

Thèse de doctorat

Pour obtenir le grade de Docteur de

L'Université de VALENCIENNES ET DU HAINAUT-CAMBRESIS

Spécialité : Electronique

Présentée et soutenue par Amina MEDJDOUB.

Le 06 Novembre 2014 à Valenciennes

Ecole doctorale : Sciences Pour l'Ingénieur (SPI)

Equipe de recherche, Laboratoire : Institut d'Electronique, de Micro-Electronique et de Nanotechnologie/Département d'Opto-Acousto-Electronique (IEMN/DOAE)

Etude et conception d'un capteur acoustique sphérique, miniaturisé, codé et autonome

JURY

Président du jury

M. Stéphane Serfaty : Professeur des universités à l'Université de Cergy Pontoise-France.

Rapporteurs

M. Mounsif Ech-Cherif El-Kettani : Maître de conférence-HDR à l'Université du Havre – France.

M. Youcef Remram : Professeur à l'Institut d'Electronique - Université des Sciences et de la Technologie Haouari Boumediene - Algérie.

Examineurs

M. Stéphane Serfaty : Professeur à l'Université de Cergy Pontoise-France.

M. Guillaume Delaplace : Directeur de recherche à l'Institut National de la Recherche Agronomique – France.

Directeur de thèse

M. Georges Nassar : Maître de conférences-HDR, l'Université de Valenciennes.

Co-encadreur de thèse

M. Fabrice Lefebvre : Maître de Conférences, Université de Valenciennes.

*A mes très chers parents qui m'ont aidé
de près et de loin, par leur amour
inestimable, leur confiance, leur soutien
et toutes les valeurs qu'ils ont su
m'apprendre.*

A mes adorables sœurs, Radhia, Ahlam et Sammou

A mon frère Mohammed

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier le bon Dieu pour m'avoir illuminée et menée jusqu'ici et qui a fait que je sois là aujourd'hui et de m'avoir donné la force et la volonté pour dépasser toutes les difficultés.

Ce travail de recherche a été effectué au sein du laboratoire IEMN/DOAE de l'université de Valenciennes.

Je tiens à remercier vivement monsieur NASSAR Georges d'avoir accepté d'être mon directeur de thèse. Je lui suis particulièrement reconnaissante pour sa disponibilité, son soutien, ses conseils éclairés et la confiance dont il m'a fait part lors de la réalisation de ce travail. Merci à vous d'avoir relu la thèse plusieurs fois, car il ne serait pas ce qu'il est sans vous.

J'exprime mes reconnaissances à monsieur LEFEBVRE Fabrice qui a participé à l'encadrement et au suivi de cette thèse. Je lui remercie pour ses explications claires et détaillées qui m'ont beaucoup aidée pour l'avancement de mon travail.

Ma gratitude et mes remerciements vont ensuite aux membres de jury qui ont bien voulu juger ce travail de recherche.

- M. Mounsif Ech-Cherif El-Kettani : Maître de conférence-HDR à l'Université du Havre - France
- M. Youcef Remram : Professeur à l'Institut d'Electronique - Université des Sciences et de la Technologie Haouari Boumediene- Algérie
- M. Stéphane Serfaty : Professeur des universités à l'Université de Cergy Pontoise-France
- M. Guillaume Delaplace : Directeur de recherche à l'Institut National de la Recherche Agronomique - France

Je tiens à remercier en particulier Mme B. Lucie pour ses conseils et son aide lors la fabrication des capteurs.

Je tiens à remercier vivement l'ensemble du personnel du département Opto-Acousto-Electronique ou s'est déroulé mon travail pour leur accueil, leur sympathie et pour les bons moments passés ensemble.

Je remercie aussi Mr Maamar Benbachir professeur associé au Département de Mathématiques et Informatique, Faculté des sciences et de la technologie, Université de Khemis Miliana, Algérie pour son aide et ses conseils concernant la rédaction du mémoire.

Un grand merci à mes amis, Hind, Othman, Nadine, Hossep, Kacem, Basma, Khadidja, Abdelmajid, Fred et en particulier Ali qui m'ont beaucoup encouragé et m'ont permis de passer cette période de ma vie dans une ambiance chaleureuse et conviviale.

Merci à toutes et tous.

Table de matières

Introduction générale	1
Chapitre I. Mécanisme d'homogénéisation : Un processus complexe	4
I.1. Introduction	5
I.2. Introduction à l'homogénéisation	5
I.2.1. Mécanismes de mélange	7
I.2.2. Les différents types de mélangeurs	8
I.2.3. Estimation de la qualité d'un mélange	10
I.2.4. Méthodes de mesures de l'homogénéité d'un mélange	11
I.3. Comportement mécanique des milieux viscoélastiques	13
I.3.1. Modèle mécanique du milieu viscoélastique : Modèle de Poynting.....	14
I.4. Comportement acoustique du milieu viscoélastique	17
I.5. Caractéristiques physiques d'une onde acoustique sphérique	18
I.5.1. Mise en équation	19
I.5.2. Cas d'un milieu viscoélastique	21
I.6. Milieu hétérogène à forte diffusion	23
I.7. Conclusion	26
Chapitre II. Résonateur sphérique : Etude et analyse du comportement vibratoire	
II.1. Introduction	29
II.2. Résonateur sphériques	30
II.3. Intérêt de la forme sphérique miniaturisée.....	31
II.4. Description du capteur proposé	31
II.5. Comportement vibratoire.....	33
II.5.1. Approche analytique	33

II.5.1.1 Equation du mouvement d'une coquille sphérique.....	33
II.5.1.2. Comportement vibratoire	37
II.5.3. Approche numériques des différents modes de résonance d'une sphère.....	39
II.5.3.1. Application des méthodes numériques à l'étude du capteur proposé...	39
I.5.4. Approche expérimentale	41
II.5.4.1. Réalisation du capteur proposé.....	42
II.6. Conclusion	44
 Chapitre III. Electronique embarquée : Module de contrôle et de gestion des ressources du capteur	
III.1. Introduction.....	46
III.2. Descriptif fonctionnel de l'électronique	46
III.3. Réalisation et expérimentation	48
III.3.1. Aspects technologiques	48
III.3.2. Exemple de signaux codés.....	55
III.4. Consommation et autonomie	59
III.5. Conclusion	60
 Chapitre IV. Résonateur sphérique autonome miniaturisé : validation expérimentale	
IV.1. Introduction	62
IV.2. Interaction du capteur avec son environnement	63
IV.2.1. La stabilité du capteur.....	63
IV.2.2. Positionnement d'une source d'émission acoustique.....	64
IV.2.2.1. Description du système de positionnement proposé	64

IV.2.2.2. Acquisition des données acoustiques.....	66
IV.2.2.3. Méthode de trilatération.....	67
IV.2.2.4. Résultats du positionnement acoustique.....	69
IV.2.3. Sensibilité du capteur à la nature du milieu	73
IV.2.3.1. Intérêt d'une analyse multidimensionnelle (trilatération)	73
IV.2.3.2. Sensibilité du capteur à l'homogénéité.....	74
IV.2.4. Sensibilité à la transition de phase	76
IV.2.5. Sensibilité à l'hétérogénéité du milieu.....	79
IV.2.5.1. Cas d'un milieu à forte diffusion.....	81
IV.2.5.2. Cas d'un milieu à forte diffusion : modèle expérimental basé sur la mesure de l'énergie moyenne reçue	82
IV.2.5.3. Evolution de la moyenne énergétique à différentes concentrations de grains.....	83
IV.2.5.4. Evolution de la moyenne énergétique à différentes tailles de grains..	84
IV.3. Conclusion	86
Conclusion générale	87
Bibliographie	89

Table des Figures

Figure I.1 : Illustration schématique de la cinétique du mélange sous l'action des deux mécanismes diffusion et convection (Schofield).....	8
Figure I.2 : Quelques exemples de mélangeurs (a) mélangeur à fort cisaillement, (b) mélangeur à double cuves.....	9
Figure I.3 : Notion d'échelle et d'intensité (Schofield).....	10
Figure I.4 : Modèle de Poynting	15
Figure I.5 : Représentation du module élastique en fonction de la fréquence d'excitation.....	17
Figure I.6 : Emission radiale par une sphère divergente	19
Figure II.1 : Les éléments mécaniques de base constituant le résonateur sphérique	32
Figure II.2 : Emplacement de la partie électronique dans la partie creuse de la sphère.....	33
Figure II.3 : Coordonnées du système	35
Figure II.4 : Fréquences de résonance des dix premiers modes de vibration d'une coquille sphérique calculées par Matlab.....	40
Figure II.5 : Modes vibratoires du résonateur sphérique obtenus numériquement par éléments finis	41
Figure II.7 : Représentation fréquentielle des phases des impédances électriques du capteur obtenues dans l'air (courbe bleu) et dans l'eau (courbe rouge).....	43
Figure II.8 : Variation de l'impédance électrique du capteur sphérique en fonction de la fréquence avec une charge appliquée.....	44
Figure III.1 : Schéma fonctionnel du dispositif embarqué dans la capsule ultrasonore.....	47

Figure III.2 : Architecture modulaire du SoC (MSP430F2012) utilisé (Doc. Texas Instruments).....	48
Figure III.3 : Architecture déployée de l'application... ..	50
Figure III.4 : Modes de fonctionnement du F2012 (Doc. Texas Instruments).....	51
Figure III.5 : Consommations par modes du F2012 (Doc. Texas Instruments).....	52
Figure III.6 : Mode de fonctionnement du timer utilisé pour la génération PWMUS.	52
Figure III.7 : Organigramme de génération du signal PWMUS par interruption ITIRQ (Code d'identification du système : 5).....	54
Figure III.8 : Réalisation technologique d'un capteur sphérique.	55
Figure III.9 : Illustration d'un système de deux réseaux de capteurs pour identification par codage.	55
Figure III.10 : système de mesure.	56
Figure III.11 : l'état du capteur émetteur au repos (à gauche) et pendant l'émission (à droite).	56
Figure III.12 : Signaux reçus après l'émission du code 5.	57
Figure III.13 : Signaux reçus après l'émission du code 7.	57
Figure III.14 : Capteur 5. Code émis, profil de courant consommé, tension batterie et puissance absorbée pendant une trame.	58
Figure III.15 : Capteur 7. Code émis, profil de courant consommé, tension batterie et puissance absorbée pendant une trame.	58
Figure IV.1 : La stabilité mécanique d'une onde acoustique (à gauche principe de mesure et à droite variation de la vitesse de l'onde acoustique en fonction du temps).....	63

Figure IV.2 : Schéma montrant la distribution des différents éléments vibratoires (réseau) du système de mesure et ses composants.....	65
Figure IV.3 : Signal temporel et son spectre fréquentiel reçu par un capteur récepteur suite à une pulsation électrique d'une fréquence 15 kHz	66
Figure IV.4 : Illustration schématique du principe de la mesure 3D en trilatération	67
Figure IV.5 : Illustration schématique du principe de mesure du temps de propagation de l'onde acoustique	68
Figure IV.6 : Signaux issus des récepteurs positionnés dans le même plan	70
Figure IV.7 : Positions des récepteurs et de l'émetteur, données par la trilatération	71
Figure IV.8 : Signaux obtenus dans le cas du positionnement aléatoire de l'émetteur.....	72
Figure IV.9 : Coordonnées des récepteurs et de l'émetteur, données par la trilatération (présentation 2D).	72
Figure IV.10 : Coordonnées des récepteurs et de l'émetteur, données par la trilatération 3D.	73
Figure IV.11 : Validation de la sensibilité du capteur : illustration montrant le principe de base des mesures effectuées sur les grandeurs vitesse et atténuation de l'onde en transmission	75
Figure IV.12 : Variations de la vitesse et de l'atténuation de l'onde dans différents produits selon leurs propriétés acoustiques	76
Figure IV.13 : En bleu, signal reçu par un récepteur plongé dans le lait seul, en rouge signal reçu au bout d'un certain temps après l'ajout de présure	77
Figure IV.14 : Evolution des grandeurs acoustiques (atténuation et temps de vol) de l'onde reçue par les 4 récepteurs au cours de la réaction de la transition de phase	78
Figure IV.15 : Morphologie des signaux reçus au cours du temps pendant la transformation du milieu.....	79
Figure IV.16 : Sensibilité des récepteurs aux variations instantanées de l'état physique ou de l'évolution des propriétés mécaniques des milieux.....	80

Figure IV.17 : Illustration graphique de la stabilité du comportement mécanique des capteurs récepteurs pour un état physique donné du milieu (cas de la mesure du temps de vol (éclaté) de l'onde reçue par les 4 récepteurs à travers un milieu hétérogène di-phasique formé des grains de caillé en suspension dans le lactosérum en agitation à 27°C)	81
Figure IV.18 : Grains de caillé ayant des caractéristiques physiques différentes résultant d'un traitement mécanique et thermique contrôlé	82
Figure IV.19 : Signal reçu après découpage du gel (code 5)	83
Figure IV.20 : Modèle d'hétérogénéité basée sur la variation de la concentration des diffuseurs dans le milieu	84
Figure IV.21 : Modèle d'hétérogénéité basée sur la variation de la taille des diffuseurs dans le milieu.....	85
Figure IV.22 : Différence en morphologie des signaux	85

Liste des Tableaux

Tableau IV.1. Coordonnées des capteurs récepteurs.	70
Tableau IV.2. Coordonnées des capteurs récepteurs.	71
Tableau IV.3. Vitesse de propagation de l'onde acoustique dans l'eau à différentes températures	74
Tableau IV.4. Vitesse de propagation de l'onde acoustique et son atténuation dans différents milieux.....	76

Introduction Générale

L'industrie agro-industrielle, pharmaceutique, ... met en œuvre des phénomènes physico-chimiques très complexes pour transformer des produits se présentant dans de nombreux états physiques différents. Une approche de caractérisation de ces états physiques est très délicate car lors de leurs transformations les milieux sont caractérisés par des propriétés physiques fortement évolutifs.

Souvent dans ce domaine, les états considérés vont du milieu aqueux jusqu'au solide visco-plasto-élastique. Il se pose alors le problème de la caractérisation des milieux progressifs quel que soit le processus. L'obtention de la qualité du produit final passe par la maîtrise de l'ensemble des étapes intermédiaires de fabrication.

Il existe actuellement un certain nombre de techniques de caractérisation dont la plupart sont des techniques de laboratoire et sont difficilement implantables sur un site de production en vue d'un contrôle systématique. Un bon nombre d'entre elles souffrent de limitations physiques dues à leur principe même. C'est par exemple le cas des méthodes optiques qui sont pénalisées par l'opacité des substances analysées. Citons également, les méthodes de radiographie RX qui posent des problèmes de coût et de nocivité vis à vis des opérateurs et du produit analysé. On doit également tenir compte du fait que la plupart de ces techniques ne sont sensibles qu'à un nombre restreint de propriétés physiques de la matière et qu'elles nécessitent un échantillonnage du produit, facteur pénalisant dans le cadre d'un suivi en continu. Il se pose donc le problème de la multiplication de techniques différentes nécessaires à une vue complète du processus de transformation et de l'intégration des données hétérogènes fournies par ces techniques.

Pour certains mélanges, le contrôle et la caractérisation du degré d'homogénéité de ces milieux est devenue une nécessité des normes de qualités requises. Les méthodes rhéologiques par exemple semblent apporter une information riche pour un cas particulier et pour un échantillon donné. Toutefois, elles sont d'un emploi en ligne difficile et limité du fait des prélèvements nécessaires et répétitifs à effectuer.

Pour beaucoup d'études, l'homogénéité d'un mélange est estimée par une voie statistique résultante d'un échantillonnage multiple. Les phénomènes qui régissent la distribution des propriétés mécaniques sont alors mal évalués. Cela est probablement dû à la contrainte environnementale et l'absence de modèles décrivant cette échelle (mésos ou μ -scopique). Sinon, il est possible d'utiliser des méthodes conventionnelles « de génie des procédés », comme l'étude de la cinétique de mélanges de modéliser le fonctionnement global.

Un problème actuel concerne le manque de méthodes fiables permettant le suivi précis en ligne de production des différentes étapes d'élaboration d'un produit. Pour caractériser ces étapes, il est indispensable de comprendre le processus d'évolution de la matière et plus précisément, dans le cas qui nous intéresse, le processus d'homogénéisation.

C'est dans ce contexte que se situe notre travail de thèse dont la particularité consiste à proposer un capteur sphérique miniaturisé et autonome permettant, par le biais des récepteurs identiques, d'offrir les grandeurs pertinentes reflétant les propriétés mécaniques d'un mélange donné.

Dans cet objectif, ce travail porte sur la mise en place d'un réseau de capteurs basé sur des éléments sphériques de taille réduite (1 cm de diamètre) dédiés à la caractérisation en ligne des propriétés mécaniques des mélanges. Compte tenu des caractéristiques techniques de ces résonateurs autonomes, ces capteurs acoustiques à électronique embarquée offrent les informations utiles sur l'évolution des propriétés mécaniques d'un système de mélange dynamique. Ce concept présente l'avantage de communiquer par un signal électrique codé, ce qui offre par ailleurs une caractérisation par plusieurs capteurs en réseaux, dispersés dans la masse globale du milieu et identifiables par codage.

Ce manuscrit se décompose en quatre chapitres :

Le premier chapitre se focalise sur l'homogénéisation. Nous ferons en premier lieu un point sur les aspects étudiés dans la littérature, sur les mécanismes de mélange et quelques types de mélangeurs. Nous aborderons notamment les différents moyens utilisés pour évaluer l'état d'un mélange ainsi que les différentes méthodes de contrôle et de caractérisation de

l'homogénéité d'un mélange. Dans la deuxième partie nous ferons un rappel sur les milieux viscoélastiques et leur comportement acoustique, nous aborderons aussi les notions sur la propagation d'une onde ultrasonore sphérique.

Le second chapitre répond à notre problématique en présentant le modèle du capteur proposé dans le cadre de cette étude. Après un bref parcours historique sur les différents capteurs sphériques utilisés dans la littérature et une description détaillée de notre capsule sphérique proposée, une étude théorique (analytique) et une numérique sur les principaux modes de vibration (résonance) d'une coque sphérique seront présentées. Enfin, une analyse expérimentale confirmera la validité des deux approches précédentes.

Vu la spécificité de notre capteur, qui est l'autonomie, l'étude du module électronique prend sa place au troisième chapitre. La partie creuse du capteur offre un moyen idéal pour l'intégration de cette électronique et rendre le module " embarqué ". Cette partie porte sur la programmation d'un système sur puce afin d'assurer en même temps l'excitation à la résonance de la structure, le contrôle de l'émission et de la réception et des algorithmes de codage, le traitement du signal, la gestion de l'énergie et le protocole de stockage de données.

Le dernier chapitre sera consacré à la validation expérimentale du concept global et cela par étude et analyse de l'interaction des capteurs avec leur environnement en appliquant le principe de la trilatération tout en estimant la position connue des récepteurs et la détermination à chaque instant de celle de l'émetteur. Ensuite, une validation de la stabilité mécanique, électrique et thermique est réalisée par une étude approfondie sur la sensibilité de la réponse acoustique codée. Plusieurs traités ont fait l'objet de cette partie comme la recherche des propriétés déclinant le comportement mécanique (acoustique) lié à la nature du milieu, à son état physique évolutif et à son état dispersif dans le cas d'un milieu à forte diffusion.

Chapitre I

Mécanisme d'homogénéisation :

Un processus complexe

I.1. Introduction

Le processus de mélange diffère suivant la nature des produits à mélanger, leurs caractéristiques mécaniques et les mécanismes de mélange utilisés.

L'étude de l'homogénéisation et la caractérisation d'un tel mélange de produits présente un intérêt très important d'un point de vue industriel.

Ce premier chapitre a plusieurs buts. Dans un premier temps, nous donnons quelques rappels sur l'homogénéisation d'un mélange, les différents mécanismes de mélange, comment estimer sa qualité ainsi que les différentes méthodes utilisées pour mesurer et quantifier son degré d'homogénéité.

Ensuite, en adéquation avec la problématique annoncée, le moyen acoustique d'investigation sera abordé en se basant sur la théorie de la propagation des ondes sphériques dans un milieu viscoélastique.

I.2. Introduction à l'homogénéisation

« Homogénéiser » signifie que la valeur de la grandeur caractéristique (température ou concentration par exemple) est identique en tout point du milieu.

Selon **Henri Berthiaux [1]** l'objectif de toute opération de mélange consiste à produire à partir de différents constituants distincts, une certaine quantité de matière dont l'homogénéité doit satisfaire un usage particulier.

Les plus grandes ambitions des chercheurs est de pouvoir prévoir les propriétés des matériaux sans même les fabriquer, à partir des propriétés des constituants élémentaires. Cette quête a conduit au développement récent de modèles théoriques permettant de trouver le comportement homogénéisé d'un milieu initialement hétérogène. Leur mise au point nécessite une réflexion approfondie sur les conditions aux limites, sur l'influence de la fraction volumique des phases, de leur distribution spatiale et de leur morphologie. On n'aborde ici que les modèles les plus élémentaires, qui permettent de déterminer les bornes pour les propriétés mécaniques, électriques, etc... Dans la pratique, il faut considérer avec prudence les résultats des modèles d'homogénéisation, dans la mesure où les propriétés que l'on peut

déterminer sur une phase élémentaire massive ne sont pas forcément celles du même matériau de base. L'approche a de toute façon le mérite d'ouvrir l'horizon sur des nouvelles possibilités de caractérisation et de permettre des comparaisons calcul-expérience à l'échelle macrostructure comme microstructure.

En fait le mélange des fluides ou des solides divisés (poudres, milieux granulaires) est une opération clé pour de nombreux domaines industriels (pharmacie, agro-alimentaire, ciments, matières plastiques...). La problématique récurrente est souvent de régler l'homogénéité de composition à une échelle requise, qui est souvent celle du conditionnement. En effet, elle est la première responsable de l'atteinte des spécifications et propriétés d'usage des produits formulés.

En fait, l'atteinte d'une certaine qualité de mélange est essentiellement due à des aspects dynamiques et/ou thermiques, eux-mêmes liés aux mécanismes qui président la mise en mouvement du milieu : convection, cisaillement et diffusion. Ces mécanismes sont le fait, non seulement des propriétés d'écoulement des produits, mais aussi des possibilités technologiques des appareils de mélange. On peut employer aussi bien des procédés de mélange en continu qu'en discontinu, le choix s'effectue selon les contraintes de production et l'usage des différents secteurs d'activités.

Comme c'est le cas pour d'autres opérations unitaires mettant en jeu des granulats en suspension, des solides divisés, les connaissances scientifiques de base font encore défaut pour expliciter clairement la phénoménologie du mélange, ceci étant probablement le fait de la nature mésoscopique de ces milieux et notamment du manque de modèles pour décrire ces milieux à cette échelle. Dans le cadre d'une approche systémique de cette opération et donc macroscopique, puisqu'à l'échelle du réacteur, il est cependant possible de prendre en compte certains aspects dynamiques classiques en Génie des Procédés (cinétique de mélange, temps de séjour, puissance consommée. . .) et de modéliser globalement l'opération.

Mais la notion d'homogénéité d'un mélange, indissociable de celles d'échelles d'observation et de ségrégation, reste difficile à atteindre par des techniques actuelles de mesures. La nature et la rhéologie des produits qui peuvent conduire à des expressions compliquées d'un certain nombre de paramètres, et tout particulièrement de leurs évolutions respectives en cours de mélange. C'est en particulier le cas pour les fluides non newtoniens

(dont la viscosité est fonction du gradient de la vitesse de cisaillement) pour lesquels on observe des évolutions non linéaires de la puissance mécanique mise en jeu. C'est le cas par exemple des fluides rhéofluidifiants (jus de fruit, sang), des fluides à seuil ou de Bingham (peintures, vernis, mayonnaises, dentifrices), des fluides rhéoépaississants (sable mouillé, suspension d'amidon, pâte à pizza), ou des fluides thixotropes (yaourts).

Souvent, des raisons économiques ou technologiques limitent les marges de manœuvre pour régler certains paramètres du mélange (e.g. la vitesse périphérique du produit en mouvement d'un type de mélangeur à un autre, le taux de cisaillement).

I.2.1. Mécanismes de mélange

Lacey [2] distingue trois mécanismes de mélange : par diffusion, par convection et par cisaillement. Pour ces trois mécanismes, un ensemble de particules est mis en mouvement par un mobile au sein du mélangeur. Le mécanisme de mélange est souvent réalisé par une intervention d'une force extérieure pour amener une énergie nécessaire au milieu à homogénéiser.

Il est souvent difficile de dissocier ces trois mécanismes. La prépondérance de l'un ou de l'autre de ces mécanismes est imposée par le type de mélangeur utilisé mais aussi par la nature physico-chimique du milieu considéré et les conditions opératoires (débit, vitesse d'agitation,).

Le mélangeur privilégie un mécanisme selon son action mécanique. Mais seules des notions qualitatives peuvent être émises pour évaluer l'action des caractéristiques du milieu à un instant précis sur le type de mécanisme.

Schofield [3] illustre dans ces travaux l'évolution d'un lot soumis à un mécanisme de diffusion et/ou de convection. Il montre que la synergie des deux mécanismes accélère fortement le processus de mélange (Figure I.1).



Figure I.1 : Illustration schématique de la cinétique du mélange sous l'action des deux mécanismes diffusion et convection (Schofield [3]).

I.2.2. Les différents types de mélangeurs

Vu la complexité des milieux à mélanger, les technologies de mélange sont extrêmement variées. Elles sont généralement classées par groupes :

- ✓ Les cuves tournantes
- ✓ Les mélangeurs à fort cisaillement
- ✓ Les mélangeurs combinatoires

Les cuves tournantes sont les mélangeurs utilisés fréquemment pour homogénéiser les produits élaborés dans l'industrie pharmaceutique par exemple. Ce sont des mélangeurs par retournement, dépourvus de pièces internes (une enceinte fermée mise en rotation contrôlée). Par contre, les mélangeurs à fort cisaillement agissent plus sur les caractéristiques physiques des différents composants formant le mélange à homogénéiser. Ce type de mélangeur permet de modifier la morphologie des composants pour améliorer la qualité du mélange et la texture de certains produits. En revanche, il n'est pas approprié pour les poudres à écoulement libre, car ce type de poudres ont une grande mobilité et se déplacent individuellement ou il leurs

faut un mélangeur qui privilégie le déplacement de groupes de particules en limitant leurs mouvements individuels.

Enfin, les mélangeurs combinatoires peuvent offrir une certaine flexibilité dans le mécanisme du mélange surtout dans le cas où la formulation du mélange est très variable.

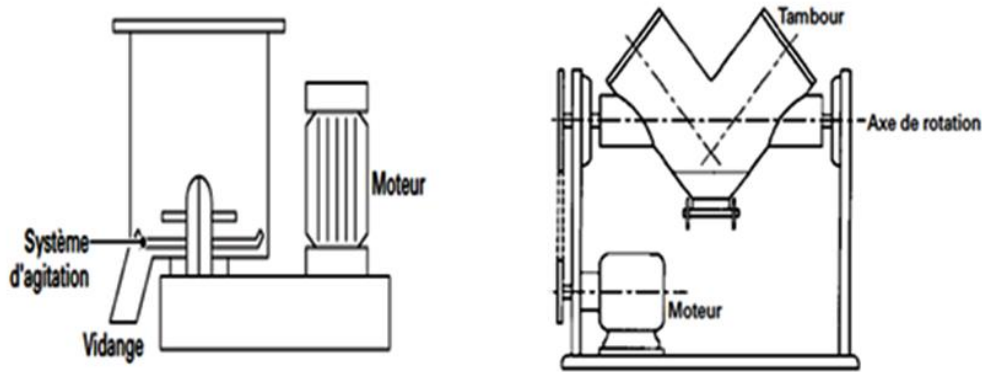


Figure I.2 : Quelques exemples de mélangeurs, à gauche mélangeur à fort cisaillement, à droite mélangeur à double cuves.

Pour un mélange donné, tout dépend de la nature et des caractéristiques recherchées. Il est donc utile de réaliser un mélange qui confère les propriétés d'usage attendues : échelle d'observation.

Actuellement, le critère « homogénéité » correspond à la valeur moyenne des échantillons représentant des volumes des conditionnements élémentaires d'un mélange donné. Plus cette valeur est grande, plus les valeurs des compositions des éléments de base sont éloignées les unes des autres, par conséquent, plus le mélange est hétérogène. Une diminution de la variance correspond donc à une diminution de la dispersion du mélange. Car deux mélanges de même variance peuvent avoir des structures totalement différentes, celles-ci pouvant avoir une répercussion sur la propriété d'usage du produit. Il est donc bien nécessaire de définir un critère macroscopique caractéristique de la structure d'un mélange.

