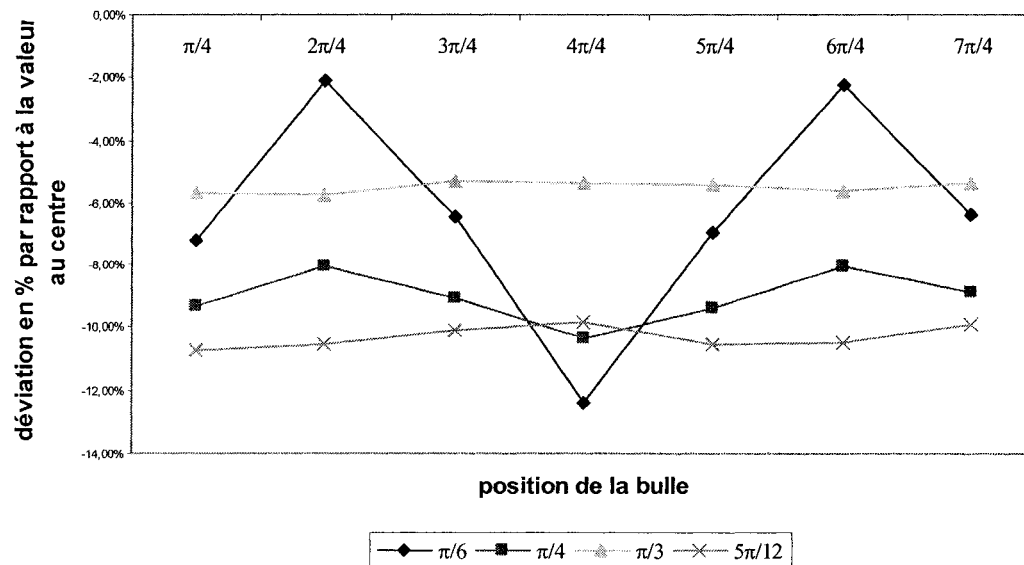


Figure 66: Évolution de la sensibilité du système en fonction de l'ouverture des électrodes.

Les résultats obtenus révèlent que au fur et à mesure qu'on augmente l'ouverture des électrodes, la déviation moyenne (en valeur absolue) entre valeur du centre et les valeurs aux extrémités, pour la même valeur du taux de vide, augmente aussi (Figure 66). La seule exception est faite au niveau de l'ouverture des électrodes de  $\pi/3$ , où on enregistre la déviation la plus faible.

Une ouverture de  $\pi/6$  présente de fortes fluctuations. Cet aspect peut être utile dans le cas où on veut détecter la différenciation entre les différentes positions des bulles. Ce qui est utile dans le cas de la reconstitution de la topologie de l'écoulement.

Par contre pour une ouverture de  $5\pi/12$  et de  $\pi/3$ , on constate qu'il n'y a pas de fluctuations. Donc ces ouvertures peuvent être adoptées dans le cas où les fluctuations ne sont pas tolérées. Mieux encore avec  $\pi/3$ , on sera en mesure de garantir une meilleure uniformité dans la mesure et moins de sensibilité envers la topologie de l'écoulement. Solution qu'on peut adopter si pour une application quelconque on ne tolère pas ces variations.

Aussi d'après la Figure 66, il ressort que avec une ouverture de  $\pi/3$  et  $5\pi/12$ , on assure une certaine uniformité dans la mesure, en faisant référence à la section de passage. Donc une meilleure corrélation avec le taux de vide. D'un autre côté avec une ouverture d'électrodes de l'ordre  $\pi/6$  on perd cette uniformité dans la mesure.

D'après la Figure 66, il s'avère que pour des ouvertures assez faible et qui couvrent une partie de la circonférence de la section de passage, la valeur de la capacité enregistre des fluctuations importantes. Ainsi pour une ouverture de  $\pi/6$ , l'écart entre la valeur maximale et la valeur minimale est de 10.31%. Par contre lorsque l'ouverture augmente les fluctuations diminuent pour se stabiliser à un écart, (entre valeur maximale et valeur minimale), inférieur à 1% c'est le cas d'une ouverture de  $5\pi/12$  et  $\pi/3$ . Un résumé des résultats est présenté dans le Tableau 18.

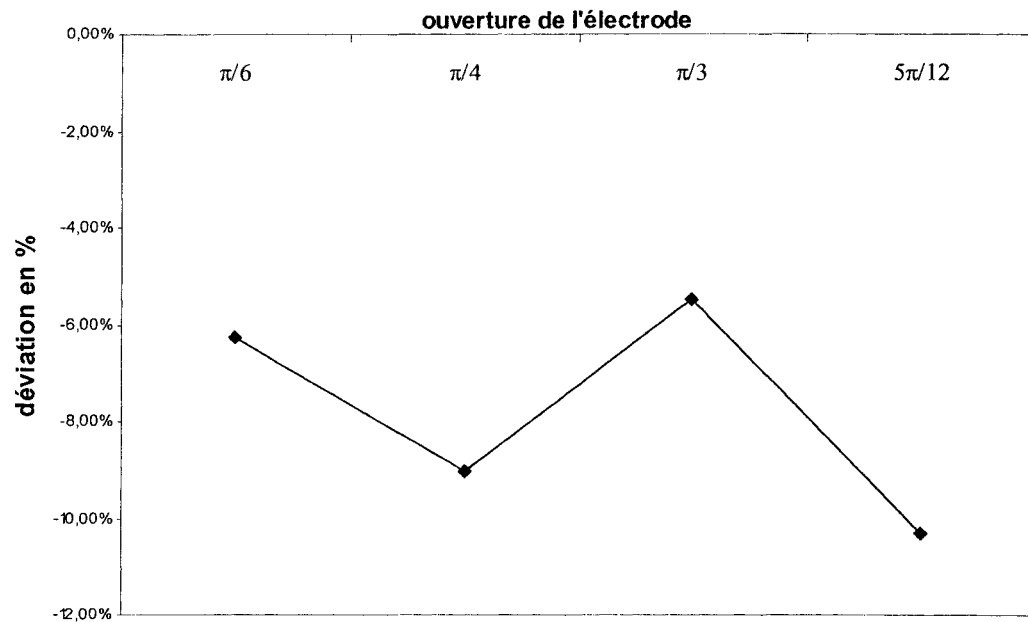


Figure 67: Évolution de la déviation moyenne de toutes les positions de la bulle par type d'ouverture des électrodes.



La Figure 67 montre que la déviation moyenne, par ouverture d'électrode, décroît lorsqu'on augmente l'ouverture. La seule exception est faite au niveau de l'ouverture de  $\pi/3$  qui enregistre la plus faible déviation.

On constate aussi que pour une même position de bulle, la valeur de la capacité augmente en augmentant l'ouverture de l'électrode. Cet aspect est justifié par le fait que la capacité est une fonction directe de la géométrie et particulièrement de la surface des électrodes.

Tableau 18: Différence entre les valeurs de capacité en fonction de l'ouverture des électrodes.

	$\pi/4$	$5\pi/12$
<b><i>Tout liquide</i></b>	4.20413E-10	5.94512E-10
<b><i>Bulle de 0.4cm de rayon au centre</i></b>	2.75105E-10	4.2933E-10
<b><i>Bulle de 0.4cm de rayon à une distance de 0.3cm et angle de <math>\pi/4</math></i></b>	2.84971E-10	4.29307E-10

### 5.2.9 Choix de la modélisation appropriée à chacune des configurations des écoulements et choix de la fréquence adéquate pour l'opération

Dans cette partie nous avons deux objectifs; le premier consiste dans la détermination de la fréquence appropriée permettant l'assurance d'une bonne corrélation simultanément entre le module et l'argument de l'impédance électrique avec le taux de vide. Le second objectif est de déterminer la modélisation adéquate à chaque type de configurations d'écoulement et pour chacune des géométries de section de passage. Pour ce dernier

objectif, on s'est proposé d'effectuer la comparaison en se basant sur une multitude de tests basés sur le changement de fréquence.

Au terme de cette comparaison on serait en mesure de se prononcer sur le modèle adéquat pour chacune des configurations et chacune des sections de passage, ainsi que le choix de la fréquence optimale.

Pour ce faire, on a procédé au calcul du coefficient de corrélation entre le module de l'impédance et le taux du vide d'un côté, et entre le taux du vide et l'argument de l'impédance électrique d'un autre côté et ce pour chacun des modèles proposés. À savoir, le modèle parallèle et le modèle série, tels qu'ils sont présentés dans la section 3.2.2. Les Tableaux 19 à 24 résument les différents résultats obtenus.

Tableau 19: Évolution de la corrélation entre le taux de vide et le module d'impédance équivalente ainsi que son argument, en fonction de la fréquence. Cas écoulement par bulles (section circulaire).

<i>Modèle parallèle</i>			<i>Modèle série</i>	
<b>Fréquence (Hz)</b>	<b>coef_corr_imp</b>	<b>coef_corr_arg</b>	<b>Coef_corr_imp</b>	<b>coef_corr_arg</b>
<b>100.00</b>	0,996026178	0,480241087	0,80074854	-0,891352294
<b>1,000.00</b>	0,996026178	0,480241087	0,800748541	-0,891352294
<b>3,000.00</b>	0,996026178	0,480241087	0,800748541	-0,891352294
<b>10,000.00</b>	0,996026178	0,480241089	0,800748547	-0,891352294
<b>50,000.00</b>	0,9960269	0,480241137	0,800748708	-0,891352294
<b>100,000.00</b>	0,996026225	0,480241286	0,800749208	-0,891352294
<b>500,000.00</b>	0,996027351	0,48024606	0,800765227	-0,891352294
<b>1,500,000.00</b>	0,996036074	0,480285796	0,80089864	-0,891352294
<b>9,500,000.00</b>	0,995392345	0,48947775	0,80663776	-0,891352294
<b>10,500,000.00</b>	0,995007411	0,482303335	0,807907324	-0,891352294
<b>30,500,000.00</b>	0,956842231	0,492260839	0,85090091	-0,891352294
<b>40,500,000.00</b>	0,927121613	0,496930041	0,877575472	-0,891352294
<b>40,700,000.00</b>	0,926552458	0,497013469	0,878100642	-0,891352294
<b>50,700,000.00</b>	0,900699439	0,500668632	0,903003478	-0,891352294

Table 20 : Évolution de la corrélation entre le taux de vide et le module d'impédance équivalente ainsi que son argument, en fonction de la fréquence. Cas écoulement par bouchons (section circulaire).

Fréquence (Hz)	Modèle parallèle		Modèle série	
	coef_corr_imp	coef_corr_arg	coef_corr_imp	coef_corr_arg
100.00	0,991264155	0,102063428	0,84888879	-0,924542138
1,000.00	0,991264155	0,102063428	0,848888787	-0,924542138
3,000.00	0,991264155	0,102063428	0,848888788	-0,924542138
10,000.00	0,991264154	0,102063429	0,848888795	-0,924542138
50,000.00	0,991264122	0,10206345	0,848888989	-0,924542138
100,000.00	0,991264021	0,102063516	0,848889596	-0,924542138
500,000.00	0,991260788	0,102065626	0,848908998	-0,924542138
1,500,000.00	0,991233691	0,102083184	0,849070528	-0,924542138
9,500,000.00	0,989787474	0,102814742	0,855909641	-0,924542138
10,500,000.00	0,989398627	0,102970562	0,857393789	-0,924542138
30,500,000.00	0,967183128	0,107260755	0,901805771	-0,924542138
40,500,000.00	0,949379714	0,109246381	0,924148767	-0,924542138
40,700,000.00	0,94909759	0,109281861	0,924552699	-0,924542138
50,700,000.00	0,931816559	0,110840328	0,942254161	-0,924542138

Tableau 21 : Évolution de la corrélation entre le taux de vide et le module d'impédance équivalente ainsi que son argument, en fonction de la fréquence. Cas écoulement annulaire (section circulaire).

<i>Fréquence (Hz)</i>	<i>Modèle parallèle</i>		<i>Modèle série</i>	
	<i>coef_corr_imp</i>	<i>coef_corr_arg</i>	<i>Coef_corr_imp</i>	<i>coef_corr_arg</i>
<i>100.00</i>	0,992434637	-0,918325392	0,97045977	-0,976333241
<i>1,000.00</i>	0,992434637	-0,918325392	0,970459766	-0,976333241
<i>3,000.00</i>	0,992434637	-0,918325392	0,970459767	-0,976333241
<i>10,000.00</i>	0,992434637	-0,918325392	0,970459768	-0,976333241
<i>50,000.00</i>	0,992434631	-0,918325395	0,970459813	-0,976333241
<i>100,000.00</i>	0,992434612	-0,918325406	0,970459951	-0,976333241
<i>500,000.00</i>	0,992434017	-0,918325741	0,970464392	-0,976333241
<i>1,500,000.00</i>	0,99242905	-0,918328526	0,970501339	-0,976333241
<i>9,500,000.00</i>	0,992204841	-0,918444485	0,972025095	-0,976333241
<i>10,500,000.00</i>	0,99215251	-0,918469143	0,972345579	-0,976333241
<i>30,500,000.00</i>	0,989865492	-0,99129248	0,980510989	-0,976333241
<i>40,500,000.00</i>	0,988007321	-0,994091	0,98378814	-0,976333241
<i>40,700,000.00</i>	0,987967606	-0,99413861	0,983843445	-0,976333241
<i>50,700,000.00</i>	0,985941475	-0,99612397	0,986154168	-0,976333241

Tableau 22 : Évolution de la corrélation entre le taux de vide et le module d'impédance équivalente ainsi que son argument, en fonction de la fréquence. Cas écoulement par bulles (section carrée).

Fréquence (Hz)	Modèle parallèle		Modèle série	
	coef_corr_imp	coef_corr_arg	coef_corr_imp	coef_corr_arg
100.00	0,996864299	0,101173839	0,77390391	-0,909009595
1,000.00	0,996864299	0,101173839	0,773903909	-0,909009595
3,000.00	0,996864299	0,101173839	0,773903911	-0,909009595
10,000.00	0,996864301	0,101173844	0,773903936	-0,909009595
50,000.00	0,996864341	0,101173964	0,773904606	-0,909009595
100,000.00	0,996864467	0,101174342	0,773906697	-0,909009595
500,000.00	0,996868442	0,101186431	0,773973611	-0,909009595
1,500,000.00	0,996897991	0,101286914	0,774530155	-0,909009595
9,500,000.00	0,993108718	0,105294846	0,797241528	-0,909009595
10,500,000.00	0,991205185	0,106105946	0,80954073	-0,909009595
30,500,000.00	0,879461276	0,124013238	0,91122264	-0,909009595
40,500,000.00	0,824472765	0,130201122	0,946595001	-0,909009595
40,700,000.00	0,823548738	0,130302792	0,947134988	-0,909009595
50,700,000.00	0,785138464	0,134503793	0,967723342	-0,909009595

Tableau 23 Évolution de la corrélation entre le taux de vide et le module d'impédance équivalente ainsi que son argument, en fonction de la fréquence. Cas écoulement par bouchons (section carrée).

Fréquence (Hz)	Modèle parallèle		Modèle série	
	coef_corr_imp	coef_corr_arg	coef_corr_imp	coef_corr_arg
100.00	0,998012253	-0,472670277	0,8257321	-0,960307303
1,000.00	0,998012253	-0,472670277	0,825732096	-0,960307303
3,000.00	0,998012253	-0,472670277	0,825732099	-0,960307303
10,000.00	0,998012254	-0,472670276	0,825732133	-0,960307303
50,000.00	0,998012271	-0,472670269	0,825733043	-0,960307303
100,000.00	0,998012323	-0,472670246	0,825735886	-0,960307303
500,000.00	0,998013996	-0,472669503	0,825826831	-0,960307303
1,500,000.00	0,998027301	-0,472663326	0,82658222	-0,960307303
9,500,000.00	0,997628276	-0,472414744	0,855845459	-0,960307303
10,500,000.00	0,997309836	-0,472363922	0,861538829	-0,960307303
30,500,000.00	0,96304496	-0,471202091	0,960060112	-0,960307303
40,500,000.00	0,936204044	-0,470785284	0,979827181	-0,960307303
40,700,000.00	0,935690636	-0,47077838	0,980088126	-0,960307303
50,700,000.00	0,912418954	-0,470491713	0,989124136	-0,960307303

Tableau 24 : Évolution de la corrélation entre le taux de vide et le module d'impédance équivalente ainsi que son argument, en fonction de la fréquence. Cas écoulement annulaire (section carrée).

Fréquence (Hz)	Modèle parallèle		Modèle série	
	coef_corr_imp	coef_corr_arg	coef_corr_imp	coef_corr_arg
100.00	0,99570476	-0,769962463	0,48095087	-0,901750766
1,000.00	0,99570476	-0,769962463	0,480950876	-0,901750766
3,000.00	0,99570476	-0,769962463	0,480950889	-0,901750766
10,000.00	0,995704758	-0,769962468	0,480951039	-0,901750766
50,000.00	0,995704706	-0,769962595	0,480954995	-0,901750766
100,000.00	0,995704542	-0,769962991	0,480967354	-0,901750766
500,000.00	0,995699299	-0,76997567	0,481362707	-0,901750766
1,500,000.00	0,995653937	-0,770080946	0,484645433	-0,901750766
9,500,000.00	0,991089193	-0,774129547	0,609018105	-0,901750766
10,500,000.00	0,989460629	-0,774914564	0,632231881	-0,901750766
30,500,000.00	0,871592056	-0,789764632	0,934094263	-0,901750766
40,500,000.00	0,786929561	-0,793969726	0,968306285	-0,901750766
40,700,000.00	0,785347185	-0,794035453	0,968703741	-0,901750766
50,700,000.00	0,715128654	-0,796662177	0,981718007	-0,901750766



Au terme de cette étude comparative entre les deux modes de modélisation (série et parallèle), il ressort que l'adoption de la modélisation style parallèle (entre  $R$  et  $C$ ), exclusivement, pour toutes les configurations d'écoulements mène à une limitation de la fréquence à un ordre de 10.5MHz. Par contre dans la modélisation style série, toutes les fréquences semblent répondre avec satisfaction au critère de corrélation et par suite pas de contraintes sur la fréquence. On aimerait juste noter que la corrélation s'améliore légèrement lorsque la fréquence  $f$  devient supérieure à 50,7MHz.

Le Tableau 25 résume les principaux résultats obtenus.

Tableau 25: Évolution de la fréquence optimale dans le cas de toutes les configurations d'écoulement et pour les deux types de section de passage.

	Section carrée		Section circulaire	
	<i>Configuration optimale</i>	<i>Fréquence opt.</i>	<i>Configuration optimale</i>	<i>Fréquence opt.</i>
<i>É. par bulles</i>	série	$\geq 50.7\text{MHz}$	Série	$\geq 50.7\text{MHz}$
<i>É. Par bouchons</i>	Série	$\geq 50.7\text{MHz}$	Série	$\geq 50.7\text{MHz}$
<i>É. annulaire</i>	Parallèle	$\leq 10.5\text{MHz}$	Parallèle/ série	$\geq 50.7\text{MHz}$

Les configurations optimales obtenues sont confirmées et justifiées par la structure physique de chacune des configurations des écoulements.

En effet on sait que le liquide est un élément plutôt passif que réactif, ce qui est justifié par la prépondérance de sa partie conductive par rapport à la partie capacitive. Par contre pour l'air il a un comportement inverse. De cette constatation, il découle que pour

l'écoulement par bulles et l'écoulement par bouchons, ils sont bien présentés par une modélisation série (Figure 68), à cause de la prépondérance de la partie liquide dans l'écoulement. Pour l'écoulement annulaire, il peut être assimilé à deux couches de permittivité différentes, empilées l'une sur l'autre (Figure 69). Ce comportement peut être décrit par une modélisation parallèle, vue que la couche la plus prépondérante est la couche d'air.

Cependant il faut signaler que le choix de la modélisation la plus appropriée aux configurations des écoulements diphasiques, n'a pas bénéficié d'un intérêt particulier, dans les anciennes recherches. La seule fois qu'on a parlé de l'impact du « type de disposition » des configurations d'écoulement sur les mesures, c'était dans le travail de Petrick [28]. En effet, dans sa recherche consistant à expliquer l'origine des erreurs d'incertitudes commises lors des mesures du taux du vide par la méthode d'absorption des rayons  $\gamma$ , Petrick a prouvé que pour un même taux du vide, l'atténuation mesurée dans le cas d'une disposition en parallèle de l'eau et de l'air est différente de la disposition série des deux milieux. Ce qui rejoint notre idée de choix de modélisation appropriée aux configurations des écoulements.

Concernant la fréquence optimale, on constate que pour les configurations des écoulements par bulles et par bouchons et dans le cas des deux types de sections de passage, la corrélation est d'autant meilleure quand la fréquence augmente. La justification de cette constatation n'a pas fait l'objet d'un sujet de recherche dans le passé.

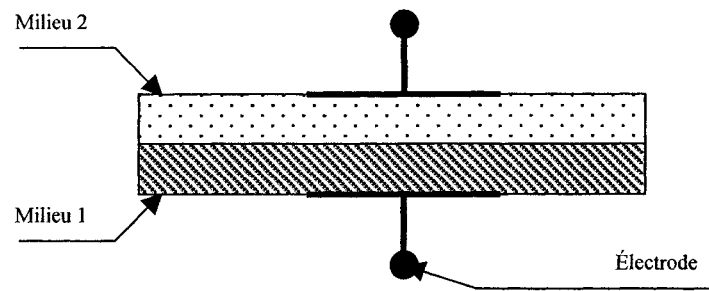


Figure 68 : Modèle série.

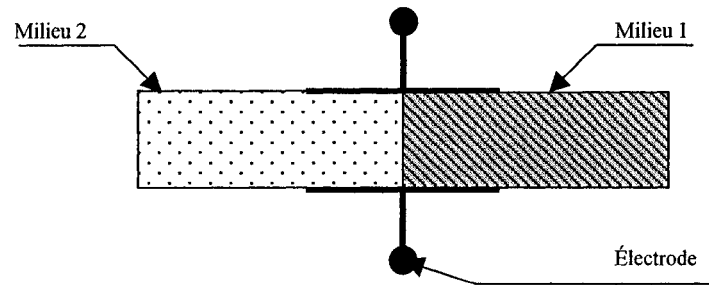


Figure 69 : Modèle parallèle.

## Chapitre 6: Analyse statistique

Dans ce chapitre, on se propose de présenter les résultats correspondants à l'analyse statistique par la fonction de densité de probabilité, FDP, des pseudo-signaux générés par le logiciel de simulation.

Une autre analyse par la fonction de densité de puissance spectrale, FDPS, sera également effectuée. En effet ces deux analyses ont démontré leur « efficacité » dans l'identification des configurations des écoulements diphasiques. Dans ce sens Vince et Lahey [34] ont démontré, à travers leurs recherches que la considération de la FDP et la FDPS constitue un bon indicateur « objectif » pour l'identification des configurations des écoulements diphasiques. L'utilisation de la variance de la FDP est recommandée, car c'est un paramètre qui répond aux changements observés dans les configurations d'écoulement sans qu'il soit affecté par les vitesses superficielles.

Les pseudo-signaux considérés correspondent à l'évolution du taux de vide, de la résistance et de la capacité. L'analyse sera effectuée pour les deux types de section de passage, section à géométrie circulaire et section à géométrie carrée.

### **6.1 Analyse par fonction de densité de probabilité FDP**

L'objectif de cette analyse est de consolider les résultats obtenus des simulations par des techniques qui ont montré leur efficacité dans le domaine de l'identification des configurations des écoulements diphasiques.

### 6.1.1 Définition de la fonction de densité de probabilité FDP

La fonction de densité de probabilité (FDP) est définie comme étant le taux de changement de la probabilité en fonction de l'amplitude. Elle est exprimée comme suit :

$$p(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left[ \frac{\text{Prob}[x < x(t) \leq x + \Delta x]}{\Delta x} \right] \quad (6.1)$$

Sachant que  $\{x(t)\}$  représente une séquence de données provenant d'un processus aléatoire et  $\Delta x$  est la largeur de l'intervalle d'observation. Ainsi, il s'en suit que la probabilité est donnée par l'intégration de la fonction de densité de probabilité entre deux valeurs de notre choix.

### 6.1.2 Historique de l'analyse statistique basée sur la FDP

Dans le passé, les configurations d'écoulements ont été identifiées expérimentalement via l'utilisation de photographie. Par après, des cartes de configuration ont été proposées comme une autre alternative. La FDP a été introduite dans le domaine diphasique dans le but de rendre les identifications plus objectives. Dans ce sens, il a été démontré dans plusieurs travaux de recherche (Vince et Lahey[34]) le solide lien existant entre le comportement de certains paramètres statistiques du signal de pression et du taux de vide, avec le type de la configuration des écoulements diphasiques. La première utilisation de la technique de la FDP remonte à 1975. Elle a été proposée par Jones & Zuber (Vince et Lahey [34]). Dans leur travail, ils ont appliqué la technique sur un signal du taux de vide obtenu à partir de la technique d'absorption des rayons  $X$ .

Ainsi pour un écoulement par bulles, ils ont constaté que la FDP est caractérisée par un pic autour d'une valeur faible du taux de vide; pour les écoulements annulaires, ils ont constaté qu'ils sont caractérisés par un pic situé dans la zone de grandes valeurs du taux de vide. Par après Vince et Lahey [34] ont pu démontrer que l'application de la FDP et de la FDPS accompagnée de la variance de la FDP est un indicateur objectif pour l'identification des configurations des écoulements diphasiques.

