

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie mécanique

Utilisation de la lévitation acoustique pour la concentration de pulpe de papier

Mémoire de maîtrise
Spécialité : Génie mécanique

Romain LE MAGUERESSE

Sherbrooke (Québec) Canada
Juillet 2020

MEMBRES DU JURY

Nicolas QUAEGEBEUR

Directeur

Patrice MASSON

Examineur

Sébastien PONCET

Rapporteur

RÉSUMÉ

Dans les usines de pâte et papier, des techniques mécaniques sont utilisées pour éliminer les suspensions solides accumulées et concentrer la pulpe de papier. Pour des raisons environnementales et dans le but d'optimiser la fabrication de papier, l'enjeu est aujourd'hui de développer une nouvelle méthode pour filtrer les solides ou fibres du flux d'eau. L'idée de départ porte ainsi sur l'utilisation de la lévitation acoustique qui permet la suspension de particules de matière dans un milieu en utilisant la pression de rayonnement d'une onde acoustique. La force acoustique de rayonnement provenant du champ ultrasonore couplée à la force de traînée permettent alors de faire migrer les solides et de les séparer du flux d'eau.

L'objectif est ainsi, en s'appuyant sur les connaissances actuelles en lévitation acoustique, de déterminer les conditions opératoires optimales pour le déploiement d'un procédé industriel de concentration de pulpe par méthode ultrasonore. Ainsi, un état de l'art à partir de travaux existants est réalisé dans un premier temps. Des applications de lévitation acoustique dans différents milieux sont notamment étudiées. De plus, les caractéristiques des flux de pulpe sont mises en avant. Les transducteurs de puissance créant l'onde ultrasonore sont aussi analysés. Ensuite différentes expériences préliminaires pour un cas de pulpe stationnaire sont réalisées afin de valider l'utilisation de la lévitation acoustique pour la concentration de pulpe de papier. Différents paramètres et conditions sont ainsi identifiés. Un modèle numérique de lévitation acoustique en présence d'un flux de pulpe de papier est alors développé afin de réaliser une étude visant à optimiser les paramètres et conditions mis en avant expérimentalement. Ce modèle 2D axisymétrique se base sur des modèles existants de lévitation acoustique en milieu micro fluidique. A la suite de cette étude numérique un ensemble de paramètres permettant la concentration de la pulpe de papier est obtenu. Des estimations de performance sont aussi réalisées. Un prototype, conçu à partir d'un anneau de transducteurs agissant sur les particules en les concentrant au centre du flux de pulpe, est alors développé. Une série de tests à l'échelle industrielle est enfin réalisée pour expérimenter ce prototype.

Mots clés :

Lévitation acoustique – Séparation acoustique – Onde ultrasonore - Transducteur de puissance – Industrie des pâtes et papiers – Flux de fibres en suspension – Concentration de pulpe de papier

REMERCIEMENTS

Premièrement, j'aimerais remercier Nicolas Quaegebeur pour m'avoir offert l'opportunité de travailler sur ce beau projet. Je souhaite le remercier pour la confiance qu'il m'a accordé tout au long du projet ainsi que pour ses conseils et sa disponibilité. J'ai appris énormément à ses côtés. Merci Nicolas !

Ensuite, je souhaite remercier toutes les personnes de VALMET qui ont suivi l'évolution du projet. Ainsi, je remercie tout particulièrement Rob Schiavi et Pierre Gélinas pour leur encadrement et le temps qu'ils ont accordés à ce projet. Je remercie aussi Michel Normandin, Sylvain Allard et Adam Roy pour leurs aides précieuses au moment de la conception et de l'expérimentation du prototype.

De plus, je remercie toute l'équipe du GAUS et particulièrement mes collègues du groupe ultrason. J'ai découvert avec vous l'acoustique et la recherche mais j'ai surtout apprécié travailler dans un laboratoire où la bonne humeur règne. Je veux aussi dire merci à Tamara Krpic, pour son aide au début du projet, et à Patrick Lévesque pour ses services.