La notion d'homogénéité de mélange est donc intimement liée à la manipulation de deux échelles :

1. L'observation, à laquelle on désire que les propriétés d'usage soient garanties.

2. La ségrégation, qui correspond à ce qu'un procédé de mélange peut effectivement produire.

Optimiser une opération de mélange de solides divisés sur la base de l'homogénéité reviendra donc à faire coïncider ces deux échelles en agissant sur les actionneurs (conditions opératoires) du mélangeur (Figure I.3).

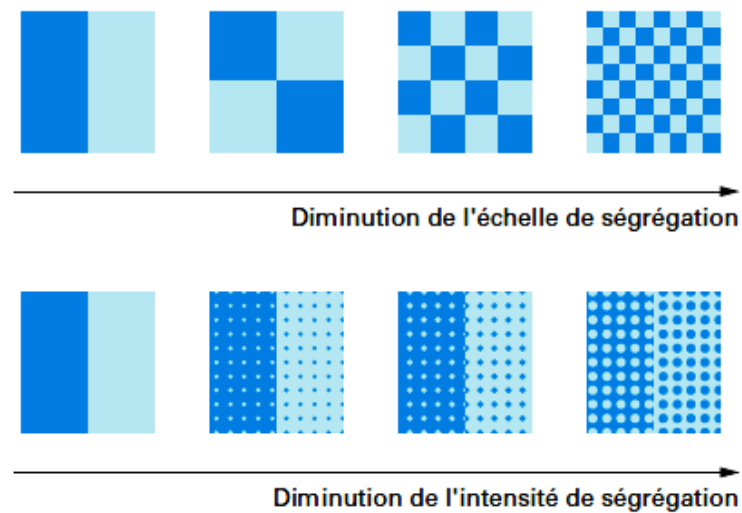


Figure I.3 : Notion d'échelle et d'intensité (Schofield [3]).

I.2.3. Estimation de la qualité d'un mélange

Estimer la qualité d'un mélange c'est donc avant tout pouvoir extrapoler les valeurs mesurées d'un critère global (macro ou microscopique). Mais ce processus comporte entre autre deux écueils qui s'articulent autour de la taille des prélèvements et surtout le nombre d'échantillons et la modalité du prélèvement :

1. Prélèvement statique, qui n'a de sens que dans le cas d'un procédé discontinu.
2. Prélèvement dynamique pour un prélèvement en écoulement (en continu).

Mais quel que soit la démarche qui estime la qualité, le prélèvement conduit souvent à des contraintes de conditionnement (d'échantillons) et des mesures objectives :

- ✓ La difficulté sur la sélection de la zone de prélèvement avec l'espérance que cette zone reflète les propriétés attendues.
- ✓ la définition d'un prélèvement modèle.
- ✓ La perturbation du mélange suite à l'insertion de la sonde dans le volume considéré.

Or, pour des questions pratiques, on diminue le nombre d'échantillons à prélever tout en augmentant la taille de ces prélèvements. Mais ceci cause des problèmes sur l'estimation de l'homogénéité, qui mène à une échelle plus grande que celle d'observation et par conséquent on court le risque de ne pas atteindre les propriétés recherchées du mélange. D'où le problème d'une interférence volume par échantillon et statistique autour d'une qualité « moyenne ».

Pour une question pratique, l'échantillonnage dans un environnement industriel est limité au nombre de 15 (valeur optimale qui reflète l'état d'un milieu par une voie statistique), ce qui rend illusoire toute caractérisation représentative de l'ensemble des régions du mélangeur.

I.2.4. Méthodes de mesures de l'homogénéité d'un mélange

Les études actuelles montrent que la qualité de l'homogénéisation d'un mélange de produits (solide granulaire ou liquide) est liée à plusieurs paramètres tels que le temps de mélange, la vitesse de rotation, le dimensionnement et la géométrie du système d'agitation. Le réglage de ces paramètres conduit à des modifications dans les propriétés physiques et mécaniques de la matière première ce qui va influencer les propriétés du produit final. Actuellement, rares sont les méthodes permettant de suivre ces modifications.

Pour contrôler et réguler les propriétés du mélange, **Ehrardt & al [4]** ont développé une méthode basée sur la mesure d'une caractéristique électrique (permittivité diélectrique) du milieu situé entre deux électrodes. Cette méthode souffre d'un problème de résolution pour différencier l'état de milieux ayant des propriétés physiques très proches.

Les méthodes infrarouges quant à elles, permettent de connaître la composition chimique par analyse spectrale. Une technique qui donne accès à une analyse multi-composante simultanément. La bande spectrale dite du proche infrarouge s'étend de 1100 nm à 2500 nm. Un spectromètre est constitué d'une source lumineuse couvrant cette bande

spectrale, d'un système optique de focalisation, d'un monochromateur et d'un capteur. A titre d'exemple, **Frake & al [5]** et **Bakeev [6]** ont abordé le suivi et le contrôle des réactions par la mesure de l'humidité dans le produit. **Berntsson [7]** a développé une méthode de suivi d'un mélange de poudre pour étudier l'influence de différents paramètres sur le temps de mélange. Pour atteindre une surface d'analyse de 0,12cm² cette méthode demande un lourd travail de calibration et un taux d'échantillonnage trop élevé. **Rielly [8]** quant à lui, a ciblé l'instant de la fin du mélange en estimant la présence d'un certain type des particules par nuance des couleurs. On trouve également **A. Ait Kadour & al [9]** qui ont utilisé la spectroscopie proche infrarouge (NIR - Near InfraRed Spectroscopy) pour contrôler le pétrissage d'une pâte en utilisant des méthodes chimio-métriques avec la possibilité d'interpréter chimiquement le changement du spectre avec le temps de mélange.

A ces techniques, s'ajoutent celles basées sur l'analyse d'image. Le système développé par **Realpe & al [10]** propose une image acquise par une matrice numérique au niveau de gris. Ces valeurs sont analysées et organisées dans un cluster afin de déterminer la concentration de chaque composé du mélange.

Pour des systèmes combinant plusieurs mouvement (agitateur planétaire), **Delaplace & al [11]** ont proposé une étude basée sur le rapport des vitesses de rotation de l'agitateur (la vitesse de rotation de l'agitateur autour de l'axe vertical par rapport à sa vitesse de rotation autour de l'axe horizontal) et son effet sur l'homogénéité d'un mélange de produits granulaires à écoulement libre en utilisant un mélangeur TRIAXE, pour valider leur hypothèse, ils ont effectué une analyse sur le temps de mélange et la consommation de l'énergie pendant l'opération de mélange.

Des méthodes acoustiques aussi ont été développées pour contrôler l'homogénéité d'un mélange, **G. Nassar & al [12]** ont développé un capteur acoustique passif très basse fréquence (<100 Hz) pour suivre l'évolution mécanique d'une pâte durant le processus de pétrissage.

De l'analyse des différentes applications, on constate un manque total de dispositifs de mesure quantitative des propriétés physiques et mécaniques dans la masse du produit. La majorité des techniques actuelles se contentent d'une analyse des propriétés de surface avec une estimation qualitative résultante d'une analyse statistique.

Le développement des méthodes de mesures en ligne, non intrusives, devrait toutefois permettre prochainement une meilleure définition, et un meilleur contrôle, de l'homogénéité.

C'est la raison pour laquelle ce besoin nous a amené à définir une nouvelle technologie de contrôle dynamique basée sur le suivi en ligne des propriétés mécaniques d'un mélange. Cette technique est basée sur la distribution dans le mélange des capteurs ultrasonores sphériques, miniaturisés (environ 1 cm de diamètre), autonomes. Le module électrique embarqué dans les capteurs assure entre autre le codage numérique des émetteurs et par conséquent un protocole de mesures par réseaux. La mise en vibration de l'émetteur permet la génération d'une onde sphérique dans le milieu. L'analyse du signal issu d'un émetteur donné positionné aléatoirement dans le mélange, offre une information pertinente sur le niveau d'homogénéisation souhaité. La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à un bref rappel des propriétés acoustiques des matériaux viscoélastiques pouvant faire l'objet d'une mesure intervenant dans l'analyse du mélange à caractériser.

I.3. Comportement mécanique des milieux viscoélastiques

Un milieu viscoélastique est un milieu complexe, dont les propriétés mécaniques peuvent évoluer en fonction de la fréquence de sollicitation utilisée et de la température. Citons par exemple : les gels, les pâtes, les polymères, les suspensions, les mousses...

Il est caractérisé par un comportement intermédiaire entre celui d'un solide élastique parfait où les contraintes sont proportionnelles aux déformations et celui d'un liquide visqueux newtonien où les contraintes sont proportionnelles aux vitesses de déformation.

La relation qui relie les contraintes σ et les déformations ε dans un milieu viscoélastique linéaire est de la forme suivante :

$$A\sigma + B\dot{\sigma} + \dots = C\varepsilon + D\dot{\varepsilon} + \dots \quad \text{I.1}$$

A, B, C, et D sont des constantes indépendantes du temps, du niveau de la contrainte et de la vitesse de déformation.

Le comportement mécanique d'un milieu viscoélastique est souvent représenté par les éléments rhéologiques de base, montés en parallèle ou / et en série, constitué d'un ressort d'élasticité k pour traduire le caractère élastique et d'un amortisseur de viscosité η qui traduit le caractère visqueux.

I.3.1. Modèle mécanique du milieu viscoélastique : Modèle de Poynting

Le modèle de Poynting est formé du modèle de Kelvin (constitué d'un ressort et un amortisseur monté en parallèle) monté en série avec un ressort (figure 1.14).

Au temps court, le milieu est régi par un comportement purement élastique (seule le ressort k_1 intervient).

Au temps long, les ressorts k_1 et k_2 interviennent en série, le matériau est élastique aussi. Par contre au temps intermédiaire, la vitesse de déformation est telle que la contrainte sur l'amortisseur est du même ordre de grandeur que la contrainte sur le ressort k_2 , le matériau est viscoélastique.

A l'état pré-déformé et pour des vitesses de sollicitations très faibles, le modèle se réduit à un ressort correspondant au comportement hyper-élastique en grande déformation. Autour de l'état pré-déformé, le comportement est viscoélastique en petites déformations.

Deux grandeurs essentielles caractérisent le système présenté sur la figure I.4 :

- La déformation totale :

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad \text{I.2}$$

- La contrainte totale :

$$\sigma = k_1 \cdot \varepsilon_1 = k_2 \cdot \varepsilon_2 + \eta \cdot \dot{\varepsilon}_2 \quad \text{I.3}$$

En éliminant ε_1 , ε_2 et leurs dérivées, on obtient l'équation d'état du modèle de Poynting :

$$\frac{k_1+k_2}{k_1 k_2} \sigma + \frac{\eta}{k_1 k_2} \dot{\sigma} = \varepsilon + \frac{\eta}{k_2} \cdot \dot{\varepsilon} \quad \text{I.4}$$

Cette équation relie les déformations, les contraintes et leurs dérivées par une relation linéaire qui caractérise le milieu viscoélastique.

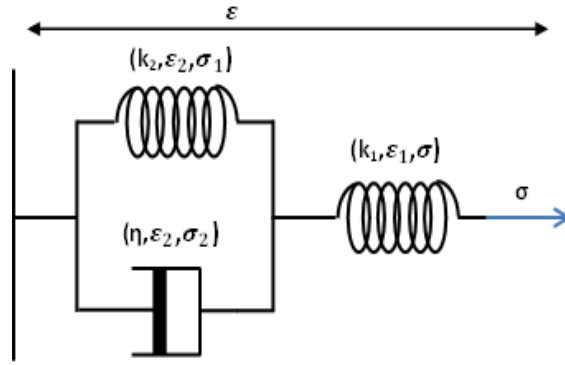


Figure I.4 : Modèle de Poynting.

Afin d'étudier le comportement dynamique du milieu viscoélastique, nous allons nous intéresser à la réponse d'un tel milieu en appliquant une sollicitation harmonique de pulsation ω et d'amplitude maximale ε_0 .

$$\varepsilon^* = \varepsilon_0 e^{j\omega t} \quad \text{I.5}$$

La contrainte σ résultante de la déformation appliquée est aussi sinusoïdale mais déphasée de δ , elle a la forme suivante :

$$\sigma^* = \sigma_0 e^{j(\omega t + \delta)} \quad \text{I.6}$$

On a°:

$$\dot{\varepsilon}^* = j\omega \varepsilon^*, \quad \dot{\sigma}^* = j\omega \sigma^* \quad \text{I.7}$$

En remplaçant la contrainte, la déformation et leurs dérivées dans l'équation d'état du modèle de Poynting, nous obtenons :

$$\sigma^* \left[\left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \right) + \frac{\eta}{k_1 k_2} j\omega \right] = \varepsilon^* \left[1 + \frac{\eta}{k_2} j\omega \right] \quad \text{I.8}$$

$$(k_1 + k_2 + j\omega\eta). M(\omega) = k_2(k_1 + j\omega\eta) \quad \text{I.9}$$

Où M est le module élastique complexe dont la partie réelle représente la réponse élastique et la partie imaginaire caractérise la dissipation visqueuse du matériau.

Les valeurs du module élastique dépendent de la valeur de la pulsation ω donc de la fréquence d'excitation.

On peut donc identifier un comportement élastique du matériau quand la fréquence de sollicitation tend vers l'infini (l'amortisseur devient rigide et bloque le deuxième ressort et seul le premier ressort peut se déformer), le module élastique aura la valeur suivante :

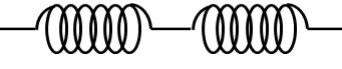
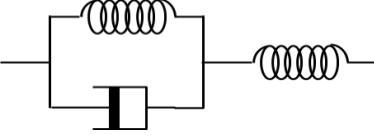
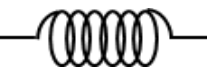
$$M_{\infty} = k_1 \quad \text{I.10}$$

Par contre aux basses fréquences on a un comportement visqueux (l'action de l'amortisseur est négligeable et le modèle sera équivalent aux deux ressorts en série), M tend vers une valeur réelle :

$$M_0 = \frac{k_1 * k_2}{k_1 + k_2} \quad \text{I.11}$$

Le comportement d'un milieu viscoélastique en fonction de la fréquence de sollicitation est résumé dans le tableau suivant :

Tableau-I-1

	$\omega \rightarrow 0$	$0 < \omega < \infty$	$\omega \rightarrow \infty$
$M(\omega)$	$\frac{k_1 * k_2}{k_1 + k_2}$	$\frac{k_1(k_2 + j\omega\eta)}{k_1 + k_2 + j\omega\eta}$	k_1
Schéma équivalent			

La figure I.5 représente la variation du module élastique en fonction de la fréquence.

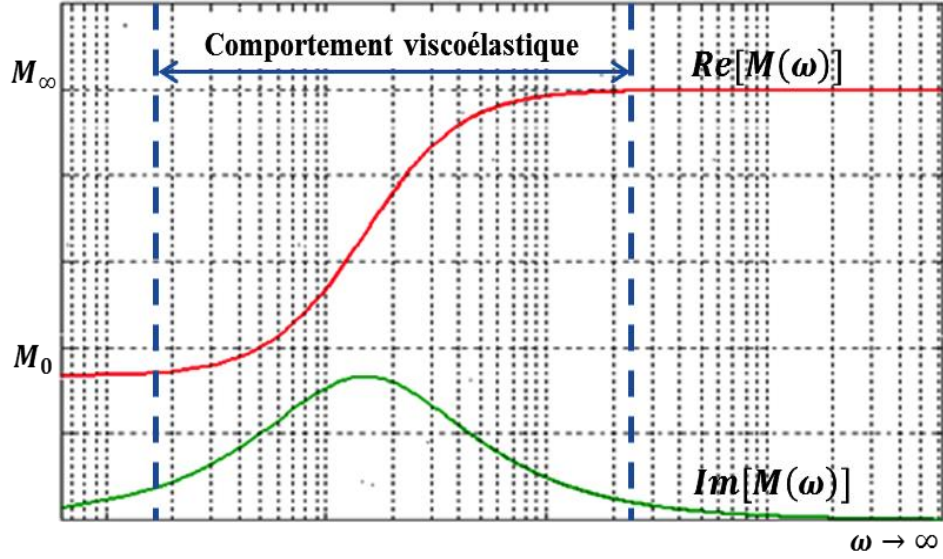


Figure I.5: Représentation du module élastique en fonction de la fréquence d'excitation.

I.4. Comportement acoustique du milieu viscoélastique

D'une manière générale, la propagation d'une onde ultrasonore dans un milieu viscoélastique est liée à la nature du milieu (liée aux propriétés du milieu : la viscosité, l'élasticité et la plasticité.) donc dépend des forces de liaison entre les particules constituant le milieu. Cette propagation se traduit par deux phénomènes importants, une dispersion (dépendance de la vitesse de propagation avec la fréquence de vibration) et une atténuation du signal ultrasonore. Ces deux phénomènes sont dus, soit à une diffraction, soit à une absorption dans le milieu de propagation. De tels phénomènes sont généralement modélisés par une loi de comportement viscoélastique du milieu homogène équivalent (**Bourbié et al [13], Lakes [14]**).

Un fluide visqueux homogène et isotrope est décrit par un tenseur symétrique de rang de deux, qui généralise les expressions de la loi de Newton sur la viscosité dans les trois directions de l'espace:

$$\vec{\sigma} = (-P + \eta' \operatorname{div} \vec{v})\vec{\mathbb{I}} + \eta(\overrightarrow{\operatorname{grad}} \vec{v} + \overrightarrow{\operatorname{grad}}^t \vec{v}) \quad \text{I.12}$$

$\vec{\mathbb{I}}$: est un tenseur identité de rang deux.

$\overrightarrow{\text{grad}}^t \vec{v}$: désigne le transposé du gradient de vitesse.

Avec $\eta' = \eta - \frac{2}{3}\eta$

En régime harmonique : $\vec{v} = j\omega\vec{u}$, l'équation (I.12) devient :

$$\vec{\sigma} = (-P + j\omega\eta' \text{div } \vec{u})\vec{I} + j\omega\eta(\overrightarrow{\text{grad}} \vec{u} + \overrightarrow{\text{grad}}^t \vec{u}) \quad \text{I.13}$$

Or l'équation de mouvement s'écrit:

$$\text{div } \vec{\sigma} + \rho_0\omega^2\vec{u} = \vec{0} \quad \text{I.14}$$

En combinant les deux équations précédentes, nous obtenons :

$$-\overrightarrow{\text{grad}} p + j\omega\eta \Delta\vec{u} + j\omega\left(\frac{1}{3}\eta + \eta_v\right)\overrightarrow{\text{grad}}(\text{div } \vec{u}) + \rho_0\omega^2\vec{u} = \vec{0} \quad \text{I.15}$$

Du fait que le champ du vecteur déplacement $\vec{u}$ peut toujours être mis sous la forme:

$$\vec{u} = \vec{u}_L + \vec{u}_T \quad \text{I.16}$$

Avec :

L désigne la composante longitudinale et T la composante transversale

$$\vec{u}_L = \overrightarrow{\text{grad}}\Phi \quad ; \quad \vec{u}_T = \overrightarrow{\text{rot}}\vec{\Psi}$$

Φ représente le potentiel scalaire et Ψ le potentiel vecteur.

De cette configuration résulte deux phénomènes majeurs : compression et absorption

Du fait que notre étude se base sur l'exploitation des capteurs sphériques de taille réduite générant une longueur d'onde relativement grande dans le milieu de couplage, alors nous pouvons considérer qu'à chaque instant l'onde émise dans le milieu sous investigation est une onde sphérique.

I.5. Caractéristiques physiques d'une onde acoustique sphérique

Dans le cas d'une source à symétrie sphérique rayonnant en champ libre dans un espace homogène, les ondes se propagent suivant des surfaces sphériques (figure 1.6). Les surfaces d'ondes sont des sphères concentriques dont l'amplitude de vibration décroît en fonction de la distance à la source.

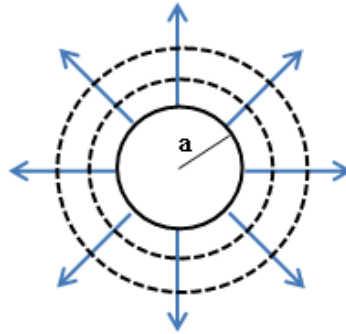


Figure I.6 : Emission radiale par une sphère divergente.

I.5.1. Mise en équation

Dans un milieu homogène, l'équation de propagation d'une onde sphérique est donnée par :

$$\nabla^2(\phi) - \frac{1}{c^2} \frac{d^2(\phi)}{dt^2} = 0 \quad \text{I.17}$$

Où ϕ est un potentiel des vitesses.

$$\vec{v} = -\overrightarrow{\text{grad}}\phi = -\vec{\nabla}\phi \quad \text{I.18}$$

Pour une vibration ayant une symétrie sphérique autour d'un point O pris comme origine, le potentiel ϕ au point M ne dépend que de la distance $r = OM$ et du temps t .

Dans ce cas le Laplacien d'une fonction en coordonnée sphérique s'écrit :

$$\nabla^2(\phi) = \frac{2}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} \quad \text{I.19}$$

$$\text{Avec : } \frac{2}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} = \frac{1}{r} \frac{\partial^2(r\phi)}{\partial r^2}$$

En conséquence l'équation de propagation d'une onde sphérique s'écrit :

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2(r\phi)}{\partial t^2} = \frac{\partial^2(r\phi)}{\partial r^2} \quad \text{I.20}$$

La solution générale d'une telle équation est donnée par la somme d'une onde divergente se déplaçant vers les r croissants (premier terme) et d'une onde convergente se déplaçant vers le centre acoustique (deuxième terme):

$$\phi(r, t) = \frac{1}{r} F\left(t - \frac{r}{c}\right) + \frac{1}{r} G\left(t + \frac{r}{c}\right) \quad \text{I.21}$$

Dans notre cas, on s'intéresse qu'à l'onde divergente.

Pour un potentiel de vitesse ϕ , l'équation d'Euler s'écrit :

$$\vec{v} = -\overrightarrow{\text{grad}}\phi = -\vec{\nabla}\phi \quad \text{I.22}$$

$$\rho \frac{d\phi}{dt} + p = 0 \quad \text{I.23}$$

$$p = -\rho \frac{d\phi}{dt} \quad \text{I.24}$$

La pression de l'onde s'écrit dans ce cas :

$$p(r, t) = \frac{\rho}{r} F'\left(t - \frac{r}{c}\right) \quad \text{I.25}$$

La vitesse de l'onde en tout point M est dirigée suivant le vecteur $\vec{r} = \overrightarrow{OM}$. Elle est donnée par la relation :

$$v = -\frac{d\phi}{dr} = \frac{1}{rc} F'\left(t - \frac{r}{c}\right) + \frac{1}{r^2} F\left(t - \frac{r}{c}\right) \quad \text{I.26}$$

L'équation d'état dans ce cas reste inchangée :

$$dP = c^2 d\rho \quad \text{I.27}$$

Dans la suite de notre travail, deux milieux de nature complexe sont considérés ; milieux viscoélastiques et milieux à forte diffusion.

I.5.2. Cas d'un milieu viscoélastique

Suivant la théorie de **T. M Lee [15]**, la propagation d'une onde dans un milieu viscoélastique peut être étudiée en utilisant la relation liant la contrainte à la déformation sur la base de l'équivalent mécanique du solide de Kelvin-Voigt.

L'équation de dilatation de l'onde s'écrit alors :

$$\left[(\lambda + 2\mu) + (\lambda' + 2\mu') \frac{\partial}{\partial t} \right] \nabla^2 \varphi = \rho \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \quad \text{I.28}$$

Où

λ et μ sont les constantes de Lamé

λ' et μ' représentent les constantes visqueuses correspondants à λ et μ

Pour une onde sphérique divergente, la solution de l'équation précédente a la forme suivante :

$$\varphi = \frac{A}{r} \exp \left[-\alpha_1 r + i\omega \left(t - \frac{r}{c_1} \right) \right] \quad \text{I.29}$$

Où

A est une constante et α_1 Représente le coefficient d'atténuation,

$$\alpha_1 = (\omega/c_1) \tan \left(\theta_1/2 \right) \quad \text{I.30}$$

c_1 Représente la vitesse de dilatation de l'onde,

$$c_1 = \left(M_1/\rho \right)^{1/2} \sec \left(\theta_1/2 \right) \quad \text{I.31}$$

Avec :

$$M_1 = (\lambda + 2\mu) \sec \theta_1 \quad \text{I.32}$$

$$\tan \theta_1 = \omega(\lambda' + 2\mu')(\lambda + 2\mu) \quad \text{I.33}$$

Dans le cas d'une coque sphérique excitée par une uniforme source de pression $p(t)$ variable dans le temps et si nous supposons que la source est harmonique :

$$p(t) = p_0 \cos \omega t \quad \text{I.34}$$

Avec p_0 est l'amplitude de la pression à une fréquence ω donnée, le potentiel des déplacements correspondant est donné par :

$$\varphi = \frac{A}{r} \exp[-\alpha_1(r - r_0)] \cos(\omega\tau - \varepsilon_0) \quad \text{I.35}$$

Où $\tau = t - (r - r_0)/c_1$ et ε_0 représente l'angle de phase déterminé par les conditions aux limites.

Les conditions aux limites à satisfaire à la surface de la coque, sont :

$$(\sigma_r)_{r=r_0} + p_0 \cos \omega t = 0 \quad \text{I.36}$$

L'équation I.36 s'appelle l'équation des pressions acoustiques.

Avec σ_r représente la contrainte radiale dans le milieu, sa relation avec le déplacement radial u_r de la sphère est donnée par :

$$\sigma_r = \left\{ \left[(\lambda + 2\mu) + (\lambda' + 2\mu') \frac{\partial}{\partial t} \right] \frac{\partial u_r}{\partial r} + 2 \left(\lambda + \lambda' \frac{\partial}{\partial t} \right) u_r / r \right\} \quad \text{I.37}$$

En utilisant les équations (I.36) et (I.37), l'équation du potentiel de déplacement devient :

$$\varphi = - \left(\frac{p_0 r_0^3}{4\mu D_0 r} \right) \exp[-\alpha_1(r - r_0)] \cos(\omega\tau - \varepsilon_0) \quad \text{I.38}$$

Avec

$$D_0 = \{(\xi + \eta \tan \theta_2)^2 + [\eta - \xi(\tan \theta_2 + \Gamma\xi)]^2\}^{1/2}$$

$$\varepsilon_0 = \tan^{-1} \left\{ \frac{(\xi + \eta \tan \theta_2)^2}{[\eta - \xi(\tan \theta_2 + \Gamma \xi)]} \right\}$$

$$\xi = \frac{\omega r_0}{c_1}$$

$$\eta = 1 + \alpha_1 r_0$$

$$\tan \theta_2 = \frac{\omega \mu'}{\mu}$$

$$\Gamma = \frac{\rho c_1^2}{4\mu}$$

En utilisant les équations (I.37) et (I.38), nous pouvons écrire :

$$u_r = \frac{\partial \varphi}{\partial r} = \left(\frac{p_0 N_u}{4\mu D_0} \right) \left(\frac{r_0^3}{r^2} \right) \exp[-\alpha_1(r - r_0)] * \cos(\omega\tau - \varepsilon_0 + \varepsilon_u) \quad \text{I.39}$$

Et

$$\sigma_r = -\frac{p_0 N_\sigma}{D_0} \left(\frac{r_0}{r} \right)^3 \exp[-\alpha_1(r - r_0)] \cos(\omega\tau - \varepsilon_0 + \varepsilon_\sigma) \quad \text{I.40}$$

Où

$$N_u = (\xi_r^2 + \mu_r^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$\varepsilon_u = \tan^{-1} \left(\frac{\xi_r}{\eta_r} \right)$$

$$N_\sigma = \{(\xi_r + \eta_r \tan \theta_2)^2 + [\eta_r - \xi_r(\tan \theta_2 + \Gamma \xi_r)]^2\}^{1/2}$$

$$\varepsilon_\sigma = \tan^{-1} \left[\frac{\xi_r + \eta_r \tan \theta_2}{\eta_r - \xi_r(\tan \theta_2 + \Gamma \xi_r)} \right]$$

$$\xi_r = \frac{\omega r}{c_1}$$

$$\eta_r = 1 + \alpha_1 r$$

I.6. Milieu hétérogène à forte diffusion

Dans ce cas de figure, des travaux de **J.M. Perdigao [16]** se sont appuyés en considérant la section efficace de diffusion γ comme paramètre principal. Il est défini comme étant le rapport de l'énergie totale par unité de temps diffusée par un obstacle diffuseur à l'énergie par unité de surface par unité de temps transportée par l'onde incidente.