Ces résultats ont été confirmés par la suite par plusieurs travaux de recherche utilisant différentes méthodes de mesure. Ainsi en 1997 Whally & Costigan [36] ont utilisé l'analyse par FDP pour les signaux du taux de vide obtenus d'une sonde d'impédance électrique et ils ont reporté des résultats similaires à ceux de Jones et Zuber. Rezkallah et Lowe [29] ont utilisé la FDP pour confirmer l'objectivité dans l'identification en utilisant des signaux de collectés à partir d'une sonde capacitive. Teyssedou & Han [31] ont adopté la FDP et la FDPS pour la caractérisation des configurations des écoulements diphasiques à partir des composantes fluctuantes des signaux de la pression et du taux de vide.

### 6.1.3 Procédure de calcul de la FDP

La FDP représente le taux de changement de la probabilité versus l'amplitude. Donc l'aire qui est sous la courbe de densité de probabilité donne la probabilité.

Dans le calcul de la FDP d'une série  $x(t)$  formée de  $N$  points, on suit le schéma suivant :

1. Définition du nombre des intervalles  $K$  à utiliser, ce qui permet la détermination des nombres de classes.

2. Calcul de  $X_{\max} = \max\{x(t)\}$  et  $X_{\min} = \min\{x(t)\}$ .
3. Formation des classes correspondantes à la série  $x(t)$ ; ces classes sont définies comme suit :  $I_i = X_{\min} + i \cdot \frac{X_{\max} - X_{\min}}{K}$ . Sachant que  $i$  représente un entier inférieur à  $K$ .
4. Calcul du nombre  $N_i$  des  $x(t)$  qui se trouvent dans un intervalle  $[I_i \quad I_{i+1}]$  sachant que  $N_i = \text{nombre des } x(t) \text{ tel que } I_i \leq x(t) \leq I_{i+1}$ .
5. Calcul de FDP selon l'équation suivante  $p(i) = \frac{N_i \cdot K}{N}$ .

La Figure 70 montre l'algorithme que nous avons utilisé, pour le calcul de la FDP.

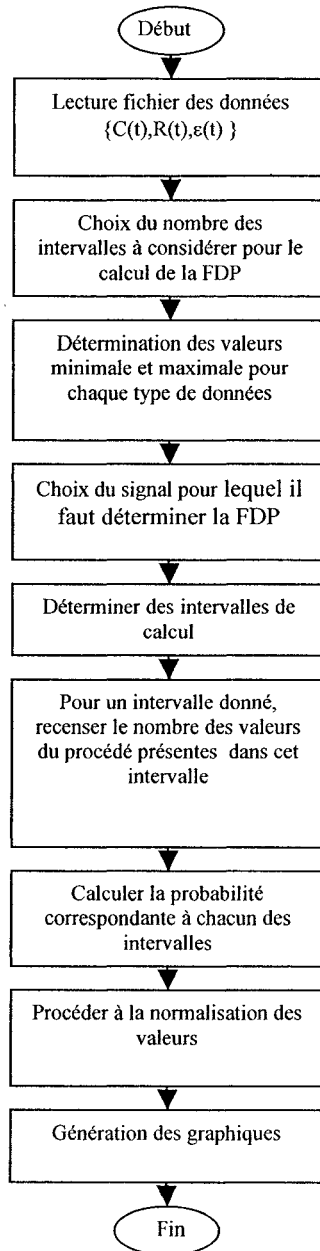


Figure 70: Organigramme du calcul de la FDP.



## **6.2 Résultats de l'analyse par FDP**

Dans les parties qui suivent nous présentons les FDP de chacun des signaux générés pour la résistance, la capacité et le taux de vide et ce pour chacune des géométries de section de passage. À savoir la section de passage carrée et la section de passage circulaire.

### **6.2.1 FDP des pseudo-sigaux engendrés pour la section carré**

Dans ce qui suit on présente pour le même type de configuration d'écoulement, le comportement des trois types de signaux.

Les figures allant de la Figure 71 à la Figure 79, résument le comportement des différents pseudo-sigaux (résistance, capacité et taux de vide), pour les trois types de configurations d'écoulement.

Pour l'écoulement par bulle et pour les trois cas (Figure 71 à Figure 73), les pseudo-sigaux de résistance, de capacité et celui du taux de vide, on constate que la FDP est caractérisé par un seul pic. Pour le pseudo-signal de la résistance et du taux de vide, le pic se trouve du côté des valeurs faibles du taux de vide. Par contre pour le signal de la capacité, le pic se trouve dans les alentours des valeurs élevées. En effet le taux de vide et la capacité sont inversement « proportionnel » du fait que l'augmentation du vide fait diminuer la valeur de la capacité (voir section 5.2.5).

La forme de FDP obtenue pour l'écoulement par bouchons (Figure 74 à Figure 76) est bimodale et elle est caractérisée par deux pics. Pour le pseudo-signal de résistance et du taux de vide, le pic le plus élevé se trouve autour des valeurs les plus faibles du signal.

Le second pic qui est moins important, se trouve situé autour de valeurs plus grandes que le premier pic. Par contre pour le signal de capacité l'emplacement des deux pics est inversé en comparaison avec les deux autres signaux. Ceci est expliqué par le comportement de la capacité qui est inversement proportionnelle au taux de vide (voir section 5.2.5).

La forme de la FDP obtenue pour l'écoulement annulaire (Figure 77 à Figure 79), est caractérisée par un seul pic. Pour le signal de résistance et le signal du taux de vide le pic se trouve dans les alentours des valeurs élevées. Par contre pour le signal capacité le comportement est inverse car comme il a été expliqué auparavant la capacité a un comportement inverse de celui du taux de vide.

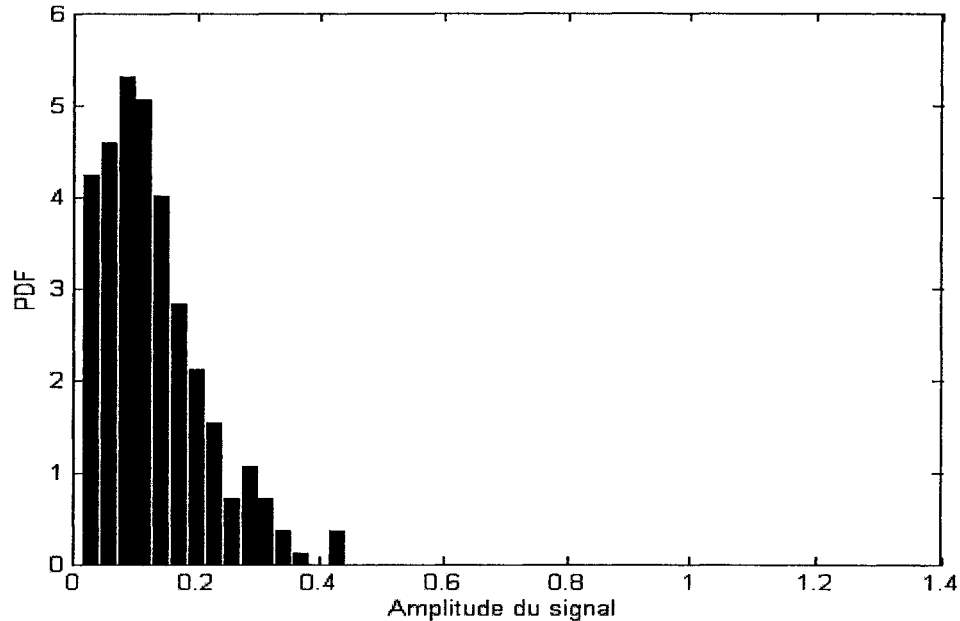


Figure 71: FDP du pseudo-signal de la résistance cas écoulement par bulles (section carrée)

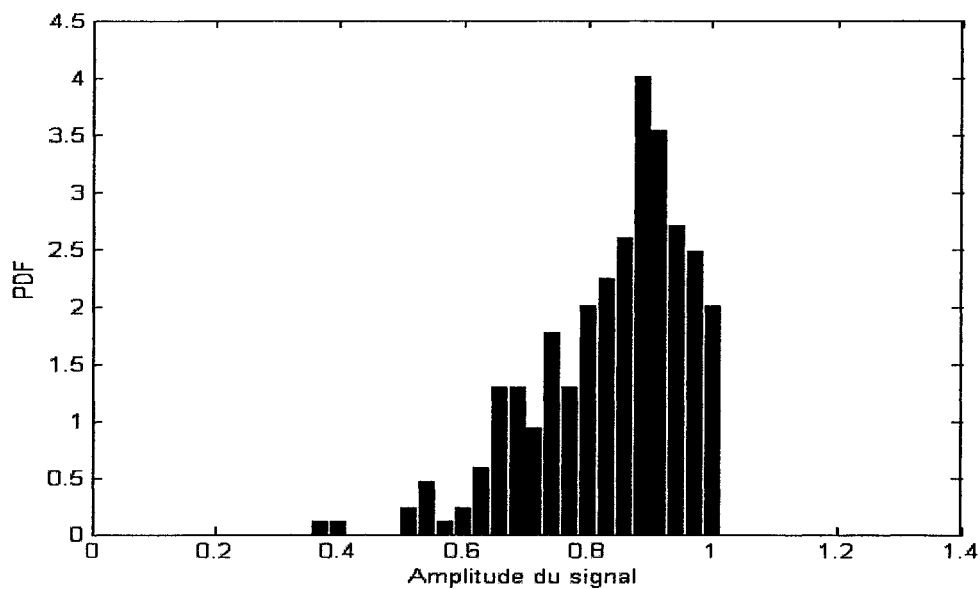


Figure 72 : FDP du pseudo-signal de la capacité cas écoulement par bulles (section carrée).

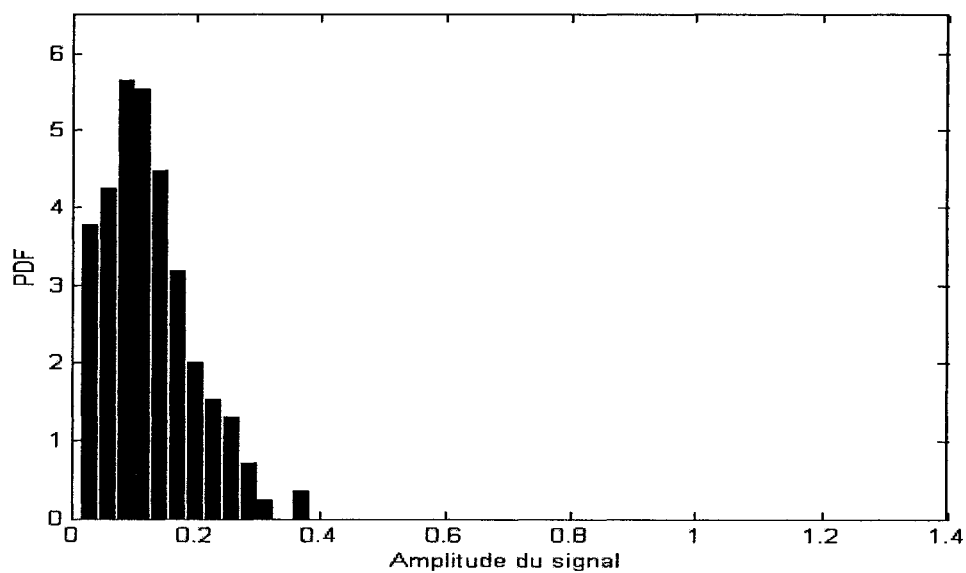


Figure 73 : FDP du pseudo-signal du taux de vide cas écoulement par bulles (section carrée).

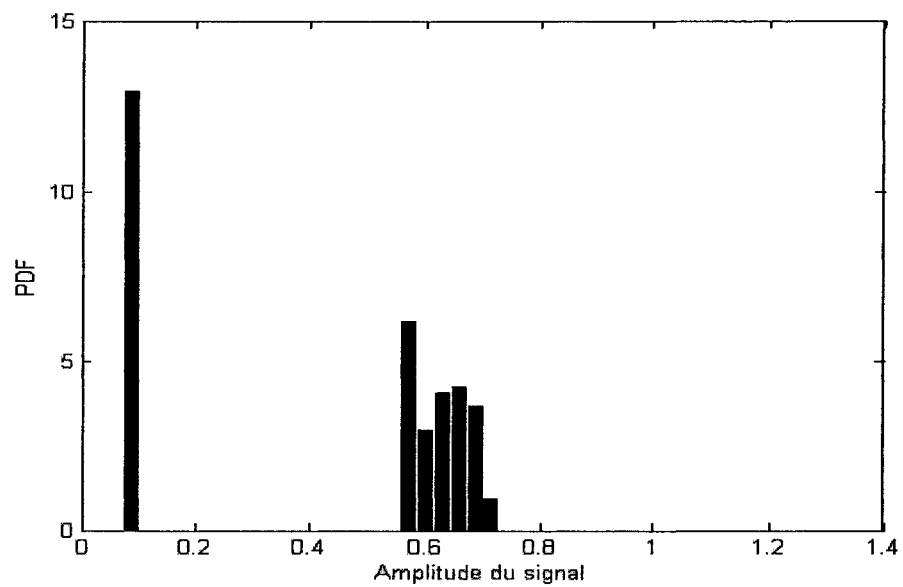


Figure 74 : FDP du pseudo-signal de la résistance cas écoulement par bouchons (section carrée).

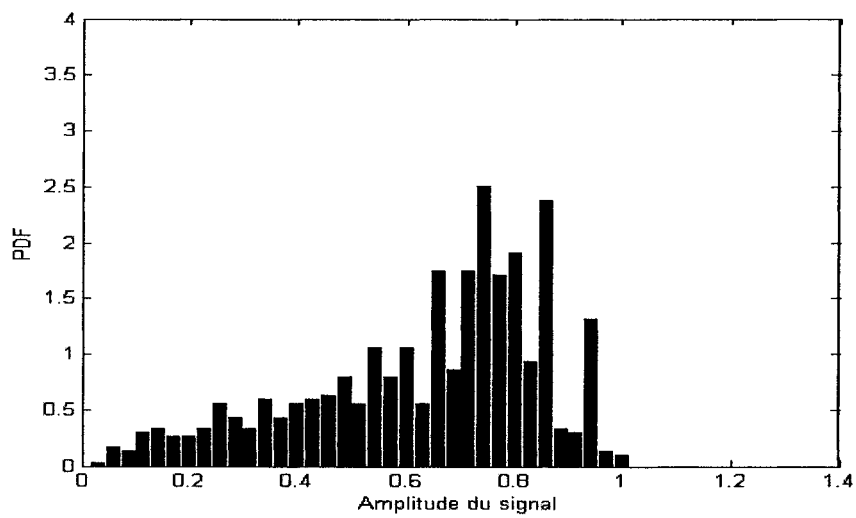


Figure 75 : FDP du pseudo-signal de la capacité cas écoulement par bouchons (section carrée).

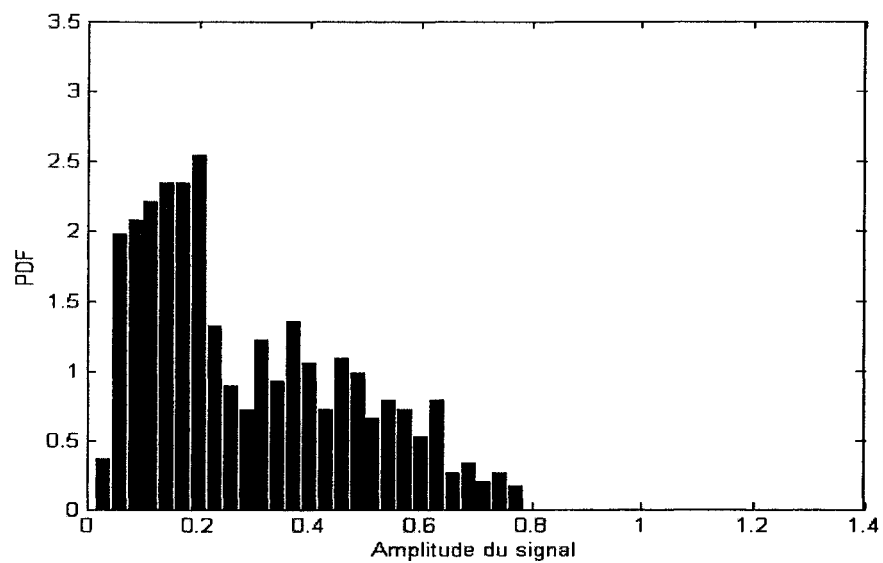


Figure 76 : FDP du pseudo-signal du taux de vide cas écoulement par bouchons (section carrée).

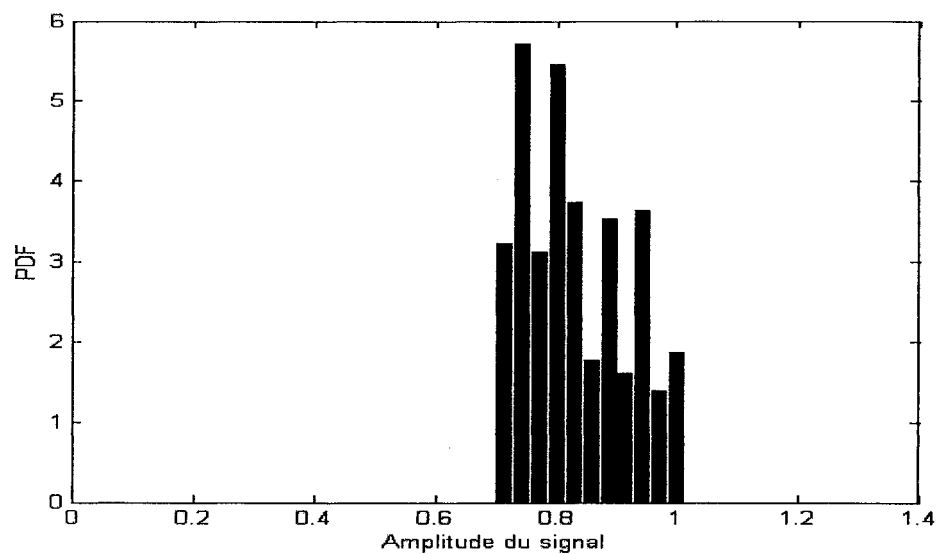


Figure 77 : FDP du pseudo-signal de la résistance cas écoulement annulaire (section carrée).

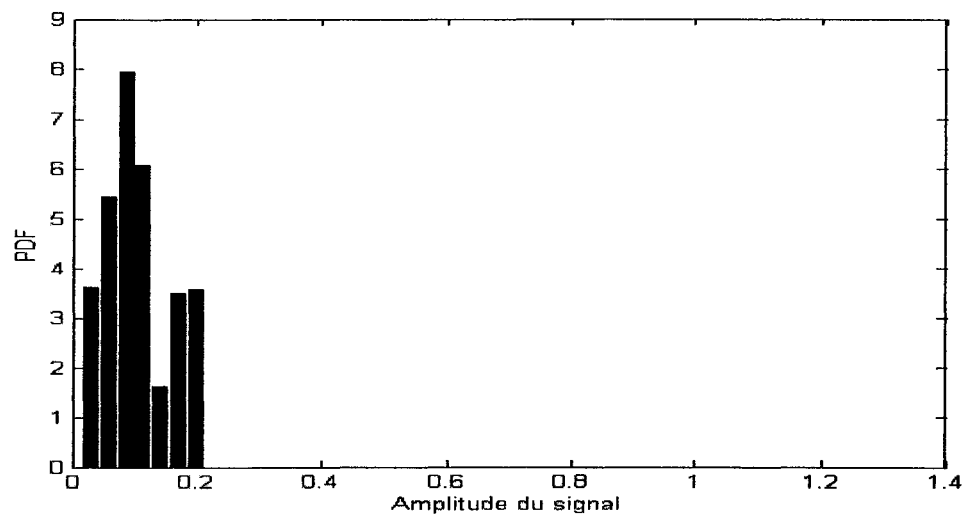


Figure 78 : FDP du pseudo-signal de la capacité cas écoulement annulaire (section carrée).

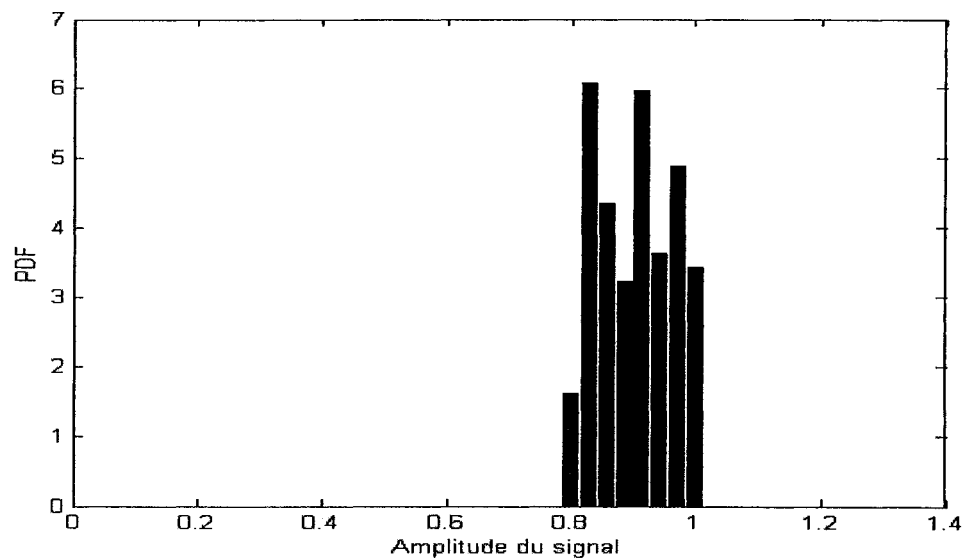


Figure 79 : FDP du pseudo-signal du taux de vide cas écoulement annulaire (section carrée).

### 6.2.2 FDP des pseudo-sigaux engendrés pour la section circulaire

Dans ce qui suit on présente pour le même type de configuration d'écoulement, le comportement des trois types de signaux.

Les figures allant de la Figure 80 à la Figure 88 résument le comportement des différents pseudo-sigaux (résistance, capacité et taux de vide), pour les trois types de configurations d'écoulement.

Les formes de FDP obtenues sont caractérisées par un seul pic autour de la valeur moyenne du signal en question. Pour les écoulements par bouchons, la forme de la FDP est caractérisée par deux pic; allure bimodale. Cependant pour les FDP de l'écoulement par bulles, on constate qu'on ne commence pas vraiment de 0. Ceci est justifié par une limitation du logiciel de simulation qui ne peut délivrer des tailles de bulles plus petite que 1 mm à cause du pas utilisé dans le maillage de la section de passage.

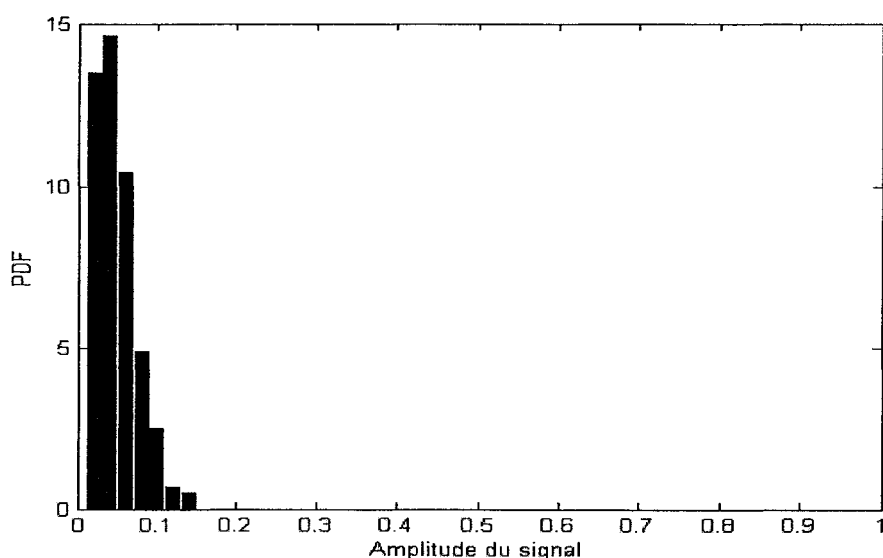


Figure 80:FDP du pseudo-signal de la résistance cas d'écoulement par bulles (section circulaire).

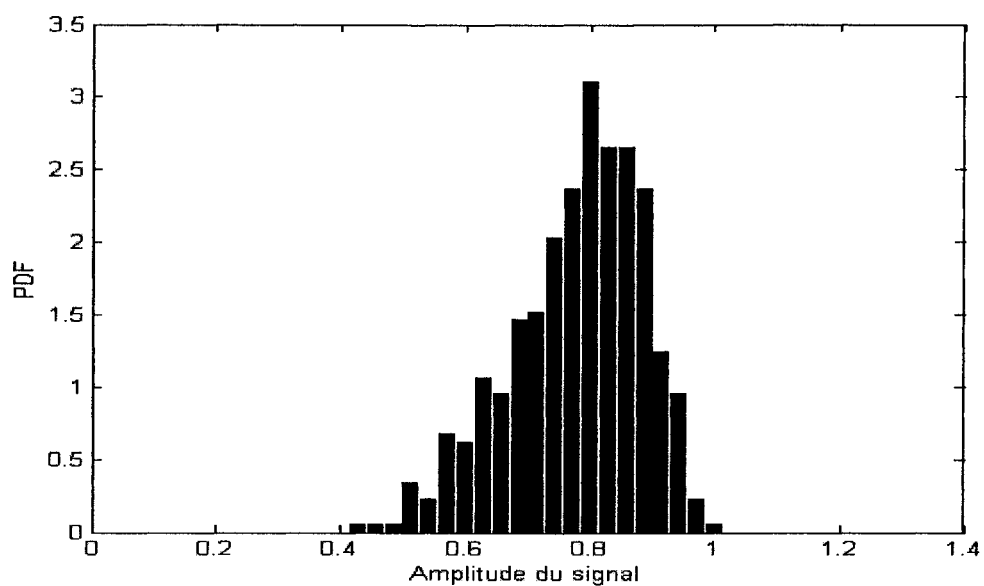


Figure 81: FDP du pseudo-signal de la capacité écoulement par bulles (section circulaire).