Enfin, je veux remercier ma famille pour leur soutien et leur encouragement dans cette belle aventure au Québec. Merci aussi à tous les amis qui ont permis pendant ces deux années à Sherbrooke pleins de moments inoubliables !

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	II
REMERCIEMENTS	III
TABLE DES MATIÈRES	IV
LISTE DES FIGURES	VII
LISTE DES TABLEAUX	IX
CHAPITRE 1	10
1. INTRODUCTION	10
1.1. Mise en contexte	10
1.2. Question de recherche	10
1.3. Objectifs du projet de recherche	10
1.4. Contributions originales.....	11
1.5. Plan du document.....	11
CHAPITRE 2	12
2. ÉTAT DE L'ART	12
2.1. Le procédé de concentration de la pulpe	12
2.1.1. Techniques actuelles et besoin ressenti.....	12
2.1.2. Paramètres et contraintes industriels	13
2.2. La lévitation acoustique pour la séparation de particules	15
2.2.1. Utilisation des ultrasons	15
2.2.2. Applications de la lévitation acoustique.....	18
2.2.3. La lévitation acoustique pour la pulpe	19
2.3. Les transducteurs de puissance ultrasonores.....	24
2.3.1. Le principe	24
2.3.2. Le modèle électrique du transducteur	26
2.3.3. La conception du transducteur	29
2.3.4. Propriétés acoustiques des transducteurs	32
2.4. Bilan de l'état de l'art	33
CHAPITRE 3	34
3. EXPÉRIMENTATIONS PRÉLIMINAIRES DE LÉVITATION ACOUSTIQUE	34
3.1. Conception et réalisation de l'enceinte expérimentale.....	34
3.2. Développement de transducteurs	36
3.2.1. Objectif	36

3.2.2. Critères de conception	36
3.2.3. Fabrication et validation des performances électriques et vibratoires.....	38
3.3. Mise en œuvre expérimentale.....	39
3.3.1. Transducteurs utilisés.....	39
3.3.2. Installation des transducteurs	40
3.3.3. Électronique de puissance.....	41
3.3.4. Visualisation	41
3.4. Expériences réalisées.....	42
3.4.1. Configuration testée.....	42
3.4.2. Création d'une onde stationnaire	43
3.4.3. Utilisation de la force de trainée	45
3.5. Conclusion des tests préliminaires	50
CHAPITRE 4	51
4. NUMERICAL MODELING OF ACOUSTOPHORESIS FOR PAPER PULP CONCENTRATION	51
4.1. Avant-propos	51
4.2. Résumé de l'article	52
4.3. Abstract.....	53
4.4. Introduction	54
4.5. Modeling acoustophoresis in a pulp flow.....	55
4.5.1. Pulp flow model ($\mathbf{u0}, p0, \rho0$)	56
4.5.2. First order terms ($\mathbf{u1}, p1, \rho1$)	57
4.5.3. Second order terms ($\mathbf{u2}, p2, \rho2$)	58
4.5.4. Forces in action	59
4.6. Numerical implementation of the model	60
4.6.1. Simulation parameters	60
4.6.2. Numerical implementation	61
4.7. Numerical Results	62
4.7.1. Reference configuration.....	62
4.7.2. Influence of the acoustic parameters.....	66
4.7.3. Influence of the particle and flow properties.....	70
4.7.4. Feasibility of acoustophoresis for pulp concentration	72
4.8. Conclusion.....	75
4.9. Acknowledgements	76
CHAPITRE 5	77
5. DÉVELOPPEMENT D'UN CONCEPT INDUSTRIEL.....	77
5.1. Conception du système	77
5.1.1. Cahier des charges.....	77
5.1.2. Transducteurs utilisés.....	78
5.2. Prototype réalisé	80
5.2.1. Adaptation des transducteurs/ chambre des transducteurs	80
5.2.2. Mécanisme de séparation des deux flux	81
5.2.3. Circuit total.....	82
5.3. Validation des performances de la chambre des transducteurs	83