Le calcul du flux d'énergie est essentiel dans la détermination de la section efficace de diffusion. Nous calculons les relations pour le flux d'énergie à partir des relations des contraintes et des déplacements. L'énergie élastique E contenue dans un volume V pour un champ élastique donné est la somme de l'énergie cinétique E_c et de l'énergie potentielle E_p , avec:

$$E_c = \frac{1}{2} \int \rho v_i^2 dV = \frac{1}{2} \int \rho \frac{\partial u_i}{\partial t} \frac{\partial u_i}{\partial t} dV \quad \text{I.41}$$

$$E_p = \frac{1}{2} \int \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dV \quad \text{I.42}$$

La variation de l'énergie à l'intérieur de l'élément de volume V est donnée par:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \int \rho \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} \frac{\partial u_i}{\partial t} \right) dV + \frac{1}{2} \int \frac{\partial}{\partial t} (\sigma_{ij} \varepsilon_{ij}) dV \quad \text{I.43}$$

Où :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\sigma_{ij} \varepsilon_{ij}) = \frac{\partial}{\partial t} (C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \varepsilon_{ij}) = 2C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial t} = 2\sigma_{ij} \frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial t}$$

C_{ijkl} représente le tenseur des paramètres élastiques.

D'où :

$$\frac{dE}{dt} = \int \rho \frac{\partial u_i}{\partial t} \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} dV + \int \sigma_{ij} \frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial t} dV \quad \text{I.44}$$

$$\frac{dE}{dt} = \int \left(\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} + \sigma_{ij} \frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial t} \right) dV \quad \text{I.45}$$

Nous avons d'après le principe fondamental de la dynamique:

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad \text{I.46}$$

$$\frac{dE}{dt} = \int \left(\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \sigma_{ij} \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) dV \quad \text{I.47}$$

$$\frac{dE}{dt} = \int \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial t} \right) dV \quad \text{I.48}$$

Si S étant la surface qui entoure le volume V , en utilisant le théorème de Green, nous pouvons écrire :

$$\frac{dE}{dt} = \int \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial t} d\vec{S} = \int \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial t} n_j dS = \int \bar{\sigma} \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \vec{n} dS \quad \text{I.49}$$

$\vec{n}$ étant un vecteur unitaire normale à la surface S et dirigé vers l'extérieur.

Cette intégrale représente l'écoulement de l'énergie dans le volume V à travers la surface fermée S . Le principe de conservation de l'énergie impose que le flux d'énergie à travers la surface S soit égal à la diminution d'énergie $\left(\frac{dF}{dt}\right)$ dans le volume V entouré par S . Cette diminution d'énergie s'écrit:

$$\frac{dF}{dt} = -\frac{dE}{dt} = -\int \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial t} n_j dS \quad \text{I.50}$$

Seules les parties réelles des tenseurs complexes de contrainte et du déplacement représentent la quantité physique, alors nous pouvons écrire :

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{2}(\sigma + \sigma^*) ; \quad \bar{u} = \frac{1}{2}(u + u^*) \quad \text{I.51}$$

$$\frac{dF}{dt} = -\frac{1}{4} \int (\sigma + \sigma^*) \left(\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^*}{\partial t} \right) n dS \quad \text{I.52}$$

Les astérisques désignent la conjugaison complexe. En régime harmonique, la contrainte et le déplacement s'écrivent :

$$\sigma = \sigma_0 e^{i\omega t} ; \quad u = u_0 e^{i\omega t} \quad \text{I.53}$$

Avec σ_0 et u_0 représentent respectivement les composantes spatiales de la contrainte et du déplacement.

$$\frac{dF}{dt} = \frac{j\omega}{4} \int [-(\sigma_0 u_0 e^{i\omega t} - \sigma_0^* u_0^* e^{-i\omega t}) + (\sigma_0 u_0^* - \sigma_0^* u_0)] n dS \quad I.54$$

En moyennant sur une période temporelle, nous obtenons:

$$\frac{d\bar{F}}{dt} = \frac{j\omega}{4} \int (\sigma_0 u_0^* - \sigma_0^* u_0) n dS \quad I.55$$

Finalement la section efficace γ de diffusion s'exprime par:

$$\gamma = \left(\frac{d\bar{F}_s}{dt} \right) \cdot \left(\frac{d\bar{F}_i}{dt} \right)^{-1} \quad I.56$$

Les deux indices s et i signifient qu'il s'agit respectivement du taux d'énergie diffusée et incident.

Dans le cas d'un milieu à faible densité d'hétérogénéité ayant une dimension faible par rapport à la longueur d'onde, l'atténuation due à ces obstacles peut être calculée à partir de la section efficace de diffusion γ de chaque élément supposé indépendant des autres, et ceci par une sommation continue. (Nassar et al [17])

Si nous supposons un faisceau acoustique continu, d'intensité I_0 à $z = 0$ et $I(z)$ à z positif, traversant un élément de volume de section unité et de longueur dz , et si n_0 représente la densité volumique des obstacles, alors le nombre d'obstacles dans l'élément de volume considéré est $n_0 dz$. La variation d'intensité du faisceau acoustique sera donnée par:

$$dI(z) = -n_0 \gamma I(z) dz \quad I.57$$

$$I(z) = I_0 e^{-n_0 \gamma z} \quad I.58$$

Avec un coefficient d'atténuation par diffusion donné par :

$$\alpha_{diff} = n_0 \gamma \quad I.59$$

Qui s'exprime en Neper / unité de longueur.

A noter que, lorsque les dimensions des obstacles et leur densité sont non négligeables, ces derniers ne peuvent plus être considérés comme indépendants, alors il faut tenir compte du recouvrement des sections des différents éléments. Avec cette dernière hypothèse, les calculs pour déterminer l'atténuation deviennent très complexes et la sommation continue doit être remplacée par une sommation discrète. Nous parlerons dans ce cas de section efficace de diffusion corrigée γ_c obtenue à partir d'un modèle de cases volumiques d'une structure hexagonale compacte.

I.7. Conclusion

L'homogénéisation d'un mélange des milieux complexes est une opération très importante pour différents domaines tels que les industries agroalimentaires, pharmaceutiques, ... Cette étape permet d'avoir un produit final homogène d'un point de vue visuel et textural. La majorité des méthodes d'homogénéisation qui existent se base soit sur le prélèvement d'un échantillon de mesure, un temps de mélange fixe ou sur l'image finale du mélange ; toutefois, l'absence d'une méthode d'homogénéisation autonome et capable de suivre l'évolution des propriétés mécaniques d'un mélange en temps réel nous a mené à proposer une technique ultrasonore de caractérisation offrant à la fois une flexibilité de fonctionnement et un accès aux caractéristiques physiques in-situ d'un milieu ayant une dépendance forte de son historique.

C'est la raison pour laquelle le chapitre suivant, met l'accent sur une nouvelle méthodologie de caractérisation. Il est basé sur un réseau de capteurs dont chaque élément est de forme sphérique, miniaturisé et autonome. Ce capteur forme le noyau du système de mesure que nous avons proposé pour l'étude de l'homogénéisation d'un milieu viscoélastique complexe.

Chapitre II

Résonateur sphérique : Etude et analyse du comportement vibratoire

II.1. Introduction

De nombreuses activités industrielles mettent en œuvre des phénomènes physico-chimiques très complexes permettant la transformation de produits qui présentent souvent de nombreux états de la matière lors des différentes phases des procédés de transformation.

Souvent cette transformation se fait par apport d'énergie provenant d'une réaction chimique, d'énergie thermique, mécanique ou une combinaison de ces formes d'énergie. Des modifications physiques peuvent également être apportées (introduction d'air dans la matière, ...). L'ensemble de ces formes d'énergie est très souvent combiné dans un même procédé de transformation et il est souvent difficile de quantifier la part de chacune dans la transformation du produit.

Suite à la complexité des procédés (nombreuses étapes de transformation, multiplicité des formes d'énergie, ...) et des produits (matière viscoélastique, visco-élasto-plastique, ...), associée à un souci légitime de ne pas interférer avec le procédé, peu de mesures sont réalisées au cours des différentes étapes de transformation du produit (c'est souvent les grandeurs température, pression, débit qui sont suivies dans le procédé alors qu'elles ne sont pas nécessairement corrélées aux propriétés recherchées du produit en cours d'élaboration).

C'est la raison pour laquelle nous avons choisi de développer des capteurs acoustiques adaptés aux contraintes imposées par le produit ou le procédé. Il s'agit d'une instrumentation acoustique basse fréquence adaptée à la caractérisation de produits complexes et utilisant des capteurs ultrasonores autonomes, sphériques, miniaturisés et omnidirectionnels.

L'objectif alors de notre travail est d'avoir une source ponctuelle basse fréquence pour générer une onde acoustique sphérique. Pour ce faire, une procédure différente pour la conception du capteur a été utilisée, une technique qui a consisté à mettre en résonance toute une structure mécanique de forme sphérique de taille réduite. Etant donné que sa forme est plus petite que la longueur d'onde utilisée dans le milieu, la source se comporte comme une source acoustique ponctuelle.

Dans le présent chapitre nous allons présenter un bref historique sur les différents concepts existants dans la littérature exploitant la forme sphérique comme moyen d'analyse ou de mesure. Ensuite nous décrivons le modèle du capteur acoustique sphérique proposé

dans le cadre de cette étude et qui est adapté pour l'étude d'homogénéité en temps réel des milieux évolutifs. Une validation de ce modèle est appuyée par une étude analytique et numérique des principaux modes vibratoire de ce capteur, complétée par une réalisation et une analyse expérimentale de ces modes.

II.2. Résonateur sphériques

Dans le domaine pétrochimique, des résonateurs sphériques ont été utilisés dans plusieurs travaux de recherche pour mesurer la vitesse du son dans différents gaz afin d'obtenir des informations thermodynamiques tel que la conductivité thermique, la viscosité et la constante des gaz R . L'utilisation d'un résonateur sphérique en mode radial par **J. B. MEHL & all [18]** par exemple a montré, par le biais de la mesure de la vitesse du son dans des gaz dilués, une bonne satisfaction pour déterminer les propriétés thermodynamiques de l'environnement confiné. L'auteur a montré que les fréquences de résonance des modes radiaux pour une sphère sont sensibles au second ordre à des imperfections géométriques, et donc, en pratique, seul le volume du résonateur sera connu. Le choix de la forme sphérique repose sur le fait que la correction des fréquences de résonance mesurées résultantes des interactions gaz-résonateur peut être d'un ordre de grandeur inférieur dans un résonateur sphérique que dans un interféromètre cylindrique.

J. B. MEHL & all [18] ont utilisé un résonateur sphérique dans une gamme de fréquence de 4 à 13 kHz pour mesurer la vitesse et l'atténuation du son dans l'éthylène (C_2H_4) en utilisant l'Argon (Ar) comme gaz de calibration sous une plage de température de 0 à 100°C et une pression comprise entre 0.15-1.0 MPa. Ils se sont basés dans leurs travaux sur un résonateur sphérique en aluminium, de diamètre intérieur de 127 mm et une épaisseur de 12,1 mm. Ils ont choisi de placer un accéléromètre à l'extérieur des parois du résonateur pour pouvoir négliger l'effet des propriétés de ces derniers sur les fréquences et les modes de résonance de la sphère.

Dans le même contexte, un autre résonateur sphérique en acier inoxydable a été développé par **He et al [19]** pour mesurer la vitesse du son dans des gaz comme le propane gazeux pour des températures comprises entre 293 K et 313 K et à une pression allant jusqu'à

200 kPa. Le résonateur a été assemblé à partir de deux hémisphères d'acier inoxydable (type : 00Cr17Ni14Mo2), de rayon intérieur d'environ 61,77 mm et de fréquence de travail comprise entre 1 et 15 KHz.

Récemment, et sur la base de la relation liant la constante de Boltzmann à la vitesse du son dans un gaz parfait, **Arnaud GUILLOU [20]** a proposé une méthode de mesure pour déterminer la vitesse du son en utilisant un résonateur en cuivre de forme quasi sphérique et de volume intérieur de 0,5 L, rempli d'argon.

A ce jour-là, la littérature montre que la quasi-totalité des systèmes de mesures ou d'analyses exploitant la résonance d'une structure en forme sphérique se limite à des applications très limitées. Nous constatons que les capteurs existants font partie des systèmes de mesures encombrants et câblés, ils sont souvent dédiés à des applications limitées (des mesures sur les propriétés des gaz).

II.3. Intérêt de la forme sphérique miniaturisée

Un des objectifs de ce travail de thèse a visé la réalisation d'une source acoustique de faible encombrement, basse fréquence, permettant la génération d'une onde sphérique à travers le milieu à analyser. Nous nous sommes placés dans une stratégie de développement des réseaux de capteurs adaptés à des contraintes industrielles.

Le besoin d'une technologie exploitant des capteurs autonomes nous a amené à développer un résonateur sphérique miniaturisé pour la caractérisation en ligne des propriétés mécaniques des mélanges (fluides ou visqueux). Le choix sur les caractéristiques géométriques et électriques des capteurs offre un double intérêt sur l'identification des différents éléments issus du même réseau et ceci soit par une identification par fréquence (dimensionnelle) ou par codage (numérique binaire).

II.4. Description du capteur proposé

D'un point de vue mécanique, le résonateur est composé d'une coquille sphérique fermée, assemblée à partir de deux demi-sphères réalisées à partir d'un matériau approprié, adapté à l'application envisagée, dans la présente étude le plexiglas a été utilisé. Son rayon intérieur est d'environ 10 mm et son épaisseur est d'environ 3 mm. La capsule sphérique est mise en résonance par un anneau piézo-électrique (PZT-Pz26-ferroperm)) de 1 mm d'épaisseur, pris en sandwich entre les deux demi-sphères.

La dimension et la forme considérée rendent ces éléments vibratoires comme des sources acoustiques ponctuelles vues la longueur d'onde qui résulte de la fréquence de résonance dans les milieux considérés.

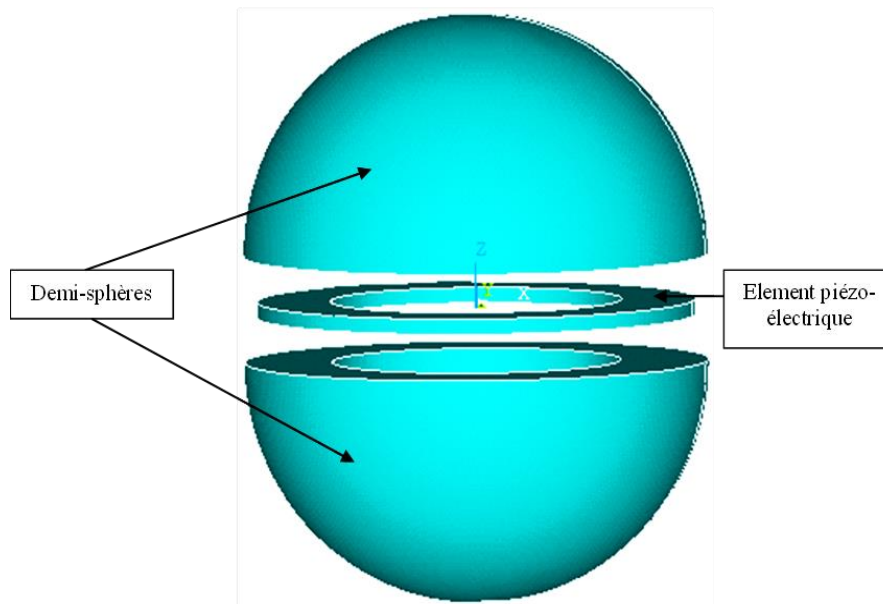


Figure II.1 : Les éléments mécaniques de base constituant le résonateur sphérique.

Comme nous pouvons remarquer sur la figure II.2, la forme sphérique creuse de la structure nous a offert la flexibilité d'embarquer une électronique de codage et de commande au sein du résonateur qui permet de rendre ainsi le capteur autonome. En fait, cette électronique assure, en même temps, l'excitation de l'anneau piézo-électrique, le contrôle de l'émission-réception, les algorithmes de codage, le traitement du signal et en perspective un protocole de stockage des données.

Par ailleurs, le control et la commande du résonateur sont assurés par une puce programmable (SoC) intégrée dans la partie creuse du capteur sphérique. Elle comprend, une unité centrale de traitement (CPU), un oscillateur numérique (DCO), un ordonnanceur de tâches (IT), un générateur d'ultrasons codé (PWMG), une unité de gestion d'énergie (PMU), un amplificateur de sortie (OB) et une batterie (BAT).

Le principe de fonctionnement de la carte sera détaillé dans le chapitre 3.

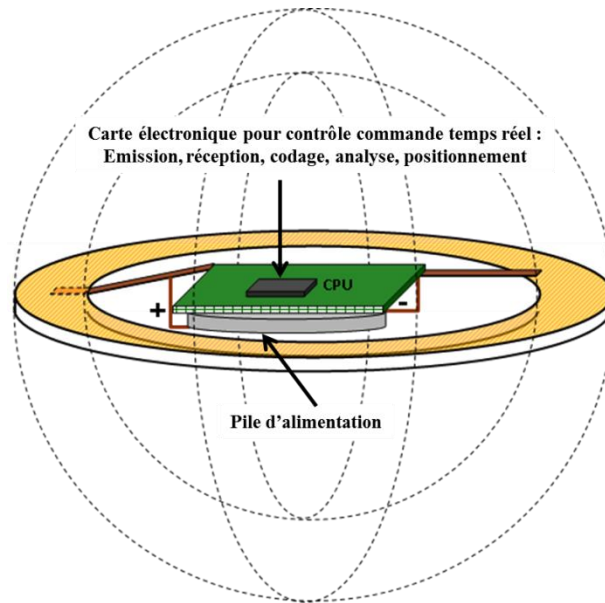


Figure II.2 : Emplacement de l'électronique dans la partie creuse de la sphère.

II.5. Comportement vibratoire

II.5.1. Approche analytique

II.5.1.1 Equation du mouvement d'une coquille sphérique

Sur la base de la théorie proposée par **Love [21]** et adapté par **Kalnins [22]**, **De Souza [23]** montre, dans le cadre des petites déviations d'une coquille mince, homogène, isotrope et élastique, que sa réponse vibratoire d'amortissement est négligeable (en absence de toute contrainte extérieure (force nulle)).

Dans ce cas le concept lagrangien L est défini comme étant la différence entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle peut être exprimée comme :

$$L = T - U \quad \text{II.1}$$

Par contre, pour un système dynamique simple, subissant des mouvements vibratoires libres variant de façon continue sur l'intervalle de temps $t_1 \leq t \leq t_2$, l'équation de mouvement peut être exprimée en utilisant le principe d'Hamilton qui satisfait la condition suivante :

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} L dt \equiv \delta \int_{t_1}^{t_2} (T - U) dt \quad \text{II.2}$$

➤ L'énergie cinétique d'une sphère est donnée par :

$$T = \frac{1}{2} \rho h \iint [\dot{u}^2 + \dot{v}^2 + \dot{w}^2] R^2 \sin \varphi d\varphi d\theta \quad \text{II.3}$$

Avec h est l'épaisseur de la sphère, ρ la densité du matériau et (u, v, w) sont les déplacements de la sphère en coordonnées sphériques (φ, θ, R) (figure II.3).

➤ L'énergie de déformation U (énergie potentielle), est constituée des termes suivants :

$$U = U_{M\varphi} + U_{M\theta} + U_{M\varphi\theta} + U_{B\varphi} + U_{B\theta} + U_{B\varphi\theta} \quad \text{II.4}$$

Où les composantes de l'énergie de déformation de la membrane sont : $U_{M\varphi}$ la méridienne, $U_{M\theta}$ la circonférentielle et $U_{M\varphi\theta}$ dans le plan de cisaillement, et sont définies comme suit:

$$U_{M\varphi} = \frac{1}{2} \iint N_{\varphi} \varepsilon_{\varphi} R^2 \sin \varphi d\theta d\varphi \quad \text{II.5}$$

$$U_{M\theta} = \frac{1}{2} \iint N_{\theta} \varepsilon_{\theta} R^2 \sin \varphi d\theta d\varphi \quad \text{II.6}$$

$$U_{M\varphi\theta} = \frac{1}{2} \iint N_{\varphi\theta} \varepsilon_{\varphi\theta} R^2 \sin \varphi d\theta d\varphi \quad \text{II.7}$$

Où N est la force par unité de longueur de la surface neutre et ε représente la déformation de la membrane.

$$N_\varphi = K(\varepsilon_\varphi + \nu \varepsilon_\theta) \quad \text{II.8}$$

$$N_\theta = K(\varepsilon_\theta + \nu \varepsilon_\varphi) \quad \text{II.9}$$

$$N_{\varphi\theta} = K(1 - \nu)\varepsilon_{\varphi\theta} \quad \text{II.10}$$

Avec

$K = Eh/(1 - \nu^2)$ représente la rigidité de la membrane.

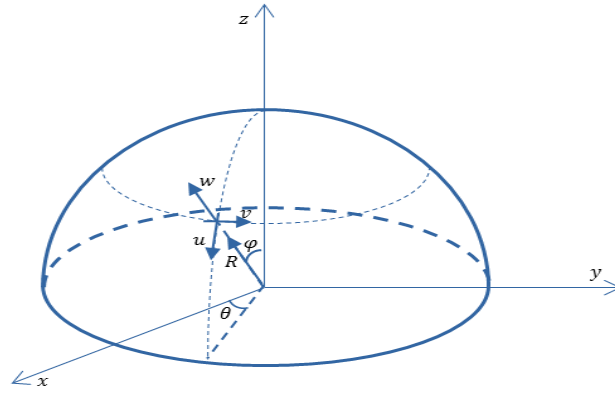


Figure II.3 : Coordonnées du système.

Les composants de l'énergie de déformation de flexion sont : $U_{B\varphi}$ la méridienne, $U_{B\theta}$ la circonférentielle et $U_{B\varphi\theta}$ qui représente la torsion, sont définies par :

$$U_{B\varphi} = \frac{1}{2} \iint M_\varphi \chi_\varphi R^2 \sin \varphi \, d\theta \, d\varphi \quad \text{II.11}$$

$$U_{B\theta} = \frac{1}{2} \iint M_\theta \chi_\theta R^2 \sin \varphi \, d\theta \, d\varphi \quad \text{II.12}$$

$$U_{B\varphi\theta} = \frac{1}{2} \iint M_{\varphi\theta} \chi_{\varphi\theta} R^2 \sin \varphi \, d\theta \, d\varphi \quad \text{II.13}$$

Avec M représente le moment de flexion par unité de longueur de et χ est la déformation de flexion.

$$M_\varphi = D(\chi_\varphi + \nu \chi_\theta) \quad \text{II.14}$$

$$M_\theta = D(\chi_\theta + \nu \chi_\varphi) \quad \text{II.15}$$

$$M_{\varphi\theta} = D(1 - \nu)\chi_{\varphi\theta} \quad \text{II.16}$$

Où $D = Kh^2/12$ est la rigidité de flexion.

Les différentes relations qui lient les déformations et les déplacements sont données par :

$$\varepsilon_{\varphi} = \frac{1}{R} \left(\frac{\partial u}{\partial \varphi} + w \right) \quad \text{II.17}$$

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{1}{R} \left(u \cot \varphi + \frac{1}{\sin \varphi} \frac{\partial v}{\partial \theta} + w \right) \quad \text{II.18}$$

$$\varepsilon_{\varphi\theta} = \frac{1}{2R} \left(\frac{\partial v}{\partial \varphi} - v \cot \varphi + \frac{1}{\sin \varphi} \frac{\partial u}{\partial \theta} \right) \quad \text{II.19}$$

$$\chi_{\varphi} = \frac{1}{R^2} \left(\frac{\partial u}{\partial \varphi} - \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2} \right) \quad \text{II.20}$$

$$\chi_{\theta} = \frac{1}{R^2} \left(\frac{1}{\sin \varphi} \frac{\partial v}{\partial \theta} - \frac{1}{\sin^2 \varphi} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} + u \cot \varphi - \cot \varphi \frac{\partial w}{\partial \varphi} \right) \quad \text{II.21}$$

$$\chi_{\varphi\theta} = \frac{1}{2R^2} \left(\frac{\partial v}{\partial \varphi} - v \cot \varphi - \frac{2}{\sin \varphi} \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi \partial \theta} + \frac{2 \cos \varphi}{\sin^2 \varphi} \frac{\partial w}{\partial \theta} + \frac{1}{\sin \varphi} \frac{\partial u}{\partial \theta} \right) \quad \text{II.22}$$

Après diverses substitutions, les équations régissant les déformations sans torsion à symétrie axiale d'une coque sphérique peuvent être obtenues à partir des équations différentielles résultantes des travaux de **(Soedel Werner [24])**. D'où:

$$\frac{\partial(N_{\varphi} \sin \varphi)}{\partial \varphi} + \frac{\partial N_{\varphi\theta}}{\partial \theta} - N_{\theta} \cos \varphi + Q_{\varphi 3} \sin \varphi + a q_{\varphi} \sin \varphi = a \sin \varphi \rho h \frac{\partial^2 u_{\varphi}}{\partial t^2} \quad \text{I.23}$$

$$\frac{\partial(N_{\varphi\theta} \sin \varphi)}{\partial \varphi} + \frac{\partial N_{\theta}}{\partial \theta} + N_{\varphi\theta} \cos \varphi + Q_{\theta 3} \sin \varphi + a q_{\theta} \sin \varphi = a \sin \varphi \rho h \frac{\partial^2 u_{\theta}}{\partial t^2} \quad \text{II.24}$$

$$\frac{\partial(Q_{\varphi 3} \sin \varphi)}{\partial \varphi} + \frac{\partial Q_{\theta 3}}{\partial \theta} - (N_{\varphi} + N_{\theta}) \sin \varphi + a q_3 \sin \varphi = a \sin \varphi \rho h \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} \quad \text{II.25}$$

Avec $Q_{\varphi 3}$ et $Q_{\theta 3}$ représentent les contraintes de cisaillement transversales et sont données par :

$$Q_{\varphi 3} = \frac{1}{a \sin \varphi} \left[\frac{\partial(M_{\varphi\varphi} \sin \varphi)}{\partial \varphi} + \frac{\partial M_{\theta\varphi}}{\partial \theta} + M_{\theta\theta} \cos \varphi \right] \quad \text{II.26}$$

$$Q_{\theta 3} = \frac{1}{a \sin \varphi} \left[\frac{\partial (M_{\varphi \theta} \sin \varphi)}{\partial \varphi} + \frac{\partial M_{\theta}}{\partial \theta} + M_{\varphi \theta} \cos \varphi \right] \quad \text{II.27}$$

Ces équations sont connues par les équations de LOVE avec lesquelles **Werner Soedel [24]** a exprimé le mouvement de la structure (déflexion statique) indépendamment de la nature ou type de contraintes exercées sur la surface.

Par contre, une simplification sur les composantes liées aux flexions de cisaillement et l'inertie de rotation a été prise en considération du fait que cette étude vise en premier lieu le mode de résonance « fondamentale » axisymétrique.

II.5.1.2. Comportement vibratoire

Les travaux de **Lamb [25]** et ensuite **Baker [26]** montrent que les modes vibratoires axisymétriques d'une coque sphérique mince sont exprimés en fonction d'un polynôme de Legendre d'ordre deux d'indice « n ». Pour chaque valeur de $n \geq 2$, deux différentes fréquences de vibrations existent correspondant à deux modes de vibrations, nommés branche supérieure et branche inférieure. La branche inférieure se rapproche d'une valeur asymptotique pour une valeur de " n " élevée, ce qui semble physiquement dénué car les intervalles entre les fréquences naturelles deviennent de plus en plus petits. Pour $n = 0$ il y a qu'une seule racine réelle, qui représente le mode fondamental ou ce qu'on nomme le mode « respiratoire ».