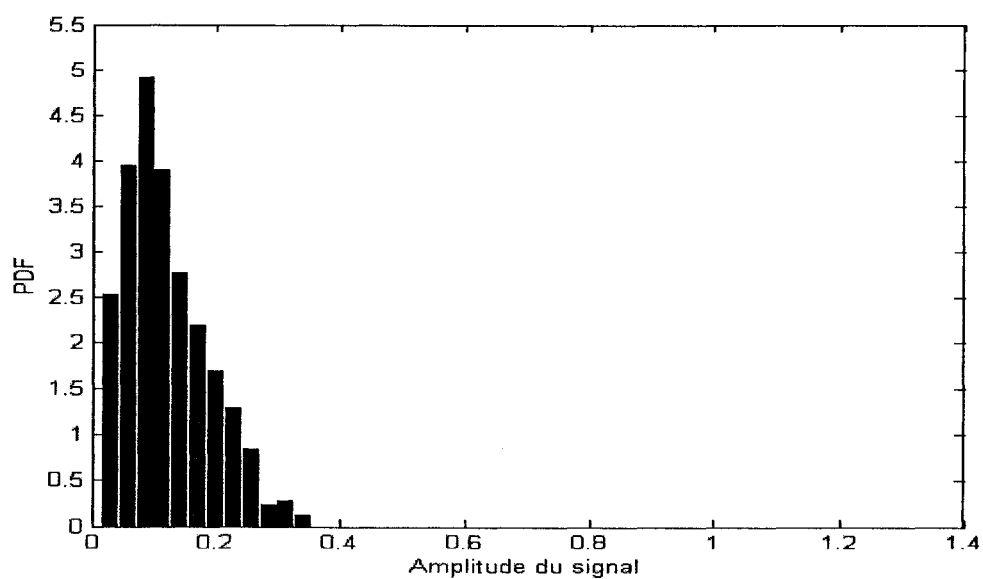


Figure 82: FDP du pseudo-signal du taux de vide cas écoulement par bulles (section circulaire).



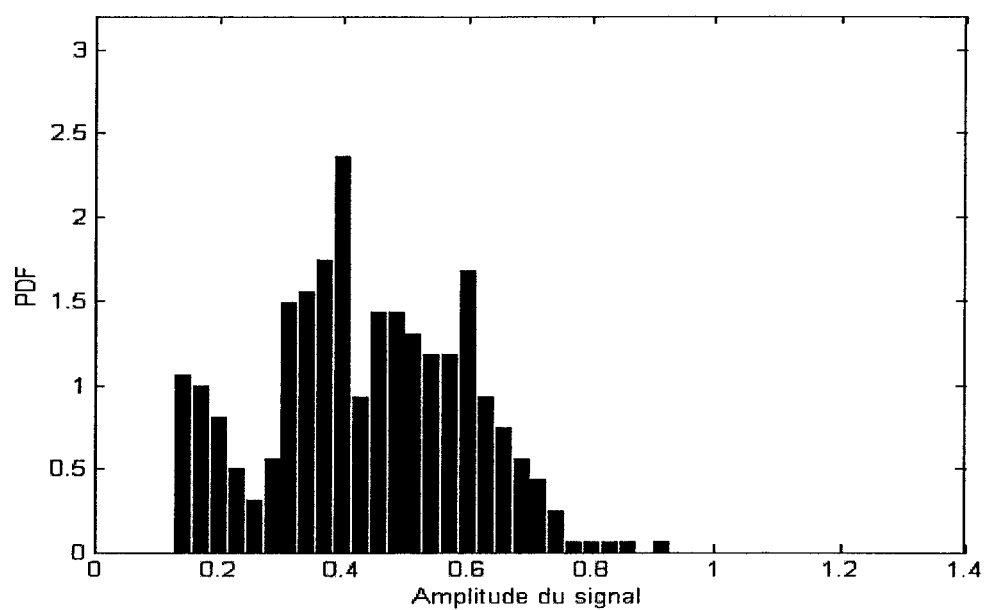


Figure 83: FDP pseudo-signal de la résistance cas écoulement par bouchons (section circulaire).

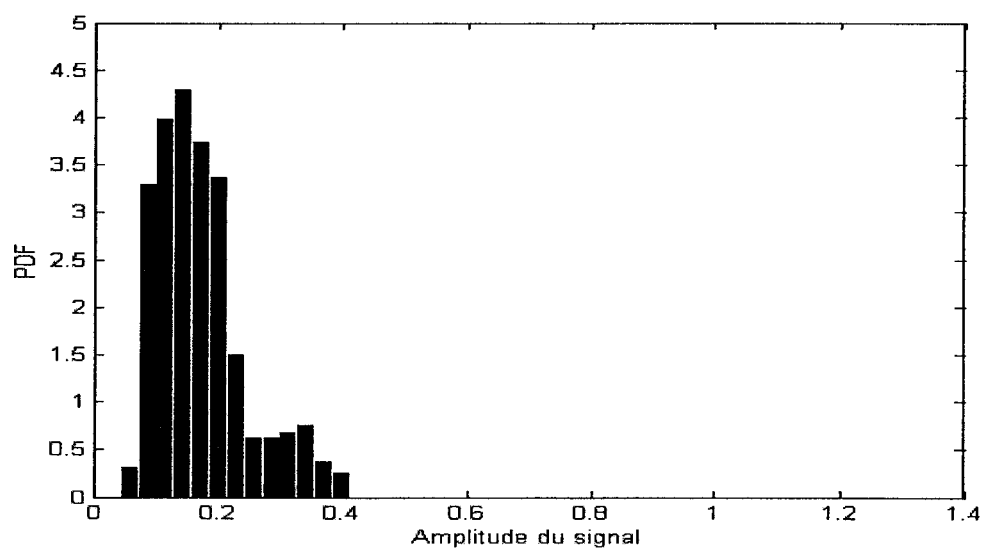


Figure 84: FDP du pseudo-signal de la capacité écoulement par bouchons (section circulaire).

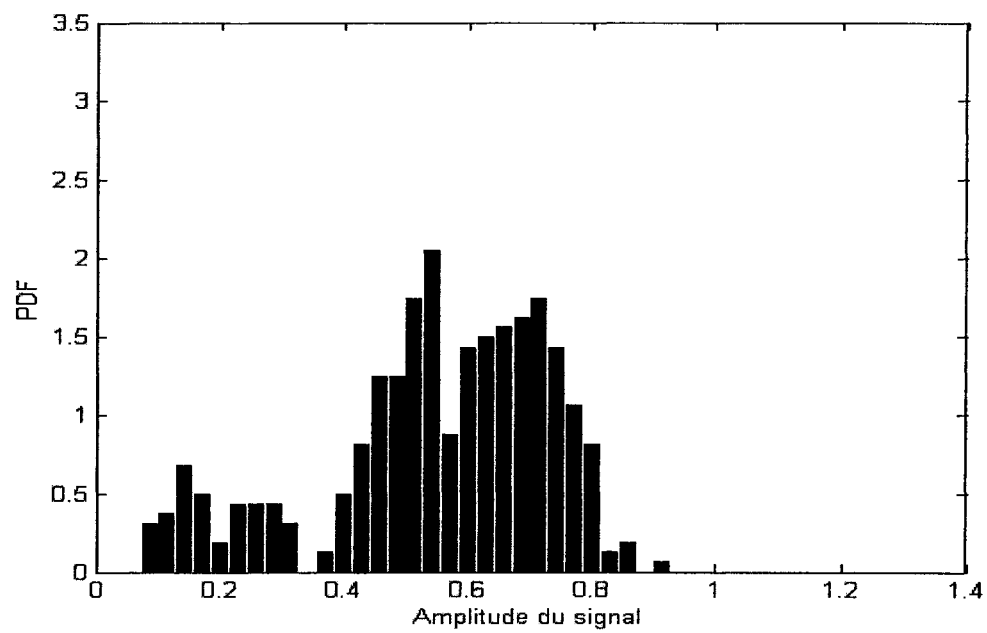


Figure 85: FDP du pseudo-signal du taux de vide cas d'écoulement par bouchons (section circulaire).

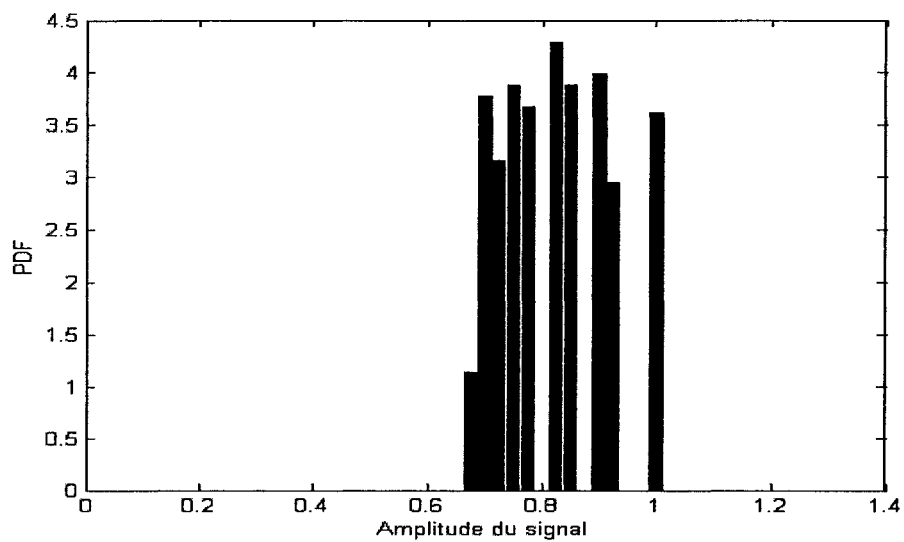


Figure 86: FDP pseudo-signal de la résistance cas écoulement annulaire (section circulaire).

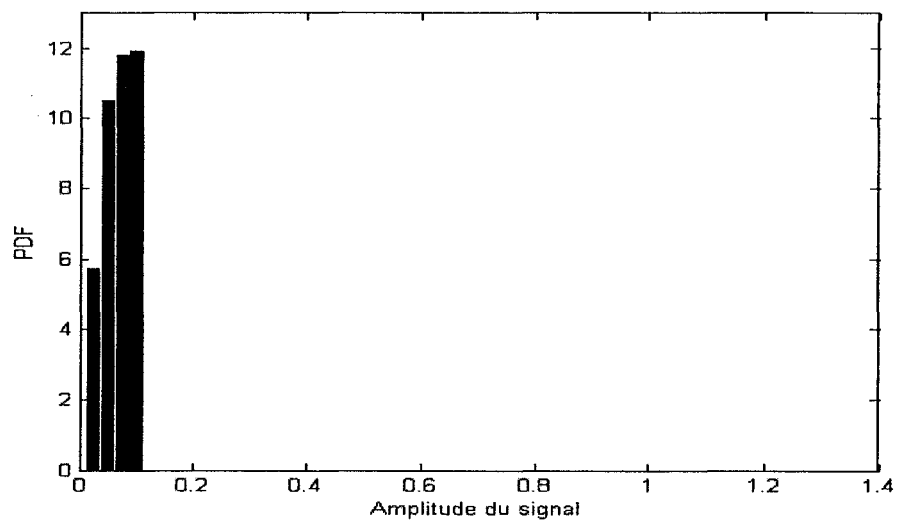


Figure 87: FDP pseudo-signal de la capacité cas écoulement annulaire (section circulaire).

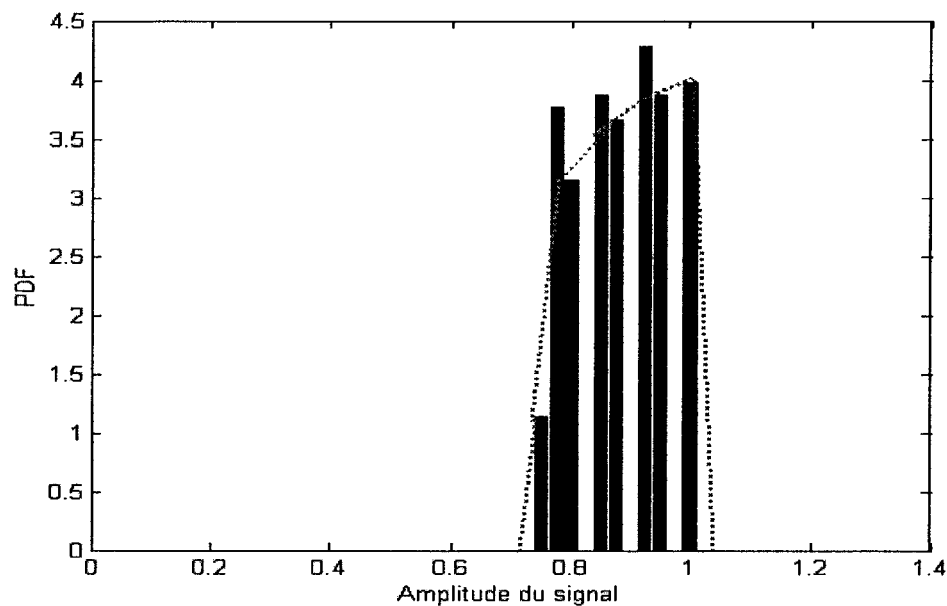


Figure 88: FDP pseudo-signal taux de vide cas écoulement annulaire (section circulaire).

### 6.2.3 Analyse par FDP des signaux de mesure de Han [7]

Dans cette partie on se propose de présenter les résultats d'analyse des signaux de mesure du taux de vide obtenus dans le laboratoire IGN. L'objectif de cette analyse est de confirmer les types de configurations pour pouvoir les utiliser par après pour une « validation croisée » du fonctionnement de la machine neuronale. Ces mesures du taux de vide ont été délivrées par un capteur type impédance électrique et les mesures ont été fournies en terme de potentiel électrique.

Les figures obtenues (de la Figure 89 à la Figure 91) confirment que les signaux obtenus correspondent bien aux configurations attendues. La valeur maximale du taux de vide est de 80% et la valeur minimale enregistrée est de 40%. En effet ceci est justifié par le fait

que les mesures ont été biaisées par le signal engendré par les vibrations de la pompe d'eau.

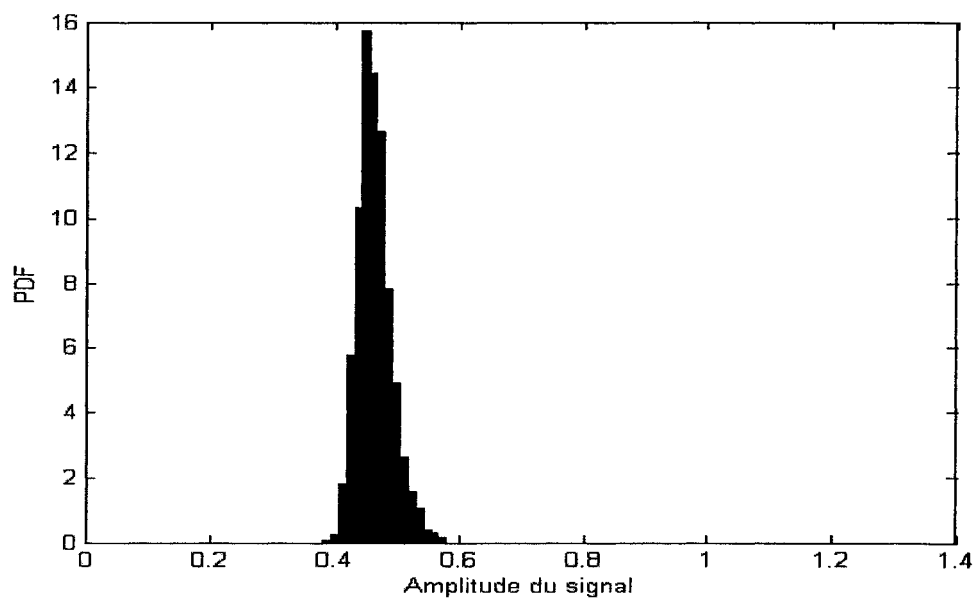


Figure 89: FDP écoulement par bulles section carrée (Han [7]).

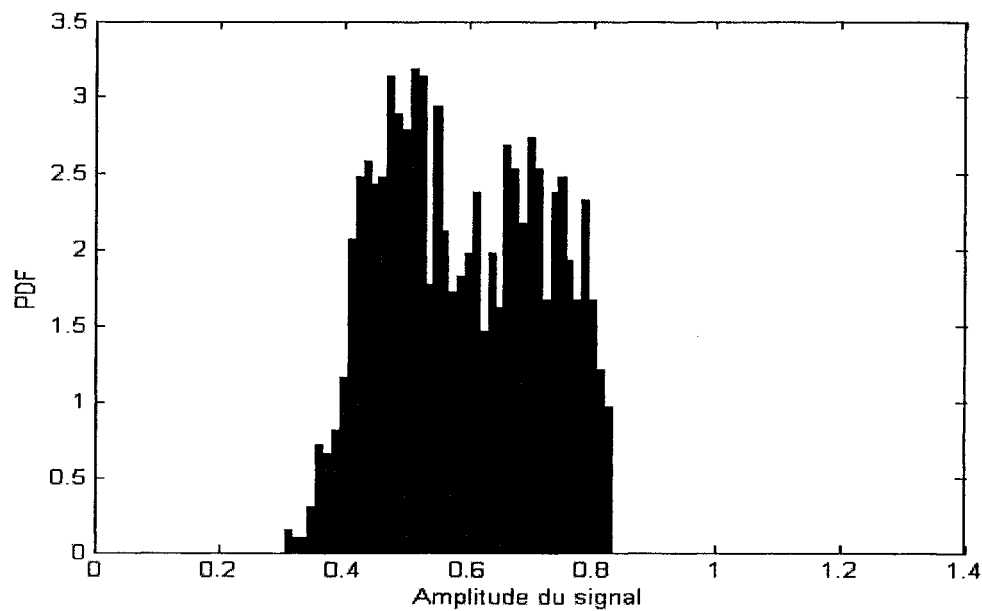


Figure 90: FDP écoulement par bouchons section carrée (Han [7]).

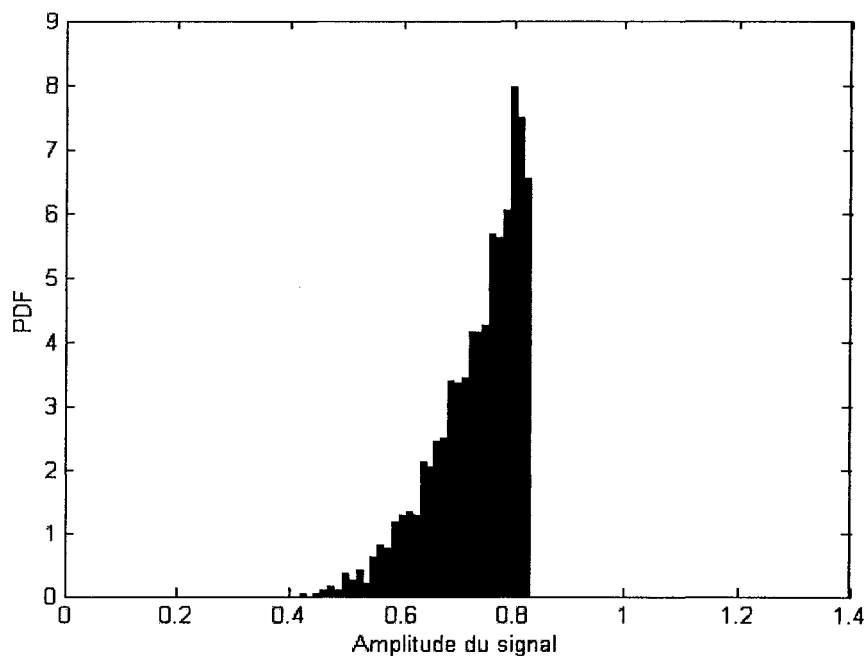


Figure 91: FDP écoulement annulaire section carrée (Han [7]).

Au terme de cette partie dédiée à l'analyse par FDP des pseudo-signaux engendrés par notre programme de simulation, il ressort que la tendance générale des FDP obtenues pour nos pseudo-signaux est semblable à celles obtenues à partir des mesures réelles.

Il faut aussi noter que dans le calcul de la FDP, l'allure de la fonction est fortement influencée par le nombre des intervalles choisis dans la phase d'échantillonnage de la série de données.

Concernant les données du programme de simulation, on constate que la FDP du signal de la capacité présente dans certains cas des pics « anormaux » par rapport aux autres pseudo-signaux. Ceci est expliqué par la sensibilité de la composante capacitive envers

les changements de topologie. Ce qui constitue une autre confirmation des résultats obtenus dans la section 5.2.4.

### **6.3 Analyse par fonction de densité de puissance spectrale, FDPS**

Le but de l'analyse spectrale est de décrire la distribution de la puissance contenue dans le signal en fonction de la fréquence. L'analyse spectrale est utilisée dans un ensemble d'applications, notamment pour la détection de signaux biaisés par le bruit, et ce dans une bande de fréquence donnée.

L'estimation de la puissance spectrale peut être effectuée selon plusieurs modes. Bendat et Piersol [4], ont présenté trois méthodes : filtrage analogique, l'estimation via la fonction de corrélation et enfin l'estimation via la transformée de Fourier. La méthode classique, basée sur le filtrage analogique, consiste à faire passer le signal à analyser à travers des filtres à bandes assez étroites de fréquence  $\Delta f$ . La sortie du filtre est moyennée dans le temps puis elle est élevée au carré, ensuite elle est divisée par  $\Delta f$  pour obtenir la puissance spectrale.

L'autre approche consiste à estimer la puissance spectrale via la transformée de Fourier de la séquence de corrélation de notre signal. Ainsi, l'expression par unité de fréquence du spectre est comme suit :

$$S_{xx}(f) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} R_{xx}(m) e^{\left( \frac{2 \cdot \pi \cdot j \cdot f \cdot m}{f_e} \right)} \quad (6.2)$$

Sachant que  $f$  est la fréquence pour laquelle on veut évaluer le spectre et  $f_e$  la fréquence d'échantillonnage du signal,  $m$  un entier et  $j$  le nombre complexe tel que  $j^2 = -1$ .

La fonction de corrélation  $R_{xx}(m)$  est déduite à partir de la formule suivante :

$$R_{xx}(m) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(n)x(n+m) \quad (6.3)$$

$x(n)$  représente la valeur de notre signal  $x(t)$  prise à l'instant  $n\tau$ , sachant que  $\tau$  est la période d'échantillonnage, l'inverse de  $f_e$  fréquence d'échantillonnage du signal et  $n$  désigne l'instant d'échantillonnage.

L'expression de la puissance spectrale est donnée comme suit :

$$P_{xx}(f) = \frac{S_{xx}(f)}{f_e} \quad (6.4)$$

Cette expression représente la puissance contenue dans le signal dans une bande assez étroite de puissance, d'où la notion de fonction de densité de puissance spectrale. L'unité associée à cette fonction est *Watt/Hz*.

Comme la séquence de corrélation est symétrique, il en découle que la fonction de densité de puissance spectrale l'est aussi. Donc il serait judicieux d'étudier le comportement sur la moitié du domaine.

D'un autre côté, d'après l'équation (6.3), si la moyenne du signal est nulle, il ressort que  $R_{xx}(0) = \sigma^2$  ; donc pour ce cas l'aire sous la fonction de densité de puissance spectrale est exactement la variance du signal.



Bendat et Piersol [4] ont utilisé le théorème de Parseval pour démontrer que la dernière approche est équivalente à l'approche basée sur l'application directe de la transformée de Fourier sur le signal. Comme l'utilisation directe de la transformée de Fourier utilise moins de ressources, nous avons opté pour cette option dans l'estimation de la fonction de densité de puissance spectrale.

Pour les phénomènes typiques, par exemple les signaux sinusoïdaux, tout le spectre d'énergie est centré autour d'une seule fréquence. Pour des phénomènes stochastiques, le cas d'un bruit blanc, la densité spectrale est présente dans toutes les fréquences.

#### **6.4 Résultats de l'analyse par FDPS**

Dans cette partie on se propose de comparer les pseudo-signaux obtenus, par le logiciel de simulation avec les signaux obtenus par Han [7]. La comparaison est effectuée sur la base de la FDPS.

##### **6.4.1 FDPS des signaux de Han [7]**

Les signaux qui ont été collectés par Han [7], lors de son projet de recherche, concernaient les signaux du taux de vide et le signal de pression. Dans cette analyse nous nous sommes concentrés sur l'analyse du signal du taux de vide délivré sous forme de différence de potentiel électrique, mesuré par une paire d'électrodes. Le signal de pression a été exclu de cette étude comparative pour deux raisons. La première c'est que notre logiciel de simulation ne peut reproduire un signal de pression, et par suite on ne possède pas un signal équivalent pour effectuer la comparaison. La deuxième raison, c'est que les fluctuations du signal de pression contiennent d'autres informations, à part

celles engendrées par l'écoulement diphasique, comme les fluctuations dues au fonctionnement de la pompe.