5.3.1. Performances vibratoires	83
5.3.2. Utilisation pour un cas statique.....	84
5.4. Essais réalisés.....	87
5.4.1. Description du montage industriel	87
5.4.2. Configurations testées.....	88
5.4.3. Résultats / Discussion	89
5.5. Conclusion.....	90
CHAPITRE 6	91
CONCLUSION.....	91
LISTE DES RÉFÉRENCES	92
ANNEXE A	96
ANNEXE B.....	97
ANNEXE C.....	99

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Procédé de fabrication de la pulpe de papier	12
Figure 2.2	Dessin d'une presse de lavage - VALMET Technologies.....	13
Figure 2.3	Perte de charge d'un flux de pulpe (gauche); régimes d'un flux de pulpe (droite)	14
Figure 2.4	Illustration de la particule cylindrique [10]	16
Figure 2.5	Principe de séparation des particules en champ stationnaire [12].....	17
Figure 2.6	Transducteur émettant une onde stationnaire [14]	17
Figure 2.7	Illustrations de lévitations acoustiques dans l'air	18
Figure 2.8	Schématisation de la séparation de particules dans un fluide [19]	19
Figure 2.9	Schématisation de la fibre soumise au champ acoustique	20
Figure 2.10	Schématisation du concept de Brodeur [13].....	20
Figure 2.11	Schématisation de l'installation réalisé par Brodeur [22]	21
Figure 2.12	Déflexion des fibres selon le modèle analytique [22]	22
Figure 2.13	Image de la technologie développée à grande échelle [27]	24
Figure 2.14	Transducteur Langevin vendu par American Piezo [28].....	25
Figure 2.15	Modèle de vibration forcée d'une masse [29]	25
Figure 2.16	Modèle de vibration longitudinale d'une poutre [29]	26
Figure 2.17	Modèle électrique du transducteur	28
Figure 2.18	Impédance d'un transducteur [35]	29
Figure 2.19	Parties indispensables au transducteur Langevin [36].....	29
Figure 2.20	Structures de transducteurs proposés par Gallego [29] [40]	31
Figure 2.21	Simulation numérique des modes de flexion d'un transducteur [43]	31
Figure 2.22	Schématisation de la tête supérieure du transducteur.....	32
Figure 3.1	Schématisation de l'enceinte expérimentale.....	35
Figure 3.2	Enceinte expérimentale finale sous différents angles	35
Figure 3.3	Géométrie du transducteur avec ses dimensions caractéristiques	36
Figure 3.4	Déformée modale à 150 kHz (à gauche) et déplacement absolu du transducteur (à droite) 37	
Figure 3.5	Admittance du transducteur : simulation (à gauche) et réalité (à droite)	38
Figure 3.6	Vitesse absolue mesurée en surface du transducteur	39
Figure 3.7	Transducteurs adaptés (à gauche) et montage dans l'aquarium (à droite).....	40
Figure 3.8	Transducteur à 150 kHz adapté.....	41
Figure 3.9	Schéma du montage électronique de puissance.....	41
Figure 3.10	Montage final avec la caméra (à gauche) et le tunnel d'observation (à droite)	42
Figure 3.11	Schématisation de l'onde stationnaire.....	43
Figure 3.12	Image du regroupement des fibres.....	44
Figure 3.13	Schématisation de la recirculation des fibres	44
Figure 3.14	Les différentes étapes du processus : (1) Situation initiale; (2) Début de la recirculation causée par l'excitation du transducteur; (3) Accumulation de fibres à la surface; (4) Évacuation des fibres bloquées à la surface; temps t_p mesuré; (5) Situation finale	46
Figure 3.15	Situation pour une pulpe de 1% à $t = 0 s$, à $t = t_p = 80 s$ et à $t = 300 s$	48
Figure 4.1	Schematics of the pulp concentration using acoustophoresis.....	55