Dans le même contexte, **Kalnins [27]** a également examiné les modes de vibration d'une sphère complète, mais en prenant en compte les effets de flexion. Il a constaté l'existence de deux ensembles de fréquences qu'il a nommé branche de flexion et branche de membrane. Pour distinguer ces familles de modes, il s'est basé sur la comparaison des énergies de déformation due à la flexion et à l'extension de chaque mode (les modes possédant une énergie de flexion importante sont appelés modes de flexion alors que les autres sont appelés modes de membrane). Dans ses travaux, **Kalnins [27]** a observé que sa branche supérieure était identique à celle de **Baker [26]**. Par contre, il a remarqué des différences dans la forme de la branche inférieure. Il a pu montrer que la branche inférieure prédites par la théorie de la membrane de **Baker [26]** est un ensemble de modes de flexion dégénérés. Ces résultats sont en accord avec ceux issus, par éléments finis, des travaux de

Duffey et Romero [28] et **Duffey et all [29]** et qui confirme l'existence des deux branches fréquentielles.

A noter qu'auparavant, les travaux de **Wilkinson [30]** ont mis en évidence l'existence d'une troisième branche située en plus haute fréquence et ceci en tenant compte dans son modèle les effets de cisaillement et l'inertie de rotation.

Partant de la théorie de **Wilkinson [30]**, la recherche du mode régissant la vibration axisymétrique sphéroïdale (sans torsion), nous a conduit à une équation cubique en λ^2 de paramètre de fréquence λ_n , avec n un nombre entier :

$$\alpha\lambda^6 - \beta\lambda^4 + \delta\lambda^2 - \gamma = 0 \quad \text{II.28}$$

Où

$$\alpha = 2k_s k_1 (k_r k_1 - c_r c_1) / (1 - \nu)$$

$$\beta = (k_r k_1 - c_r c_1) [r + 4k_s (1 + \nu) / (1 - \nu)] + k_1 [\xi (k_1 + c_1) + c_r + k_r + 2k_s (k_1 + k_r) (r / (1 - \nu) - 1)]$$

$$\delta = (\xi c_1 + c_r) (1 + \nu) (2 - r) + k_r [r (r - 3 - \nu) + 2(1 + \nu) ((r - 2)k_s + 1)] + k_1 [2k_s r (r + 4\nu) / (1 - \nu) + r (r + \xi + \nu) + (1 + 3\nu) (\xi - 2k_s) - (1 - \nu)]$$

Et

$$\gamma = (r - 2) [r (r - 2) + 2k_s (1 + \nu) (r - 1 + \nu) + (1 - \nu^2) (\xi + 1)]$$

Avec

$$k = h^2 / 12R^2$$

$$\xi = 1/k$$

$$k_1 = 1 + k ; k_r = 1 + 1.8 k$$

$$c_1 = 2k ; c_r = 2$$

$$k_s \approx 1.2$$

$$r = i(i + 1)$$

Et h l'épaisseur de la sphère.

La relation entre le paramètre de fréquence λ_n et la fréquence de vibration f_n correspondant à chaque mode de vibration est donnée par la relation suivante :

$$\lambda_n^2 = \omega^2 \rho R^2 \frac{(1-\nu^2)}{E} \quad \text{II.29}$$

D'où les fréquences de vibration d'une coque sphérique complète sont données par:

$$f_n = \frac{\lambda_n}{2\pi R} \left[\frac{E}{\rho(1-\nu^2)} \right]^{1/2} \quad \text{II.30}$$

Où R représente le rayon moyen de la sphère, ρ sa densité, E le module d'élasticité, ν le coefficient de Poisson, λ_n paramètre de fréquence (dépend de la théorie utilisée) et n représente le numéro de mode de vibration de la sphère.

II.5.3. Approche numériques des différents modes de résonance d'une sphère

Pour identifier les modes de résonance de notre capteur, nous avons procédé à un calcul numérique de différentes fréquences de vibration de la coque en utilisant le logiciel **MATLAB** et pour valider ces résultats et visualiser les champs de déplacements correspondants, une simulation numérique par éléments finis, sous le logiciel **ANSYS** a été faite.

II.5.3.1. Application des méthodes numériques à l'étude du capteur proposé :

Sur la base des travaux de **Wilkinson [30]**, les valeurs propres des fréquences correspondantes à 10 modes de résonances sont présentées sur la figure suivante (figure (II.4)). Ceci pour une sphère de rayon moyen ($R=11.3$ mm), d'épaisseur ($h=2.6$ mm), de module d'élasticité ($E=3300$ MPa), de coefficient de poisson ($\nu=0.39$) et d'une densité volumique ($\rho = 1190$ Kg/m³).

La figure II.4 montre deux différentes branches. **McIvor et Sonstegard [31]** ont constaté que les modes de vibration associés à la branche supérieure sont des modes de

membrane, tandis que les modes associés à celle inférieure changent de modes de membrane à des modes de flexion (**Q. Dong, Q.M. Li, J.Y. Zheng [32]**).

Le mode de corps rigide (à fréquence nulle) est associé à la branche inférieure. On note aussi que le mode fondamental est le premier mode sur la branche supérieure ($n = 0$) (**Duffey et all [29]**).

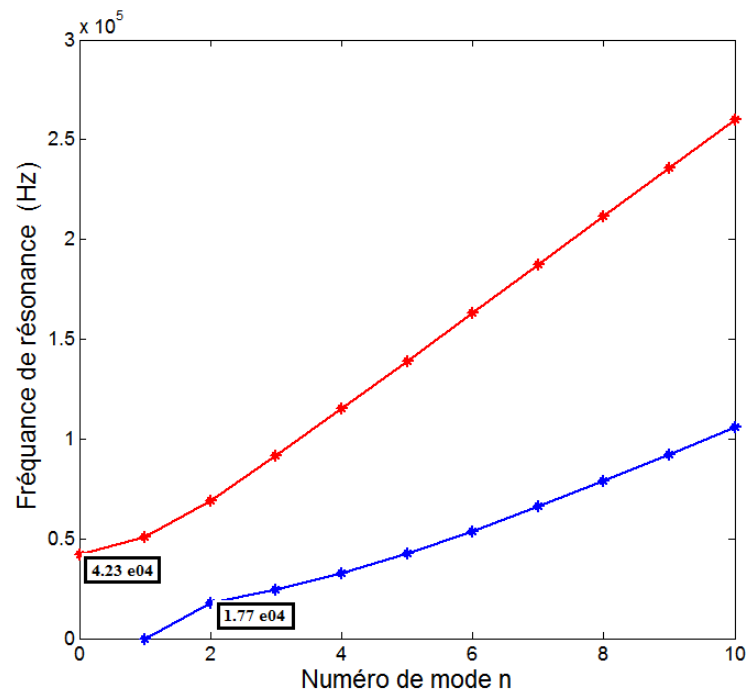


Figure II.4 : Fréquences de résonance des dix premiers modes de vibration d'une coquille sphérique calculées par Matlab.

A titre d'illustration, quelques une des formes modales de notre capteur sont présentées sur la figure II.5. Ces formes modales, ainsi que les fréquences associées, ont été calculée par élément finis 3D sous **ANSYS**.

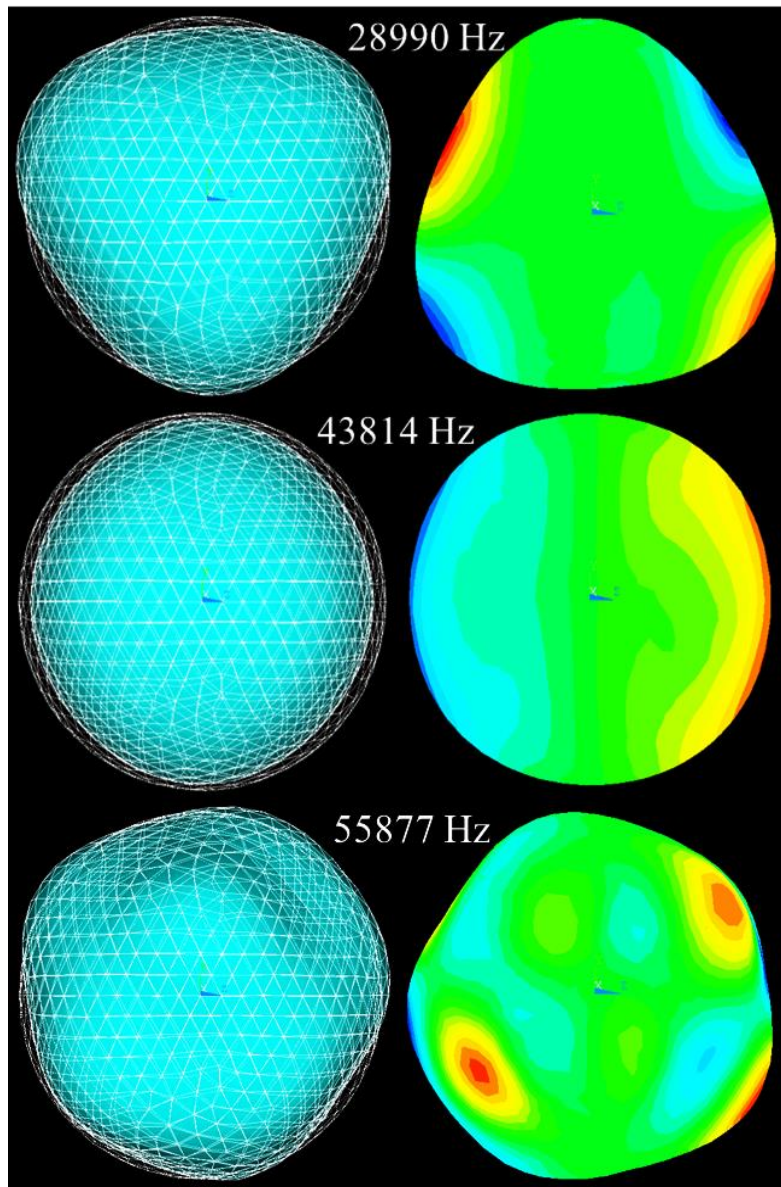


Figure II.5 : Modes vibratoires du résonateur sphérique obtenus numériquement par éléments finis.

II.5.4. Approche expérimentale :

Dans cette partie, nous détaillons les étapes de fabrication du capteur proposé. Des mesures d'impédance électrique sont ensuite effectuées afin de déterminer la fréquence de résonance électrique du capteur dans l'air et dans un milieu réel (eau comme référence).

II.5.4.1. Réalisation du capteur proposé :

La conception du capteur a été effectuée au sein de notre équipe au laboratoire IEMN/DOAE de l'université de Valenciennes. Il s'agit de l'assemblage de deux demi-sphères creuses tenant en sandwich un anneau piézoélectrique. La géométrie adoptée du capteur nous a permis d'intégrer le module électronique dans la partie creuse de la structure et rendant ainsi cette dernière comme un capteur résonateur acoustique miniaturisé et autonome.

Dans la suite, nous avons adopté un capteur ayant les caractéristiques suivantes :

- ✓ Deux demi-sphères (plexiglas) : $R_{\text{ext}} = 12.6 \text{ mm}$, $R_{\text{int}} = 10 \text{ mm}$, $E = 3300 \text{ MPa}$, $\nu = 0.39$, $\rho = 1190 \text{ kg/m}^3$.
- ✓ Disque (Titanate Zirconium de Plomb (PZT)): $R_{\text{ext}} = 12.6 \text{ mm}$, $R_{\text{int}} = 10 \text{ mm}$, $E_p = 0.5 \text{ mm}$, $E = 43.5 \text{ GPa}$, $\nu = 0.39$, $\rho = 7700 \text{ kg/m}^3$.

La résonance du capteur dans son intégralité est étudiée en observant la variation de la phase de l'impédance électrique du capteur en fonction de la fréquence à l'aide d'un analyseur d'impédance (Wayne Kerr 6520).

Deux cas sont considérés : le résonateur sphérique est placé à l'air libre et ensuite placé dans un environnement réel modifiant ainsi les conditions des charges sur la paroi.

Cette expérience nous a permis d'obtenir les courbes de variation de phase de l'impédance électrique en fonction de la fréquence représentées sur la figure II.6. La plage de fréquence choisie (25 KHz – 65 KHz), nous montre dans les deux cas considérés, trois modes de résonance bien distincts entre eux et qui sont en bonne concordance avec les résultats issus de l'approche numérique ainsi réalisée précédemment.

Les valeurs des fréquences trouvées dans les deux cas sont présentées dans le tableau suivant :

	fr 1	fr 2	fr 3
Fréquence (kHz)	35 ± 01	45 ± 0.5	53

A noter que l'incertitude sur la valeur de la fréquence est liée à la nature du fluide dans lequel le capteur est baigné.

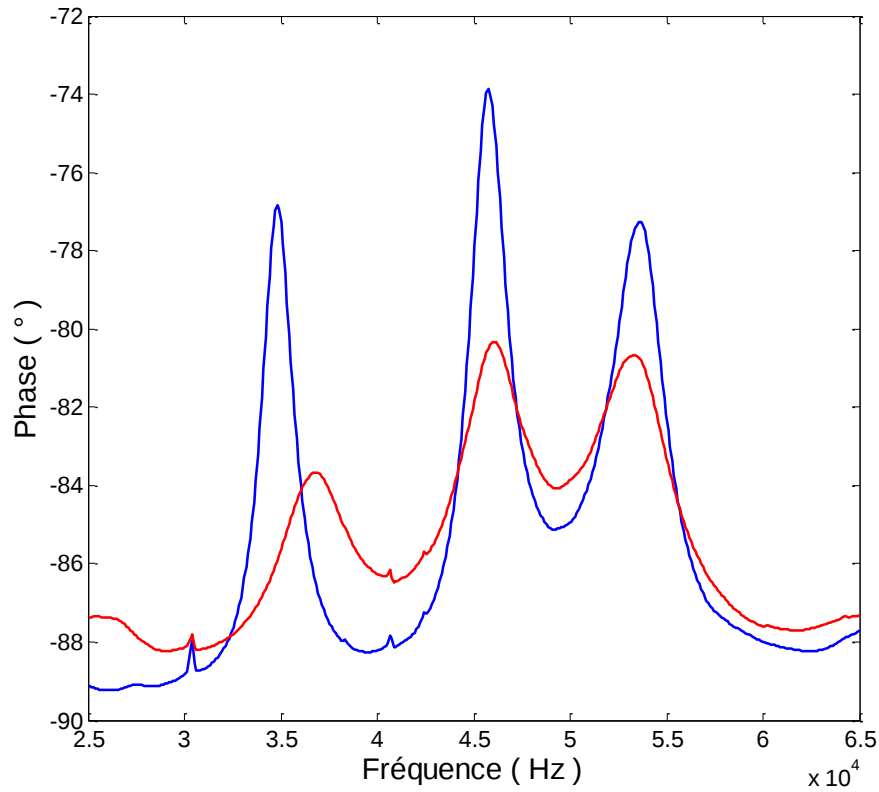


Figure II.6 : Représentation fréquentielle des phases des impédances électriques du capteur obtenues dans l'air (courbe bleu) et dans l'eau (courbe rouge).

La mise sous contrainte du capteur fait apparaître une modification déséquilibrée d'amplitudes des modes et la disparition de deux modes de résonance (figure II.7). D'après les résultats obtenus, nous remarquons que la 2^{ème} fréquence mesurée par l'analyseur d'impédance correspond approximativement à la fréquence du mode fondamental du capteur calculé théoriquement et par éléments finis. Ce qui mène à affirmer que ce mode est associé à la résonance axisymétrique fondamentale, tandis que les deux autres ont une composante de flexion non négligeable.

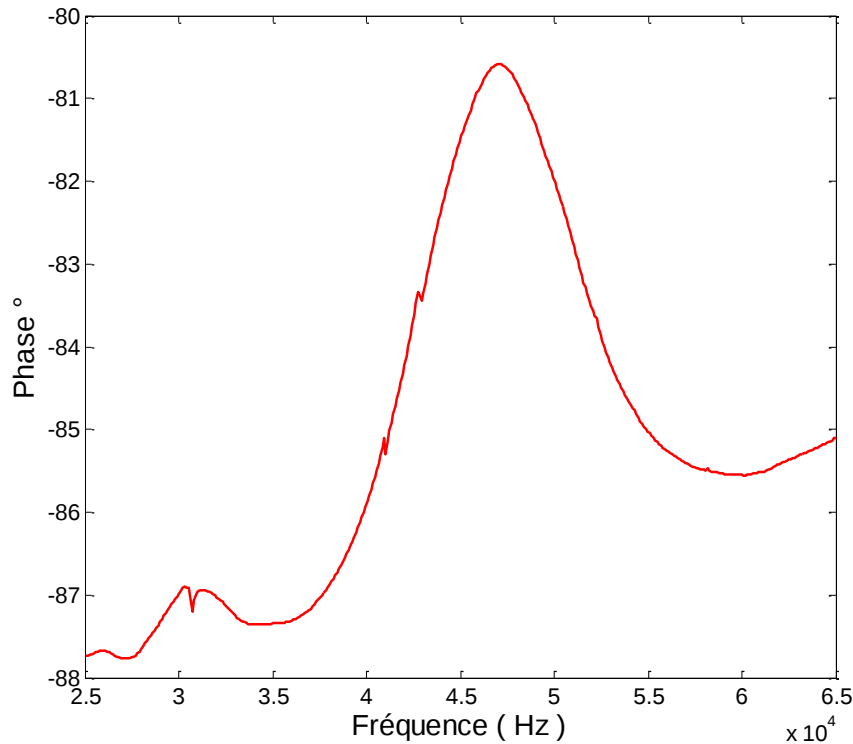


Figure II.7 : Variation de l'impédance électrique du capteur sphérique, mis sous une action externe, en fonction de la fréquence.

II.6. Conclusion :

Dans cette partie du travail, nous avons donné un bref historique sur les applications utilisant le concept de mesures et d'analyses par la résonance d'une structure de forme sphérique.

Selon la contrainte et le choix de notre application, une description détaillée du résonateur proposé; son comportement mécanique vibratoire a fait l'objet d'une approche numérique consolidée avec des résultats issus de modèle « éléments finis ».

La réalisation physique du capteur nous a conduits à un élément vibratoire autonome. L'analyse électrique (impédance et phase) de la structure globale montre une très bonne concordance avec les résultats trouvés à la fois avec les deux approches numérique et analytique.

Chapitre III

Electronique embarquée : Module de contrôle et de gestion des ressources du capteur

III.1. Introduction

Parmi les faiblesses actuelles des techniques ultrasonores utilisées dans l'industrie on peut citer la difficulté de contrôler continûment et rapidement le processus de transformation des produits industriels dans les domaines notamment agroalimentaire, pharmaceutique...etc. Ces transformations sont des phénomènes complexes et passent par de nombreuses phases intermédiaires sensibles aux propriétés physiques et chimiques des produits de base.

Afin de remédier à cette contrainte, nous proposons un capteur de caractérisation en temps réel d'un milieu en cours de transformation. La forme sphérique creuse de notre capteur nous a permis d'embarquer une électronique programmable dans sa partie creuse.

Le but principal de cette électronique est sa capacité d'assurer en même temps l'excitation à la résonance de la structure, le contrôle de l'émission et de la réception et des algorithmes de codage, le traitement du signal, la gestion de l'énergie et le protocole de stockage de données.

Au cours de ce chapitre, nous commençons par le principe de fonctionnement de chaque élément constituant l'électronique embarquée, ensuite nous présentons la méthode de réalisation du capteur avec quelques résultats destinés à vérifier le bon fonctionnement du dispositif. Finalement pour aboutir à notre objectif principal, l'autonomie du capteur, une étude sur sa consommation électrique pendant les différentes phases de fonctionnement sera présentée.

III.2. Descriptif fonctionnel de l'électronique

L'électronique embarquée dans le dispositif est schématisée sur la figure III.1. Elle est intégrée dans un système sur puce (SoC, partie encadrée). Elle comprend une unité centrale (CPU), un oscillateur numérique (DCO), un ordonnanceur de tâches (IT), un générateur ultrasonore codé (PWMG), une unité de gestion d'énergie (PMU), un amplificateur de sortie (OB) et une batterie (Bat).

L'oscillateur numérique (DCO) produit trois sources d'horloge. Une horloge basse fréquence (TB) à 6 kHz permet de produire une base de temps stable pour l'ordonnanceur de

taches (IT). Une horloge haute fréquence (MCLK) à 16 MHz permet le cadencement de l'unité centrale (CPU) et une horloge moyenne fréquence (USCLK) à 60 kHz correspondant à la fréquence porteuse des vibrations émises par la capsule.

A intervalles régulier (1,5 s), l'ordonnanceur de taches (IT) génère un signal d'interruption (INT) à l'unité centrale (CPU) laquelle produit une trame de 4 bits (CP). Cette trame de bits constitue à la fois le signal d'interrogation du milieu et l'identifiant du dispositif. Cette trame est modulée en tout ou rien par le générateur de modulation de largeur (PWMG) sur la base de la fréquence porteuse (USCLK). Un 0 logique correspond à une largeur de 1ms alors qu'un 1 logique correspond à une largeur de 2 ms. Chaque bit de la trame est espacé d'un silence d'une durée de 7 ms environ. Ces impulsions codées sont amplifiées par l'étage de sortie (OB) avant d'être appliquées à l'élément piézo-électrique. L'ensemble est alimenté par une batterie (Bat) de 3 V. Une unité de gestion d'énergie (PMU) assure une alimentation parcimonieuse des différents éléments de la chaîne afin de garantir une consommation minimale du dispositif et par la même une durée de vie maximale de la batterie.

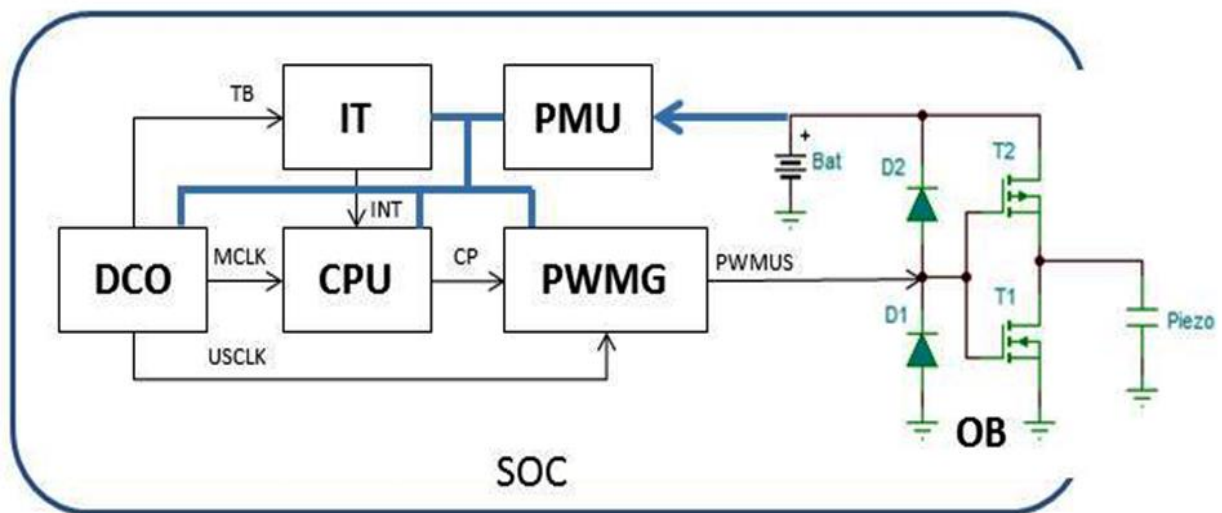


Figure III.1 : Schéma fonctionnel du dispositif embarqué dans la capsule ultrasonore.

III.3. Réalisation et expérimentation

III.3.1. Aspects technologiques

Le dispositif a été réalisé à partir d'un SoC de la famille des MSP430 de chez Texas Instruments. Le choix s'est porté sur le modèle MSP430F2012 pour sa faible taille et ses ressources matérielles minimales. La figure III.2 présente l'architecture interne de ce SoC. L'architecture modulaire de ce composant à laquelle s'ajoutent des mécanismes de gestion poussée de l'alimentation permet de concevoir des systèmes très basse consommation conférant à la capsule une très grande autonomie sur batteries de petites capacités. De plus, le développement logiciel peut se faire à moindre coût à partir d'un émulateur/debugger sur simple clé USB (ez430- FET debugger, Texas Instruments).

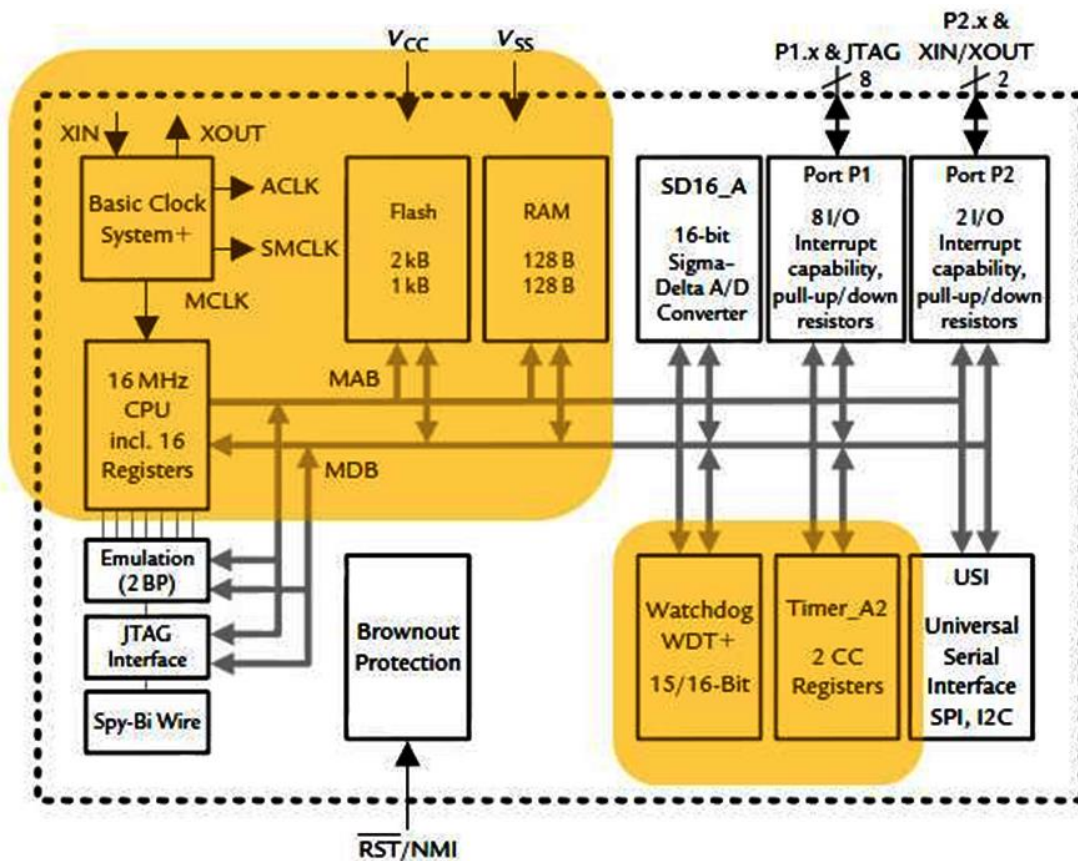


Figure III.2 : Architecture modulaire du SoC (MSP430F2012) utilisé (Doc. Texas Instruments).

Hormis la CPU, trois modules périphériques internes ont été mis à contribution pour réaliser les fonctionnalités décrites précédemment. Les fonctionnalités utilisées dans cette application sont colorées sur la figure III.2. Le schéma de la figure III.3 montre l'architecture matérielle déployée à cet effet. Un module horloge (BCS+) permet de réaliser, à l'aide d'un oscillateur numérique à accumulation de phase, une horloge principale (MCLK : Main Clock) pour la CPU et une horloge secondaire (SMCLK : Sub Main Clock) pour les modules périphériques, ces deux horloges qui peuvent être de fréquences différentes sont, dans notre cas cadencées toutes deux à 16 MHz. De plus, ce module permet de générer une base de temps (ACLK : Auxiliary Clock) cadencée à 6 kHz pour l'ordonnanceur de tâches. Cette horloge est réalisée sur la base d'un oscillateur RC interne très basse consommation ce qui lui permet de fonctionner avec parcimonie même pendant les périodes de veille du système. L'ordonnanceur de tâche IT est réalisé par un logiciel déclenché par interruption à intervalle régulier. Cette interruption est réalisée à l'aide d'une utilisation détournée du chien de garde (Watchdog Timer WDT+) que l'on programme en « interval timer ». Ce timer, principalement constitué d'un compteur 16 bits, est cadencé à 6 kHz par ACLK et remis à zéro après division par 8192, soit une fréquence de sortie de 0,7 Hz et donc une impulsion d'interruption se répétant à la cadence de 1,5 sec environ (ITIRQ : Interval Timer Interrupt ReQuest).