Les données utilisées dans le cadre de cette comparaison, ont été prises pour un débit de liquide de  $0,57m^3/h$  et un débit d'air de  $0,1m^3/h$ . La température de l'eau était de  $\pm 20^\circ C$ .

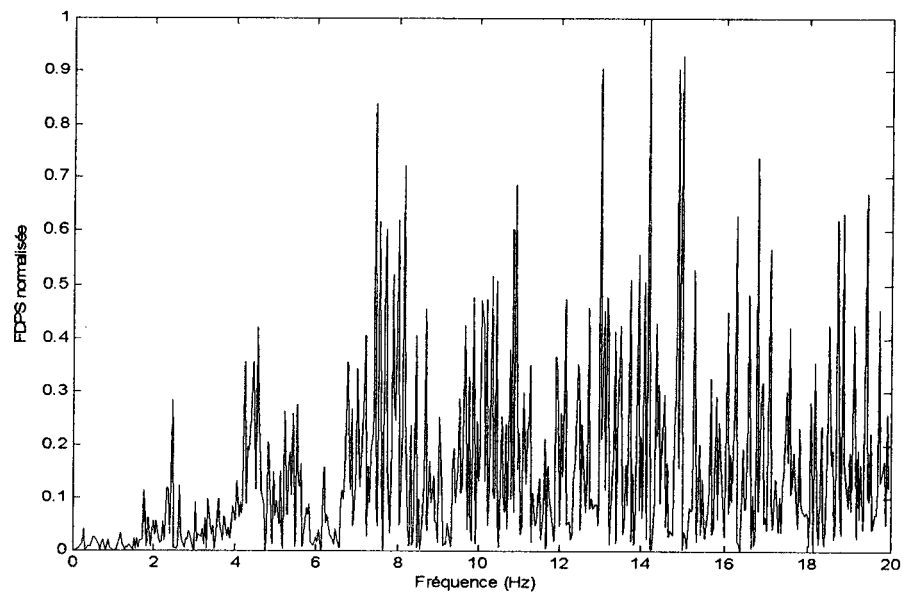


Figure 92 : FDPS pour un écoulement par bulles (Han [7]).

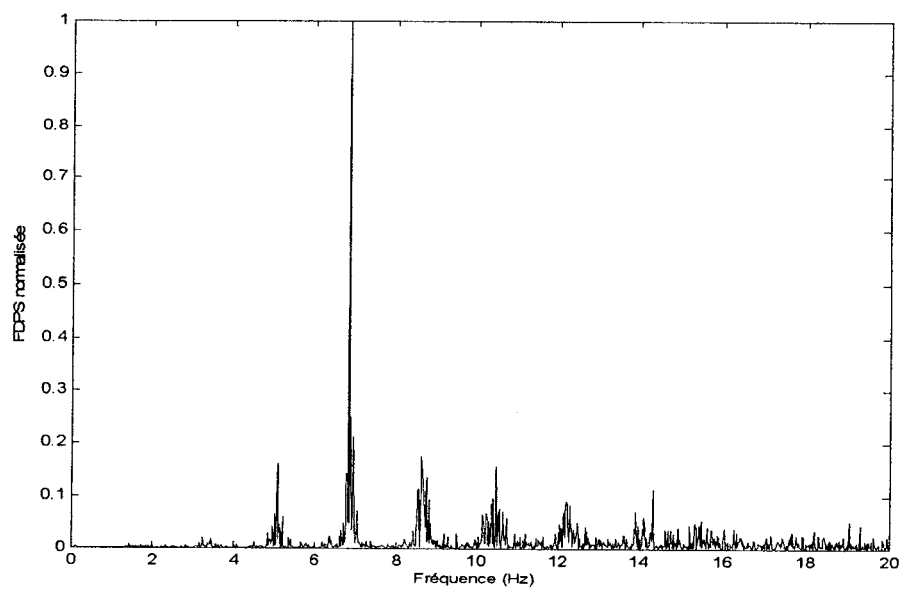


Figure 93 : FDPS de l'écoulement par bouchons (Han [7]).

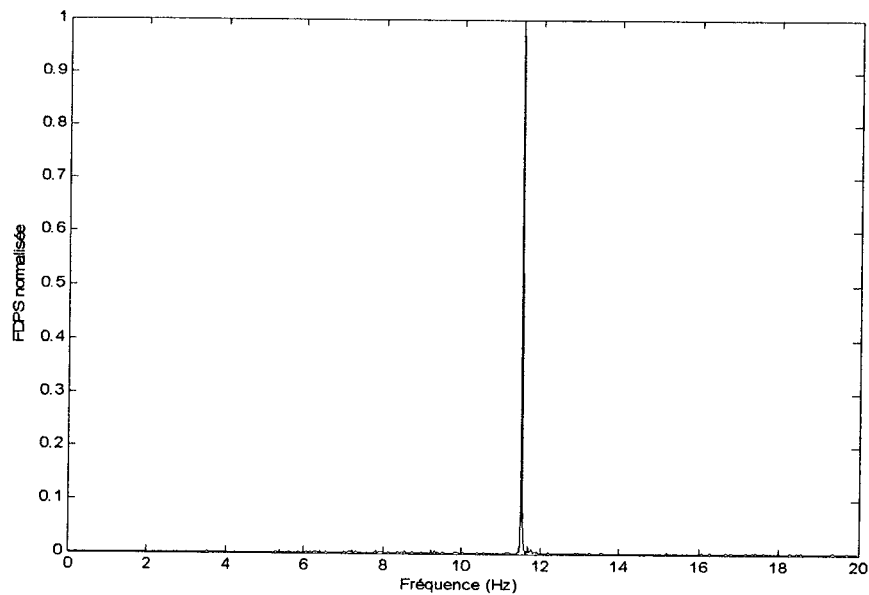


Figure 94 : FDPS de l'écoulement annulaire (Han [7]).

D'après la Figure 92, on constate que l'écoulement par bulles est caractérisé par une bande assez large couvrant une gamme assez importante de fréquences. Cette constatation rejoint l'idée qui a été avancée au début de ce chapitre concernant le comportement spectral d'un bruit blanc.

Pour l'écoulement par bouchons, la FDPS montre la dominance d'une fréquence, accompagnée par plusieurs autres fréquences ayant de petites amplitudes. La Figure 93 illustre cette constatation.

La fréquence dominante est attribuée aux bulles de Taylor qui passent périodiquement à travers la section de passage. Cette fréquence indique que l'écoulement a un caractère périodique caractérisé par la fréquence observée.

Dans le cas de la FDPS d'un écoulement annulaire, on constate qu'il y a une dominance d'une fréquence assez élevée par rapport aux autres composantes (Figure

94). Cette fréquence caractérise le mouvement des vagues formées sur les surfaces, développées à l'interface air-eau.

#### 6.4.2. FDPS des pseudo-signaux obtenus à partir des simulations

Comme nous l'avons précisé auparavant, notre objectif est d'effectuer une comparaison entre le comportement de la FDPS des signaux du taux de vide de Han [7], et les pseudo-signaux générés par notre logiciel de simulation. Pour ce faire nous proposons de l'effectuer pour le cas du signal du taux de vide pour les raisons mentionnées dans le paragraphe précédent.

Les pseudo-signaux, générés par le programme de simulation, sont composés d'une suite de valeurs calculées pour des configurations générées aléatoirement. Et donc la notion du temps n'existe pas réellement, mais elle peut être contournée. En effet si on suppose que cette séquence de valeurs représente un signal échantillonné, on pourrait reconstruire l'original de ce dernier, sachant le nombre des échantillons considérés et la durée d'observation, puisqu'on sait que le nombre des échantillons  $N$ , peut s'écrire de la forme :

$$N = \frac{T_{ob}}{T_e} \text{ ou } N = \frac{f_e}{f_{ob}} \quad (6.5)$$

avec  $T_{ob}$  la période d'observation; l'inverse de la fréquence d'observation qui est  $f_{ob}$  et  $T_e$  est la période d'échantillonnage, l'inverse de la fréquence d'échantillonnage  $f_e$ .

Donc la fréquence d'échantillonnage peut être déduite comme suit :  $f_e = N \cdot f_{ob}$

Pour les FDPS que nous avons déterminées, on constate une certaine similitude, entre les résultats obtenus par Han et les notre. En effet on constate, pour l'écoulement par bulles (Figure 95), la présence d'un spectre assez large. Pour

l'écoulement par bouchons, il y a dominance d'une fréquence assez particulière (Figure 96). La seule exception c'est que dans notre cas il nous est impossible de se prononcer sur la fréquence caractéristique de ces configurations. En effet la fréquence caractéristique, à chacune des configurations d'écoulement, est un paramètre qui est déterminé au laboratoire et qui dépend de plusieurs éléments caractéristiques de l'écoulement, entre autre le débit des deux phases. Chose qui n'a pas été considérée dans notre logiciel de simulation. Alors pour la détermination de la FDPS de nos pseudo-signaux, la période d'observation a été ajustée de telle manière à coïncider avec les fréquences constatées dans les travaux de Han [7]. Pour les fréquences caractéristiques des configurations nous nous sommes référés aux résultats de Han [7]. Ainsi l'obtention des FDPS des Figure 96, Figure 97 et Figure 98 suppose une fréquence d'échantillonnage variant entre  $8kHz$  et  $9kHz$ .

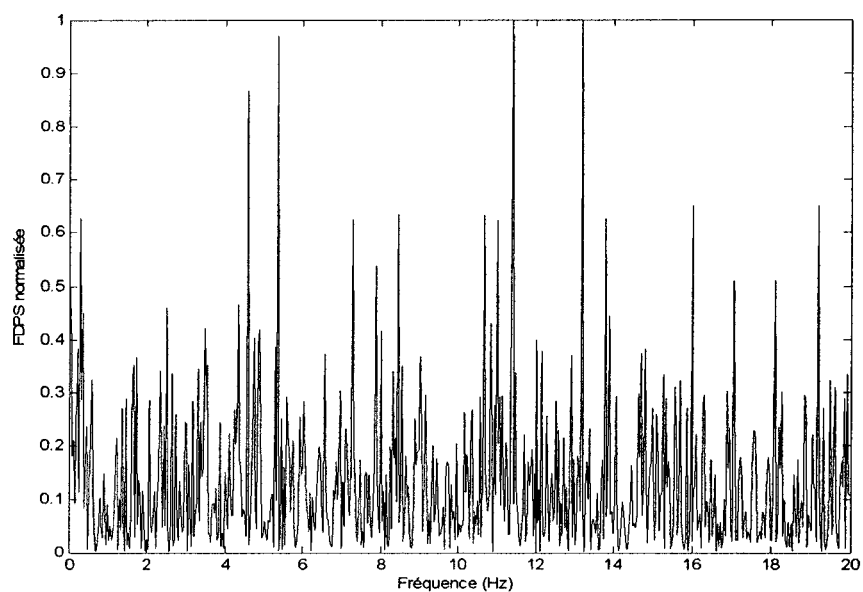


Figure 95 : FDPS du pseudo-signal taux de vide cas de l'écoulement par bulles.

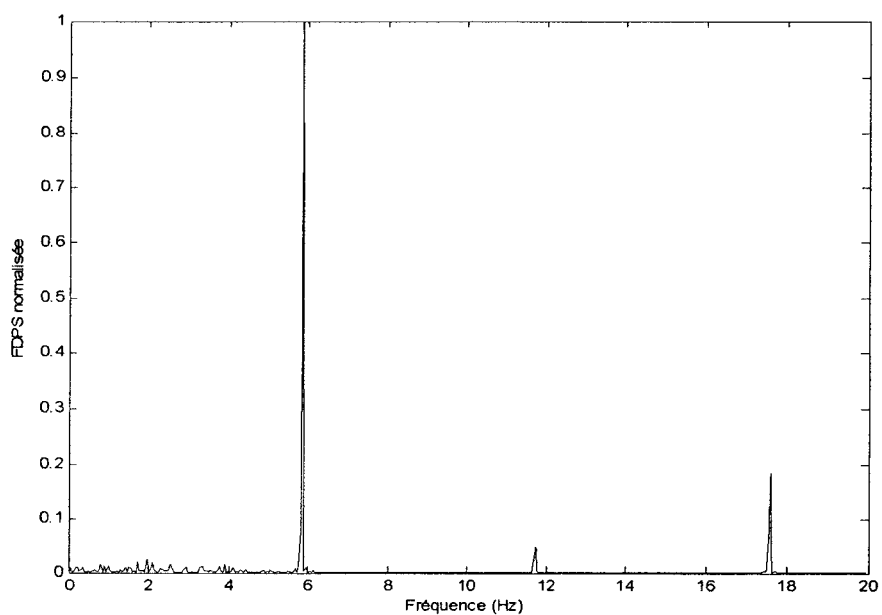


Figure 96 : FDPS du pseudo signal taux de vide, cas de l'écoulement par bouchons.

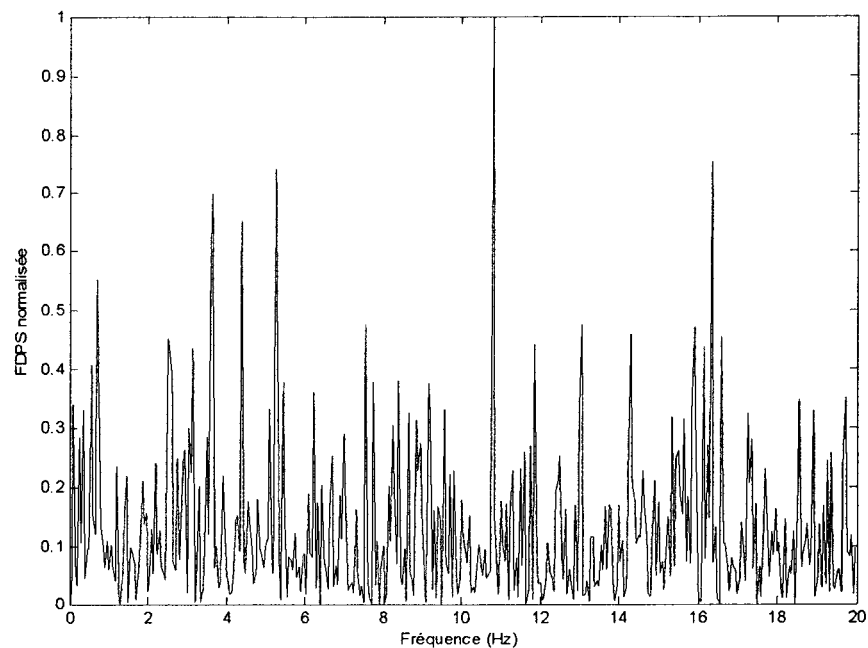


Figure 97 : FDPS pseudo-signal taux de vide, cas de l'écoulement annulaire.

La Figure 95, correspondante à l'écoulement par bulles montre un spectre assez large et distribué sur toutes les fréquences. Ce qui reste conforme avec les essais menés par Han [7].

La Figure 96 correspond au cas d'un écoulement par bouchons. Cette dernière est caractérisée par un pic prononcé autour de  $6\text{Hz}$ , accompagné de petits pics. Les premiers pics caractérisent l'aspect périodique du déplacement des bulles de Taylor et les derniers correspondent à la présence des bulles aléatoires dans le bouchon liquide.

Pour le pseudo signal correspondant à l'écoulement annulaire (Figure 97), on constate qu'il présente un pic autour de  $11\text{Hz}$ , mais en parallèle il comporte des fluctuations non négligeables qui ne sont pas présentes dans le cas réel. Cette



constation est justifiée par le fait que la forme simulée des vagues, formées sur l'interface air liquide de l'écoulement, était trop condensée par rapport à la réalité. D'où l'allure des figures.

Dans ce qui suit, nous effectuerons la FDPS du pseudo-signal de la capacité et ce pour toutes les configurations diphasiques. Le but de cette analyse est de voir le comportement de ce dernier par rapport aux figures montrées précédemment.

Pour ce faire, nous allons appliquer au pseudo-signal de la capacité les mêmes fréquences d'échantillonnage que celles calculées dans les cas précédents, puisqu'il s'agit de la même expérience. Donc on appliquera une fréquence de  $9kHz$  pour le pseudo-signal de l'écoulement par bouchons et  $8kHz$  pour l'écoulement annulaire.

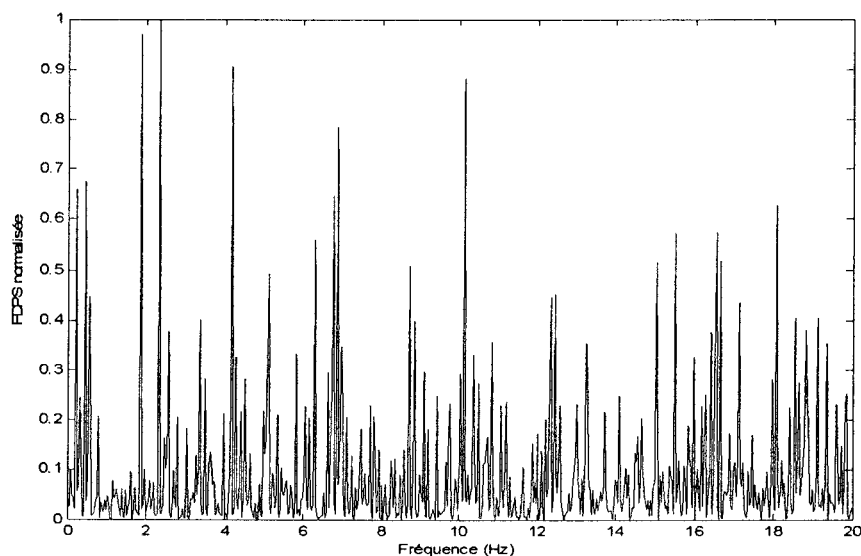


Figure 98 : FDPS du pseudo-signal capacité, cas de l'écoulement par bulles.

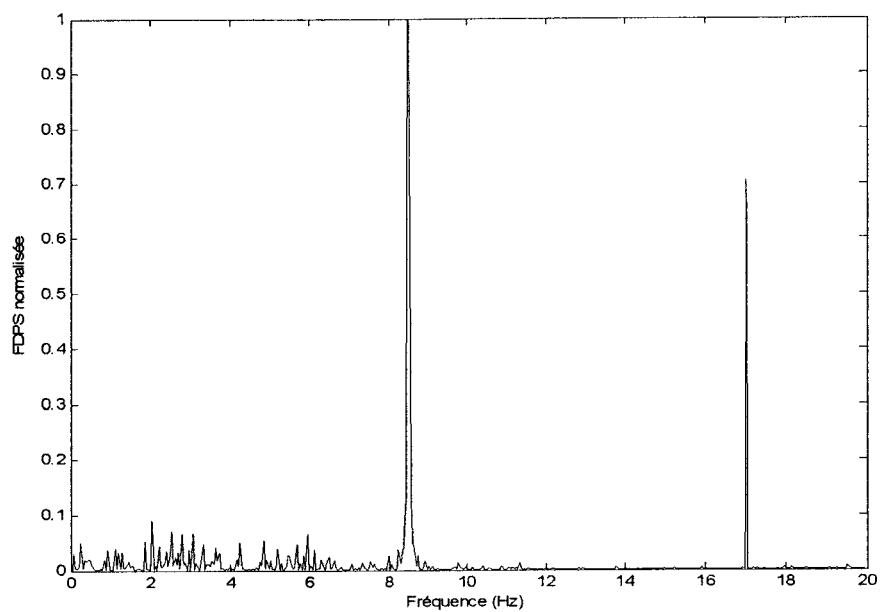


Figure 99 : FDPS du pseudo-signal de capacité, cas écoulement par bouchons.

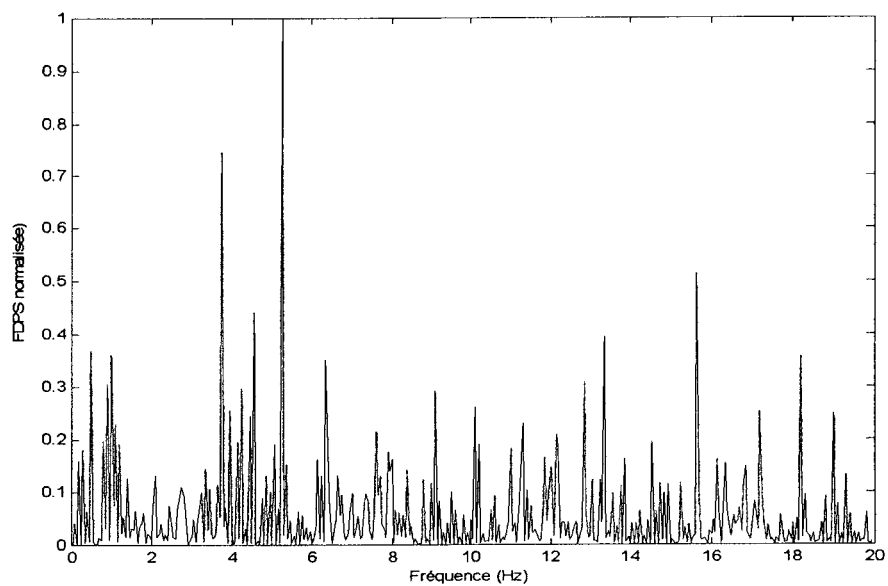


Figure 100 : FDPS du pseudo-signal de capacité, cas écoulement annulaire.

D'après les figures obtenues (de Figure 98 à Figure 100), on constate une certaine similitude entre ces figures et celles vues précédemment. Cependant pour le cas de l'écoulement par bouchons (Figure 99), on constate qu'à côté du pic autour de  $8\text{Hz}$ , la présence d'un autre pic moins prononcé. Cette allure est interprétée comme suit : dans la séquence des valeurs calculées de la capacité, il y a présence de deux « suites » différentes de données dont la construction n'a pas été effectuée de la même manière. En d'autres termes ceci montre que la fréquence de répétition des structures n'était pas la même, ce qui se traduit par une différence dans les fréquences caractéristiques. D'où l'allure obtenue des figures. Ce qui est compréhensible puisque leur détermination est gérée aléatoirement par le logiciel.

Cependant on constate que la fréquence, correspondante à l'amplitude la plus élevée dans le spectre de puissance est de l'ordre de  $8\text{Hz}$ . Cette différence dans les fréquences caractéristiques ne peut être attribuée qu'au comportement de la capacité traduit par la sensibilité envers la topologie de l'écoulement. La même explication s'applique sur le cas de la Figure 100, qui montre une fréquence caractéristique inférieure à celle donnée par Han [7].

## Chapitre 7: Machine neuronale

La notion de machines neuronales a été annoncée vers le début des années 40 (1943) avec le papier de McCulloch & Pitt (Haykin [9]). Leur objectif était de modéliser le comportement des neurones suivant une logique mathématique, tout en intégrant le comportement neurophysiologique. Les résultats préliminaires de McCulloch & Pitts ont servi de base dans la conception et l'idéalisation des éléments de commutation utilisés dans les premiers ordinateurs (Haykin [9]).

Depuis ce temps les réseaux de neurones n'ont cessé de connaître des améliorations. En 1948 Winner (cité dans [9]) a proposé l'approche « d'auto-organisation » (“self organization”) pour l'amélioration de l'apprentissage. Vers 1988, Broomhead (Haykin [9]) a sorti les réseaux “*radial basis function*” (RBF) utilisant des fonctions potentielles comme une alternative à “*multilayer perceptron*” (MLP). En 1990 Poggio et Grossi (Haykin [9]) ont introduit d'autres améliorations sur les RBF en intégrant la théorie de régularisation proposée par Tikhonov (voir Haykin [9]).

Les réseaux de neurones sont composés de plusieurs unités de traitements dont le rôle est de stocker des connaissances expérimentales afin de les exploiter dans le futur, selon les cas et selon la nature du problème posé. Les connaissances acquises, moyennant le processus d'apprentissage et provenant de l'environnement, servent à la définition des poids synaptiques (Figure 101) dans les interconnexions entre les différents neurones. Un réseau de neurones est caractérisé par : des neurones, des synapses, des poids

synaptiques et le type des fonctions d'activation utilisées, sachant que les  $\{X_i\}$  représentent le vecteur d'entrée,  $\{w_k\}$  les poids synaptiques et  $\phi$  une fonction d'activation.

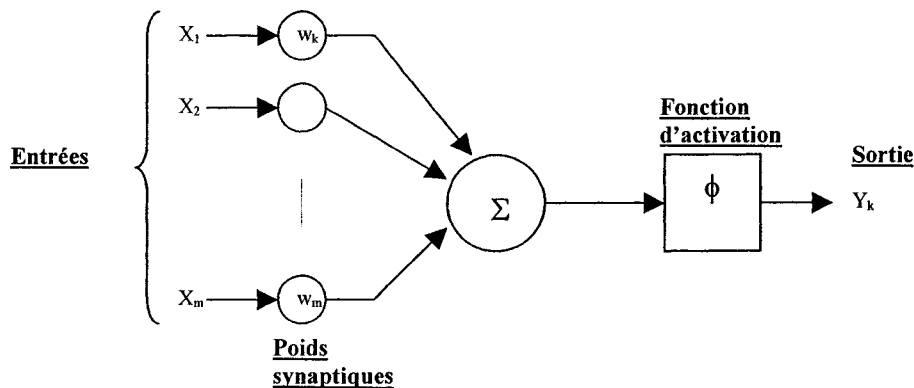


Figure 101: Exemple de neurone.