Figure 4.2	Details of the boundary layer used for computation of the first and second order terms	62
Figure 4.3	a) Pressure field p_1 , b) Radial velocity u_1 , c) Axial velocity w_1 , d) Pressure field p_2 , e) Radial velocity u_2 and f) Axial velocity w_2	63
Figure 4.4	a) Surface radial acoustic radiation force; b) Radial acoustic radiation force for $z=L/2$; c) Surface radial drag force ; d) Radial drag force for $z=L/2$	65
Figure 4.5	Pressure field p_1 (top); Radial radiation force (middle); Radial drag force (bottom).....	67
Figure 4.6	Influence of the transducer frequency on the radial drag (left) and radiation (right) forces	68
Figure 4.7	Influence of the transducer width on the radial drag (left) and radiation (right) forces	69
Figure 4.8	Influence of the transducer velocity on the radial drag (left) and radiation (right) forces.	70
Figure 4.9	Evolution of the pulp flow velocity magnitude (left) and the radial drag force (right) with respect to the pulp flow.	71
Figure 4.10	Evolution of the pulp flow velocity magnitude (left) and the radial drag force (right) with respect to the pulp consistency.	72
Figure 4.11	Initial axial particle velocity (left) and radial particle velocity (right).....	73
Figure 4.12	Evolution of the particle position and radial velocity over time between 0 and 5 s.....	74
Figure 4.13	Particle deviation with respect to the radial position	75
Figure 5.1	Admittance du transducteur à 200 kHz : partie réelle (haut) et imaginaire (bas)	79
Figure 5.2	Vitesse absolue mesurée en surface du transducteur	79
Figure 5.3	Dessins de la chambre des transducteurs : vue isométrique et vue coupée	80
Figure 5.4	Images de la chambre des transducteurs.....	81
Figure 5.5	Dessin de la séparation des deux flux	81
Figure 5.6	Image du coude (à gauche) et du tuyau intérieur noté 5 sur la Fig.5.3 (à droite)	82
Figure 5.7	Schématisation du circuit hydraulique final.....	82
Figure 5.8	Chambre des transducteurs après câblage	83
Figure 5.9	Admittance d'une rangée de transducteurs: partie réelle (haut) et imaginaire (bas).....	84
Figure 5.10	Chambre des transducteurs pour les essais en statique.....	85
Figure 5.11	Situations initiale, intermédiaire à $t = 10$ s et finale à $t = 30$ s pour une pulpe à 1.5%..	85
Figure 5.12	Situation initiale et finale à $t = 40$ s pour une pulpe à 2.5%	86
Figure 5.13	Montage réalisé à VALMET Trois-Rivières.....	87
Figure 5.14	Prototype fixé sur la structure.....	87
Figure 5.15	Situation causant l'inefficacité du concept	89

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Données utilisées pour estimer la force acoustique de rayonnement	21
Tableau 2.2	Détermination des modes de vibration 31 et 33 [30]	27
Tableau 3.1	Transducteurs testés lors des expériences	40
Tableau 3.2	Caractéristiques des deux pulpes utilisées.....	43
Tableau 3.3	Temps moyen t_p nécessaire pour pousser la pulpe	47
Tableau 3.4	Temps moyen t_p nécessaire en fonction de la fréquence choisie.....	49
Tableau 3.5	Temps moyen t_p nécessaire en fonction de la puissance électrique	49
Table 4.1	Definition of the terms ϕ , $\Gamma\phi$ and $S\phi$ in the general expression of Eq.4.2	56
Table 4.2	AKN model functions.....	57
Table 4.3	Parameters for the domain, particles and fluid	60
Table 4.4	Parameters selected to test particle deflection	73
Tableau 5.1	Caractéristiques des transducteurs utilisés pour le système	78
Tableau 5.2	Paramètres de références pour les expériences.....	88
Tableau 5.3	Configurations testées à Trois-Rivières	88

CHAPITRE 1

1. INTRODUCTION

1.1. Mise en contexte

L'industrie des pâtes et papiers est aujourd'hui soumise à de nouvelles réglementations environnementales et écologiques. En effet, cette industrie est l'une des plus énergivores au Canada, puisque 30% de l'énergie industrielle consommée au Canada est utilisée par l'industrie des pâtes et papiers [1]. Dans cette optique, l'industrie des pâtes et papiers cherche à inventer de nouveaux concepts permettant la réduction des besoins en énergie et ainsi l'optimisation du procédé de fabrication du papier. Ce projet s'insère dans cet objectif.