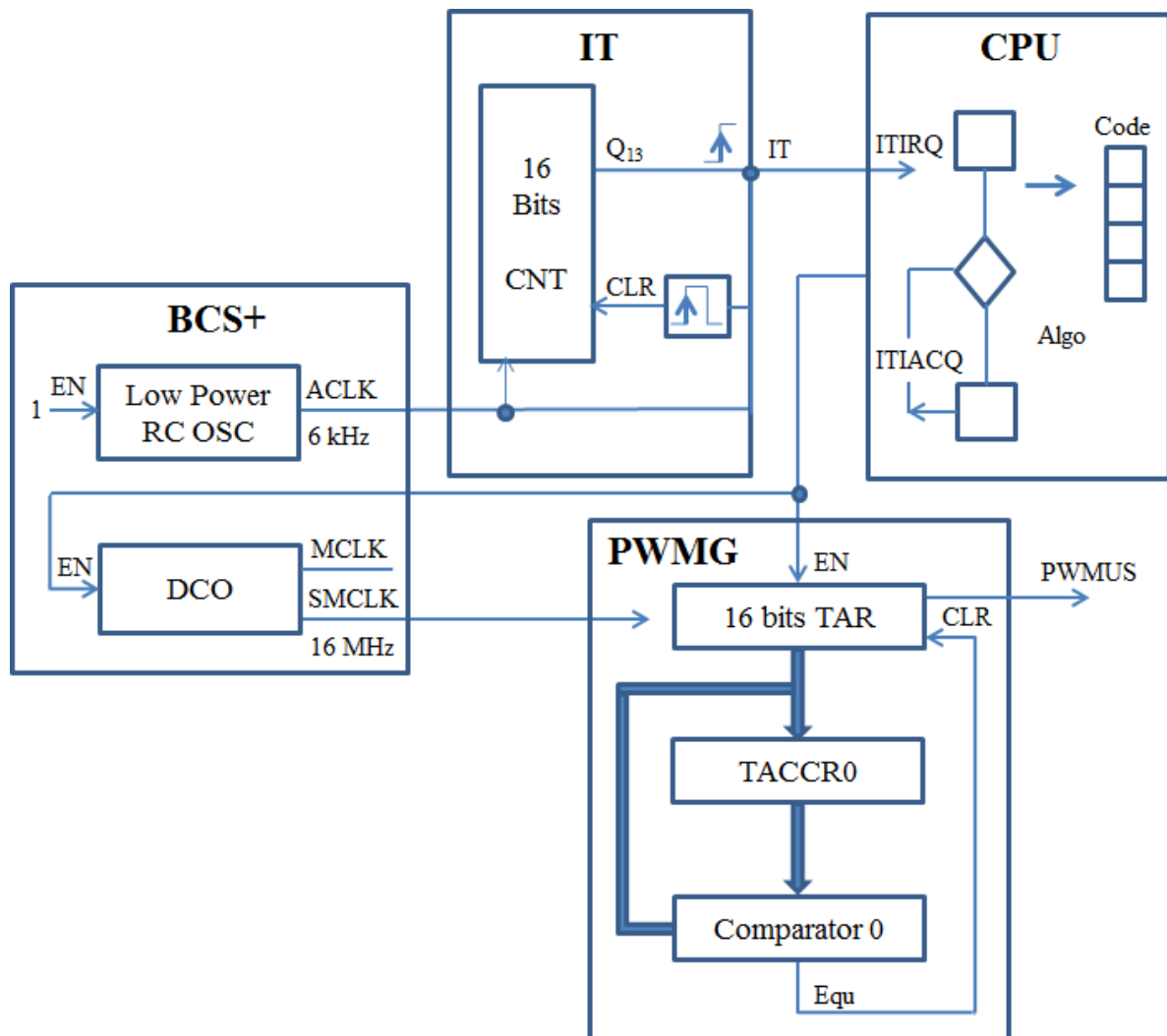


Figure III.3 : Architecture déployée de l'application.

Le système est régi par 6 modes de fonctionnement qui conditionnent grandement la consommation du système. Le mode de base, appelé « actif » et noté AM (active mode) est un mode de fonctionnement normal dans lequel l'ensemble des fonctionnalités sont opérationnelles. Dans ce mode, la consommation du SoC est maximale. A cela s'ajoute, cinq modes dit de « basse consommation » (low power mode) et notés de LPM0 à LPM4. Chacun de ces modes correspond à une mise en veille plus ou moins profonde des fonctionnalités du système. La figure III.4 présente le diagramme d'activation des différents modes ainsi que les fonctions activées ou désactivées correspondantes.

La routine d'interruption du chien de garde appelée par ITIRQ permet la génération des trames de bits ultrasonores à la cadence de 1,5 sec. En dehors de cette période d'activité

pendant laquelle le SoC est placé en mode « mode actif » (AM), le système est en sommeil et placé en mode LPM3. Dans ce mode, seul le chien de garde WDT+ et son horloge basse consommation ACLK sont actives et la consommation est extrêmement réduite.

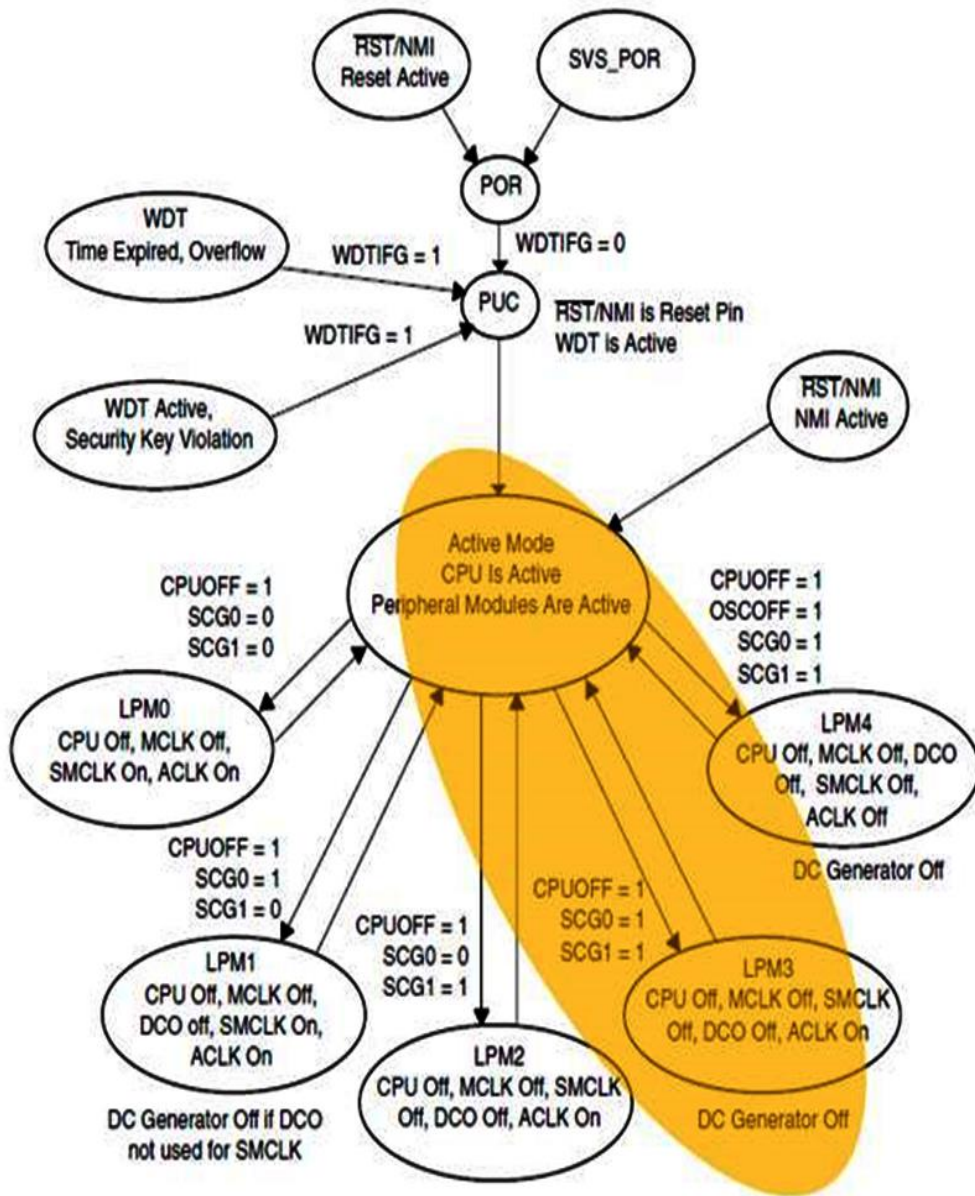


Figure III.4 : Modes de fonctionnement du F2012 (Doc. Texas Instruments).

Les consommations liées aux différents modes de fonctionnement sont montrés sur la figure III.5.

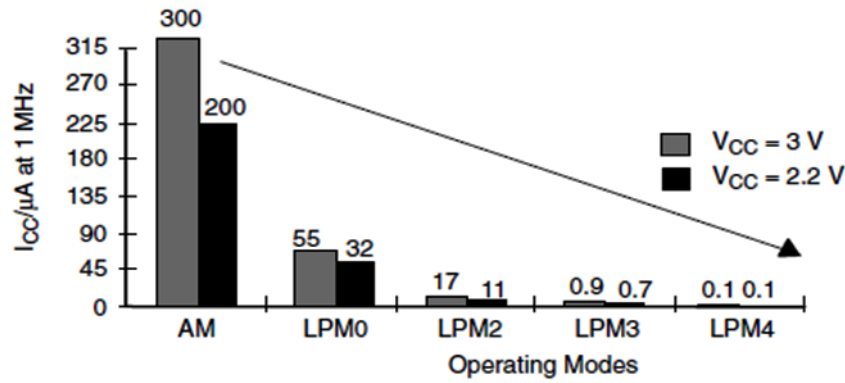


Figure III.5 : Consommations par modes du F2012 (Doc. Texas Instruments).

Un deuxième timer (Timer_A2) est utilisé pour la génération de la porteuse ultrasonore. Il est organisé autour d'un compteur 16 bits (TAR) cadencé à 16 MHz par l'horloge SMCLK. Un registre comparateur (TACCR0) est chargé avec une valeur représentant la fréquence du signal désiré. Lorsque le compteur TAR atteint la valeur TACCR0, le registre TAR est remis à zéro et un cycle recommence. Cette remise à zéro provoque un changement d'état de la sortie du timer (PWMUS) d'où une fréquence moitié de celle programmée dans le registre de comparaison TACCR0 (figure III.6). La relation entre la fréquence ultrasonore générée et le contenu de ce registre est donc :

$$F_{PWMUS} = \frac{F_{SMCLK}}{2 \cdot TACCR0}$$

Soit avec $F_{SMCLK} = 16 \text{ MHz}$ et un registre TACCR0 de 16 bits (TACCR0=1 à 65536), une fréquence F_{PWMUS} programmable de 122 Hz à 8MHz.

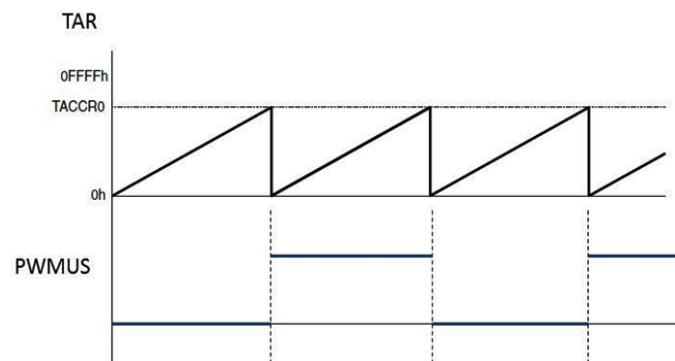


Figure III.6 : Mode de fonctionnement du timer utilisé pour la génération PWMUS.

Un fois configuré, ce timer est activé et désactivé par la routine d'interruption ITIRQ selon une séquence de 4bits définie dans une table représentant l'identifiant de système. Selon la valeur du bit lu, le timer est activé pendant 1 ms (0) ou 2 ms (1). Chaque bit est séparé d'un espace de 7 ms. Une fois la table entièrement parcourue, le pointeur de table est réinitialisé et le processeur est remis en vielle (LPM3) jusqu'à la prochaine interruption ITIRQ.

La figure III.7 montre l'organigramme de cette procédure. Remarquons qu'elle pourrait être réalisée de façon matérielle à condition de disposer d'un timer supplémentaire. Malheureusement, le modèle de SoC utilisé ne le permet pas et une prise en charge logicielle a été nécessaire. Cela impose d'avoir la CPU active pendant l'ensemble de la trame entraînant un surcout de consommation.

Elle a été entièrement intégrée dans la routine d'interruption vu le caractère non critique de la durée d'exécution de celle-ci : au maximum $4 \times 2 \text{ ms} + 3 \times 7 \text{ ms} = 29 \text{ ms}$ sur une durée totale de 1,5 sec.

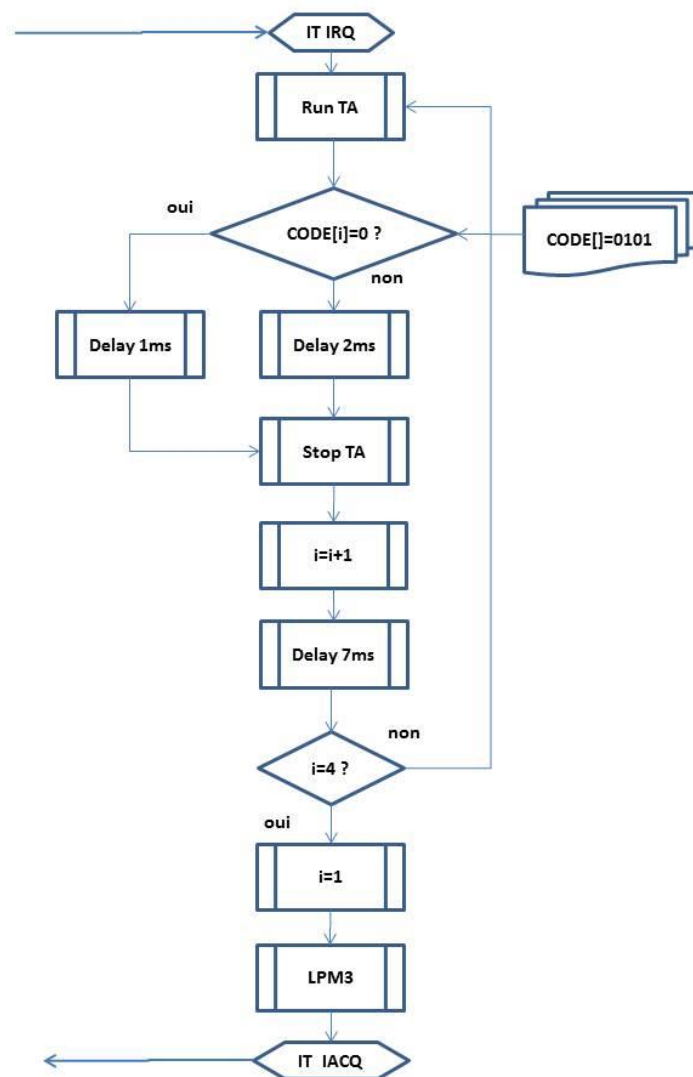


Figure III.7 : Organigramme de génération du signal PWMUS par interruption ITIRQ (Code d'identification du système : 5).

La puce F2012 a été collée sur un morceau de plaque d'essai taillé pour entrer dans la cavité sphérique du capteur (figure III.8). Les connections électriques ont été réalisées à l'aide de simple fils à wrapper. Les deux batteries de 1,5 V (modèle SR621SW) câblées en série ont été placées sous le circuit.

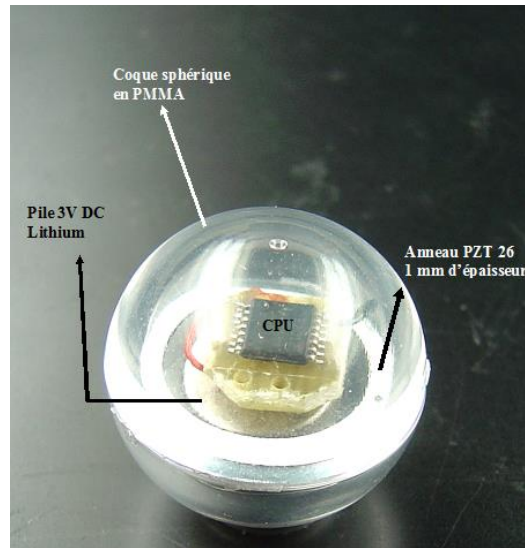


Figure III.8 : Réalisation technologique d'un capteur sphérique.

III.3.2. Exemple de signaux codés

Afin de vérifier le bon fonctionnement de la carte électronique, un réseau de capteurs a été réalisé (Figures. III.9-III.10). Ce système est constitué de deux capteurs émettant deux codes binaires différents et plusieurs récepteurs.

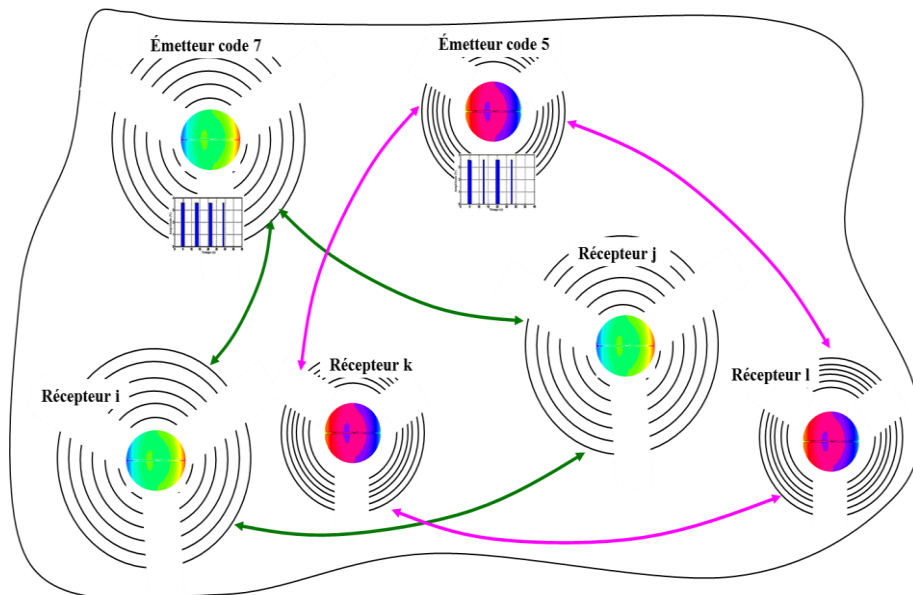


Figure III.9 : Illustration d'un système de deux réseaux de capteurs pour identification par codage.

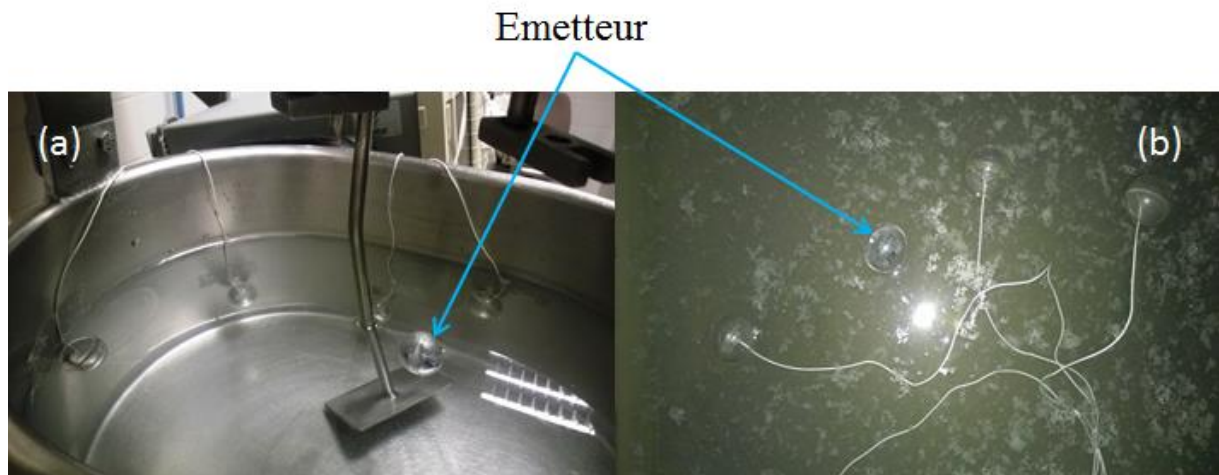


Figure III.10 : Principe standard du système de mesure (a- dynamique, b- statique).

Les deux capsules émettrices ont été réalisées et testées. L'une émettant un code 5 (5=1 0 1 0 en binaire) et l'autre un code 7 (7=1 1 1 0 en binaire). La durée d'une trame est d'environ 15 ms. Les trames sont répétées toutes les 1,5 s. La fréquence porteuse est de 42 kHz.

La figure III.11 présente l'état du capteur émetteur au repos et pendant l'émission.

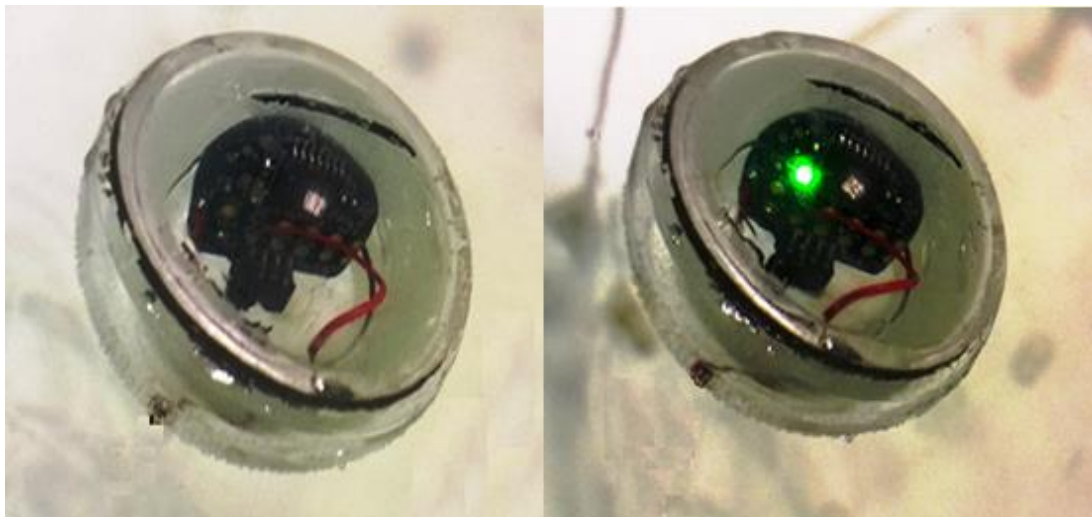


Figure III.11 : Etat du capteur émetteur au repos (à gauche) et pendant l'émission (à droite).

Un exemple de quelques réponses temporelles à la réception est présenté sur les deux figures suivantes (le grand paquet représente le 1 logique et le petit paquet représente le 0 logique) :

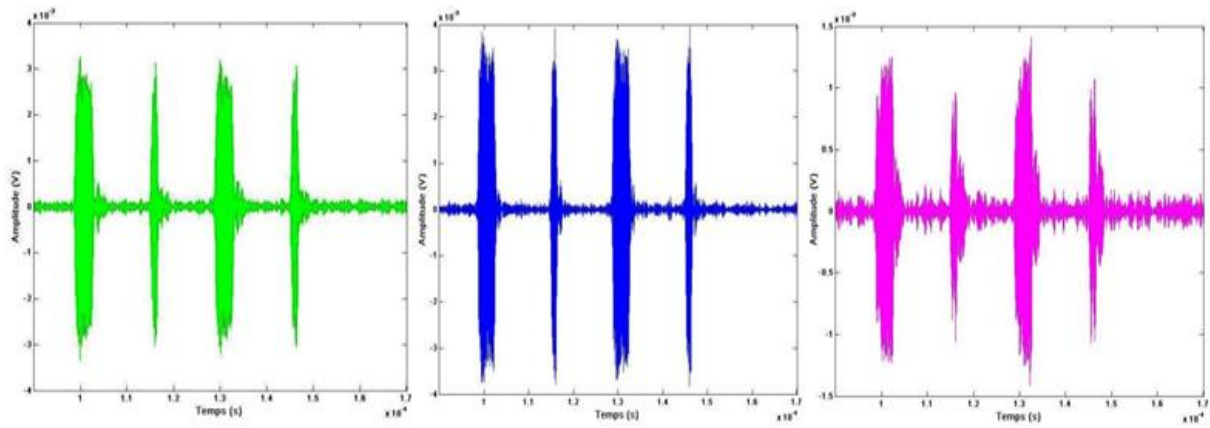


Figure III.12 : Signaux reçus après l'émission du code 5.

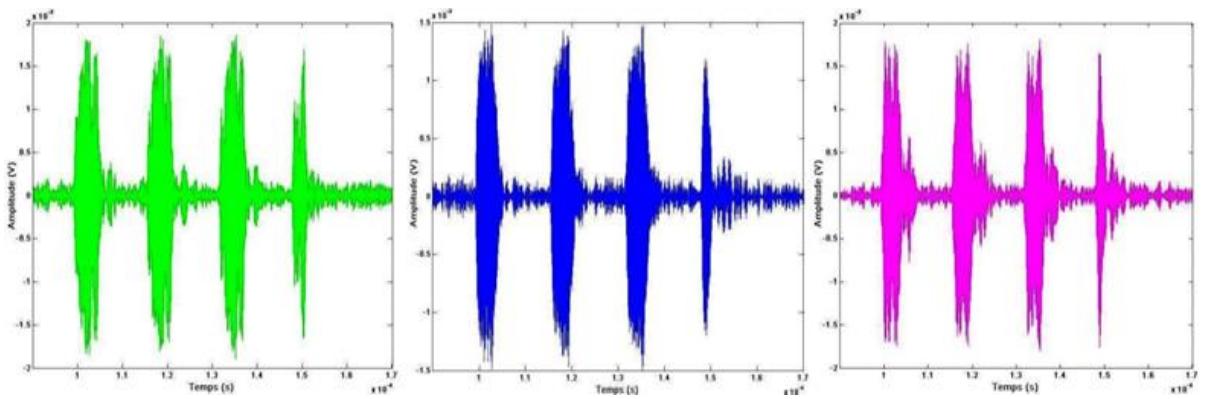


Figure III.13 : Signaux reçus après l'émission du code 7.

Un relevé des courants consommés par les deux capteurs codés avec leurs puissances absorbées pendant une trame de transmission ainsi que la réponse temporelle de chaque code à l'émission avec la tension de la batterie, est présenté sur les figures III.14-III.15 :

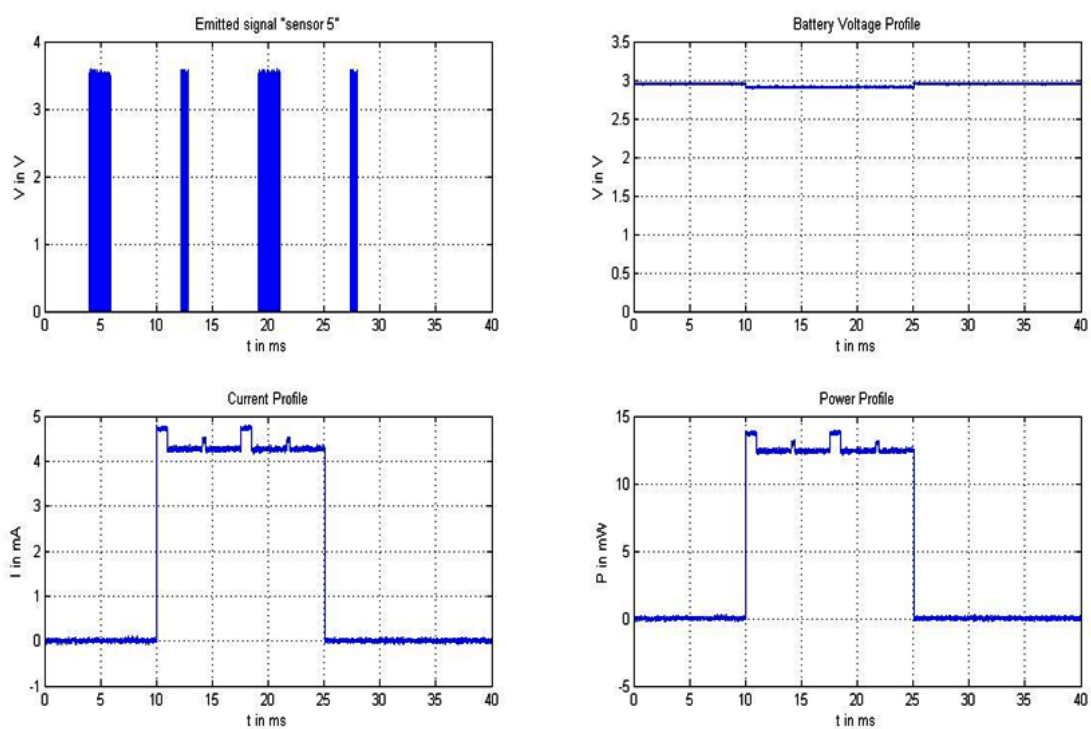


Figure III.14 : Capteur 5. Code émis, profil de courant consommé, tension batterie et puissance absorbée pendant une trame.