### 7.1 Différentes architectures des réseaux de neurones

Les réseaux de neurones sont différenciés entre eux par le type de leur architecture. Dans ce cadre on distingue trois principales catégories :

1. réseau à une couche “feed forward”; dans ce type de réseau le flux d’information est unidirectionnel depuis les entrées vers la sortie,
2. réseau multicouche “feed forward”; dans ce type de réseaux, la même entrée est connectée à plusieurs neurones sachant que le sens des données est toujours unidirectionnel,

3. réseau récurrent, c'est un réseau dynamique dont il y a au moins une boucle de rétroaction sur l'une de ses couches.

## **7.2 Mode d'apprentissage des réseaux de neurones**

L'apprentissage est un processus par lequel les paramètres libres du réseau de neurones sont adaptés à travers un ensemble de simulations imposées par l'environnement, dans lequel se trouve le réseau de neurones. Le mode d'apprentissage est déterminé en fonction de la manière par laquelle ces paramètres sont adaptés. Dans ce sens on distingue trois catégories d'apprentissage: avec supervision, sans supervision et avec renforcement.

Dans l'apprentissage avec supervision, on présente simultanément au réseau l'entrée et la sortie désirée pour calculer le poids synaptique qui est déterminé en fonction de la différence entre sortie produite et sortie désirée.

Dans l'apprentissage sans supervision, on détecte automatiquement les régularités qui figurent dans les exemples présentés et on procède à modifier les poids des connexions pour que les exemples ayant les mêmes caractéristiques de régularité provoquent la même sortie.

Dans l'apprentissage avec renforcement, l'amélioration s'effectue continuellement par interaction avec l'environnement dans l'objectif de minimiser un indice prédéfini de performance. Ce type d'apprentissage est utilisé dans les systèmes où on doit plutôt explorer différentes actions et développer une certaine stratégie pour retenir d'une façon

sélective les actions qui maximisent les performances du système. Un exemple typique de cet algorithme est le jeu de cartes et le domaine des finances.

### 7.3 Algorithme d'apprentissage

Une fois le mode d'apprentissage est déterminé, alors il est nécessaire de choisir l'algorithme approprié pour assurer cette fonction. L'algorithme est défini comme étant un ensemble de règles déterminé pour la résolution du problème d'apprentissage. On distingue plusieurs types d'algorithmes d'apprentissage : l'algorithme d'apprentissage basée sur la correction d'erreur, apprentissage basé sur la mémorisation et l'apprentissage compétitif.

L'algorithme d'apprentissage par correction d'erreur ("*Error correction learning*") est un processus associé à la correction par rétro propagation ("*backpropagation*"). Ce type d'apprentissage est caractérisé par la correction de l'erreur, entre la valeur désirée et la valeur produite par le système. L'erreur est définie comme suit :

$$e_j(n) = d_j(n) - y_j(n) \quad (7.1)$$

Avec  $d_j$  sortie désirée au neurone  $j$ ,  $y_j$  sortie réelle au neurone  $j$  et  $n$  le  $n^{\text{ième}}$  exemple pour l'entraînement du réseau. L'objectif de ce type d'algorithme est de pouvoir minimiser l'énergie totale de l'erreur qui est donnée par l'équation suivante :

$$\xi(n) = \frac{1}{2} \sum_j e_j^2(n) \quad (7.2)$$

$j$  un neurone du réseau et  $n$  le  $n^{\text{ième}}$  exemple d'entraînement. L'énergie de l'erreur globale est donnée par l'équation suivante.

$$\xi_{av} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \xi(n) \quad (7.3)$$

Sachant que  $N$  représente le nombre des données d'entraînement. La fonction  $\xi_{av}$  représente la fonction de coût permettant de mesurer les performances du processus d'apprentissage. L'objectif visé par ce processus est de minimiser la fonction de coût. Sa minimisation peut s'effectuer par plusieurs méthodes : la méthode de Newton, la méthode de Gauss Newton, la méthode du minimum des moindres carré "*least mean square*", (LMS) ou la méthode "*linear lest square*", (LLS). La principale différence entre ces différents algorithmes réside dans la définition de la fonction du coût.

Un autre type d'apprentissage a fait son apparition vers les années 60, c'est l'apprentissage basé sur la mémorisation "*Memory based learning*". Ce mode d'apprentissage est caractérisé par l'utilisation d'un large d'historique de configurations bien classifiées. Ainsi lorsque un événement à classifier se présente à l'entrée du système, un « vecteur de voisinage » détermine la classe la « plus proche » à cet événement, ce qui permet son identification. Un exemple typique de réseau utilisant ce type d'algorithme est le réseau RBF.

L'apprentissage Hebbian (Haykin [9]) "*Hebbian learning*" est parmi les modes les plus anciens, proposés pour l'apprentissage. Ce mode est inspiré du comportement neurobiologique des neurones. En effet, si deux neurones des deux côtés du synapse sont simultanément excités, le poids du synapse qui les relie augmente en conséquence. Si les deux neurones sont excités d'une façon asynchrone, le poids du synapse est réduit ou même annulé.



Un autre mode d'apprentissage a été proposé vers 1985 par Rumelhart et Zipser (Haykin [9]), c'est l'apprentissage compétitif. Dans ce mode d'apprentissage, les différents neurones rentrent en compétition entre eux même. Le neurone qui gagne la compétition s'appelle « le vainqueur » ou “winner-takes-all neuron” et c'est sa sortie qui détermine l'appartenance de l'élément d'entrée.

#### **7.4 Exemple d'utilisation de réseaux de neurones**

Les réseaux de neurones ont été largement utilisés dans plusieurs domaines. Par exemple dans la reconnaissance des configurations, la généralisation des résultats, la classification des données, la reconnaissance vocale, etc.

Parmi les machines qui existent on retrouve les réseaux à simple couche “*simple layer perceptron*”. “*Mmultilayer perceptron*”, caractérisé par plusieurs neurones dans les couches intermédiaires, permet un apprentissage facile pour les tâches les plus compliquées. “*Radial basis function*” (RBF) est un autre type de réseau caractérisé par une seule couche cachée.

“*Support vector machine*”, constitue une autre catégorie des machines neuronales dont le principe est basé sur la minimisation du risque, c'est à dire la minimisation de l'erreur de classification. Ce type de réseau est utilisé principalement dans la régression non linéaire et la classification des configurations. Les plans de séparation sont engendrés par un nombre de vecteurs qui servent de base pour la définition de ces plans. D'où l'appellation de vecteur de support.

“*Comitte machine*” est une machine formée « d’experts » dont les décisions sont acheminées vers une sortie « compétitive » qui a le privilège de sélectionner la décision la plus convenable.

“*Self organizing map*” (carte d’auto-organisation), ce type de modèle a été inspiré de l’observation neuro-physiologique qui traduit la dépendance entre les différents détecteurs et qui est regroupée sous forme de carte dont la topologie est en correspondance avec la topologie spatiale

### **7.5 Description de la machine neuronale utilisée**

Pour notre sujet, nous avons opté pour l’utilisation de réseaux de neurones avec un apprentissage supervisé. Ce choix est dicté par le souci de garantir une fiabilité dans les résultats obtenus. Notre machine neuronale est composée de trois réseaux, “*Multi layer perceptron*” (MLP), “*Generalized regression neural network*” (GRNN), “*Probabilistic neural network*” (PNN).

#### **7.5.1 Caractéristiques réseaux MLP**

Le réseau utilisé est caractérisé par 16 neurones dans la couche d’entrée, 2 neurones (Haykin [9]) dans la couche cachée et 1 neurone dans la couche de sortie. Les composantes du vecteur d’entrée représentent les valeurs d’impédance, calculées par le logiciel de simulation, pour chacun des états constituant la configuration d’écoulement (Figure 1).

Pour le réseau de MLP (Figure 102), nous avons opté pour l'algorithme de rétro-propagation "back propagation" utilisant la méthode du descente du gradient qui permet la minimisation de la fonction du coût donnée par l'équation (7.3).

L'algorithme de "back propagation" est régi par les équations (7.1 à 7.3) qui sont répétés ici pour commodité :

$$\xi_{av} = \frac{1}{N} \sum_1^N \xi(n) \quad (7.4)$$

$$\xi(n) = \frac{1}{2} \sum_j e_j^2(n) \quad (7.6)$$

$$e_j(n) = d_j(n) - y_j(n) \quad (7.5)$$

Sachant que,  $e_j(n)$  représente l'erreur,  $d_j(n)$  sortie désirée,  $y_j(n)$  sortie réel du système et  $n$  le numéro de l'essai.

Pour les neurones de la couche de sortie

$$\Delta\omega_{ij}(n) = \mu e_j(n) \varphi'_j[v_j(n)] y_i(n) \quad (7.7)$$

$\omega_{ij}$  représente le poids synaptique entre l'entrée  $i$  et le neurone  $j$ ,  $\mu$  est le taux d'apprentissage,  $\varphi'$  la dérivée de la fonction d'activation,  $v_j$  entrée du module de la fonction d'activation et  $y_i$  la sortie du neurone  $i$  dans la couche  $i$ , antérieure à la couche  $j$ .

Pour le cas des neurones des couches intermédiaires.

$$\Delta\omega_{ij}(n) = \mu \left\{ \varphi'_j[v_j(n)] \sum_k \delta_k(n) \omega_{kj}(n) \right\} y_i(n) \quad (7.8)$$

Ainsi la forme générale de  $\Delta\omega_{ij}$  s'écrit sous la forme de :

$$(7.9)$$

$$\Delta\omega_{ij}(n) = \mu\delta_j(n)y_i(n)$$

Sachant que dans le cas des neurones des couches intermédiaires  $\delta_j$  peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\delta_j(n) = \left\{ \varphi'_j[v_j(n)] \sum_k \delta_k(n) \omega_{kj}(n) \right\} \quad (7.10)$$

et dans le cas de la couche de sortie,  $\delta_j$  peut s'écrire :

$$\delta_j(n) = e_j(n) \varphi'_j[v_j(n)] \quad (7.11)$$

Pour améliorer la convergence du système, on a opté pour l'algorithme du delta généralisée qui tient compte de la constante d'apprentissage et du moment. Ainsi la forme finale de l'équation est donnée comme suit :

$$\Delta\omega_{ij}(n) = \alpha\omega_{ij}(n-1) + \mu\delta_j(n)y_i(n) \quad (7.12)$$

Sachant que  $\alpha$  représente le moment d'apprentissage;  $\delta_j(n)$  prend la valeur de l'équation (7.10) dans le cas des neurones des couches intermédiaires et la valeur de l'équation (7.11) pour le cas des neurones de la couche de sortie.

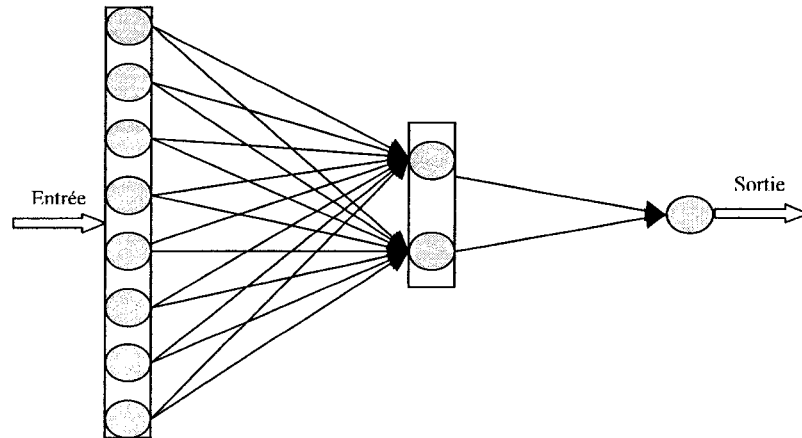


Figure 102: Réseau MLP.

### 7.5.2 Caractéristiques du réseau probabiliste

Les réseaux probabilistes font partie des “*radial basis function*” (RBF). Ils sont composés de deux couches principales plus la couche d’entrée (Figure 103):

- Couche à base radiale; dans la couche intermédiaire
- Couche compétitive; dans la couche de sortie

Quand un vecteur est présenté à l’entrée du réseau, la 1<sup>ère</sup> couche calcule la distance du vecteur d’entrée aux poids synaptiques de cette première couche et produit un vecteur dont les éléments indiquent de combien l’entrée est proche des classes prédéterminées. La seconde couche somme les différentes contributions pour chaque classe des entrées, pour produire un vecteur de probabilité.

Dans la couche compétitive, la fonction de transfert considère le maximum de ces probabilités et produit 1 pour cette classe et 0 pour les autres classes.

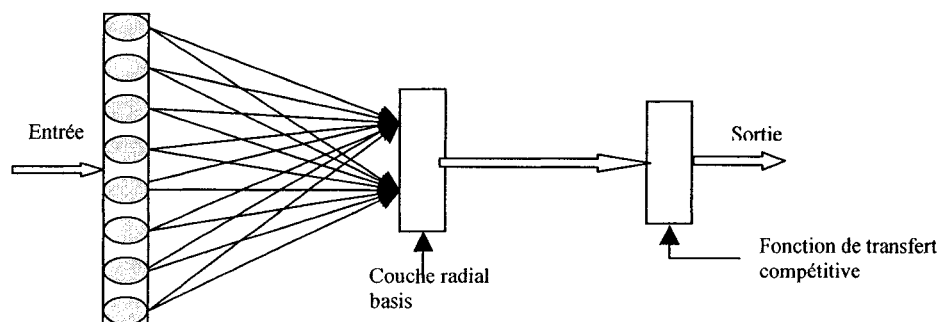


Figure 103: Structure du réseau probabiliste.

### 7.5.3 Caractéristiques du réseau de régression généralisée (GRNN)

Le réseau GRNN représente un cas des réseaux de neurones RBF (Figure 104). Il est souvent utilisé comme « fonction d'approximation » (voir [25]), pour la généralisation et l'estimation.

Le réseau GRNN est constitué de deux couches : une couche “radial basis” et une couche linéaire spéciale.

Dans la première couche, on calcule la distance entre le vecteur d'entrée et les poids synaptiques de la couche d'entrée. Cette distance, plus le vecteur de biais, va être ensuite acheminée vers la couche “*radial basis*” qui détermine le poids d'appartenance de ce vecteur à chacune des classes. Le vecteur de sortie de la couche “*radial basis*” est ensuite multiplié scalairement par le vecteur de poids, correspondant à la couche spéciale linéaire, pour ensuite s'orienter vers le module linéaire qui permettra de produire la valeur estimée correspondante au vecteur d'entrée.

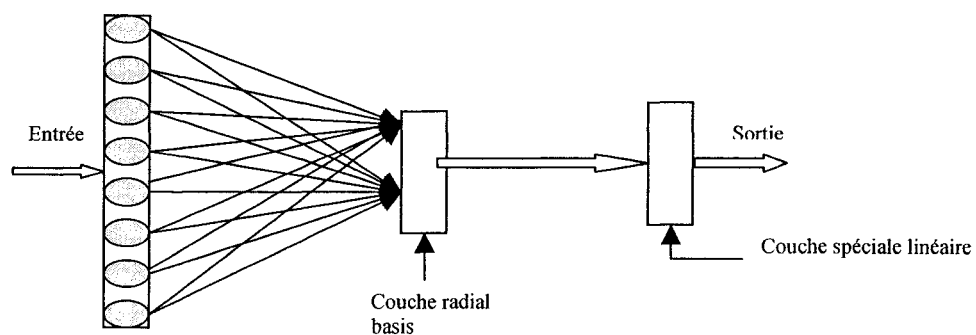


Figure 104: Réseau de régression généralisée.

## 7.6 Objectif de la machine neuronale

Pour l'identification des configurations des écoulements, on a opté pour l'utilisation des réseaux MLP et réseau probabiliste PNN. La redondance a pour objectif d'assurer une certaine fiabilité dans le processus d'identification des configurations d'écoulement. Pour l'estimation du taux de vide on a opté pour l'utilisation du réseau GRNN vu sa réputation de bon estimateur. Le détail des résultats obtenus va être entamé dans les chapitres qui suivent.

## 7.7 Choix des caractéristiques du réseau

### 7.7.1 Nombre d'entrées

L'entrée de notre réseau va être composée de valeurs de résistances et de capacité. Le choix de la dimension de notre vecteur a été effectuée sur la base des fréquences constatées lors des essais qui ont été menés dans le laboratoire IGN (Han [7]) dont les résultats sont résumés dans le Tableau 26.

Tableau 26 : Résumé des fréquences du signal du taux de vide pour chacune des configurations d'écoulement.

<i>Configuration d'écoulement</i>	<i>Fréquence</i>
Bulles	Large spectre
Bouchons	5Hz
Annulaire	10Hz

D'après le théorème de Shanon, la fréquence d'échantillonnage doit être supérieure à 2 fois la fréquence du signal. Donc dans notre cas la fréquence qui est adaptée pour toutes les configurations d'écoulements doit être au minimum de l'ordre de 20Hz. Donc un choix de facteur 8 paraît convenable pour tous les cas d'écoulements mentionnés dans le Tableau 27.

Comme dans notre cas le vecteur d'entrée est composé de deux types de signaux, signal de capacité et signal de résistance, alors sa dimension sera de 16.

### 7.7.2 Données d'estimation et de validation

Pour rendre la machine neuronale composée des réseaux MLP, PNN, GRNN, opérationnelle, il faut passer par deux étapes :

1. La première étape est l'apprentissage de la machine.
2. L'étape suivante est la validation croisée. Son objectif est de vérifier le bon comportement du réseau en présence de données qui n'ont pas été présentes lors de la phase d'apprentissage.

Le nombre optimal des données nécessaire pour la « validation croisée » est donné par la formule suivante :

$$r_{opt} = 1 - \frac{1}{\sqrt{2w}} \quad (7.13)$$

Sachant que  $w$  représente le nombre total des données disponibles et  $r_{opt}$  est le pourcentage des données  $w$  pris pour l'entraînement.  $(1-r_{opt})$  représente le pourcentage des données disponibles pour effectuer la validation croisée.



Pour l'apprentissage des réseaux PNN, GRNN et MLP, on a utilisé 4448 données. Pour la validation croisée on a utilisé 744 données.

### 7.7.3 Choix du type de normalisation à appliquer aux données d'entrées

À travers un ensemble de simulations, il a été constaté que les types de réseau proposés sont sensibles à la nature et à l'écart de variation entre les données. Ce qui affecte l'efficacité du réseau et la fiabilité des résultats.

Pour pallier à cette problématique, on s'est proposé de procéder à leur normalisation. Ainsi on a entamé une étude comparative pour le choix de l'approche adéquate.

Les options disponibles sont comme suit:

- Mise à l'échelle en utilisant la moyenne des données et l'écart type. Ainsi dans une série  $\{x\}$ , la valeur normalisée s'écrit comme suit :  $x_n = \frac{x - \bar{x}}{\sigma}$  sachant que  $\bar{x}$  représente la valeur moyenne de la série de données et  $\sigma$  l'écart type des données.
- Mise à l'échelle entre -1 et 1 en utilisant les valeurs maximale et minimale.

L'analyse a été effectuée pour les deux types de géométrie de sections de passages, carrée et circulaire.

L'indice utilisé dans la comparaison entre les deux approches, est l'incertitude générée lors de l'estimation du taux de vide. Pour cet effet nous avons effectué une série de simulation couvrant toutes les configurations des écoulements et pour les deux types de sections de passage. Les résultats de cette comparaison sont résumés dans le Tableau 27 et 28.

Tableau 27 : Résultat de la normalisation basée sur la moyenne et l'écart type.

section circulaire			section carrée		
Écoulement par bulles					
			valeur		
valeur réelle	valeur simulée	déviati <u>o</u> n	valeur réelle	simulée	déviati <u>o</u> n
0.1766	0.1927	9.12%	0.1103	0.1377	24.80%
0.1244	0.1658	33.28%	0.0857	0.1306	52.39%
0.1094	0.1595	45.77%	0.0881	0.12905	46.48%
Écoulement par bouchons					
			valeur		
valeur réelle	valeur simulée	déviati <u>o</u> n	valeur réelle	simulée	déviati <u>o</u> n
0.2878	0.2238	-22.24%	0.1509	0.1299	-13.92%
0.1846	0.181	-1.95%	0.1961	0.1448	-26.16%
0.2464	0.1882	-23.62%	0.1739	0.1565	-10.01%
Écoulement annulaire					
			valeur		
valeur réelle	valeur simulée	déviati <u>o</u> n	valeur réelle	simulée	déviati <u>o</u> n
0.6482	0.6007	-7.33%	0.756	0.6425	-15.01%
0.6669	0.6189	-7.20%	0.7752	0.592	-23.63%
0.6251	0.5802	-7.18%	0.756	0.5988	-20.79%

Tableau 28 : Résultat de la normalisation basée sur les valeurs maximales et minimales

<i>section circulaire</i>			<i>section carrée</i>		
<i>valeur réelle</i>	<i>valeur simulée</i>	<i>déviaton relative</i>	<i>valeur réelle</i>	<i>valeur simulée</i>	<i>déviaton relative</i>
<b><i>Écoulement par bulles</i></b>					
0.1241	0.2311	86.22%	0.1345	0.1886	40.22%
0.1288	0.2133	65.61%	0.1316	0.186641	41.82%
0.1073	0.2098	95.53%	0.0857	0.1744	103.50%
<b><i>Écoulement par bouchons</i></b>					
0.2572	0.2625	2.06%	0.1701	0.1901	11.76%
0.1548	0.221	42.76%	0.2473	0.214	-13.47%
0.1861	0.2415	29.77%	0.1688	0.189	11.97%
<b><i>Écoulement annulaire</i></b>					
0.6197	0.4503	-27.34%	0.7387	0.4866	-34.13%
0.5889	0.429	-27.15%	0.7475	0.4923	-34.14%
0.6409	0.4345	-32.20%	0.7836	0.524	-33.13%

De ces résultats il découle que, l'approche qui nous assure le taux d'erreur le moins élevé est l'approche basée sur l'application de la moyenne et de l'écart type.

#### 7.7.4 Mode d'apprentissage de la machine neuronale

L'apprentissage de la machine de neurones peut s'effectuer par plusieurs façons :

- ✓ Par l'utilisation des pseudo-signaux formés par le module et l'argument de l'impédance équivalente et de son argument.
- ✓ Soit via l'utilisation des valeurs brutes de la résistance et de la capacité.

Dans notre cas on se propose d'effectuer l'apprentissage avec les valeurs de  $R$  la résistance et de la capacité  $C$ . Ainsi on garantit un apprentissage objectif non biaisé par l'effet introduit par la fréquence.

Cependant avant de procéder à l'apprentissage, les données devront être validées à l'avance par une analyse FDP.

### 7.8 Description de l'application

Comme nous l'avons mentionné, notre machine neuronale est composée de trois types de réseaux MLP, "*multi layer perceptron*", PNN "*probabilistic neural network*" et GRNN, "*generalised regression neural network*".

À travers le processus d'entraînement, la machine stocke les informations nécessaires et calcule les poids synaptiques, pour permettre aux réseaux MLP, PNN et GRNN, d'estimer la configuration et le taux de vide lorsque un vecteur  $[R,C]$  est présenté à son entrée.

Le déroulement des différentes procédures obéit à l'organigramme de la Figure 105

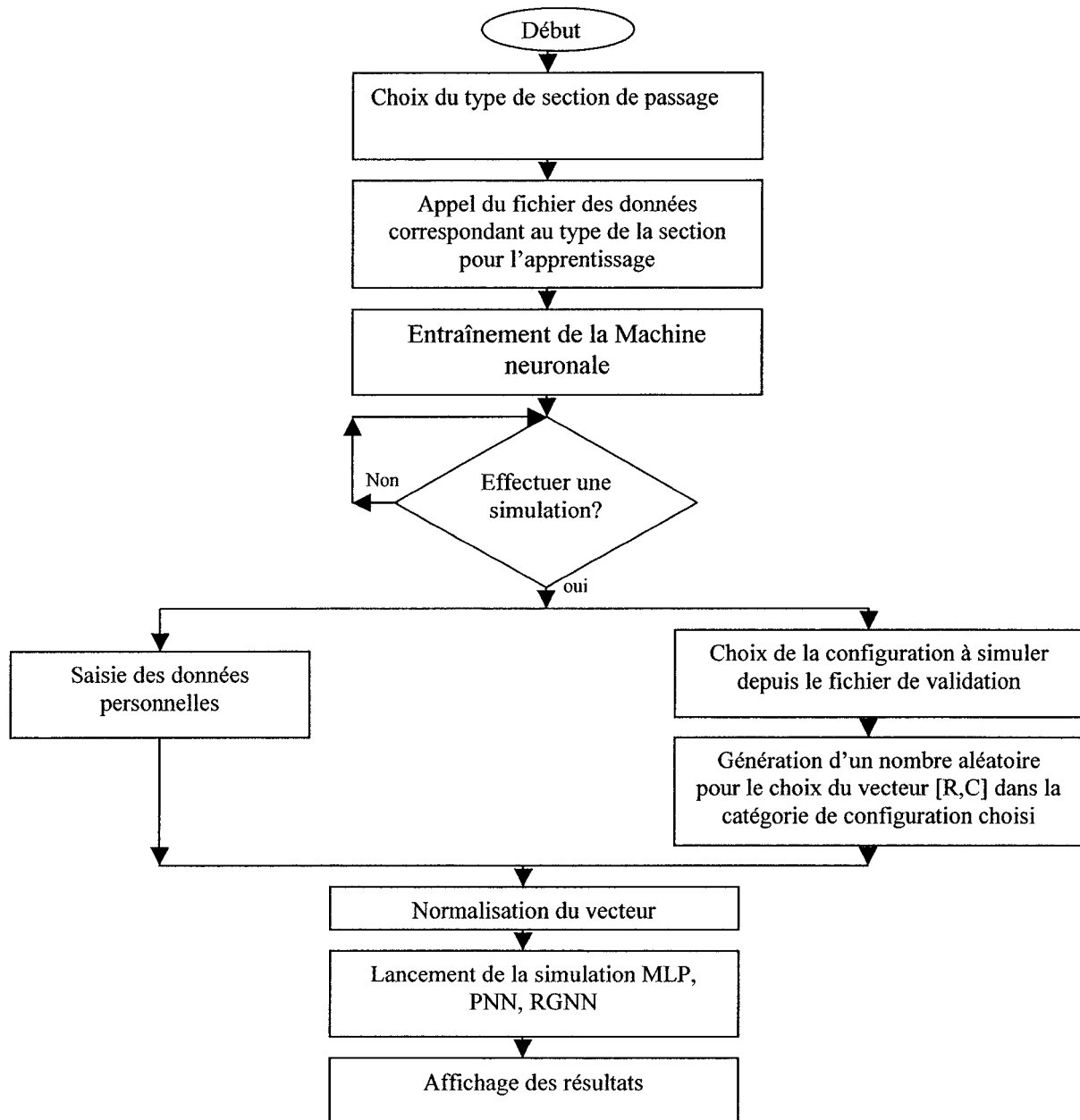


Figure 105: Organigramme du déroulement des différentes étapes du programme de la machine neuronale.