L'entreprise partenaire du projet, VALMET Technologies, a pour but d'utiliser une nouvelle technologie et de l'implanter dans ses machines de production des pâtes et papiers. Ce projet reprend la suite des travaux de H. Brodeur, professeur à l'Université GeorgiaTech, réalisés il y a maintenant près de 20 ans avec cette même entreprise : l'utilisation des ondes ultrasonores pour la concentration et la séparation de la pulpe de papier. La base du projet est ainsi l'utilisation de la lévitation acoustique. La lévitation acoustique est le fait de suspendre dans un milieu des particules de matière en utilisant la pression de rayonnement d'une onde acoustique. Ce procédé de lévitation est connu depuis un certain moment. Quelques applications ont d'ailleurs déjà été développées dans l'air ou encore dans des milieux fluidiques à l'échelle micrométrique. L'enjeu du projet est donc d'appliquer cette méthode à l'échelle industrielle pour la concentration de pulpe de papier.

1.2. Question de recherche

Ainsi notre question de recherche de recherche est définie:

Est-il possible de concevoir un nouveau procédé de concentration de pulpe à l'aide des ondes ultrasonores dans l'industrie des pâtes et papiers ?

1.3. Objectifs du projet de recherche

L'objectif principal de ce projet est donc de déterminer les conditions opératoires optimales pour le déploiement d'un procédé industriel de concentration de pulpe par méthode ultrasonore. Ce procédé sera ultimement intégré directement dans la chaîne de production de la pulpe afin de permettre la concentration de pulpe de 3% à 6%.

Afin de mener à bien ce projet, des objectifs secondaires sont nécessaires :

- Identifier les conditions optimales pour permettre la concentration de la pulpe de papier à l'aide d'ondes ultrasonores;
- Développer un modèle numérique de lévitation acoustique en présence d'un flux de pulpe de papier;
- Étudier/ Optimiser les transducteurs de puissance pour notre utilisation;
- Concevoir un système industriel permettant la concentration de la pulpe de papier grâce aux ondes ultrasonores;
- Tester à l'échelle industrielle l'utilisation de la lévitation acoustique.

1.4. Contributions originales

Les travaux réalisés dans le cadre de ce projet contribuent au développement d'une nouvelle méthode de concentration de la pulpe de papier. L'utilisation de la lévitation acoustique dans cet objectif n'est pas une nouveauté, mais l'insertion de cette technologie à l'échelle industrielle en est une. En effet, Brodeur n'a pas pu développer un procédé efficace pour l'industrie. Ainsi, cet apport scientifique s'articule autour des trois contributions suivantes:

- Une modélisation numérique de lévitation acoustique dans un flux de pulpe en mouvement;
- Une étude des paramètres permettant la concentration par méthode ultrasonore avec une validation des paramètres par une comparaison simulations/expériences;
- Le développement d'un dispositif expérimental de lévitation acoustique pour concentrer la pulpe de papier.

1.5. Plan du document

Ce mémoire est divisé en plusieurs parties. Dans le chapitre 2, l'état des connaissances sur les procédés actuels de concentration de pulpe puis sur la lévitation acoustique, ses applications et la formation de l'onde ultrasonore avec les transducteurs de puissance est présenté. A la suite, des expérimentations préliminaires sont proposées dans le chapitre 3, en utilisant la lévitation acoustique pour la pulpe de papier dans un cas stationnaire. Les travaux de Brodeur sont ainsi validés tout en essayant différentes configurations. Puis, dans le chapitre 4, la modélisation numérique de la lévitation acoustique pour un écoulement de pâte à papier dans un tuyau est abordée. Une étude paramétrique est ainsi effectuée en analysant l'influence du transducteur et du flux de pulpe, permettant d'aboutir à une configuration où la déviation des particules et le gain de concentration sont quantifiés. Le chapitre 5 est dédié à la conception et aux essais du concept industriel découlant des simulations numériques.