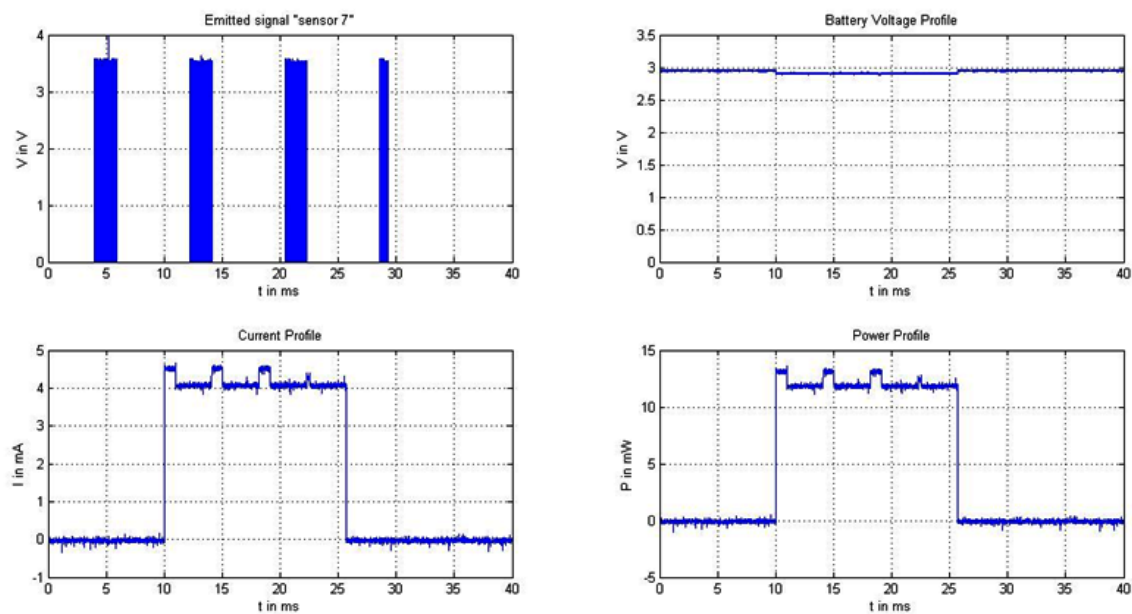


Figure III.15 : Capteur 7. Code émis, profil de courant consommé, tension batterie et puissance absorbée pendant une trame.

III.4. Consommation et autonomie

Un des buts recherchés étant de disposer d'un capteur destiné à être injecté dans un processus à surveiller (mélangeur, cuve,...), il doit posséder une grande autonomie de fonctionnement. Nous avons donc procédé à des mesures de consommation électrique pendant la phase active d'émission d'un code. Les relevés de courant consommé ont été obtenus à l'aide d'un shunt de 10Ω placé en série dans la batterie (graphe inférieur gauche des figures 9 et 10). La tension batterie (graphe supérieur droit des figures III.14 et III.15) ainsi que la tension aux bornes du shunt ont été mesurées à l'aide d'amplificateurs d'isolement différentiels. Les deux signaux ont été enregistrés sur un oscilloscope numérique qui a également assuré le calcul de la puissance instantanée consommée par le dispositif (graphe inférieur droit des figures III.14 et III.15).

En dehors de la trame de bits, la consommation est insignifiante hormis l'horloge basse fréquence TB et l'ordonnanceur de tâche IT. L'unité centrale, le générateur PWMG, l'amplificateur de sortie et les autres horloges sont à l'arrêt.

Pendant l'émission de la trame de bits, l'ensemble des éléments sont en fonctionnement et la consommation est maximale. Cette consommation est essentiellement due à l'unité centrale qui fonctionne même pendant les espaces entre bits puisque ces espaces sont gérés de façon logicielle. Une légère surconsommation apparaît lorsque le générateur PWMG est mis en marche lors de l'émission d'un 0 ou d'un 1, mais cette surconsommation est marginale.

Si l'on se réfère aux différents enregistrements, on s'aperçoit la consommation moyenne du système pendant une trame de bits est relativement indépendante du code émis et vaut :

$$I_{trame} \cong 4,5mA$$

Le courant moyen consommé sur une trame de durée $T_{trame}=15ms$ se répétant périodiquement toutes les $T=1,5s$ vaut donc :

$$I_{moy} = \frac{I_{trame} T_{trame}}{T} \cong \frac{4,5mA \times 15.10^{-3}}{1,5} = 0,045mA$$

Les batteries possédant une capacité $C = 20mA.h$, l'autonomie A du dispositif sera donc de :

$$A = \frac{C}{I_{moy}} = 444,4h \cong 18,5j$$

Pour améliorer cette autonomie, on peut envisager de gérer les espaces entre bits par le matériel. On peut penser à l'utilisation d'un timer ce qui nécessite l'emploi d'un autre type de SoC dans la famille des MSP430. Une autre possibilité pourrait être une gestion plus sophistiquée de l'ordonnanceur de tâches IT afin qu'il puisse désactiver l'unité centrale pendant ces espaces.

Dans ce cas, l'émission du code 15 (consommation maximale) produirait une consommation en courant moyenne entre deux trames de :

$$I_{moy} \cong \frac{4,8mA \times (4 \times 2ms)}{1,5s} \cong 0,026mA$$

Soit une autonomie de $A \cong 781,25h \cong 32,5j$.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'essentiel de l'électronique intégrée, nécessaire à gérer d'une manière optimale les ressources du capteur autonome proposé. L'unité centrale forme la partie principale. Elle est connectée à des composants intermédiaires pour assurer le bon fonctionnement du module global.

Après la définition du rôle de chaque élément constituant l'unité et sa place dans la configuration principale, la réalisation physique et la programmation du module nous a montré une flexibilité sur le choix des paramètres électriques attendus; alimentation, codage de reconnaissance et consommation.

La mise des capteurs dans une configuration « réseaux » et dans un environnement dédié (milieu évolutif, mélange dynamique, ...) fait l'objet du 4^{ème} chapitre. Cette partie abordera le comportement du capteur dans des conditions réelles d'utilisation.

Chapitre IV

Résonateur sphérique autonome miniaturisé : validation expérimentale

IV.1. Introduction

La caractérisation et le contrôle des milieux hétérogènes posent de nombreux problèmes techniques ; échantillonnages, statistiques, Une difficulté qui résulte du manque de méthodes fiables permettant le suivi précis en ligne de production des différentes étapes d'élaboration d'un produit espéré. Pour caractériser ces étapes, il est indispensable de comprendre le processus d'évolution de la matière et plus précisément, dans le cas qui nous intéresse, le processus d'homogénéisation.

Par ailleurs, rares sont les méthodes basées sur le principe vibratoire qui ont été exploitées, in-situ, dans l'étude du comportement mécanique dans ce milieu complexe. Cette complexité est principalement due à la nature même de la matière car le comportement des ondes mécaniques dans ces milieux dépend de plusieurs paramètres, entre autres:

- La forme géométrique des hétérogénéités.
- Leur nombre et leur concentration dans le milieu de base.
- Leurs dimensions par rapport à la longueur d'onde. Leurs caractéristiques acoustiques différentes par rapport à celles du milieu de base, comme par exemple la densité, la viscosité, l'élasticité, la vitesse...
- Leur arrangement spatial (réseau organisé ou aléatoire).
- Comportement cinétique des diffuseurs (en mouvement ou en repos).

Dans le but d'apporter un moyen de mesure allant au-delà de ces contraintes, nous nous sommes focalisés dans cette partie de l'étude à l'aspect métrologique des capteurs sphériques. Afin de valider le concept vibratoire ainsi que la réponse acoustique de ces capteurs, nous avons choisi de nous orienter vers des milieux modèles; diphasiques avec une interface (M_e/M_i) et des milieux ayant un certain taux d'hétérogénéités avec une répartition aléatoire au sein de la matrice principale.

Avec M_e , milieu eau et M_i milieu de nature chimique donné (huile, glucose, ...).

Deux parties seront présentées :

1. Une étude sur la stabilité et le comportement du capteur proposé dans différents milieux.

2. La validation expérimentale du système de positionnement acoustique de l'émetteur par trilatération 3D. Cette information permet d'envisager la mise en place d'un réseau formé des capteurs émetteurs bien identifiés dans l'espace.

IV.2. Interaction du capteur avec son environnement

Pour caractériser l'interaction du capteur sphérique proposé avec son environnement, et par conséquence étudier le comportement de la structure dans différents milieux, deux aspects ont été considérés : la stabilité et la sensibilité.

IV.2.1. La stabilité du capteur

Afin d'étudier la stabilité du capteur, nous avons effectué différentes mesures de la vitesse de propagation de l'onde acoustique dans l'eau à $(25 \pm 0.3) ^\circ\text{C}$ et ceci pour différentes positions du récepteur. La figure IV.1 montre la géométrie proposée ainsi que la variation de la vitesse de propagation de l'onde acoustique en fonction du temps. L'évolution de la courbe montre l'état stable de la réponse du capteur dans un milieu de référence.

A noter que les mesures ont été faites à la fois selon un déplacement axial de $(15 \text{ cm} \leq d \leq 60 \text{ cm})$ et circonférentiel de distance $d = 40 \text{ cm}$. La valeur de la vitesse de l'onde mesurée à cette température est de $V = 1.497 \pm 2.39 \text{ m/s}$.

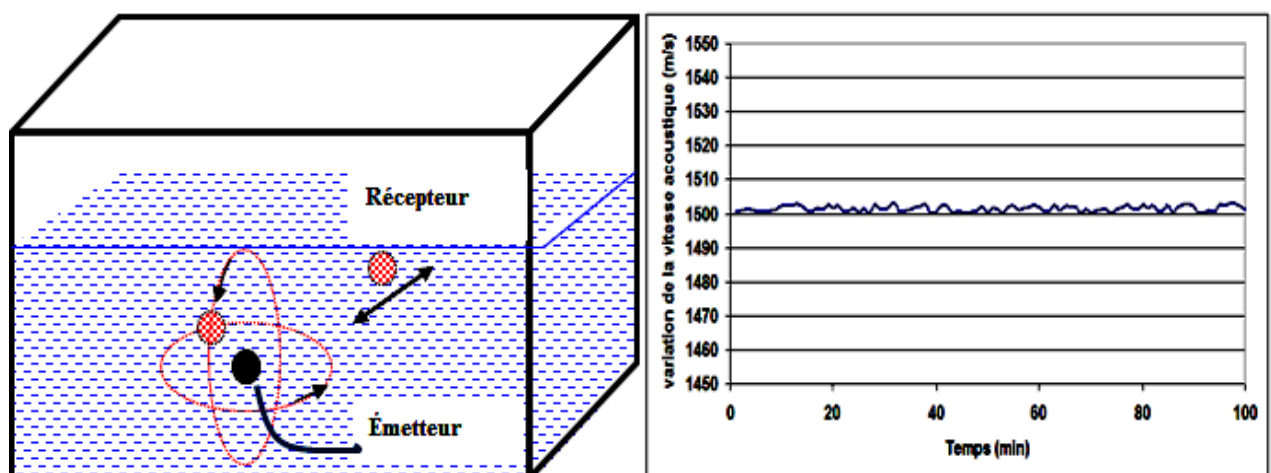


Figure IV.1 : La stabilité mécanique d'une onde acoustique (à gauche principe de mesure et à droite variation de la vitesse de l'onde acoustique en fonction du temps).

IV.2.2. Positionnement d'une source d'émission acoustique

IV.2.2.1. Description du système de positionnement proposé

Pour certains produits composés, l'atteinte d'une certaine qualité de mélange est essentielle. La voie à cette qualité recherchée passe souvent par des aspects dynamiques et / ou thermiques, eux-mêmes liés aux mécanismes qui président à la mise en mouvement du milieu : convection, cisaillement et diffusion. Ces mécanismes sont le fait, non seulement des propriétés d'écoulement des produits, mais aussi des possibilités technologiques des appareils de mélange.

Comme c'est le cas d'une bonne majorité de produits de notre quotidien (pharmaceutique, cosmétique, alimentaire, agro-industriel, ...), les connaissances scientifiques de base font encore défaut pour expliciter clairement la phénoménologie du mélange, ceci étant probablement le fait de la nature mésoscopique ou microscopique de ces milieux et notamment du manque de modèles pour décrire ces milieux à cette échelle. Dans le cadre d'une approche systémique de cette opération et donc macroscopique, il est cependant possible de prendre en compte certains aspects dynamiques classiques en Génie des Procédés (cinétique de mélange, distribution des temps de séjour, puissance consommée. . .) et de modéliser globalement l'opération.

Comme nous l'avons mentionné auparavant, la notion d'homogénéité d'un mélange, indissociable de celles d'échelles d'observation et de ségrégation, reste difficile à atteindre par les techniques actuelles de mesures. La nature et la rhéologie des produits qui peuvent conduire à des expressions compliquées d'un certain nombre de paramètres, et tout particulièrement de leurs évolutions respectives en cours de mélange.

Connaitre les propriétés d'un mélange dans une échelle spatio-temporelle correspond à une localisation dans le temps : À chaque donnée est associée une information spatiale (i.e. une localisation) et une information temporelle (i.e. une date) fait de notre concept un atout.

Pour avoir une information sur l'état d'homogénéité *in-situ* d'un mélange il faut passer par la connaissance de la position instantanée de l'élément de mesure qui est dans notre cas un émetteur acoustique placé au sein d'un réseau de capteurs à récepteurs identifiés.

L'identification spatiale de l'émetteur à chaque instant permet de tracer l'historique de ce dernier et par conséquent l'accès à des propriétés acoustique recherchées du milieu.

En effet, pour localiser le capteur un système de positionnement acoustique a été mis en place.

Ce système de positionnement est constitué sur la base d'un échange des signaux entre un émetteur et des récepteurs (figure IV.2). L'analyse de ces signaux par trilatération permet de connaître la distance entre l'émetteur et un récepteur et par conséquent déterminer la position relative de l'émetteur par rapport à un point de référence, souvent une position d'un récepteur donné considéré comme coordonnées d'origine (0, 0, 0).

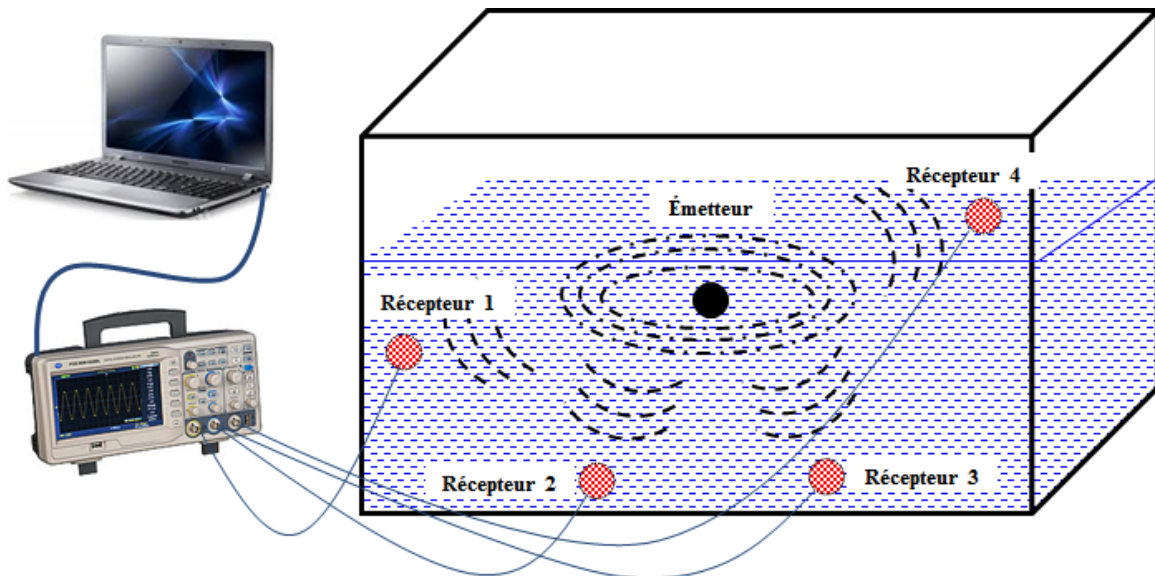


Figure IV.2 : Schéma montrant la distribution des différents éléments vibratoires (réseau) du système de mesure et ses composants.

En effet le système est composé d'un émetteur situé à une position quelconque dans l'espace et de quatre récepteurs de positions connues. Les différents capteurs sphériques ont les mêmes caractéristiques physiques (un rayon moyen de 11.3 mm, pour une épaisseur de 2.6 mm, module d'élasticité $E = 3300 \text{ MPa}$, coefficient de poisson $\nu = 0.39$ et une densité volumique $\rho = 1190 \text{ Kg/m}^3$).

L'autonomie du capteur émetteur confère à cet élément une flexibilité sur le choix de la pulsation électrique désirée en fonction de l'application et les conditions de mesures.

Sous l'action d'une impulsion électrique générée par le module embarqué dans l'émetteur, la structure se met en résonance et transmet la vibration à travers le milieu vers les quatre récepteurs. L'acquisition des signaux est assurée par un module d'acquisition des données constitué d'un oscilloscope haute résolution multivoies.

IV.2.2.2. Acquisition des données acoustiques

La figure IV.3 montre un exemple du signal électrique reçu, ainsi que son spectre, par un des récepteurs du réseau.

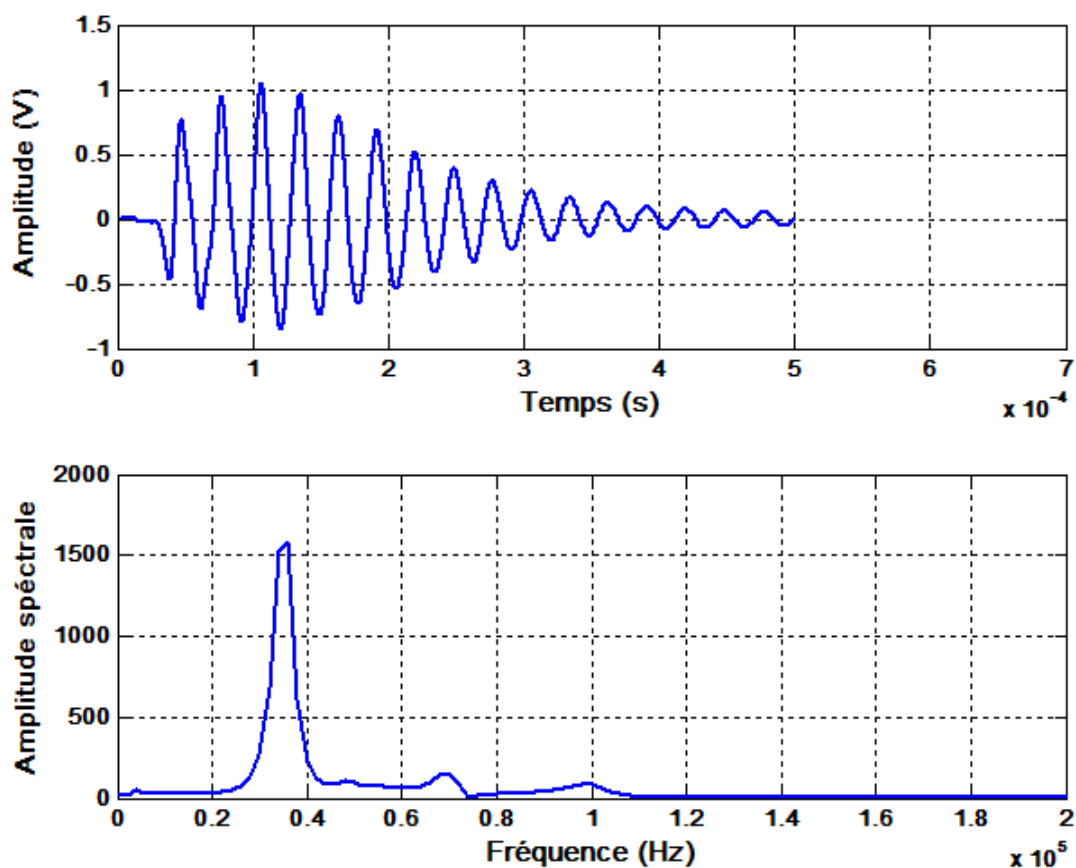


Figure IV.3 : Signal temporel et son spectre fréquentiel reçu par un capteur récepteur suite à une pulsation électrique d'une fréquence 37 kHz.

IV.2.2.3. Méthode de trilatération

Cette technique a pour objectif de localiser instantanément une source d'émission acoustique en mouvement, dans un espace (x,y,z). Seules les positions des récepteurs sont connues. Cette démarche donnera accès, par la mesure des temps de vol de l'onde (des différents récepteurs) à des propriétés physiques «locales» (par axe E/R_i) de la matière. (E : émetteur, R : récepteur).

En fait, dans le cas d'une mesure 3D la distance entre l'émetteur et le récepteur correspond au rayon de l'onde sphérique générée par la source (Figure IV.4).

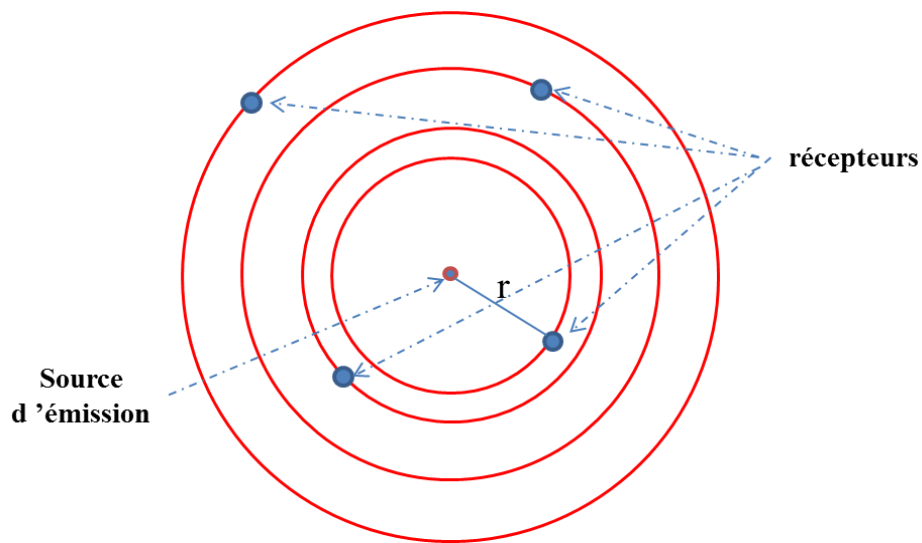


Figure IV.4 : Illustration schématique du principe de la mesure 3D en trilatération.

Cependant, dans l'espace, la localisation nécessite quatre coordonnées connues, dont trois représentent les points de référence dans l'espace et la quatrième représente un référentiel temporel qui mesure l'instant d'émission du signal en assurant la synchronisation.

La validation du concept nécessite un choix d'un milieu de référence (eau à température constante régulée dans notre cas) pour pouvoir comparer les grandeurs mesurées à celles de la littérature.

Si on considère que p(x,y,z) est un point appartenant à une sphère de centre o (a,b,c) et de rayon r qui vérifie l'équation suivante, alors :

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 + (z - c)^2 - r^2 = 0 \quad \text{IV.1}$$

L'onde se propageant à la vitesse v entre le point o de la sphère et son centre, on obtient :

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 + (z - c)^2 = v^2 * (\Delta t)^2 \quad \text{IV.2}$$

Δt : représente le temps de propagation du signal acoustique émis (figure IV.5).

Dans ce contexte le principe de mesure se résume à la résolution du système d'équations non linéaires à quatre inconnues suivant :

$$(x - a_i)^2 + (y - b_i)^2 + (z - c_i)^2 = v^2 * (\Delta t_i)^2, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad \text{IV.3}$$

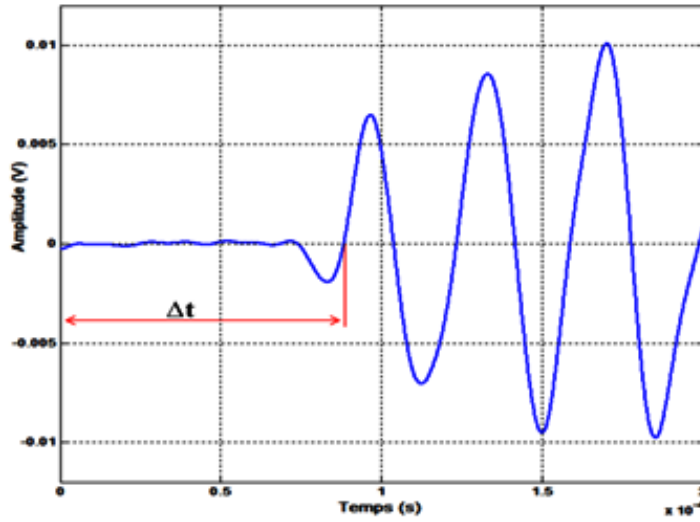


Figure IV.5 : Illustration schématique du principe de mesure du temps de propagation de l'onde acoustique.

Avec (a_i, b_i, c_i) la position du i -ème récepteur.

Le développement explicite se mène au système d'équations suivant :

$$x^2 + y^2 + z^2 - 2a_1x - 2b_1y - 2c_1z + a_1^2 + b_1^2 + c_1^2 = v^2 * (\Delta t_1)^2 \quad \text{IV.4}$$

$$x^2 + y^2 + z^2 - 2a_2x - 2b_2y - 2c_2z + a_2^2 + b_2^2 + c_2^2 = v^2 * (\Delta t_2)^2 \quad \text{IV.5}$$

$$x^2 + y^2 + z^2 - 2a_3x - 2b_3y - 2c_3z + a_3^2 + b_3^2 + c_3^2 = v^2 * (\Delta t_3)^2 \quad \text{IV.6}$$

$$x^2 + y^2 + z^2 - 2a_4x - 2b_4y - 2c_4z + a_4^2 + b_4^2 + c_4^2 = v^2 * (\Delta t_4)^2 \quad \text{IV.7}$$

On pose :

$$\alpha_1 = a_1^2 + b_1^2 + c_1^2 - v^2 * (\Delta t_1)^2 \quad \text{IV.8}$$

$$\alpha_2 = a_2^2 + b_2^2 + c_2^2 - v^2 * (\Delta t_2)^2 \quad \text{IV.9}$$

$$\alpha_3 = a_3^2 + b_3^2 + c_3^2 - v^2 * (\Delta t_3)^2 \quad \text{IV.10}$$

$$\alpha_4 = a_4^2 + b_4^2 + c_4^2 - v^2 * (\Delta t_4)^2 \quad \text{IV.11}$$

En soustrayant l'équation (10) de chacune des trois autres équations, les termes du deuxième degré vont disparaître, on obtient alors :

$$(5)-(4) \rightarrow 2(a_2 - a_1)x + 2(b_2 - b_1)y + 2(c_2 - c_1)z + \alpha_1 - \alpha_2 = 0 \quad \text{IV.12}$$

$$(6)-(4) \rightarrow 2(a_3 - a_1)x + 2(b_3 - b_1)y + 2(c_3 - c_1)z + \alpha_1 - \alpha_3 = 0 \quad \text{IV.13}$$

$$(7)-(4) \rightarrow 2(a_4 - a_1)x + 2(b_4 - b_1)y + 2(c_4 - c_1)z + \alpha_1 - \alpha_4 = 0 \quad \text{IV.14}$$

On aura :

$$2 * \begin{pmatrix} (a_2 - a_1) & (b_2 - b_1) & (c_2 - c_1) \\ (a_3 - a_1) & (b_3 - b_1) & (c_3 - c_1) \\ (a_4 - a_1) & (b_4 - b_1) & (c_4 - c_1) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \alpha_1 - \alpha_2 \\ \alpha_1 - \alpha_3 \\ \alpha_1 - \alpha_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{IV.15}$$

La résolution du système précédent nous donne les coordonnées cartésiennes (x, y, z) de la position de notre émetteur.