Pour concrétiser l'ensemble des objectifs attendus de la machine neurale, nous avons développé une application gérant simultanément les phases d'apprentissage et de simulation pour les deux types de section de passage et pour les différents réseaux composant notre machine.

Les pseudo-sigaux générés à partir du programme de simulation des configurations des écoulements seront décomposés de deux sous-ensemble : un va servir pour l'entraînement du réseau donc à son apprentissage et le deuxième va servir pour la validation de cet apprentissage.

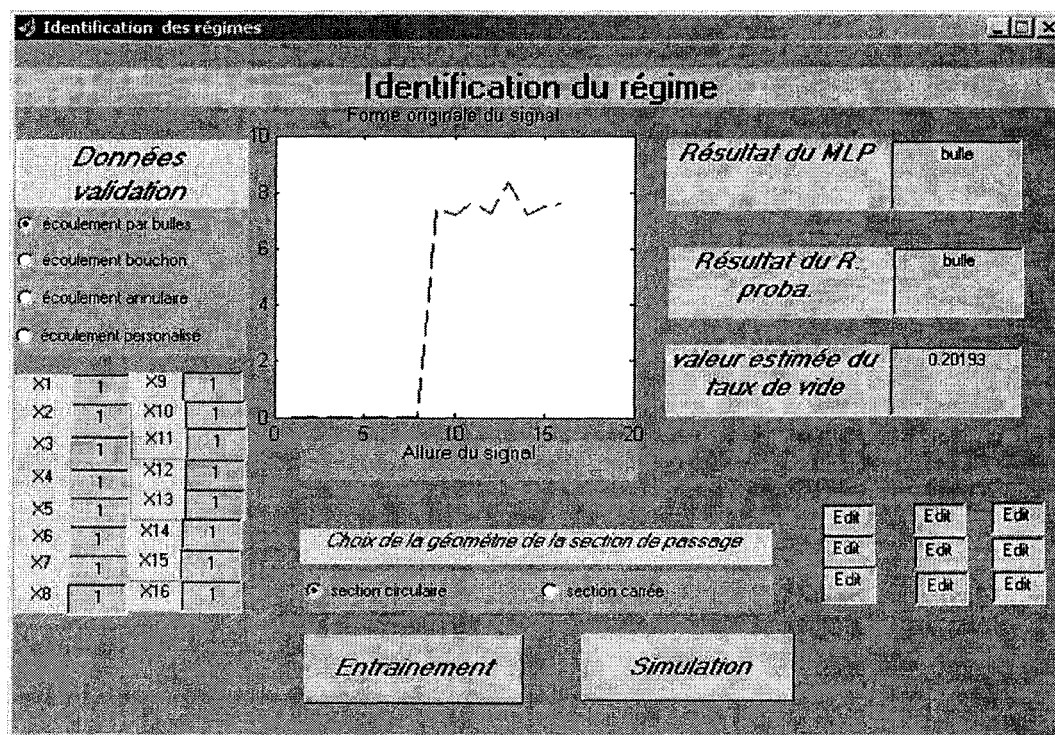


Figure 106: Interface de l'application d'entraînement et de simulation de la machine neuronale.

Une fois que le réseau a « appris », sa fiabilité doit être « validée » par les données réelles obtenues à partir des mesures du laboratoire.

## 7.9 Résultats et discussion

D'après les différentes simulations il s'avère que la normalisation est un paramètre important qu'il faut intégrer dans le processus de l'apprentissage. En effet avec la normalisation on a réussi à améliorer la performance du système et le réseau MLP semble être positivement influencé par cet aspect.

Dans les paragraphes qui suivent on compte présenter les performances des différents réseaux utilisés.

### 7.9.1 Effet du moment et du taux d'apprentissage sur les performances de MLP

La méthode de "back propagation", utilisant la descente du gradient, est une méthode assez sensible au taux d'apprentissage et à la constante du moment. La Figure 107 illustre bien cette constatation.

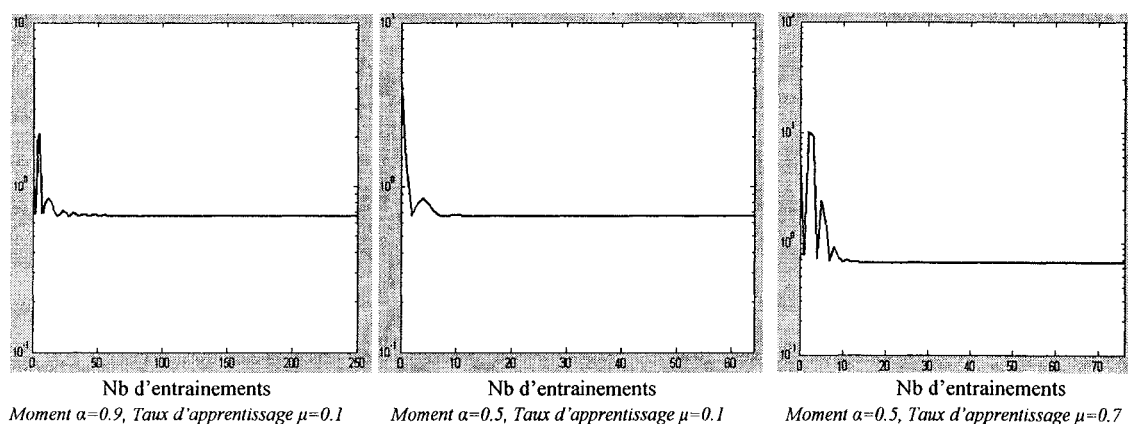


Figure 107: Allure de la fonction de performance en fonction du taux d'apprentissage et du moment.

D'autre part, pour assurer la stabilité de l'ensemble, il est nécessaire d'assurer un taux d'apprentissage assez faible. Ce qui rend la convergence très lente.

Pour les réseaux MLP, l'établissement des conditions de convergence pour l'algorithme s'avère difficile. Ce risque peut nous laisser « s'attraper » dans un minima local. D'un autre côté, les réseaux MLP peuvent être exposés au problème de « sur-ajustement ».

### 7.9.2 Incertitude dans l'identification des configurations des écoulements

Pour accomplir cette tâche, des pseudos signaux générés par le programme de simulation ont été utilisés comme signaux d'apprentissage de la machine. Le signal de chaque entrée est discrétisé et il est représenté par un vecteur de dimension 16. Les 8 premières composantes correspondent à la valeur du signal de la résistance. Les 8 dernières correspondent aux valeurs de la capacité. À travers l'ensemble des simulations, avec les données d'estimation et les données de validation, l'identification des configurations par les réseaux MLP et PNN se fait avec 0 erreurs et ce dans tous les cas.

### 7.9.3 Incertitude dans l'estimation du taux de vide

Pour la mesure de cette incertitude, on s'est proposé d'effectuer une étude comparative basée sur l'incertitude générée lors de l'estimation du taux de vide pour les différentes configurations et pour les deux types de géométries.

Les résultats obtenus sont résumés dans les Tableaux 29 et 30.



Tableau 29 : Incertitude dans l'estimation du taux de vide en se référant aux données d'apprentissage (seulement les données de la simulation)

section circulaire			Section carrée		
valeur	valeur	déviati	valeur réelle	valeur	Déviati
réelle	simulée	relative		simulée	relative
Écoulement par bulles					
0.1474	0.2011	36.45%	0.1158	0.1803	55.67%
0.1199	0.1635	36.33%	0.1345	0.2027	50.71%
0.1161	0.1574	35.60%	0.0979	0.1756	79.26%
Écoulement par bouchons					
0.26874	0.2346	-12.70%	0.16221	0.155498	-4.14%
0.35925	0.31979	-10.98%	0.25146	0.217307	-13.58%
0.32195	0.28096	-12.73%	0.30137	0.204173	-32.25%
Écoulement annulaire					
0.6318	0.57426	-9.11%	0.77255	0.51711	-33.06%
0.64248	0.539209	-16.07%	0.80049	0.594402	-25.75%
0.622	0.60779	-2.28%	0.8028	0.63516	-20.88%

Tableau 30 : Incertitude dans l'estimation du taux de vide en se référant aux données de validation (91% sont les données de simulation et 9% sont de Han(1999))

<i>section circulaire</i>			<i>section carrée</i>		
<i>valeur</i>	<i>valeur</i>	<i>déviatio</i>	<i>valeur</i>	<i>valeur</i>	<i>déviatio</i>
<i>réelle</i>	<i>simulée</i>	<i>relative</i>	<i>réelle</i>	<i>simulée</i>	<i>relative</i>
<b><i>Écoulement par bulles</i></b>					
0.13094	0.193259	<b>47.59%</b>	0.10721	0.170339	<b>58.88%</b>
0.1156496	0.158214	<b>36.80%</b>	0.10198	0.1789	<b>75.43%</b>
0.13106174	0.155071	<b>18.32%</b>	0.0899	0.16144	<b>79.58%</b>
<b><i>Écoulement par bouchons</i></b>					
0.21956	0.209197	<b>-4.72%</b>	0.32737	0.223162	<b>-31.83%</b>
0.25324	0.239619	<b>-5.38%</b>	0.2104	0.194058	<b>-7.77%</b>
0.3693	0.340374	<b>-7.83%</b>	0.29244	0.209026	<b>-28.52%</b>
<b><i>Écoulement annulaire</i></b>					
0.68541	0.6305	<b>-8.01%</b>	0.7599	0.446908	<b>-41.19%</b>
0.559169	0.508076	<b>-9.14%</b>	0.7609	0.437851	<b>-42.46%</b>
0.651577	0.60177	<b>-7.64%</b>	0.71886	0.5835	<b>-18.83%</b>

L'incertitude dans l'estimation du taux de vide peut être justifiée par deux aspects :

- Erreur d'estimation, propre au réseau GRNN
- Erreur due à la corrélation entre capacité et taux de vide, d'un côté et la capacité et la topologie de l'écoulement d'un autre côté. En effet, d'après l'analyse effectuée dans le paragraphe 5.2.4, il a été démontré que la valeur de la capacité varie en fonction de la position de la bulle pour un taux de vide fixe. Cet aspect contribue dans l'erreur de l'estimation du taux de vide.

À travers les résultats des paragraphes précédents (Tableau 31), on constate que pour les réseaux probabilistes, même s'ils sont lents à entraîner, ils sont plus performants que les MLP. En effet leur robustesse est justifiée par le mode de conception qui leur permet l'implantation des transformations non linéaire. C'est ce qui leur attribue la réputation de bons généralisateurs.

Pour le réseau MLP, la détermination du nombre des couches cachées et du nombre des neurones par couche dépend du choix de l'utilisateur. En effet la détermination du nombre optimal de ces deux variantes peut être déduite par des tests répétitifs. D'un autre côté le bon fonctionnement du réseau MLP, repose sur un bon choix du moment et du taux d'apprentissage.

Pour le réseau de régression généralisé, il permet d'avoir des résultats avec des taux d'erreur acceptables.

L'utilisation des réseaux neuronaux s'avère être un moyen très « économique » pour la réalisation d'identification des configurations des écoulements. En effet l'identification de configuration telle que l'écoulement par bouchons nécessite plusieurs mesures. Ce

qui signifie plusieurs électrodes, le long du canal ou sur la circonférence du canal. Or avec le réseau de neurones, ce phénomène peut être compensé par l'augmentation de la dimension du vecteur d'entrée du réseau de neurones.

Tableau 31 : Tableau comparatif entre le réseau MLP et réseau probabiliste.

<i>Type de réseau</i>	<i>Généralisation</i>	<i>Temps d'entraînement</i>	<i>Convergence</i>
<i>MLP</i>	moyen	Moyen	Risquée
<i>Réseau Proba.</i>	bon	Grand	Pas de problème

#### **7.10 Validation du fonctionnement de la machine neurale, par des mesures réelles**

Dans cette partie on se propose de faire « valider » le fonctionnement de notre machine neuronale en utilisant des mesures réelles. Pour ce faire nous avons considéré les mesures collectées sur une section carrée de diamètre 16 *mm* pour les écoulements par bulles, par bouchons et annulaire.

Les taux de vide sont donnés en terme de potentiel électrique. La variation du potentiel en fonction des configurations est donnée dans le Tableau 32.

Tableau 32: Évolution du potentiel mesuré en fonction des différentes configurations.

	<i>Écoulement par bulles</i>	<i>Écoulement par bouchons</i>	<i>Écoulement annulaire</i>
<i>Valeur maximale du potentiel (V)</i>	6,4569	8,8222	<b>9,411</b>
<i>Valeur minimale du potentiel (V)</i>	<b>3,7874</b>	2,9041	3,9248

Normalement lorsque le taux de vide augmente, la valeur du courant électrique traversant la structure, diminue. Ce qui justifie les valeurs du Tableau 32. Cependant on constate que pour certains cas de l'écoulement par bouchons, la valeur du potentiel reste quand même élevée. Ceci est justifié par le fait que dans l'écoulement par bouchons, les diamètres des poches d'air peuvent atteindre des diamètres qui avoisine celui de la conduite. D'un autre côté, l'utilisation de ces données par notre machine neuronale nécessite l'établissement d'une certaine correspondance entre le potentiel et le format de notre vecteur d'entrée [R,C]. C'est l'objet de la partie suivante.

#### 7.10.1 Conversion des données

Pour faire valider le fonctionnement de notre machine neuronale, on s'est proposé de générer des pseudo-signaux par notre programme de simulation et ce dans les mêmes conditions que ceux des tests. En effet les tests ont été effectués dans une section à géométrie carrée, de 16mm du côté; les mesures disponibles traduisant l'évolution du taux de vide, sont exprimées en terme du potentiel. Cependant pour notre machine neuronale, le vecteur d'entrée est composé d'une partie capacitive et d'une partie

résistive. Pour pallier à cette disparité dans les données, on s'est proposé de considérer juste la composante résistive pour l'identification des configurations des écoulements et d'ignorer la partie capacitive.

Pour ce faire nous avons du :

- adapter le fonctionnement de notre machine à fonctionner, juste avec la partie résistive en ignorant la partie capacitive et ce autant dans la phase d'entraînement que dans la phase d'estimation.
- Convertir le signal de mesure du taux de vide, exprimé en potentiel, en terme de résistance. Ainsi on pose :  $R = (R_{\max} - R_{\min}) \frac{(V - V_{\min})}{(V_{\max} - V_{\min})} + R_{\min}$  sachant que  $R$  représente la valeur de la résistance équivalente au potentiel  $V$ .  $V_{\max}$  la valeur maximale du potentiel enregistrée sur l'ensemble des configurations des écoulements.  $V_{\min}$  représente la valeur minimale enregistrée sur l'ensemble des configurations des écoulements.  $R_{\max}$ ,  $R_{\min}$  représentent respectivement la valeur maximale et la valeur minimale de la résistance enregistrées lors de la simulation des différentes configurations d'écoulement.

Les valeurs de  $R_{\max}$  et  $R_{\min}$ , dans les données de simulation correspondent à des valeurs bien définies du taux de vide. Ainsi lors de la conversion des valeurs de tests, on retient juste les valeurs qui rentrent dans cette gamme de valeurs.

Le Tableau 33 résume les résultats obtenus à partir de la conversion du potentiel en résistance et en taux de vide.

Tableau 33: Résumé des données de simulation générées pour une section carrée de 16mm de côte.

	<i>É. Par bulles</i>	<i>É. Par bouchons</i>	<i>É. annulaire</i>
<i><math>R_{max}</math> (ohm/m)</i>	14.167	12.988	33.31.52
<i><math>R_{min}</math> (ohm/m)</i>	8.065	9.1939	13.9899
<i>Taux du vide max</i>	0.4485	0.398	<b>0.7654</b>
<i>Taux du vide min</i>	<b>0.0314</b>	0.1502	0.44

#### 7.10.2 Discussion

L'objectif est de voir le comportement de la machine, en lui présentant des données provenant du laboratoire, après un apprentissage par des données provenant du logiciel de simulation. Pour ce faire on a opté pour deux modes de tests :

- Dans le premier mode de test on a procédé à filtrer les données d'apprentissage de telle sorte que les configurations d'écoulements par bulles et par bouchons soient clairement identifiables, de point de vue taux de vide, tout en restant en concordance avec les résultats des recherches qui ont été entamés dans le passé.
- Dans le second mode on a « biaisé » les données d'entraînement par 9% des données à faire valider sachant que ces dernières ne seront jamais présentées à la machine.

Dans le premier mode de test, nous avons constaté que sur un ensemble d'estimations le réseau MLP semble donner de bons résultats. En effet sur un ensemble de 100 simulations, 80 configurations ont été bien identifiées par le réseau MLP.

Pour le second mode de test, on a constaté que les identifications ont été toutes correctes sans aucune exception.

Cependant il faut noter que l'approche adoptée pour le calcul de la résistance équivalente au potentiel est une approximation qui suppose une certaine linéarité entre la valeur de la résistance et la valeur du potentiel, chose qui n'est pas vrai à 100%. D'un autre côté, l'identification des configurations au laboratoire est basée sur une observation visuelle. En effet une analyse des données, montre que l'écoulement par bouchons a été identifié pour un taux de vide entre 30% et 70%, par contre un écoulement par bulles a été identifié aussi pour un taux de vide de l'ordre de 40%. Cette remarque vient joindre le résultat que nous avons mentionné, correspondant à l'identification des configurations par la paire  $[R,C]$ , surtout que la conductivité ne traduit pas exactement la nature de la topologie.



## Chapitre 8: Conclusion

La connaissance des configurations des écoulements diphasiques constitue un paramètre important dans la plus part des industries; en particulier dans l'industrie de production d'énergie et dans l'industrie pétrolière. D'où l'idée de notre sujet de recherche consistant à l'étude du comportement d'un champ électrique en présence de différentes configurations d'écoulement et ce dans les sections de passage à géométrie carrée et à géométrie circulaire.

Pour ce faire nous avons fait appel à l'équation de Laplace qui nous a permis de déterminer la répartition du potentiel en fonction de la topologie de l'écoulement dans les deux types de sections de passage. Ainsi, il nous a été possible de déterminer la répartition de charges électriques, sur chacune des électrodes et par la suite le calcul de la valeur de la capacité électrique équivalente pour tout le système. Le logiciel élaboré pour cet effet permet d'avoir, en parallèle de la valeur calculée de la capacité, une estimation du taux de vide et de la résistance électrique pour chacune des configurations d'écoulement. Les configurations générées par le logiciel sont déterminées selon un mode aléatoire.

À travers cette étude, nous avons pu modéliser la configuration de l'écoulement dans la section de passage moyennant l'impédance électrique. Le modèle adapté à chacune des configurations a été aussi présenté. Nous avons aussi démontré la sensibilité de la

composante capacitive de l'impédance électrique envers les changements de la topologie de l'écoulement.

Dans le cas de la section de passage circulaire, nous avons étudié l'effet de l'ouverture des électrodes sur les valeurs calculées de la capacité. Nous avons conclu que l'utilisation d'une petite ouverture engendre une sensibilité plus importante qu'une grande ouverture.

Pour éviter la production de polarisation au niveau des électrodes, nous avons opté pour l'utilisation d'un signal sinusoïdal. Chose qui est aussi nécessaire pour effectuer la mesure de la capacité. Cependant, nous avons conclu que l'assurance d'une bonne précision dans les mesures implique l'utilisation de fréquences élevées. Ces valeurs ne devront pas dépasser les *GHz*, afin de rester conforme aux hypothèses posées dans le Chapitre 3.

Les pseudo-sigaux générés par le programme de simulation ont été consolidés par une analyse statistique basée sur l'utilisation de la FDP, fonction de densité de probabilité et par la FDPS, fonction de densité de puissance spectrale. Ensuite une comparaison avec des signaux de mesure du laboratoire de IGN, Institut de génie nucléaire, a été entamée. Ces derniers signaux sont délivrés par une sonde d'impédance électrique.

Dans le cadre de notre recherche, nous avons proposé une machine neuronale pour l'identification des différentes configurations d'écoulement. Cette machine, composée d'un réseau MLP, un réseau PNN et un réseau GRNN, a été entraînée par les pseudo-sigaux générés par le logiciel de simulation. La consolidation du fonctionnement de

cette machine a été effectuée par les signaux de mesure provenant des tests menés dans le laboratoire de l'Institut de génie nucléaire.

Basé sur les résultats obtenus, nous avons conclu que les réseaux de neurones proposés peuvent être considérés comme un moyen « objectif » pour l'identification des configurations des écoulements. En plus c'est un moyen économique puisqu'elles peuvent s'adapter à tout type de section de passage et de disposition de tubes.

En utilisant les réseaux de neurones, le sujet de recherche peut être étendu pour permettre la reconstitution des images de la configuration présente dans la section de passage.

## Chapitre 9: Recommandations

Les recherches entamées dans le passé n'ont pas accordé beaucoup d'intérêt à l'utilisation de l'impédance électrique (partie active et réactive) pour la détermination des configurations des écoulements diphasiques. Dans le cadre de notre étude, nous avons proposé quelques modèles qui sont adaptés aux différentes configurations de l'écoulement pour deux cas des sections de passage (circulaire et carrée). Cependant, il serait judicieux de valider nos résultats en utilisant d'autres techniques. Les configurations que nous avons couvertes, correspondent aux conduites disposées verticalement, nous suggérons l'extension de la procédure de traitement pour les configurations des écoulements diphasiques horizontaux. Aussi il est recommandable d'incorporer, dans le logiciel de simulation, les conditions d'écoulement, i.e., débits, vitesses, pour la génération des pseudos signaux.

Il serait intéressant d'étudier la distribution spectrale des signaux du taux de vide et pression pour des conduites ayant différentes géométries.

La méthode que nous avons proposée, pourrait être adaptée pour un système à multiélectrodes. Ceci permettra la reconstruction des configurations des écoulements diphasiques en utilisant les machines neuronales. Ces dernières peuvent être utilisées conjointement avec un système de mesure, pour assurer l'identification en temps réel, des configurations des écoulements diphasiques. Comme résultat immédiat, nous

recommandons la conception d'un instrument qui permettra la mesure simultanée des composantes actives et réactives de l'impédance électrique d'un milieu diphasique.