CHAPITRE 2

2. ÉTAT DE L'ART

2.1. Le procédé de concentration de la pulpe

2.1.1. Techniques actuelles et besoin ressenti

Il y a différentes étapes indispensables à la fabrication de la pulpe. De plus, il existe plusieurs procédés de fabrication de pulpe (mécanique, semi-mécanique, chimique). On se concentre ici sur une pulpe de papier obtenue chimiquement selon le procédé de la figure 2.1.

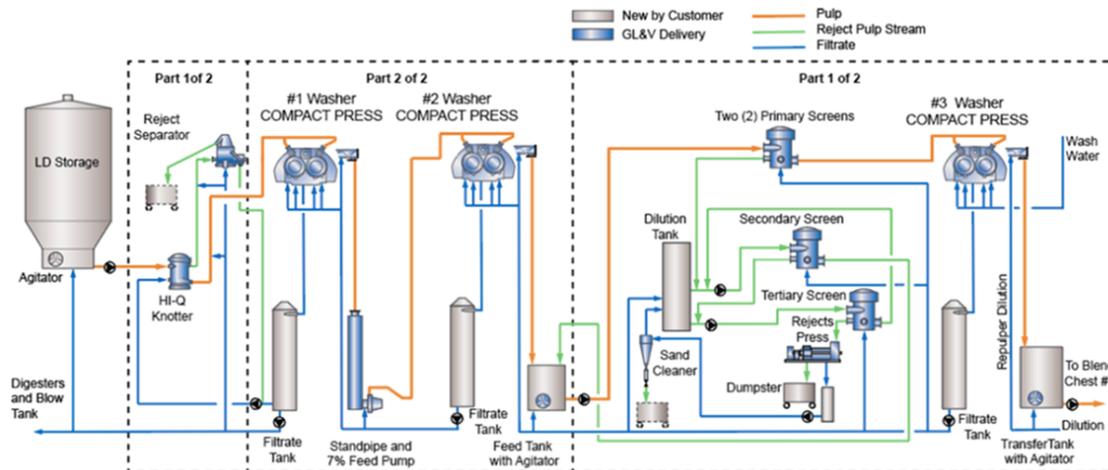


Figure 2.1 Procédé de fabrication de la pulpe de papier

La nouvelle technologie envisagée pourrait s'inscrire à terme à toutes les étapes où la pulpe doit être séparée. Cependant, nous allons axer nos recherches afin de développer un procédé utilisable entre l'étape de tamisage et l'étape de lavage de la pulpe. En effet, un besoin pour concentrer la pulpe se fait ressentir ici.

Le tamisage (knotter) de la pulpe, présenté sur la partie gauche de la figure 2.1, est une étape qui permet de séparer à l'aide de tamis tous les résidus du bois qui ne sont pas les fibres de cellulose : nœuds ou débris. Ceci donne suite à la préparation initiale de la pulpe dans le réservoir noté *LD Storage* sur la figure 2.1. A la suite de cette étape, on obtient une pulpe ayant une consistance de 3 à 4 %.

Néanmoins, cette pulpe obtenue est toujours mélangée aux produits de cuisson. Il est nécessaire de la nettoyer et de récupérer seulement les fibres de cellulose. Pour ce faire, trois à cinq lavages sont nécessaires. Sur la figure 2.1, on observe trois presses de lavage. A chaque lavage, la pâte

est de nouveau diluée avec de l'eau puis à nouveau essorée pour obtenir la consistance souhaitée. Ces étapes sont effectuées par des presses de lavage, illustrées sur la figure 2.2.