IV.2.2.4. Résultats du positionnement acoustique

Pour valider notre démarche, nous avons considéré deux cas de figure à géométrie déterminée :

- Les capteurs récepteurs et le capteur émetteur sont dans le même plan z.
- Le capteur émetteur est positionné de façon aléatoire.

A : Emetteur /récepteurs dans le même plan ; z = 10 cm

Les positions des récepteurs sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau IV.1. Coordonnées des capteurs récepteurs.

Récepteur	x(m)	y(m)	z(m)
1	0.12	0.10	0.10
2	0.12	0.01	0.10
3	0.015	0.10	0.10
4	0.015	0.01	0.10

Les récepteurs et l'émetteur étant dans le même plan z , on peut utiliser dans ce cas une trilatération à 2 dimensions.

La figure IV.6 suivante présente les signaux obtenus par les quatre récepteurs.

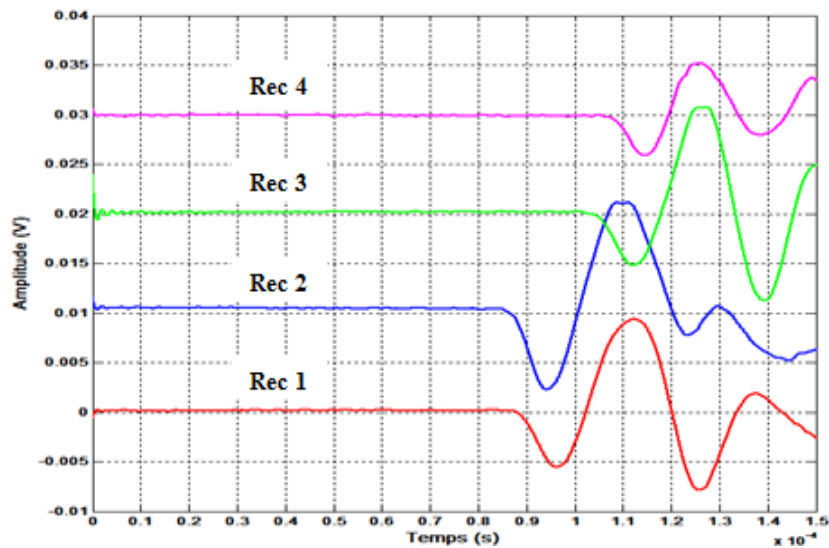


Figure IV.6 : Signaux issus des récepteurs positionnés dans le même plan.

L'analyse réalisée sur les données reçues, par la technique de passage à zéro, permette d'estimer les variations des temps de propagation de l'onde émise vers les quatre récepteurs.

D'où°:

$$dt_1 = 100 \text{ e-6 s} ; dt_2 = 101 \text{ e-6 s} ; dt_3 = 117 \text{ e-6 s} ; dt_4 = 119 \text{ e-6 s} ;$$

En tenant compte des temps de vol mesurés, les valeurs calculées (0.106 m, 0.058 m, 0.10 m), sont en très bonne concordance avec les positions des mesures réelles effectuées entre l'émetteur et les différents récepteurs, soit (0.090 m, 0.05 m, 0.10 m).

La figure IV.7 présente le positionnement des quatre récepteurs et la position calculée de l'émetteur.

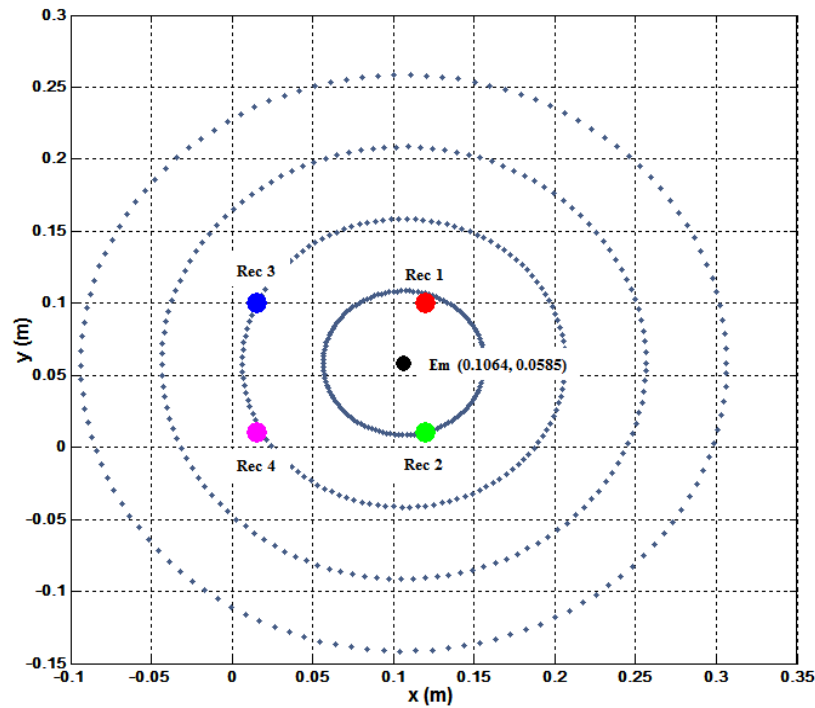


Figure IV.7 : Positions des récepteurs et de l'émetteur, données par la trilatération.

B : Emetteur à position aléatoire

Dans ce cas, les positions des récepteurs figurent dans le tableau suivant :

Tableau IV.2. Coordonnées des capteurs récepteurs.

Récepteur	x(m)	y(m)	z(m)
1	0.12	0.10	0.10
2	0.015	0.01	0.05
3	0.12	0.01	0.04
4	0.015	0.01	0.10

La figure IV.8 montre les différents signaux reçus.

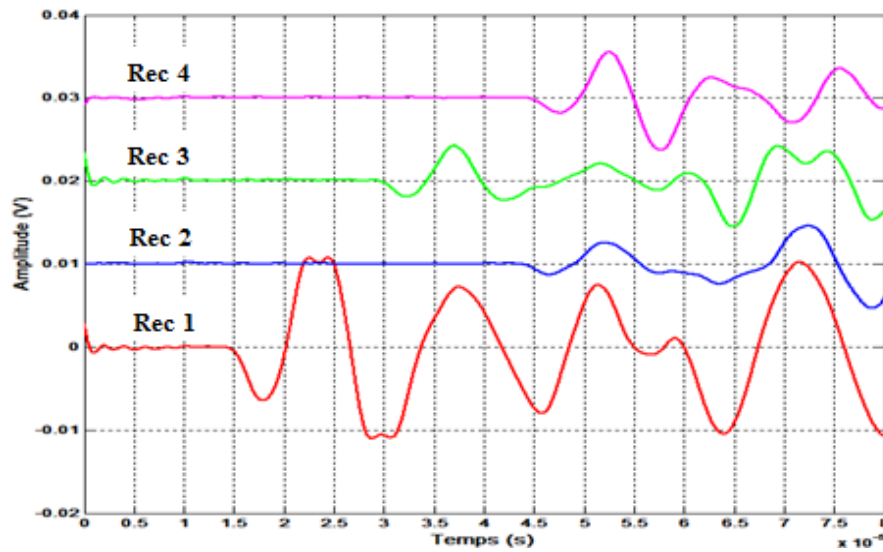


Figure IV.8 : Signaux obtenus dans le cas du positionnement aléatoire de l'émetteur.

Sur la même base de calcul, les figures IV.9- IV.10 montrent les coordonnées de l'émetteur (0.174 m, 0.081 m, 0.116 m), sachant que les coordonnées réelles mesurées sont (0.172 m, 0.08 m, 0.10 m).

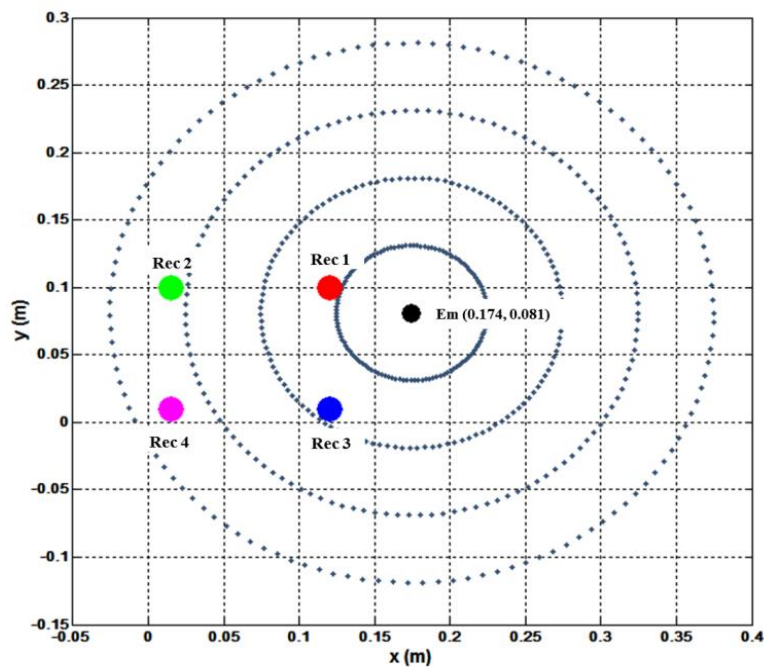


Figure IV.9 : Coordonnées des récepteurs et de l'émetteur, données par la trilatération (présentation 2D).

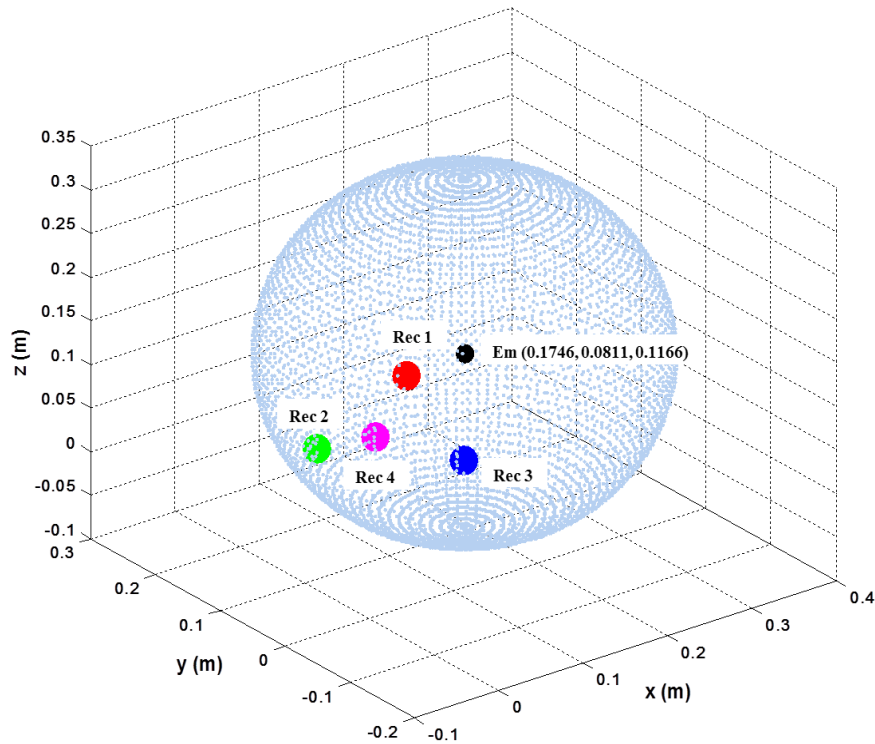


Figure IV.10 : Coordonnées des récepteurs et de l'émetteur, données par la trilatération 3D.

IV.2.3. Sensibilité du capteur à la nature du milieu

IV.2.3.1. Intérêt d'une analyse multidimensionnelle (trilatération)

Pour attribuer une identité, une image à un produit dans le domaine agro-industriel par exemple, le contrôle de l'homogénéité de la masse globale est alors une action indispensable par laquelle la décision passe sur une qualité espérée (texture collante, friable, ...). Comme nous l'avons mentionné ci-haut, plusieurs méthodes existantes donnent accès, souvent par prélèvement, à une information limitée sur l'état d'un mélange en cours.

En revanche, la technique de la trilatération basée sur la dispersion d'un certain nombre de capteurs (émetteurs codés) de mesure acoustique dans un volume donné peut offrir un moyen idéal pour atteindre l'objectif visé et par conséquence contrôler l'homogénéité en temps réel.

Dans la suite de l'étude toute application est basée systématiquement sur des mesures par trilatération.

IV.2.3.2. Sensibilité du capteur à l'homogénéité

De façon à vérifier la sensibilité du capteur et éviter toute dérive liée à l'application ou l'expérimentation, nous avons testé en premier lieu l'effet de la variation de température dans l'eau. Des mesures sur la variation de la vitesse de propagation de l'onde pour différentes valeurs de la température de l'eau ont été effectuées et sont présentées sur le tableau IV.3.

En se référant aux travaux de **Greenspan [33]** sur une plage donnée de la variation thermique, nous remarquons que la vitesse de l'onde mesurée par la technique du passage à zéro, tout en considérant la distance émetteur / récepteur comme constante, concorde très bien avec ses résultats.

Tableau IV.3. Vitesse de propagation de l'onde acoustique dans l'eau à différentes températures.

T (°C)	Vitesse		T (°C)	Vitesse	
	Méthode standard (Greenspan)	Capteur sphérique (± 2,4 m/s)		Méthode standard	Capteur sphérique (± 2,4 m/s)
20	1482,66	1481	26	1499,64	1499
22	1488,63	1488	28	1504,68	1505
24	1494,29	1495	30	1509,44	1511

D'autre part, l'étude de la sensibilité du capteur sphérique a été validée par l'analyse de la variation de la vitesse et de l'atténuation de l'onde acoustique dans des milieux bi-phasiques homogènes. Quatre différentes solutions à 18 ° C ont été considérées; l'eau (en tant que référence), le glucose, l'éthanol et l'huile de colza.

Le schéma du principe de mesure est présenté sur la figure IV.11.

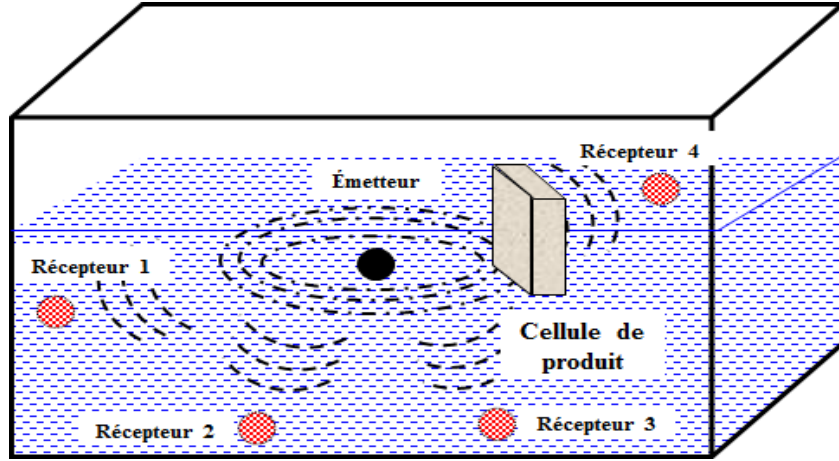


Figure IV.11 : Validation de la sensibilité du capteur : illustration montrant le principe de base des mesures effectuées sur les grandeurs vitesse et atténuation de l'onde en transmission.

Si nous désignons par $t_{éch}$ l'instant d'arrivée de l'onde traversant l'échantillon « i » et par t_{eau} l'instant d'arrivée de l'onde traversant l'eau seule en absence de l'échantillon « i » nous aurons $\Delta t = t_{éch} - t_{eau}$ la différence du temps d'arrivée de l'onde affectée par les hétérogénéités introduites.

$$\Delta t = \frac{d_{eau}}{v_{eau}} - \frac{d_{éch\ i}}{v_{éch\ i}} = \frac{d_i}{v_{eau}} - \frac{d_i}{v_i} = d_i \left(\frac{1}{v_{eau}} - \frac{1}{v_i} \right) \quad \text{IV.16}$$

$$V_i = \frac{1}{\frac{1}{v_{eau}} - \frac{\Delta t}{d_i}} \quad \text{IV.17}$$

i représente le milieu sous étude.

d_i Représente la distance émetteur-récepteur.

V_i représente la vitesse de propagation de l'onde acoustique dans le milieu i .

L'analyse de l'onde reçue nous montre une cohérence dans la vitesse et l'atténuation vis-a-vis des caractéristiques mécaniques des différents milieux considérés (Figure IV.12).

Tableau IV.4. Vitesse de propagation de l'onde acoustique et son atténuation dans différents milieux.

	Ethanol	Eau (référence)	Huile de Colza	Glucose
Densité (Kg/m³)	803	<i>1000</i>	914	1136
V (m/s)	1222	<i>1476</i>	1306	1738
Atténuation normalisée	0,88	<i>1</i>	1,13	1,18

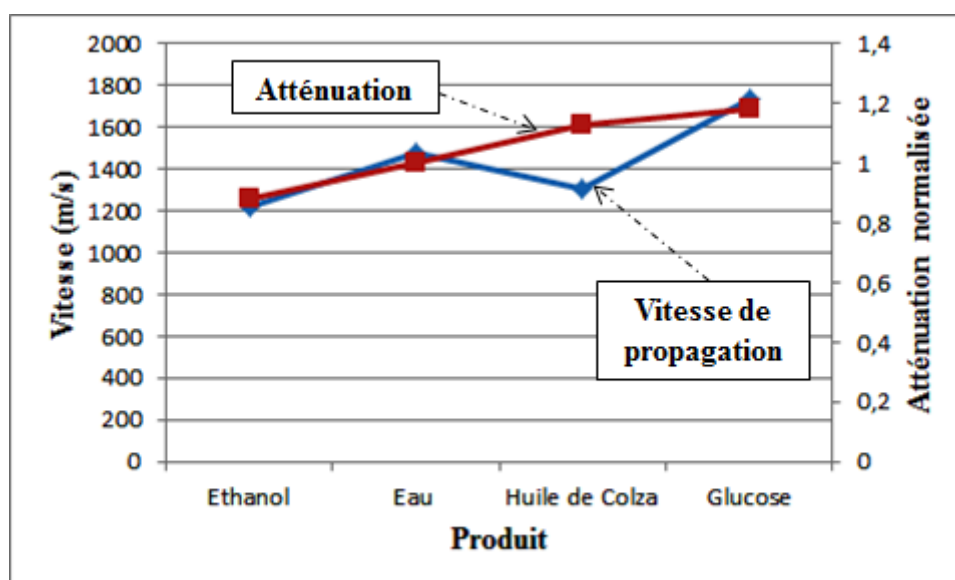


Figure IV.12 : Variations de la vitesse et de l'atténuation de l'onde dans différents produits selon leurs propriétés acoustiques.

IV.2.4. Sensibilité à la transition de phase

Sur la base des études menées par **Nassar et al [34]** sur la caractérisation des phénomènes de transition de phase, nous considérons dans cette partie, la gélification du lait comme modèle d'une transformation dynamique d'un milieu. Le but est d'estimer l'aptitude d'un tel réseau de capteurs à livrer les informations pertinentes recherchées tout au long du processus de transformation que nous pouvons décliner en plusieurs étapes :

1. Lait considéré comme un milieu homogène.
2. Transition de phase : milieu dynamique
3. Contrôle de l'orientation des découpes du caillé : zone hétérogène (découpée) pour un récepteur « i » par rapport à une zone homogène, récepteur « j ».
4. Contrôle de taille des grains ; milieu hétérogène.

Par référence à la vitesse dans l'eau à 37°C nous avons pu mesurer dans du lait porté à 37°C, considéré comme homogène dans sa globalité, une vitesse de $1540 \pm 3 \text{ m/s}$.

Nous pouvons remarquer sur la figure IV.13 que l'ajout de 30 μl de la présure pour 100 ml de lait modifie les caractéristiques physiques des signaux reçus sur un récepteur donné. Cette modification résulte de l'évolution des propriétés mécaniques du milieu reflétant ainsi la transition de phase sol-gel du milieu et le passage d'un milieu liquide à un gel viscoélastique. Du fait que, par trilatération, la position de l'émetteur (mobile) est connue à chaque instant, alors la quantification des temps de vols des ondes émises par un émetteur en position aléatoire dans l'espace considéré et reçues par les différents récepteurs (bien identifiés) donne accès à une variation de la vitesse dans le milieu en transition de l'ordre de $69 \pm 6 \text{ m/s}$. Soit une vitesse de l'ordre de $1609 \pm 6 \text{ m/s}$.

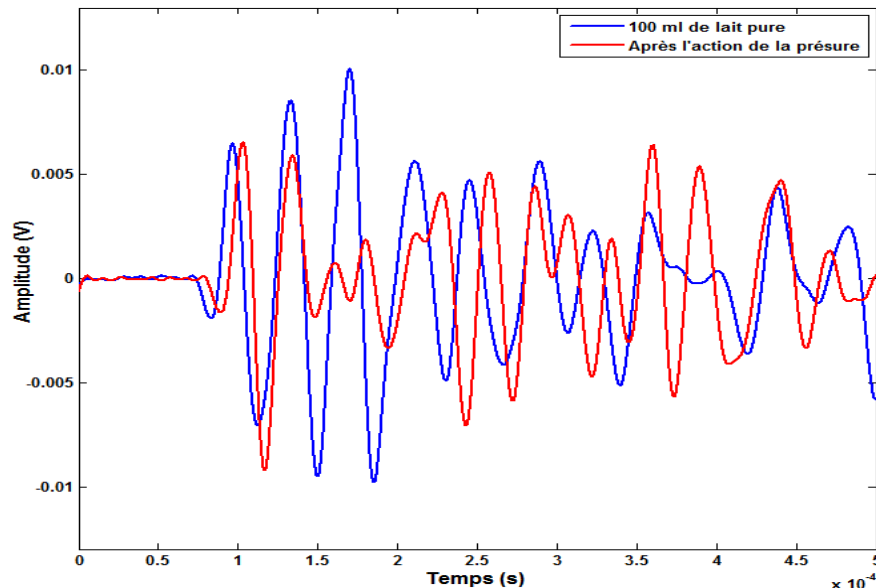


Figure IV.13 : En bleu, signal reçu par un récepteur plongé dans le lait seul, en rouge signal reçu au bout d'un certain temps après l'ajout de présure.

En rapportant les caractéristiques acoustiques des courbes issues des différents récepteurs au cours de la réaction par rapport au milieu de référence (eau), nous pouvons remarquer sur les courbes de la figure IV.14 que les phases critiques des courbes se révèlent identiques. Elles sont marquées par un départ considéré comme une phase de latence de courte durée nettement visible sur la courbe de la variation du temps de vol de l'onde, suivie par une diminution rapide de l'amplitude jusqu'au moment où la viscosité atteint sa valeur maximale. Dans le cas de notre exemple, elle se stabilise à un niveau d'environ 29 % de sa valeur initiale. La tendance asymptotique de la courbe traduit la phase finale du milieu ; un gel homogène en volume

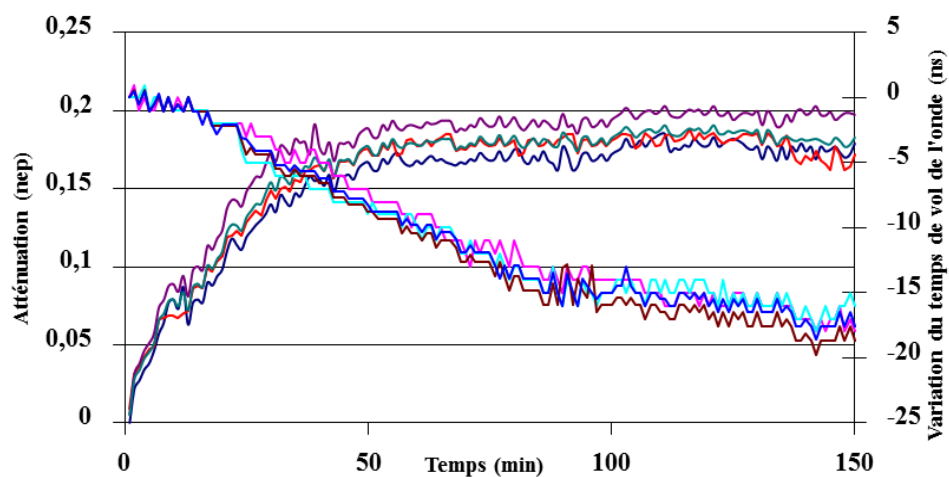


Figure IV.14 : Evolution des grandeurs acoustiques (atténuation et temps de vol) de l'onde reçue par les 4 récepteurs au cours de la réaction de la transition de phase.

En effet, la combinaison de l'augmentation de la vitesse (diminution du temps de vol) et la diminution de l'amplitude (augmentation de l'atténuation) des signaux reçus, reflète clairement les propriétés mécaniques du milieu au-delà d'un temps critique, qui dans notre cas, n'est autre que le temps de prise du milieu. Ce phénomène est bien visible sur les traces et les morphologies des signaux de la figure IV.15 montrant clairement, à la fois, la variation du temps de vol et l'atténuation du signal au cours du temps de la réaction.

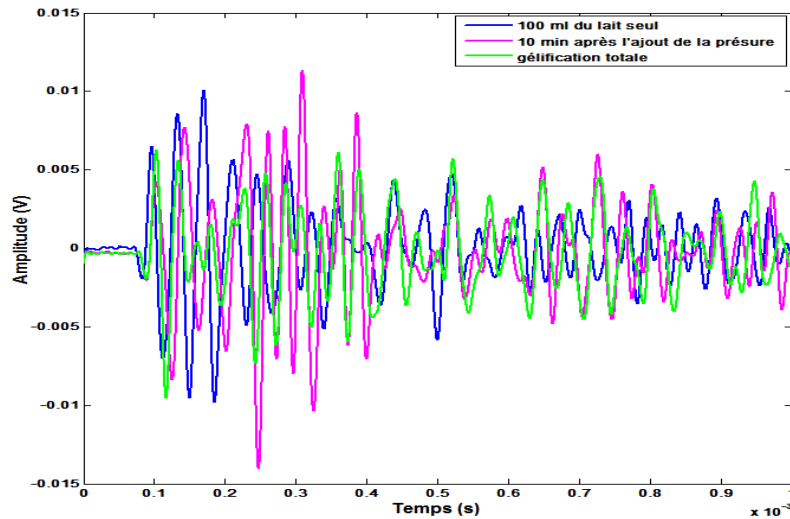


Figure IV.15 : Morphologie des signaux reçus au cours du temps pendant la transformation du milieu.

IV.2.5. Sensibilité à l'hétérogénéité du milieu

Après la transition sol-gel, nous avons procédé à un découpage mécanique contrôlé. Il s'agissait dans un premier temps de créer une zone d'hétérogénéité locale affectant ainsi l'onde reçue par un récepteur spatialement défini et dans une direction bien définie. L'objectif de cette démarche est de quantifier les variations que peuvent subir les grandeurs mesurées en fonction de l'état physique de certaines zones du mélange.

Cette action mécanique limitée (a eu lieu à 150 minutes après l'emprésurage) a conduit à une zone locale diphasique formée d'une multitude d'interfaces sous la forme de films de sérum séparant les grains de caillé. Plusieurs niveaux d'hétérogénéité ont été identifiés.

En effet, l'analyse des caractéristiques acoustiques (vitesse et atténuation) des signaux reçus par un récepteur « i » montrent une dérive par rapport aux signaux des autres récepteurs issus de la même configuration. Cette différence résulte du fait que la première phase de découpage du gel a visé la zone couverte par un récepteur donné tout en gardant la zone couverte par les autres intacte. Cette dérive, nettement visible sur l'amplitude (par comparaison aux courbes de la figure IV.14), résulte de l'apparition d'une multitude d'interfaces dans une zone diphasique : grain – lactosérum.