## Chapitre 10: Références

1. Abro E., Khoryakov V., Johansen G.A. & L. Kocbach, "Determination of void fraction and flow regime using a neural network trained on simulated data based on gamma-ray densitometry," April 1999, Meas. Sci. Technol, 10, 619-630.
2. Akagawa K., Hamaguchi H., Sakaguchi T. & T. Ikari, " Studies on the fluctuation of pressure drop in two-phase slug flow," 1971, Bull. JSME., 14, 447-469.
3. Aka-Ngnui T.& A.Beroual, "Bubble dynamics and transition into streams in liquid dielectrics under a high divergent electric field," November 2000, J. Phys. D: Appl, 34, 1408-1412
4. Bendat J.S. & A.G.Piersol, "Engineering applications of correlation and spectral analysis," January 1980, John Wiley & sons
5. Gavrilov L.R., "Free gas content of a liquid and acoustical techniques for its measurment," 1970, Soviet PhysicsAcoustics, 15, 285-295.
6. Geraets J.J.M. & J.C.Borst, "A capacitance sensor for two-phase void fraction measurement and flow pattern identification," Dec 1987, Int. J. Multiphase Flow, 14, 305-320.
7. Han Y., "Two-phase flow pattern identification from fluctuating signals of pressure and void fraction", Avril 1999, mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal

8. Harms A.A. & C.F.Forrest,"Dynamic effect in radiation diagnosis of fluctuating voids," 1971, Nuclear science and engineering, 46, 408-413.
9. Haykin S., "Neural networks: a comprehensive foundation," 1999, Prentice Hall, 2<sup>ème</sup> édition.
10. Hewitt G.F., "Measurement of two phase flow parameters," 1978, Academic press.
11. Huang S.M., Stott A.L., Green R.G. & M.S.Beck, "Electronic transducers for industrial measurement of low value capacitances," 1988, J. Phys. E: Sci. Instrum. , 21, 242-250.
12. Ishii M., Mi Y., Tsoukalas L.H. & S. Kim, "New objective approaches for characterization of interfacial structures in two-phase flow," 1998, Proceedings of the ASME Heat Transfer Division, 5, 205-213.
13. Jones Jr. O.C. & N. Zuber, "The interrelation between void fraction fluctuations and flow patterns in two-phase flow," Int. J. Multiphase flow 2, 273-306.
14. Kaatz U., Lautschmam K. & M. Brai, "Acoustical absorption spectroscopy of liquids between 0.15 and 3000 MHz : II. Ultrasonic pulse transmission methods," 1987, J. Phys. E: Sci. Instrum, 21, 98-103.
15. Kozma R., Dam H. & J.E. Hoogenboom, "Identification of flow patterns by neutron noise analysis during actual coolant boiling in thin rectangular channels," 1992, Nucl. Thechnology, 100, 97-100.
16. Leblond J., Benkedda Y., Javelot S. & L. Oger, "Two-phase flows by pulsed field gradient spin-echo NMR," October 1992, Meas. Sci. Technol, 5, 426-434.

17. Liu H.M. & T.K.Wang, "A modified one-shot photon-attenuation method for void fraction determination in two-phase flow systems," May 1990, Appl. Radiat. Isol, 42, 25-30.
18. Lindberg K., "Microwave moisture measurements in the industry by cavity resonator techniques," 1971, Proceedings European microwave conference V2, C: 8:1/1.
19. Lubbesmeyer D. & B. Leoni, "Fluid velocity measurements and flow pattern identification by noise analysis of light beam signals," 1983, Int. J. Multiphase flow, V9, 6, 665-679.
20. Mansfield P., "Imaging by nuclear magnetic resonance," 1988, J. Phys. E: Sci. Instrum., 21, 18-30.
21. Merilo M., Dechene R.L. & W.M.Cichowlas, "Void fraction measurement with rotating electric field conductance gauge," 1977, Journal of Heat transfer, 99, 330-332.
22. Mizuno Y. & K. Naito, "Voltage and temperature distribution along semiconducting glaze insulator strings," February 1999, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 6, 100-104
23. Morris D., Teyssedou A., Lapierre J. & A.Tapucu, "Optical fiber probe to measure local void fraction profiles," Novembre 1987, Applied optics, 26, 4660-4664.



24. Moura L.F., Tambellini F. & F.A. Belo, "Electrical capacitance tomography of horizontal two-phase flow," 1998, Proceedings of the ASME Heat Transfer Division, 5, 239-246.
25. Neural Network Toolbox User's Guide, de Matlab, version 6.12
26. Nishikawa K., Sekoguchi K. & T. Fukano, "On the pulsation phenomena in gas-liquid two phase flow," 1969, Bull. JSME., 1410-1416.
27. Narayanswamy R. & F. Sevilla, "Optical fibre sensors for chemical species," 1988, J. Phys. E: Sci. Instrum. 21,10-16.
28. Petrick M. & B.S. Swanson, "Radiation attenuation method of measuring density of a two-phase fluid," 1958, Review of Scientific Instruments, 29, 1079-1085.
29. Rezkallah K. S. & D.Lowe, "A capacitance sensor for the characterization of microgravity two-phase liquid-gas flows," 1999, Meas.Sci.Technol., 10, 965-975.
30. Teyssedou A., Aubé F.& P.Champagne, "Void fraction measurement system for high temperature flows," January 1991, Meas. Sci. Technol, 3, 485-494.
31. Teyssedou A. & Han Y., "Two-phase pattern identification from fluctuations components of pressure and void fraction signal," 1998, Proceedings of the ASME Heat Transfer Division, 5, 267-274.
32. Teyssedou A., Tapucu A. & M. Lortie "Impedance probe to measure local void fraction profiles," April 1988, Rev. Sci. Instrum., 59, 631-638.
33. Teyssedou A. & Tye P., "A capacitance two-phase flow slug detection system," July 1998, Review of Scientific Instruments, 70, 3942-3948.

34. Vince M.A. & R.T. Lahey, "On the development of an objective flow regime indicator," 1980, *Int. J. Multiphase flow*, 8, 93-124.
35. Webster J.G., "Electrical impedance tomography", 1990, Hilger.
36. Whalley P.B., & G. Costigan, , "Slug flow regime identification from dynamic void fraction measurements in vertical air-water flows," Juillet 1996, *Int. J. Multiphase Flow*, 23, 263-382.
37. Wenger N.C. & J. Smenta, "Hydrogen density measurements using an open-ended microwave cavity," 1971, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 21, 105-114.
38. Xie C.G. & A. Plaskowski, "8-electrode capacitance system for two-component flow identification .part2," 1989, *IEE Proceedings*, 136, 184-1990.

## Chapitre 11: Annexe 1

Programme de calcul de capacité et de répartition de potentiel pour la section carrée.

'Déclaration de variables

Global V(1 To 1000, 1 To 1000) As Double 'TABLEAU DU POTENTIEL

Global C As Double ' valeur de la capacité

Global E1 As Double ' la permittivité du milieu 1

Global E2 As Double ' la permittivité du milieu 2

Global res As Double 'valeur de la résistance

Global N As Integer ' le nombre de points selon la direction du rayon

Global M As Integer ' le nombre des points selon la direction de teta

Global V1 As Double ' le potentiel V1

Global V2 As Double ' le potentiel V2

Global h As Double ' le pas selon la direction radiale

Global dt As Double ' le pas selon la direction de l'angle

Global sigma As Double ' valeur de la conductivité

Global j1 As Integer 'indice

Global j2 As Integer 'indice

Global j3 As Integer 'indice

Global j4 As Integer 'indice

Global xj1 As Double ' abscisse de J1

Global yj1 As Double ' abscisse de J1

Global xj2 As Double ' abscisse de J2

Global yj2 As Double ' abscisse de J2

Global xj3 As Double ' abscisse de J1

Global yj3 As Double ' abscisse de J1

Global xj4 As Double ' abscisse de J4

Global yj4 As Double ' abscisse de J4

Global r As Double ' le rayon du tube

Global x0 As Double ' l'abscisse du centre du cercle

Global y0 As Double ' l'ordonnée du centre du cercle  
 Global x1 As Double ' l'abscisse de la bulle  
 Global y1 As Double ' l'ordonnée de la bulle  
 Global xb(1 To 100) As Double ' les abscisses des bulles  
 Global yb(1 To 100) As Double ' les ordonnées des bulles  
 Global x As Double 'variable intermédiaire représentant le x  
 Global y As Double 'variable intermédiaire représentant le y  
 Global b0 As Double ' variable de test si les valeurs sont à l'intérieur du cercle  
 Global b1 As Double ' variable de test si les valeurs sont à l'intérieur du cercle  
 Global a As Double ' le rayon de la bulle  
 Global eps As Double ' erreur d'estimation  
 Global r0 As Double ' la distance entre le centre de la bulle et le centre du tube  
 Global teta0 As Double 'angle que fait le centre de la bulle avec le repère  
 Global PO(1 To 1000, 1 To 1000) As Double 'tableau de la matrice définitive  
 Global Nb As Integer ' nombre total des bulles  
 Global bb(1 To 100) As Double 'calcul des distance séparant entre bulle et un point  
 Global ab(1 To 100) As Double 'le rayon des bulles  
 Global rb(1 To 100) As Double ' distance séparant la bulle du centre du tube  
 Global tetab(1 To 100) As Double ' l'angle que fait la bulle  
 Global Nbmin As Integer  
 Global Nbmax As Integer  
 Global Dbmin As Double  
 Global Dbmax As Double  
 Global Abmin As Double  
 Global Abmax As Double  
 Global Rbmin As Double  
 Global Rbmax As Double  
 Global Dx As Double  
 Global Dy As Double  
 Global Sa As Double  
 Global pi As Double  
 Global Np As Double ' nombre de points d'échantillonnage  $N_p = f_e / f_s$   
 Global kl As Integer ' variable d'échantillonnage  
 Global Vmax As Double 'valeur du potentiel maximal  
 Global Nbinteg As Integer ' représente la valeur du nombre des

'itérations à l'intérieur de la boucle du régime par bouchons

Global reg As Integer ' la variable du régime à simuler

Sub calcul\_potentiel()

'-----

'calcul du potentiel par la méthode des différences finies

'-----

'déclaration des variables

Dim alpha As Double ' l'angle de l'électrode

Dim var1 As Double 'variable intermédiaire

Dim var2 As Double ' variable intermédiaire

Dim var3 As Double ' variable intermédiaire

Dim var4 As Double ' variable intermédiaire

Dim Vr1 As Double ' variable intermédiaire V(i,j)

Dim Vr2 As Double ' variable intermédiaire V(i,j)

Dim Vr3 As Double ' variable intermédiaire V(i,j)

Dim Vr4 As Double ' variable intermédiaire V(i,j)

Dim Vr0 As Double ' variable intermédiaire V(i,j)

Dim p1 As Double

Dim p2 As Double

Dim k As Integer

Dim n2 As Double 'variable de type double

Dim cara(1 To 1000) As String

Dim a1 As Double ' valeur de test

Dim l As Integer 'boucle des itérations

Dim iter As Integer 'limites des itérations

Dim Tol As Double ' tolérance de différence

Dim Vb As Integer ' valeur de test si le point appartient à une bulle

Dim Vint(1 To 1000) As Double

Dim comp(1 To 1000) As Double

Dim rt As Double ' autre diamètre du tube

Dim Lr As Double ' longueur de l'arc

```

Dim xr As Double 'point de l'arc
Dim ang As Double ' angle déterminant la position du point
Dim W1 As Double
Dim W2 As Double
Dim W3 As Double
Dim W4 As Double
Dim xco As Double
Dim yco As Double
Dim si As Double
Dim co As Double
Dim Vnew(1 To 1000, 1 To 1000) As Double
Dim Vold(1 To 1000, 1 To 1000) As Double
Dim omega As Double ' facteur de surrelaxation
Dim conv As Double ' valeur de convergence
Dim rho As Double ' valeur de rho pour le facteur de surrelaxation
Dim nn As Double ' exposant du facteur de surrelaxation de omega
'Dim reg As Double 'définir de type du régime à simuler
Randomize
Tol = 0.05
conv = 0

'initiation des variables
rt = Worksheets("données").Range("b11").Value
r0 = Worksheets("données").Range("b12").Value ' le rayon que fait le centre de la bulle depuis le centre
du tube
a = Worksheets("données").Range("b8").Value
alpha = Worksheets("données").Range("b7").Value
E1 = Worksheets("données").Range("b9").Value
E2 = Worksheets("données").Range("b10").Value
'V1 = Worksheets("données").Range("b5").Value
'V2 = Worksheets("données").Range("b6").Value
N = Worksheets("données").Range("b13").Value
M = Worksheets("données").Range("b14").Value ' les bords de la matrice
sigma = Worksheets("données").Range("b16").Value
teta0 = Worksheets("données").Range("b17").Value

```

```

Np = Worksheets("données").Range("b3").Value ' le nombre des points d'échantillonnage du signal d'entrée
h = (2 * rt) / (N) ' N est
r = rt ' + (4 * h) ' correction du rayon
eps = h
M = N
For j = 1 To M + 10
cara(j) = Worksheets("Feuil3").Range("a" & j).Value
Next j

'=====
'initiation des cellules de bulles
'=====

For i = 1 To 12

Worksheets("données").Range("d" & i + 29).Value = 0
Worksheets("données").Range("c" & i + 29).Value = 0
Worksheets("données").Range("e" & i + 29).Value = 0

Next i

'*****
'test de régime
'*****
If reg = 1 Then 'régime par bulle

'=====
'lecture des paramètres aléatoires
'=====

Nbmin = Worksheets("données").Range("d22").Value
Nbmax = Worksheets("données").Range("e22").Value
Dbmin = Worksheets("données").Range("d23").Value
Dbmax = Worksheets("données").Range("e23").Value
Abmin = Worksheets("données").Range("d24").Value
Abmax = Worksheets("données").Range("e24").Value

```

```
Rbmin = Worksheets("données").Range("d25").Value
```

```
Rbmax = Worksheets("données").Range("e25").Value
```

```
'=====
```

```
'Génération de bulles aléatoires
```

```
'=====
```

```
Nb = Int(((Nbmax - Nbmin) * Rnd) + Nbmin)
```

```
For i = 1 To Nb
```

```
rb(i) = ((Dbmax - Dbmin) * Rnd) + Dbmin ' distance par rapport au centre
```

```
ab(i) = ((Rbmax - Rbmin) * Rnd) + Rbmin ' rayon des bulles
```

```
tetab(i) = ((Abmax - Abmin) * Rnd) + Abmin ' angle des bulles
```

```
Next i
```

```
'calcul des coordonnées des CENTRES des bulles
```

```
For i = 1 To Nb
```

```
xb(i) = r + (rb(i) * Cos(tetab(i)))
```

```
yb(i) = r + (rb(i) * Sin(tetab(i)))
```

```
Next i
```

```
'test pour voir s'il n'y a pas de chauvechement entre bulles
```

```
For i = 1 To Nb - 1
```

```
For j = i + 1 To Nb
```

```
lb1:
```

```
Dx = Abs(xb(j) - xb(i))
```

```
Dy = Abs(yb(j) - yb(i))
```

```
Sa = ab(j) + ab(i)
```

```
If Not (Dx >= Sa Or Dy >= Sa) Then
```

```
    If ab(i) > Rbmin Then
```

```
        ab(i) = Rbmin
```

```
        GoTo lb1
```

```
    Else
```

```
        ab(i) = 0
```

```
        rb(i) = 0
```

```
        tetab(i) = 0
```



```

    End If
End If
Next j
Next i

'-----
'affichage des résultats
'-----

Worksheets("données").Range("b18").Value = Nb ' nombre des bulles

For i = 1 To Nb

Worksheets("données").Range("d" & i + 29).Value = rb(i)
Worksheets("données").Range("c" & i + 29).Value = ab(i)
Worksheets("données").Range("e" & i + 29).Value = tetab(i)

Next i

'=====
'régime par bouchons
'=====

Else
If reg = 2 Then ' régime par bouchons

'=====
'lecture des paramètres aléatoires
'=====

Rbbmin = Worksheets("données").Range("h22").Value
Rbbmax = Worksheets("données").Range("i22").Value
Nbmin = Worksheets("données").Range("h23").Value
Nbmax = Worksheets("données").Range("i23").Value
Dbmin = Worksheets("données").Range("h24").Value
Dbmax = Worksheets("données").Range("i24").Value
Abmin = Worksheets("données").Range("h25").Value

```

```

Abmax = Worksheets("données").Range("i25").Value
Rbmin = Worksheets("données").Range("h26").Value
Rbmax = Worksheets("données").Range("i26").Value

'=====
'Génération de bulles aléatoires
'=====

If Nbintreg = 0 Then
    Nb = 1 + Int(((Nbmax - Nbmin) * Rnd) + Nbmin)
Else
    If Nb = 1 Then
        Nb = Nb
    Else
        Nb = Nb - 1
    End If
End If

If Nbintreg = 0 Then
    rb(1) = 0 '((Dbmax - Dbmin) * Rnd) + Dbmin
    ab(1) = Int((((Rbbmax - Rbbmin) * Rnd) + Rbbmin) * 100) / 100
    tetab(1) = 0
Else
    rb(1) = 0 '((Dbmax - Dbmin) * Rnd) + Dbmin
    ab(1) = Int((ab(1) + (Rnd * h)) * 100) / 100
    tetab(1) = 0
End If

' pour la bulle du centre il n'est pas nécessaire
'd'effectuer un test pour voir s'il est à l'intérieur ou non
' de la section de passage

For i = 2 To Nb
    rb(i) = ((Dbmax - Dbmin) * Rnd) + Dbmin ' distance par rapport au centre
    ab(i) = ((Rbmax - Rbmin) * Rnd) + Rbmin ' rayon des bulles
    tetab(i) = ((Abmax - Abmin) * Rnd) + Abmin ' angle des bulles
Next i

```

```

'calcul des coordonnées des CENTRES des bulles
For i = 1 To Nb
  xb(i) = r + (rb(i) * Cos(tetab(i)))
  yb(i) = r + (rb(i) * Sin(tetab(i)))
Next i
'test pour voir s'il n'y a pas de chauvechement entre bulles
If Nb <> 1 Then
  For i = 2 To Nb - 1
    For j = i + 1 To Nb
      lb2:
      If rb(j) < ab(1) + ab(j) Then 'test de chauvechement entre bulles
        If ab(j) > Rbmin Then
          ab(j) = Rbmin
          GoTo lb2
        Else
          ab(j) = 0
          rb(j) = 0
          tetab(i) = 0
        End If

      lb3:
      Dx = Abs(xb(j) - xb(i))
      Dy = Abs(yb(j) - yb(i))
      Sa = ab(j) + ab(i)

      If Not (Dx >= Sa Or Dy >= Sa) Then
        If ab(i) > Rbmin Then
          ab(i) = Rbmin
          GoTo lb3
        Else
          ab(i) = 0
          rb(i) = 0
          tetab(i) = 0
        End If
      End If
    End If
  End For
End For

```

```

End If

Next j
Next i
End If
'End If
'End If

'=====
'écoulement annulaire
'=====

Else
If reg = 3 Then 'régime annulaire
'=====

'lecture des paramètres aléatoires
'=====

Nbmin = Worksheets("données").Range("l23").Value
Nbmax = Worksheets("données").Range("m23").Value
Dbmin = Worksheets("données").Range("l24").Value
Dbmax = Worksheets("données").Range("m24").Value
Abmin = Worksheets("données").Range("l25").Value
Abmax = Worksheets("données").Range("m25").Value
Rbmin = Worksheets("données").Range("l22").Value
Rbmax = Worksheets("données").Range("m22").Value
'=====

'Génération de bulles aléatoires
'=====

Nb = Int(((Nbmax - Nbmin) * Rnd) + Nbmin)
For i = 1 To Nb
rb(i) = ((Dbmax - Dbmin) * Rnd) + Dbmin ' distance par rapport au centre
ab(i) = ((Rbmax - Rbmin) * Rnd) + Rbmin ' rayon des bulles
tetab(i) = ((Abmax - Abmin) * Rnd) + Abmin ' angle des bulles
Next i

```

```

'calcul des coordonnées des CENTRES des bulles
For i = 1 To Nb
  xb(i) = r + (rb(i) * Cos(tetab(i)))
  yb(i) = r + (rb(i) * Sin(tetab(i)))
Next i

'test pour voir si la bulle ne sort pas
If (ab(1) + rb(1)) >= 1 Then
  rb(1) = rb(1) - h
End If
End If
=====

End If
End If
-----

'affichage des résultats
-----

Worksheets("données").Range("b18").Value = Nb ' nombre des bulles
For i = 1 To Nb
  Worksheets("données").Range("d" & i + 29).Value = rb(i)
  Worksheets("données").Range("c" & i + 29).Value = ab(i)
  Worksheets("données").Range("e" & i + 29).Value = tetab(i)
Next i
*****
*****

-----

'initiation des potentiels
-----

For i = 1 To M + 1
  For j = 1 To M + 1
    V(i, j) = (V1 + V2) / 2
    Vnew(i, j) = (V1 + V2) / 2
    Vold(i, j) = (V1 + V2) / 2
  Next j
Next i

```

```

'=====
'début des itérations
'=====

'initiation
p1 = E1 / (2 * (E1 + E2))
p2 = E2 / (2 * (E1 + E2))
'Lr = r * (3.14 - alpha) 'longueur arc isolement
'coordonnées des électrodes
xj1 = (r) + (r * Cos(alpha))
yj1 = (r) - (r * Sin(alpha))
xj2 = (r) + (r * Cos(alpha))
yj2 = (r) + (r * Sin(alpha))
xj3 = (r) - (r * Cos(alpha))
yj3 = (r) + (r * Sin(alpha))
xj4 = (r) - (r * Cos(alpha))
yj4 = r - (r * Sin(alpha))
x0 = (r) 'le centre du cercle
y0 = (r)
'x1 = r + (r0 * Cos(teta0)) 'abscisse de la bulle
'y1 = r + (r0 * Sin(teta0)) 'ordonnée de la bulle
Lr = xj2 - xj3
'iter = 500
'For l = 1 To iter
rho = Cos(pi / N)
omega = 1
iter = 1
'-----
'début des itérations
'-----
While conv = 0
'-----
'zone des points se trouvant sur le cercle
'-----

For i = 1 To M + 1

```

For j = 1 To M + 1

y = (j - 1) \* h 'un point quelconque

x = (i - 1) \* h

b0 = ((x - x0) ^ 2) + ((y - y0) ^ 2)

If (((r ^ 2) - eps) <= b0) And (b0 <= ((r ^ 2) + eps))) Then

'une fois sur le cercle on va tester si on est sur les électrodes

If (x >= xj2 And x <= ((2 \* r))) And (y >= yj1 And y <= yj2) Then

V(i, j) = V1

Vnew(i, j) = V(i, j)

Else

If (x >= 0 And x <= xj3) And (y >= yj4 And y <= yj3) Then

V(i, j) = V2

Vnew(i, j) = V(i, j)

Else

If (x > xj3 And x < xj2) And ((y > yj2 And y <= 2 \* r) Or (y >= 0 And y < yj4)) Then

xr = (x - xj3) ^ 2 + (y - yj3) ^ 2 ^ 0.5

V(i, j) = V2 - (xr \* (V2 - V1) / Lr)

Vnew(i, j) = (omega \* V(i, j)) + ((1 - omega) \* Vold(i, j))

Else

Vr1 = V(i, j + 1)

Vr3 = V(i, j - 1)

Vr4 = V(i + 1, j)

V(i, j) = (Vr3 + Vr1 + (2 \* Vr4)) / 4

Vnew(i, j) = (omega \* V(i, j)) + ((1 - omega) \* Vold(i, j))

End If

End If

End If

End If

Next j

Next i

```

'-----
'zone des points se trouvant à l'intérieur du cercle
'-----

'k = 1
For i = 1 To M + 1
For j = 1 To M + 1
Vb = 0
    x = (i - 1) * h 'un point quelconque
    y = (j - 1) * h
    x0 = (r) 'le centre du cercle
    y0 = (r)
    b0 = ((x - x0) ^ 2) + ((y - y0) ^ 2)
    'b1 = ((x - x1) ^ 2) + ((y - y1) ^ 2)
    If b0 < (r ^ 2) - eps Then

For k = 1 To Nb

        bb(k) = (x - xb(k)) ^ 2 + (y - yb(k)) ^ 2
        xco = x - xb(k)
        yco = y - yb(k)

If (bb(k) <= ((ab(k) ^ 2) + eps) And bb(k) >= ((ab(k) ^ 2) - eps) And (ab(k) <> 0) Then
    '-----
    'interface de la bulle à l'intérieur du cercle
    '-----
    si = yco / (Sqr((xco ^ 2) + (yco ^ 2)))
    co = xco / (Sqr((xco ^ 2) + (yco ^ 2)))

Vr1 = V(i, j + 1)
Vr2 = V(i - 1, j)
Vr3 = V(i, j - 1)
Vr4 = V(i + 1, j)

```



'selon la position du point on détermine le potentiel

'forme avec Et égaux des deux côtés et Dn aussi et J nulle

If (co > (-Sqr(2) / 2) And co < (Sqr(2) / 2)) And (si > (Sqr(2) / 2)) Then

V(i, j) = (p1 \* Vr1) + (p2 \* Vr3) + ((Vr2 + Vr4) / 4)

Else

If (co <= (-Sqr(2) / 2)) And (si <= (Sqr(2) / 2) And (si >= (-Sqr(2) / 2))) Then

V(i, j) = (p1 \* Vr2) + (p2 \* Vr4) + ((Vr1 + Vr3) / 4)

Else

If (co > (-Sqr(2) / 2) And co < (Sqr(2) / 2)) And (si < (-Sqr(2) / 2)) Then

V(i, j) = (p1 \* Vr3) + (p2 \* Vr1) + ((Vr2 + Vr4) / 4)

Else

If (co >= (Sqr(2) / 2)) And (si <= (Sqr(2) / 2) And (si >= (-Sqr(2) / 2))) Then

V(i, j) = (p1 \* Vr4) + (p2 \* Vr2) + ((Vr1 + Vr3) / 4)

End If

End If

End If

End If

Else

If bb(k) < (ab(k) ^ 2) - eps Then 'cas ou on est à l'intérieur de la bulle

Vr1 = V(i, j + 1)

Vr2 = V(i - 1, j)

Vr3 = V(i, j - 1)

Vr4 = V(i + 1, j)

V(i, j) = (Vr1 + Vr2 + Vr3 + Vr4) / 4

Else

Vb = Vb + 1

```

End If
End If
Next k
    If Vb = Nb Then ' dans ce cas ce point n'appartient à aucune bulle
        Vr1 = V(i, j + 1)
        Vr2 = V(i - 1, j)
        Vr3 = V(i, j - 1)
        Vr4 = V(i + 1, j)
        V(i, j) = (Vr1 + Vr2 + Vr3 + Vr4) / 4
    End If

End If

Vnew(i, j) = (omega * V(i, j)) + ((1 - omega) * Vold(i, j))
Next j
Next i

'-----
'zone hors du cercle
'-----

For i = 1 To M + 1
For j = 1 To M + 1

    y = (j - 1) * h 'un point quelconque
    x = (i - 1) * h
    x0 = (r) 'le centre du cercle
    y0 = (r)
    b0 = ((x - x0) ^ 2) + ((y - y0) ^ 2)
    If b0 > (r ^ 2) + eps Then
        V(i, j) = 0
    End If

Vnew(i, j) = (omega * V(i, j)) + ((1 - omega) * Vold(i, j))
Next j
Next i

```

```

'test de convergence
conv = 1
For i = 1 To M + 1
For j = 1 To M + 1

If Abs(Vnew(i, j) - Vold(i, j)) <= Tol Then
conv = 1 * conv
Else
conv = 0 * conv
'nn = (iter - 1) / 2
omega = (1 / (1 - ((rho ^ 2) * (omega) / 4))) ^ (1 / (nn + 0.5))
Vold(i, j) = Vnew(i, j)

End If
Next j
Next i
iter = iter + 1
Wend

'actualisation de la matrice de potentiel
For i = 1 To M + 1
For j = 1 To M + 1
V(i, j) = Vnew(i, j)
Next j
Next i

'fin du calcul

'-----
'présentation
For i = 1 To M + 1
For j = 1 To M + 1
Worksheets("graphe").Range(cara(i) & (j)).Value = V(i, j)

```

```

Next j
Next i
'nombre des iterations
Worksheets("données").Range("g19").Value = iter
Worksheets("données").Range("g20").Value = omega
End Sub

```

```

=====
'calcul de la capacité
=====

```

```

Sub capacite()
Dim qde As Double
Dim qge As Double
Dim qg As Double
Dim qd As Double
Dim cd(1 To 20) As Double
Dim cg(1 To 20) As Double
Dim cde(1 To 20) As Double
Dim cge(1 To 20) As Double
Dim ctd(1 To 20) As Double
Dim ctg(1 To 20) As Double
Dim a As Double
Dim b As Double
Dim xco As Double
Dim yco As Double
Dim ang As Double
Dim Nbint As Integer
Dim Nbintregmax As Integer 'compteur de la boucle
Dim Nbintregmin As Integer
Dim Nbconfigmax As Integer
Dim Nbconfigmin As Integer

Dim Nbconfig As Integer
'-----
' début des itérations de calcul en automatique

```

```

'-----
Nbint = 1 'compteur de graphique sur excel
reg = Worksheets("données").Range("b4").Value ' le type du régime à simuler
For Kit = 1 To 100
Nbintreg = 0 ' initiation du compteur des états dans le régime par bouchon
'saisie du nombre des config à générer
Nbconfigmin = Worksheets("données").Range("h27").Value
Nbconfigmax = Worksheets("données").Range("i27").Value
'-----
'nombre de config à générer pour le bouchon
'-----
'Nbconfig = Int(((Nbconfigmax - Nbconfigmin) * Rnd) + Nbconfigmin)
Nbconfig = 4 ' Int(((Nbconfigmax - Nbconfigmin) * Rnd) + Nbconfigmin)
'même si les autres régimes n'ont rien à avoir avec le bouchon
'on va spécifier une condition portant sur les ocnfigurations..ça n'affecte pas
While (Nbintreg <= Nbconfig) 'tant qu'on est en régime par bouchons
'l'objectif est de générer les différents séquences d'une config du régime par bouchons
Worksheets("données").Range("h8").Value = "-"
Worksheets("données").Range("h9").Value = "-"
Worksheets("données").Range("h10").Value = "-"
Worksheets("données").Range("h11").Value = "-"
Worksheets("données").Range("h12").Value = "-"
Worksheets("données").Range("h13").Value = "-"
Worksheets("données").Range("f8").Value = "-"
Worksheets("données").Range("f9").Value = "-"
Worksheets("données").Range("f10").Value = "-"
Worksheets("données").Range("f11").Value = "-"
Worksheets("données").Range("f9").Value = "-"
Np = Worksheets("données").Range("b3").Value ' le nombre des points d'échantillonnage du signal d'entrée
'appel de la procédure de calcul du potentiel
pi = Worksheets("données").Range("b15").Value
Vmax = Worksheets("données").Range("b5").Value
For i = 1 To 20
Worksheets("capacité").Range("a" & i + 2).Value = " "
Worksheets("capacité").Range("b" & i + 2).Value = " "

```

```

Worksheets("capacité").Range("c" & i + 2).Value = " "
Worksheets("capacité").Range("d" & i + 2).Value = " "
Next i
For kl = 1 To Np ' début de la boucle pour le signal échantillonné
V1 = Vmax * Sin(2 * 180 * kl / Np)
V2 = -Vmax * Sin(2 * 180 * kl / Np)
calcul_potentiel
q = 0 ' la charge à calculer
qg = 0
qd = 0
qge = 0
qde = 0
For i = 1 To M + 1
For j = 1 To M + 1
    x = (i - 1) * h 'un point quelconque
    y = (j - 1) * h
    b0 = ((x - x0) ^ 2) + ((y - y0) ^ 2)
    'b1 = ((x - x1) ^ 2) + ((y - y1) ^ 2)
    xco = x - x0
    yco = y - y0

If (((r ^ 2) - eps) <= b0) And (b0 <= ((r ^ 2) + eps))) Then

    'une fois sur le cercle on va tester si on est sur les électrodes
    If (x >= xj2 And x <= ((2 * r))) And (y >= yj1 And y <= yj2) Then
        ' ici on est sur l'électrode de droite, il faut tester ou on est
        'dans quel milieu

        Worksheets("capacité").Range("d10").Value = 1

    'calcul
    If Nb = 1 And ab(1) = 1 Then
        qde = qde + (E2 * (V(i, j) - V(i - 1, j)))
    Else
        qde = qde + (E1 * (V(i, j) - V(i - 1, j)))

```

End If

End If

'calcul de la charge sur la partie gauche

'calcul l'approximation

If Nb = 1 And ab(1) = 1 Then

qge = qge + (E2 \* (V(i, j) - V(i + 1, j)))

Else

qge = qge + (E1 \* (V(i, j) - V(i + 1, j)))

End If

End If

End If

Next j

Next i

'valeur finale de capacité

cde(kl) = (qde) / Abs(V1 - V2)

cge(kl) = (qge) / Abs(V1 - V2)

'ctd = (qde + qd) / Abs(V1 - V2)

'ctg = (qge + qg) / Abs(V1 - V2)

Next kl ' suite des valeurs de potentiel échantillonné

'affichage sur l'interface

For kl = 1 To Np

Worksheets("capacité").Range("c" & kl + 2).Value = cde(kl)

Worksheets("capacité").Range("d" & kl + 2).Value = cge(kl)

Next kl

Range("h17:m17").Select

Selection.Copy

```

'path du fichier à actualiser en fonction du choix du PC
Workbooks.Open Filename:="C:\Mounia\aujourd'hui\aleatoire_non_sinus\données.xls"
Range("B" & Kit + Nbintreg + Nbint + 2).Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False
Application.CutCopyMode = False
ActiveWorkbook.Save
ActiveWorkbook.Close

Worksheets("données").Range("i19").Value = Kit
Worksheets("données").Range("m17").Value = Nbconfig
If reg = 2 Then
Nbintreg = Nbintreg + 1
Else
Nbintreg = Nbconfig + 1 'juste une condition pour sortir de la boucle cad l'effectuer une seule fois
End If
Wend
Nbint = Nbint + Nbintreg
Next Kit

'Worksheets("données").Range("h10").Value = cde
'Worksheets("données").Range("h11").Value = cge
'Worksheets("données").Range("h12").Value = ctd
'Worksheets("données").Range("h13").Value = ctg
'Worksheets("données").Range("f10").Value = qde
'Worksheets("données").Range("f11").Value = qge
'Worksheets("données").Range("f9").Value = qg + qe2

End Sub

```



## Programme de machine neuronale.

```

function varargout = prg_long_vect(varargin)
% PRG_LONG_VECT Application M-file for prg_long_vect.fig
% FIG = PRG_LONG_VECT launch prg_long_vect GUI.
% PRG_LONG_VECT('callback_name', ...) invoke the named callback.
% Last Modified by GUIDE v2.0 06-Nov-2002 19:31:08
if nargin == 0 % LAUNCH GUI
    fig = openfig(mfilename,'reuse');
    % Generate a structure of handles to pass to callbacks, and store it.
    handles = guihandles(fig);
    guidata(fig, handles);
    if nargout > 0
        varargout{1} = fig;
    end
elseif ischar(varargin{1}) % INVOKE NAMED SUBFUNCTION OR CALLBACK
    try
        if (nargout)
            [varargout{1:nargout}] = feval(varargin{:}); % FEVAL switchyard
        else
            feval(varargin{:}); % FEVAL switchyard
        end
    catch
        disp(lasterr);
    end
end

end

%set(handles.edit1,'string','--');
%| ABOUT CALLBACKS:
%| GUIDE automatically appends subfunction prototypes to this file, and
%| sets objects' callback properties to call them through the FEVAL
%| switchyard above. This comment describes that mechanism.
%|

```

```

%| Each callback subfunction declaration has the following form:
%| <SUBFUNCTION_NAME>(H, EVENTDATA, HANDLES, VARARGIN)
%| The subfunction name is composed using the object's Tag and the
%| callback type separated by '_', e.g. 'slider2_Callback',
%| 'figure1_CloseRequestFcn', 'axis1_ButtondownFcn'.
%| H is the callback object's handle (obtained using GCBO).
%| EVENTDATA is empty, but reserved for future use.
%| HANDLES is a structure containing handles of components in GUI using
%| tags as fieldnames, e.g. handles.figure1, handles.slider2. This
%| structure is created at GUI startup using GUIHANDLES and stored in
%| the figure's application data using GUIDATA. A copy of the structure
%| is passed to each callback. You can store additional information in
%| this structure at GUI startup, and you can change the structure
%| during callbacks. Call guidata(h, handles) after changing your
%| copy to replace the stored original so that subsequent callbacks see
%| the updates. Type "help guihandles" and "help guidata" for more
%| information.
%| VARARGIN contains any extra arguments you have passed to the
%| callback. Specify the extra arguments by editing the callback
%| property in the inspector. By default, GUIDE sets the property to:
%| <MFILENAME>(<SUBFUNCTION_NAME>', gcbo, [], guidata(gcbo))
%| Add any extra arguments after the last argument, before the final
%| closing parenthesis.
% -----
function varargout = radiobutton1_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
x1=get(handles.radiobutton1,'value');
global d;
if x1==1
    d=1;
axes1.visible=0;
set(handles.radiobutton2,'value',0)
set(handles.radiobutton4,'value',0)
set(handles.radiobutton7,'value',0)
end
% -----

```

```

function varargout = radiobutton2_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
x1=get(handles.radiobutton2,'value');
global d;
if x1==1
    d=2;
axes1.visible=0;
set(handles.radiobutton1,'value',0)
set(handles.radiobutton4,'value',0)
set(handles.radiobutton7,'value',0)
end
% -----
function varargout = radiobutton3_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
x1=get(handles.radiobutton3,'value');
global d;
if x1==1
    d=3;
axes1.visible=0;
set(handles.radiobutton1,'value',0)
set(handles.radiobutton2,'value',0)
set(handles.radiobutton4,'value',0)
set(handles.radiobutton7,'value',0)
end
% -----
function varargout = radiobutton4_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
x1=get(handles.radiobutton4,'value');
global d;
if x1==1
    d=4;
axes1.visible=0;
set(handles.radiobutton1,'value',0)
set(handles.radiobutton2,'value',0)
set(handles.radiobutton7,'value',0)
end
% -----
function varargout = radiobutton5_Callback(h, eventdata, handles, varargin)

```

```

x1=get(handles radiobutton5,'value');
global d;
if x1==1
    d=5;
axes1.visible=0;
set(handles.radiobutton2,'value',0)
set(handles.radiobutton4,'value',0)
set(handles.radiobutton1,'value',0)
set(handles.radiobutton7,'value',0)
end
% -----
function varargout = edit1_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
% -----
function varargout = edit2_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
% -----
% procédure d'entrainement des réseaux de neurones
% -----
function varargout = pushbutton1_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
global d;
global d2;
global net; % réseau MLP
global netp; % réseau probabilist
global netg; % réseau gnn
global Nb
global Nbb;
global tr;
global tc;
global tq;
global Q;
global P;
global meanr; %moyenne du réseau P
global stdr;
global meanr1;%moyenne du réseau Q
global meanr2;
global stdr1;

```

```

global str2;

%-----
% chargement de fichier pour l'apprentissage
%-----
if d2==1
    % section circulaire
    A=xlsread('données_sect_cir_app.xls'); % fichier d'apprentissage de section circulaire
else
    if d2==2
        % section carrée
        A=xlsread('données_sect_carr_app.xls'); % fichier d'apprentissage de section circulaire
    end
end
%-----
% création des signaux de base pour simulation
%-----
Nb=size(A,1);%440; % nombre des données `a saisir
Nbb=Nb/8;
x=zeros(8,1);
P1=zeros(8,Nbb); % pour probabilist et MLP
P2=zeros(8,Nbb); % pour probabilist et MLP
P3=zeros(8,Nbb); % pour probabilist et MLP
P4=zeros(8,Nbb); % pour probabilist et MLP
P5=zeros(8,Nbb); % pour probabilist et MLP
P6=zeros(8,Nbb); % pour probabilist et MLP
Q=zeros(2,3*Nb); % pour GNN
tq=zeros(1,3*Nb); % pour GNN
s=zeros(16,1);
tr=zeros(1,3*Nbb); % pour probabliste
t1=1;
t2=2;
t3=3;
%initiation de la matrice P [16,500]
% la matrice A est constituée de 3 blocs parallèle chacun contient les 3
% informations correspondantes `a capacité, résistance et taux de vide

```

```

% lors de la mise en forme des données il faut tenir compte de cette
%répartition
for j=1:Nbb
    for i=1:8
        P1(i,j)=A(((j-1)*8)+i,2) % valeur de capacité bulle
        P2(i,j)=A(((j-1)*8)+i,3) % valeur de résistance bulle

        P3(i,j)=A(((j-1)*8)+i,5); % valeur de capacité bouchon
        P4(i,j)=A(((j-1)*8)+i,6); % valeur de résistance bouchon

        P5(i,j)=A(((j-1)*8)+i,8); % valeur de capacité annulaire
        P6(i,j)=A(((j-1)*8)+i,9); % valeur de résistance annulaire
    end
end

for j=1:3*Nbb
    if (j<=Nbb)
        tr(j)=t1;%bulle
    else
        if (j>Nbb) & (j<=2*Nbb)
            tr(j)=t2;%bouchon
        else
            if (j>2*Nbb) & (j<=3*Nbb)
                tr(j)=t3;%annulaire
            end
        end
    end
end

end

% définition de la matrice finale
P=[P1 P3 P5; P2 P4 P6];
%initiation de Q et tq
for i=1:Nb
    Q(1,i)=A(i,2); % capacité bulle
    Q(2,i)=A(i,3); % résistance
    tq(i)=A(i,4);

```

```

end
for i=Nb+1:2*Nb
    Q(1,i)=A(-Nb+i,5); % capacité bouchon
    Q(2,i)=A(-Nb+i,6); % résistance
    tq(i)=A(-Nb+i,7);
end

for i=2*Nb+1:3*Nb
    Q(1,i)=A(i-2*Nb,8); % capacité annuelle
    Q(2,i)=A(i-2*Nb,9); % résistance
    tq(i)=A(i-2*Nb,10);
end

%-----
%création du réseau. MLP
%-----

[Pn,meanr,stdr]=prestd(P);
P=Pn;
% [P,minr,maxr]=premnmx(P);
net=newff(minmax(P),[16,2,1],{'tansig','tansig','purelin'},'traingdm');
% net=newff(P,[8,2,1],{'tansig','tansig','purelin'},'traingdm');
%entraînement+initiation
net.trainParam.epochs=1000;
net.trainParam.goal=0,01;
net.trainParam.lr=0.1;
net.trainParam.mc=0.7;
[net,to]=train(net,P,tr);

h=gcf;
%-----
%création du réseau. probabiliste pour l'identification du régime
%-----

tc = ind2vec(tr);
netp = newpnn(P,tc);

```

```

%-----
%création du réseau pour estimation de la valeur de taux de vide
%-----

%-----
%normalisation des données
%-----
[Qn,meanr1,stdr1]=prestd(Q);
Q=Qn;
%réseau grnn
% -----
function varargout = radiobutton6_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
x1=get(handles.radiobutton6,'value');
global d;
if x1==1
    d=6;
axes1.visible=0;
set(handles.radiobutton2,'value',0)
set(handles.radiobutton4,'value',0)
set(handles.radiobutton1,'value',0)
set(handles.radiobutton7,'value',0)
end
% -----
function varargout = edit3_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
% -----
function varargout = edit4_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
% -----
function varargout = edit5_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
% -----
function varargout = edit6_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
% -----
function varargout = edit7_Callback(h, eventdata, handles, varargin)

% -----

```



```

function varargout = edit8_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
% -----
function varargout = edit9_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
% -----
function varargout = edit10_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
% -----
function varargout = edit11_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
% -----
function varargout = edit12_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
% -----
function varargout = edit13_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
% -----
function varargout = edit14_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
% -----
function varargout = edit15_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
% -----
function varargout = edit16_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
% -----
function varargout = edit17_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
% -----
function varargout = edit18_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
% -----
function varargout = radiobutton7_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
x1=get(handles.radiobutton7,'value');
global d;
if x1==1
    d=7;
axes1.visible=0;
set(handles.radiobutton2,'value',0)
set(handles.radiobutton4,'value',0)
set(handles.radiobutton1,'value',0)
end
% -----
function varargout = edit19_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
% -----

```

```

% procédure pour la simulation apr`es entrainement des réseaux
% -----
function varargout = pushbutton2_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
global d;
global d2;
global net;
global netp;
global netg;
global Nb;
global Nbb;
global tr;
global tc;
global tq;
global Q;
global P;
global meanr; %moyenne du réseau P
global stdr;
global meanr1;%moyenne du réseau Q
global stdr1;
%-----
% chargement des données pour validation
%-----
if d2==1
    % section circulaire
    A=xlsread('données_sect_cir_val2.xls'); % fichier de validation de section circulaire
else % val2 données différentes d'apprentissage. apprentissage=val
    if d2==2
        % section carrée
        A=xlsread('données_sect_carr_val2.xls'); % fichier de validation de section circulaire
    end
end
k1=size(A,1);%k1 doit ^etre un multiple de 8!!!
k1=k1/8;
%-----
%création des signaux de base pour simulation

```

```

%-----
vs=zeros(2,1);
x=zeros(16,1);
P1=zeros(8,k1);
P2=zeros(8,k1);
P3=zeros(8,k1);
P4=zeros(8,k1);
P5=zeros(8,k1);
P6=zeros(8,k1);

%P=zeros(8,24);
s=zeros(16,1); % le signal `a simuler va devenir une matrice 2x8 qui va ^etre convertie par apr`es
% le signal qui va ^etre utilisé pour les simulations va ^etre dérivé de celui l`a
%initiation de la matrice P
% le but de cette initiation est de déterminer la valeur du vecteur `a simuler
for j=1:k1 % la taille de la matrice doit ^etre un multiple de 8
    for i=1:8
        P1(i,j)=A(((j-1)*8)+i,2); % valeur de capacité bulle
        P2(i,j)=A(((j-1)*8)+i,3); % valeur de résistance bulle

        P3(i,j)=A(((j-1)*8)+i,5); % valeur de capacité bouchon
        P4(i,j)=A(((j-1)*8)+i,6); % valeur de résistance bouchon

        P5(i,j)=A(((j-1)*8)+i,8); % valeur de capacité annulaire
        P6(i,j)=A(((j-1)*8)+i,9); % valeur de résistance annulaire
    end
end

end
Po=[P1 P3 P5; P2 P4 P6];
%normalisation des données
% `a ce niveau la normalisation doit se faire en se basant sur les paramètres
% de la normalisation dans la phase de l'apprentissage!!!!!!
% ici pas de probleme car le fichier d'apprentissage est identique `a celui de simul
for i=1:3*k1
    Po(:,i)=(Po(:,i)-meanr)./stdr;

```

```

end

%identification du signal `a simuler depuis les données de plus dans la base A
b=rand(1,1);

% pour le choix des siganux de cross validation, on pourrait revoir ce choix
switch d
    case 1 %bulle
        a1=fix(((k1-1)*b)+1);
        s=Po(:,a1);
        % s=[P1(:,1);(P2(:,1))]] % forme similaire `a P

    case 2 %bouchon
        a1=fix(((k1-1)*b)+k1+1);
        s=Po(:,a1);
        % s=[P3(:,a1);(P4(:,a1))];
        % s=[P3(:,1);(P4(:,1))]]

    case 4 %annulaire
        a1=fix(((k1-1)*b)+(2*k1+1));
        s=Po(:,a1);

%
case 7 % signal personnel
    % capacité
    s(1)=str2double(get(handles.edit3,'string'));
    s(2)=str2double(get(handles.edit4,'string'));
    s(3)=str2double(get(handles.edit5,'string'));
    s(4)=str2double(get(handles.edit6,'string'));
    s(5)=str2double(get(handles.edit7,'string'));
    s(6)=str2double(get(handles.edit8,'string'));
    s(7)=str2double(get(handles.edit9,'string'));
    s(8)=str2double(get(handles.edit10,'string'));

    % résistance
    s(9)=str2double(get(handles.edit21,'string'));
    s(10)=str2double(get(handles.edit22,'string'));
    s(11)=str2double(get(handles.edit23,'string'));
    s(12)=str2double(get(handles.edit24,'string'));

```

```

s(13)=str2double(get(handles.edit25,'string'));
s(14)=str2double(get(handles.edit26,'string'));
s(15)=str2double(get(handles.edit27,'string'));
s(16)=str2double(get(handles.edit29,'string'));
% normalisation du signal
s=(s-meanr)./stdr;
otherwise
disp('Erreur de saisie. Refaire votre choix:')
exit;
end
a1
%-----
% simulation réseau MLP
%-----
%s étant le signal `a identifier
% so=num2cell(s)% cell array de s
y=sim(net,s);
% vérification des résultats de la matrice d'entrainement
% Pr=sim(net,P);
% [mmlp,bmlp,rmlp]=postreg(Pr,tr);

y2=mean(y);
if abs(y2)<=1.5% CES VALEURS REMPLCENT CEUX DE t1, t2 et t3
y3='bulle';
end
if (y2>1.5)&(y2<=2.5)
y3='bouchon';
end
if (y2>2.5)&(y2<=3.5)
y3='annulaire';
end
%-----
% simulation avec réseau probabiliste
%-----
y4 = sim(netp,s);

```

```

Yc = vec2ind(y4);
% vérification des résultats de la matrice d'entrainement
% Pr=sim(netp,P);
% [mpnn,bpnn,rpnn]=postreg(Pr,tc);
switch Yc
    case 1 %bulle
        y5='bulle';
    case 2 %bouchon
        y5='bouchon';
    case 3 %annulaire
        y5='annulaire';
end
% w=to.perf
% m=to.mu
%      wv = -1:.1:1; bv = -2.5:.25:2.5;
%      es = errsurf(P,to,'logsig')
%      plotes(wv,bv,es,[60 30])
%-----
% estimation du taux de vide avec grnn
%-----
%ici il faut restaurer le vecteur d'origine pour le normaliser selon
%les valeurs de Q
s=poststd(s,meanr,stdr);
%normalisation selon Q
vs(1)=(mean(s(1:8)));
vs(2)=(mean(s(9:16)));
vs=(vs-meanr1)./stdr1;
v=sim(netg,vs);
% [mgnn,bgnn,rgnn]=postreg(v,tq);
%affichage des résultats
set(handles.edit1,'string',y3);
set(handles.edit19,'string',y5);
set(handles.edit20,'string',v);
%affichage des performances
% set(handles.edit30,'string',mmlp);

```

```

% set(handles.edit31,'string',bmlp);
% set(handles.edit32,'string',rmlp);
% set(handles.edit33,'string',mpnn);
% set(handles.edit34,'string',bpnn);
% set(handles.edit35,'string',rpnn);
% set(handles.edit36,'string',mgnn);
% set(handles.edit37,'string',bgnn);
%
% set(handles.edit38,'string',rgnn);
% close(h);

% set(h,'visible',off);
%visualisation sur le graphique
set(gcf,'CurrentAxes',handles.axes1)
axes1=plot(s,'--b');
title('Forme originale du signal'),xlabel('t'),ylabel('S(t));
% -----
function varargout = pushbutton1_CreateFcn(h, eventdata, handles, varargin)
% -----
function varargout = edit20_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
% -----
function varargout = radiobutton8_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
% choix de la géométrie de la section de passage circulaire
yx1=get(handles.radiobutton8,'value');
global d2; % d2 variable pour le choix de la section de passage
if yx1==1
    d2=1;

    set(handles.radiobutton9,'value',0)
end
% -----
function varargout = radiobutton9_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
% choix de la géométrie de la section de passage carrée
yx1=get(handles.radiobutton9,'value');
global d2; % d2 variable pour le choix de la section de passage

```

```
if yx1==1
    d2=2;
    set(handles.radiobutton8,'value',0)
end
```