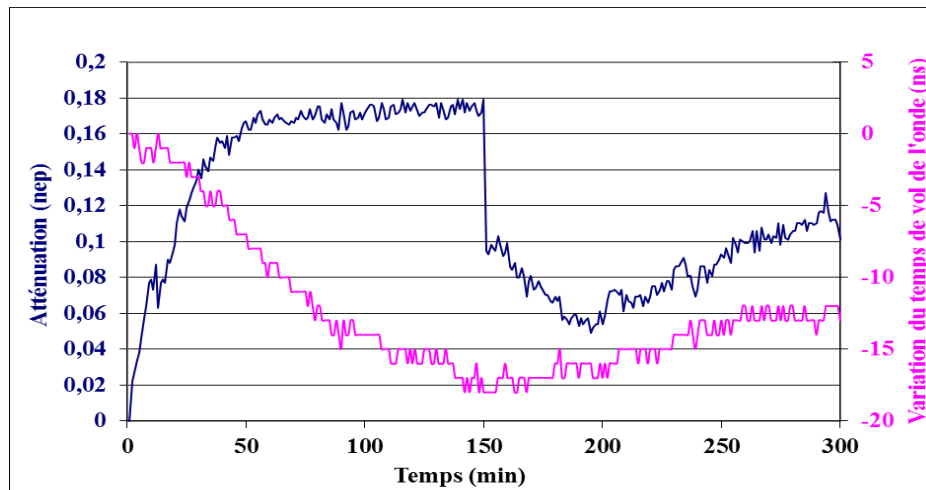


Figure IV.16 : Sensibilité des récepteurs aux variations instantanées de l'état physique ou de l'évolution des propriétés mécaniques des milieux.

A l'encontre de la figure IV.14, la figure IV.16 reflète l'image de l'évolution de l'état physique du milieu après une intervention mécanique dans le « gel » aux 150 minutes du début du processus de transformation du milieu. Nous pouvons remarquer que la perturbation de l'onde a bien été enregistrée par le récepteur, hautement sensible, qui se trouve sur l'axe de l'onde traversant cette zone « hétérogène » par rapport aux autres directions.

Afin de consolider notre point de vu, nous avons poursuivi le découpage du milieu en différente taille de grain. La figure IV.17 montre la tendance de la variation des grandeurs mesurées (temps de vols dans le cas de la figure) à s'aligner traduisant ainsi un état d'homogénéité instantanée et qui est fonction du paramètre spatio-temporel considéré (taille des grains en fonction de la durée et nature des découpes).

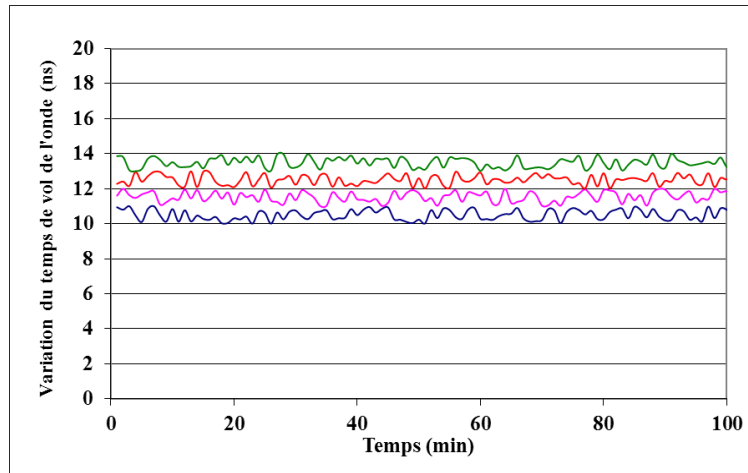


Figure IV.17 : Illustration graphique de la stabilité du comportement mécanique des capteurs récepteurs pour un état physique donné du milieu (cas de la mesure du temps de vol (éclaté) de l'onde reçue par les 4 récepteurs à travers un milieu hétérogène di-phasique formé des grains de caillé en suspension dans le lactosérum en agitation à 27°C).

IV.2.5.1. Cas d'un milieu à forte diffusion

Toutefois, la maîtrise de la vitesse de coupe nous a permis de définir plusieurs niveaux d'hétérogénéité du milieu qui sont fonction de la taille de grain atteinte pour un temps de coupe bien déterminé.

Dans ce contexte, plusieurs théories ont été développées pour traiter le problème de propagation des ondes dans les milieux hétérogènes, parmi lesquelles la théorie de transport d'énergie et la théorie analytique de la diffusion multiple.

D'une façon générale, la théorie de la diffusion multiple se base sur des considérations statistiques permettant d'aboutir à des expressions caractéristiques de la propagation des ondes.

Compte tenu de la complexité liée à l'existence de conversion de modes, à la détermination de la fonction de pondération, l'établissement des équations différentielles reflétant la réalité de ce phénomène reste difficile à établir. La théorie analytique est de loin la plus utilisée pour caractériser la propagation des ondes acoustiques dans les milieux hétérogènes, mais le traitement mathématique d'ordre « n » s'avère très complexe et nous avons recours à des simplifications pour résoudre certains problèmes souvent par une voie expérimentale.

4.2.5.2. Cas d'un milieu à forte diffusion : modèle expérimental basé sur la mesure de l'énergie moyenne reçue

Le processus de gélification montre qu'après la transition sol-gel le milieu évolue asymptotiquement définissant ainsi la formation d'un gel. Dès que le milieu a atteint une certaine rigidité qu'on estime suffisante, nous élaborons différents modèles de grains diffusants par un procédé de découpage et chauffage contrôlé (Figure IV.18).



Figure IV.18 : Grains de caillé ayant des caractéristiques physiques différentes résultant d'un traitement mécanique et thermique contrôlé.

Pour effectuer les mesures nécessaires, nous avons adopté la même configuration de réseau formé des différents capteurs : 4 récepteurs identifiables dans l'espace et un émetteur autonome à position aléatoire.

La figure IV.19 montre la morphologie des signaux « types » reçus par différents récepteurs à travers le milieu formé par des diffuseurs en suspension dans le lactosérum. Cette courbe résulte de la réception par un récepteur donné (R_i ; $i = 1$ à 4) pour un signal émis par un émetteur codé à « 5 » (0101).

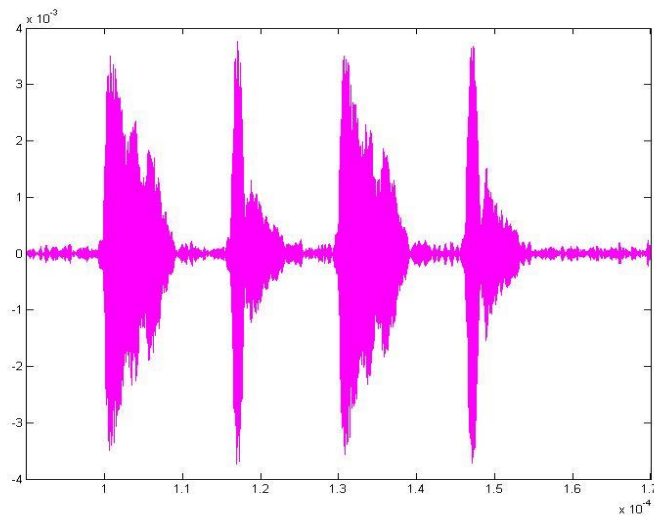


Figure IV.19 : Signal reçu après découpage du gel (code 5).

La densité d'hétérogénéité et la nature des diffuseurs engendrent une variation dans les caractéristiques acoustiques (vitesse et atténuation) des échos reçus par les différents récepteurs R_i . Bien que, dans le cas d'une hétérogénéité des zones (différente densité ou différente nature des diffuseurs) il est évident de tenir compte, en plus d'une analyse sur les caractéristiques acoustiques de l'onde, d'une analyse morphologique pour un trajet donné E/R_i .

Pour un milieu de départ ayant une concentration, densité et vitesse d'agitation mécanique constante, l'analyse du signal reçu par les différents récepteurs montre un écart type de l'ordre de 3 %.

IV.2.5.3. Evolution de la moyenne énergétique à différentes concentrations de grains

Dans cette partie, la concentration d'un type donné de diffuseurs a été considéré comme variable tout en gardant constant les autres paramètres comme la taille des grains (moyenne de 5 mm) la température du milieu et la vitesse d'agitation.

La courbe de la figure IV.20 montre une décroissance de la moyenne énergétique (intégration sur la surface totale de l'écho de réception) en fonction de la concentration. Cette décroissance est traduite par le nombre variable des diffuseurs se trouvant dans un champ

acoustique donné. Plus la concentration est élevée, plus le nombre d'obstacles diffuseurs est important, et donc le signal émis par le transducteur subit une atténuation plus importante avant sa réception par un récepteur donné.

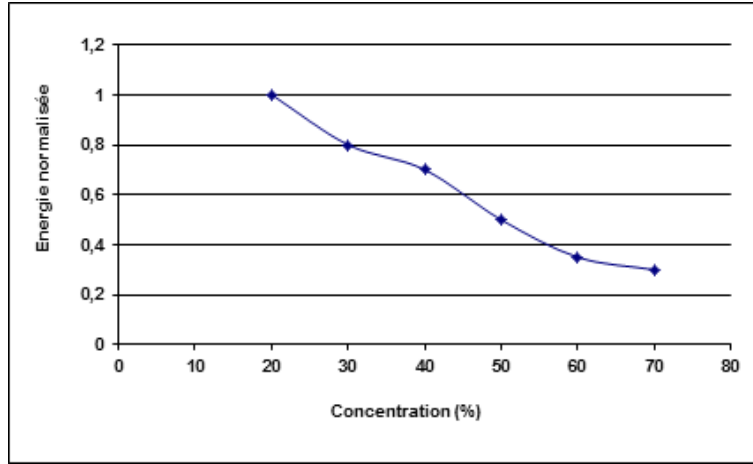


Figure IV.20 : Modèle d'hétérogénéité basée sur la variation de la concentration des diffuseurs dans le milieu.

IV.2.5.4. Evolution de la moyenne énergétique à différentes tailles de grains

Egalement et dans le même objectif, la taille des grains a été considérée cette fois ci comme le variable principale. Quatre tailles différentes de grains ont été définies sur la base de préparations identiques, du milieu de départ. Dans la suite, quatre niveaux différents (par analyse d'image) ont été définis; 1, 1/2, 1/4 et 1/8.

Comme précédemment, la figure IV.21 montre une forte sensibilité des capteurs pour un paramètre physique considéré. L'énergie à la réception est fortement influencée par l'augmentation des interfaces introduites en réduisant la taille des grains pour la même densité.

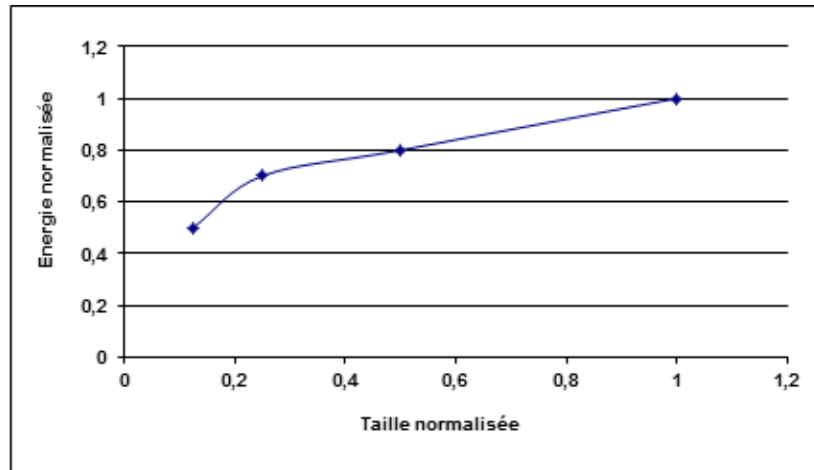


Figure IV.21 : Modèle d'hétérogénéité basée sur la variation de la taille des diffuseurs dans le milieu.

A noter que, l'analyse morphologique des courbes de la figure IV.22 montre une différence de la forme en fonction de la nature du milieu. Ceci peut être expliqué en supposant que pour des petites tailles de grains, l'énergie interceptée est soumise au phénomène de diffusion tandis que dans le cas de gros grains le milieu se comporte comme de multiples interfaces et qui est plutôt soumis au phénomène de réflexion.

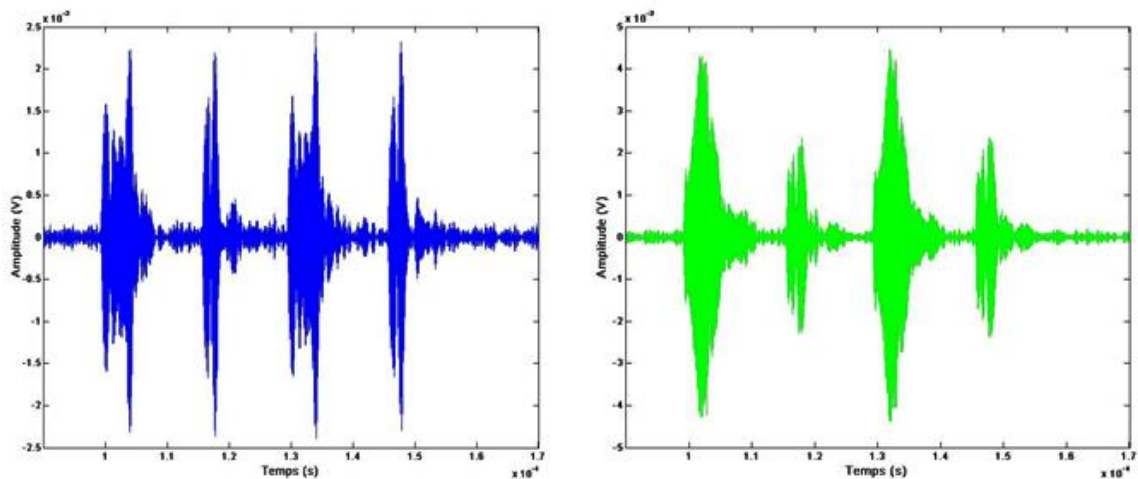


Figure IV.22 : Différence en morphologie des signaux pour le code 5 (0101).

IV.3. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons examiné l'aptitude du concept (capteurs à électroniques embarquées) ultrasons basse fréquence à répondre avec précision et haute sensibilité au comportement du milieu sous investigation.

Dans un premier temps, nous avons appliqué la méthode de trilatération afin de définir la position d'émetteurs codés dans un espace considéré. Par le biais de cette démarche nous avons pu quantifier les effets locaux engendrés sur les mesures résultants des conditions mécaniques et thermiques imposés. Les capteurs ont montré à la fois une stabilité et une sensibilité considérable et ceci par la réponse au suivi du changement d'état physique du milieu.

Dans un deuxième temps, nous avons étudié l'influence des facteurs d'hétérogénéité sur la variation des grandeurs acoustiques choisies ; le temps de vol de l'onde et la variation de l'amplitude (atténuation).

Finalement, nous avons pu présenter une vue cohérente du comportement acoustique à la fois du système de mesure et du milieu dynamique considéré. Les courbes ainsi présentées font apparaître toutes les phases critiques dans un milieu complexe évolutif dont peu de techniques donnent accès aux propriétés physiques locales recherchées. L'évolution du capteur vers une version d'intelligence intégrée assurant la conversion des vibrations acoustiques du processus vers des charges utiles ouvre ainsi de nouvelles perspectives.

Conclusion générale

L'étude et la conception d'un capteur capable de répondre à des contraintes industrielles dans le domaine de l'homogénéisation était l'objectif principal des travaux de recherche présentés dans ce mémoire. Nous avons proposé un concept d'éléments de mesure basé sur des capteurs sphériques miniaturisés à électronique embarquée. Après la très bonne concordance sur le comportement vibratoire du capteur, entre les résultats issus de l'étude analytique et ceux de la réalisation expérimentale, le concept global a donné satisfaction à la fois sur la stabilité et la sensibilité aux propriétés recherchées dans la caractérisation ou le contrôle des mélanges. Des mesures par trilatération exploitant un émetteur et plusieurs capteurs récepteurs ont montré l'aptitude d'une telle technique à offrir l'information nécessaire et pertinente sur l'évolution en temps réel de l'état physique d'un mélange donné soumis à une action chimique (enzymatique), mécanique (découpage et agitation) ou thermique (chauffage).

Dans un premier temps, une étude panoramique sur le principe d'homogénéisation, les mécanismes de mélange ainsi que les différentes méthodes utilisées pour mesurer et quantifier la qualité de tels produits a été abordée.

Une fois que la problématique a été définie, le choix d'un moyen de mesure adapté a conduit à l'étude et la conception d'un capteur basse fréquence, de forme sphérique, miniaturisé, capable de répondre à des contraintes spécifiques ; milieu dynamique, hétérogène, fragile, Dans cet objectif, le second chapitre a fait l'objet d'une étude détaillée sur le comportement vibratoire d'un capteur sphérique de taille réduite et basse fréquence. Les principaux éléments considérés dans la conception de ce type de capteur élaboré au sein du laboratoire DOAE/IEMN de l'université de Valenciennes, sont rassemblés de façon à mettre sous contrainte un anneau piézoélectrique pris en sandwich entre deux demi-sphères creuses de nature adaptée à l'application visée. Les caractéristiques physiques d'un tel élément a permis l'intégration de l'électronique dans la partie creuse de la structure et la rendre ainsi comme un capteur acoustique autonome. Nous avons montré dans cette partie que les résultats analytiques visant les modes de résonances du capteur voir son comportement vibratoire sont en très bonne concordance avec ceux trouvés par une étude numérique et une autre expérimentale.

L'électronique embarquée se présente comme le point fort du capteur. L'algorithme assurant les différentes tâches allant de l'autonomie à la quantification de la consommation énergétique en passant par le codage et l'excitation électrique du capteur ont fait l'objet du troisième chapitre.

Pour s'assurer du bon fonctionnement de cette électronique embarquée, deux réseaux de capteurs à codage différent ont été réalisés (0101 et 0111). La différence de forme entre les

signaux reçus a confirmé le bon fonctionnement mécanique des capteurs dans une configuration " réseau ".

En parallèle, les mesures du courant électrique consommé par chaque capteur, la puissance absorbée ainsi que la tension aux bornes de la batterie ont pu quantifier le besoin nécessaire en énergie de fonctionnement d'un tel émetteur.

Le dernier chapitre a été consacré à l'interaction du capteur dans un environnement réel. Un système de mesure a été réalisé dans le but d'étudier le comportement du capteur acoustique dans différents milieux pour estimer sa fiabilité et sa sensibilité. La mise en réseau des capteurs a permis par le biais du concept de trilatération à identifier à chaque instant la position d'un émetteur ayant un codage donné et fournir ainsi les caractéristiques mécaniques du milieu en évolution par analyse de l'onde reçue par les différents récepteurs spatialement identifiés.

Afin d'améliorer le fonctionnement de ce type de résonateurs et rendre ainsi l'électronique du capteur libre de toute contrainte d'intervention (e.g. remplacement des piles, connexion à l'unité programmable, ...) une perspective de ce travail fait actuellement l'objet d'un projet de thèse qui porte sur la récupération de la vibration de l'environnement (onde de synthèse, bruit de fond d'un processus, ...) pour assurer l'énergie nécessaire et rendre le capteur auto rechargeable et à terme, intégrer au sein du module électronique les fonctions ; analyse, stockage et transmission des données.

Bibliographie :

- [1] H. Berthiaux, Mélange et homogénéisation des solides divisés, Technique de l'Ingénieur, 397, 2002.
- [2] P.M.C. Lacey. Developments in the theory of particle mixing. J. of Appl. Chem., 4:527–268, May 1954.
- [3] C. Schofield. Assessing mixtures by auto-correlation. Trans. Instn. Chem. Engrs., 48:T28–T34, 1970.
- [4] N. Ehrardt, H. Berthiaux, C. Gatumel & B. Dalloz-Dubrujeaud, Algorithme pour la mesure capacitive en ligne de la qualité de mélange en poudre en écoulement. 9ème congrès français de génie de procédés, Saint Nazaire, Septembre 2003.
- [5] P. Frake, D. Greenhalgh, S.M. Grierson, J.M. Hempenstall & D.R. Rudd, Process control and end-point determination of a fluid bed granulation by application of near infra-red spectroscopy, International Journal of Pharmaceutics, 151 (1997) 70-80.
- [6] K. A. Bakeev, Near Infrared spectroscopy as a process application tool, Pharmaceutical Technology Europe, 15(9) (2003) 27-32.
- [7] O. Berntsson, L.G. Danielson, B. Lagerholm & S. Folstad, Quantative in-line monitoring of powder blending by near infra red reflexion spectroscopy, Powder Technology, 123 (2002) 185-193.
- [8] C.D. Rielly, D.L.O. Smith, J.A. Lindley, K. Niranjana & V.R. Phillips, Mixing process for agricultural and food materials^o: Part 4, assecement and monitoring of mixing systems. Journal of Organic engenierring Research, (1994) 1 – 18.
- [9] A. Ait Kadour, C. Barron, M.H. Morel and B. Cup, “Dynamic Monitoring of Dough Mixing Using Near-Infrared Spectroscopy: Physical and Chemical Outcomes”, AACC International, Vol. 84, 2007.
- [10] A. Realpe & C. Velazquez, Image processing and analysis for determination of concentrations of powder mixtures, Powder Technology, 134 (2003) 193-200.

- [11] C. André, J.F. Demeyre, C. Gatumel, H. Berthiaux, G. Delaplace,” Dimensional analysis of a planetary mixer for homogenizing of free flowing powders°: Mixing time and power consumption “,Chemical Engineering Journal 198–199 (2012) 371–378.
- [12] G. Nassar, B. Nongaillard and J. Chéio,”In-Line Dynamic Acoustic Behavior of a Viscoelastic Complex Media: Dough Application”, The Open Acoustics Journal, Vol.5, pp.39-45, 2012.
- [13] Bourbié T., Coussy O. et Zinszner B., 1986, Acoustique des milieux poreux (Technip, Paris).
- [14] Lakes R.S, 1998, Viscoelastic solids (CRC Press, New York).
- [15] T. M Lee, “Spherical Waves in Viscoelastic Media”, The Journal of the Acoustical Society of America, 36, 2402, 1964.
- [16] J.M. Perdigao
- [17] G. Nassar, F. Lefbvre, A. Skaf, J. Carlier, B. Nongaillard, Y. Noël, “Ultrasonic and acoustic investigation of cheese matrix at the beginning and the end of ripening period”,Journal of food Engeneiring, 96, 2010, 1-13.
- [18] James B. Mehl and Michael R. Moldover, “precision acoustic measurements with a spherical resonator: Ar and C₂H₄”, The Journal of Chemical Physics, Vol. 74, pp. 4062-4077, 1981.
- [19] M. G. He, Z. G. Liu and J. M. Yin, “Measurement of speed of sound with a spherical resonator: HCFC-22, HFC-152a, HFC-143a, and Propane”, Vol. 23, No. 6, 2002.
- [20] Arnaud GUILLOU, “Détermination de la constante de Boltzmann au plus haut niveau d’exactitude par spectroscopie acoustique dans un résonateur quasi sphérique”, École Doctorale du Conservatoire National des Arts et Métiers, 2012.
- [21] A. E. H LOVE, “On the small free vibrations and deformations of a thin elastic shell», philosophical transaction of the royal society, London 17, 491-546, 1888.
- [22] A. KALNINS, “Dynamic problems of elastic shells”, Applied mechanics reviews, 18, 867-872, 1965.

- [23] V. C. M De Souza and J. G. A Croll, “ An energy analysis of the free vibrations of isotropic spherical shells”, *Journal of sound and vibration*, 73 (3), 379-404, 1980.
- [24] Werner Soedel, “Vibrations of shells and plates”, *MECHANICAL ENGINEERING A Series of Textbooks and Reference Books*, 2004.
- [25] H. Lamb, “On the Vibrations of an Elastic Sphere”, *Proc. London Math. Soc*, Vol. 14, 1882.
- [26] Wilfred E. BAKER, “Axisymmetric Modes of Vibration of Thin Spherical Shell”, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.33, No. 12, 1961.
- [27] Kalnins A, “Effect of Bending on Vibrations of Spherical Shells”, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 36, No. 1, pp. 74–81, 1964.
- [28] Duffey, T.A and Romero, C., “Strain growth in spherical explosive chambers subjected to internal blast loading”, *International Journal of Impact Engineering* 28: 967–983, 2003.
- [29] Thomas A. Duffey, Jason E. Pepin, Amy N. Robertson, and Michael L. Steinzig, “VIBRATIONS OF COMPLETE SPHERICAL SHELLS WITH IMPERFECTIONS”, *International Modal Analysis Conference*, 2005.
- [30] Wilkinson J. P, “Natural Frequencies of Closed Spherical Shells”, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 38, No. 2, pp. 367–368, 1965.
- [31] McIvor IK and Sonstegard DA, “Axisymmetric response of a closed spherical shell to nearly uniform radial impulse”, *Journal of the Acoustical Society of America*, 40(6), pp. 1540-1547, 1966.
- [32] Q. Dong, Q.M. Li, J.Y. “Zheng, Further Study on Strain Growth in Spherical Containment Vessels Subjected to Internal Blast Loading”, *International Journal of Impact Engineering*, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2009.09.001, 2009.
- [33] Greenspan Martin & Carroll E. Tschiegg, “Speed of sound in water by a direct method, *ournal of research of the national bureau of standards*”, vol 59(4), 1957, 249 – 254.
- [34] Nassar G., Nongaillard B., Noel Y., “Study by ultrasound of the impact of technological parameters changes in the milk gelation process”, *J. Food Eng.*, 63, 2 (2004) 229-236.

Résumé

La caractérisation et l'étude de l'homogénéisation temps réel d'un mélange de produits liquides ou solides présente une opération clé pour de nombreux domaines industriels.

Dans le présent travail, nous proposons un modèle de capteur acoustique sphérique miniaturisé et autonome, adapté à des fonctions de caractérisations en ligne des milieux hétérogènes de différentes natures. Ce capteur a la possibilité d'être dispersé dans un système dynamique en constituant un réseau de capteurs géo-localisables permettant une cartographie des propriétés recherchées du milieu. Sa forme sphérique creuse nous offre la possibilité de loger une électronique programmable pour gérer son fonctionnement par unité ou dans un réseau de capteurs identifiés par codage.

D'un point de vue mécanique, le résonateur proposé est assemblé à partir de deux demi-sphères faites d'un matériau approprié (Plexiglas dans le cadre de notre étude), le capteur est mis en résonance à l'aide d'un élément piézo-électrique déposé entre les deux demi-sphères ayant la forme d'un anneau.

Après une validation expérimentale du système en adoptant le principe de la trilatération, une étude sur l'atténuation et la vitesse de propagation de l'onde acoustique a été effectuée dans différentes solutions à 35 °C; eau, glucose, huile de colza, lait, gel laitier et grain de caillé en suspension (différente taille).

Mots clés : Acoustique, homogénéité, Capteur Sphérique, Milieu hétérogène, Mode Vibratoire Sphérique, Trilatération.

Abstract

The characterization and the study of real-time homogenization of a mixture of liquid and solid products present a key operation for many industrial sectors.

In this work, we propose a model of spherical acoustic sensor miniaturized and autonomous adapted to different functions of characterization online of heterogeneous media of various kinds. This sensor has the ability to be dispersed in a dynamic system by creating a network of geo-localization for mapping desired properties of the medium. Its spherical hollow shape gives us the opportunity to accommodate a programmable electronic for managing its function as a unit or in a sensor network identified by coding.

From a mechanical point of view, the proposed resonator is assembled from two hemi-spheres made of a suitable material (Plexiglas in our study), the sensor is brought into resonance by using an element piezoelectric introduced between the two hemi-spheres having the shape of a ring.

After an experimental validation of the system by adopting the principle of trilateration, a mitigation study and propagation velocity of the acoustic wave was performed in different solutions at 35 °C; water, glucose, rapeseed oil, milk, dairy and grain curd gel suspension (different sizes).

Key words°: Acoustic, Homogeneity, Sensor Spherical, Heterogeneous Medium, Spherical Vibrational Mode, Trilateration.