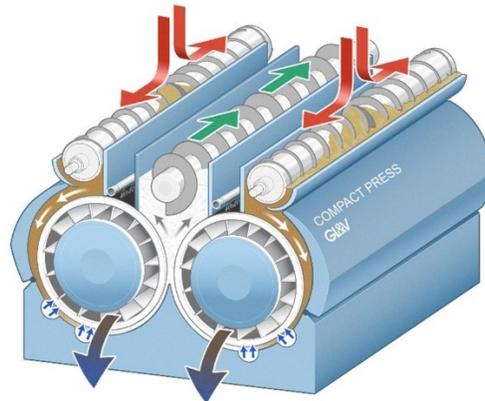


Figure 2.2 Dessin d'une presse de lavage - VALMET Technologies

Cette presse est utilisable à partir d'un flux de pulpe entrant ayant une consistance comprise entre 3 et 10 %. La consistance optimale d'entrée est de 6 %. En sortie de cette presse de lavage la consistance finale est de 30 à 32 %. Ensuite la pulpe est à nouveau diluée pour aller vers l'autre presse de lavage.

L'objectif serait donc de permettre de concentrer la pulpe de 3 % à 6 % entre l'étape de tamisage et la première presse de lavage. Il n'y a aucun moyen actuellement d'augmenter la consistance entre ces deux étapes. La presse pourrait donc travailler sur une plage de consistance bien connue. Il serait alors possible d'avoir une première presse de plus petite taille ce qui est non négligeable à la vue de l'énergie nécessaire pour laver et essorer la pulpe.

2.1.2. Paramètres et contraintes industriels

De multiples contraintes industrielles existent pour la fabrication de pulpe. Ces paramètres seront à prendre en compte dans le but de développer notre concept industriel.

Caractéristiques du flux de pulpe

Il est tout d'abord nécessaire de savoir caractériser le flux de pulpe. En effet, l'objectif final est d'agir sur celui-ci à l'aide de notre futur système.

Le flux de pulpe/fibre en suspension dans un tuyau est défini par trois régimes. Pour illustrer ces propos on utilise la figure 2.3. La chute de pression est tracée en fonction de la vitesse du flux.

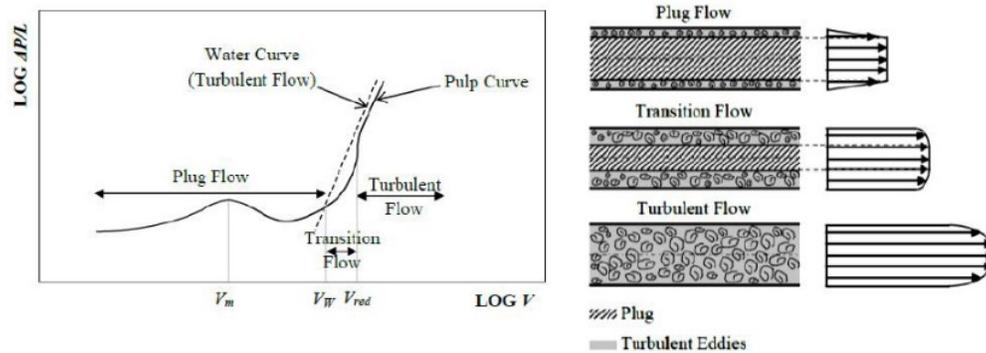


Figure 2.3 Perte de charge d'un flux de pulpe (gauche); régimes d'un flux de pulpe (droite)

A faible vitesse, le flux s'écoule sous la forme d'un bouchon de fibres. Le cisaillement a lieu dans une couche limite le long de la paroi. Le profil de vitesse est similaire à celui d'un écoulement uniforme avec une couche limite. La chute de pression est très importante dans ce cas et atteint un maximum pour la vitesse V_M . Ensuite il y a la zone de transition où le bouchon central est entouré par un anneau où le mélange fibre/eau est en régime turbulent. A haute vitesse, le fluide entier a un régime turbulent. La chute de pression est alors toujours inférieure à celle présente pour un écoulement d'eau dans un tuyau à même débit.

Des modèles pour différents types de pulpe ont été développés ces dernières années grâce à la modélisation numérique par éléments finis. Ainsi il est possible de connaître la loi de perte de charge pour le type de pulpe utilisé. La loi dépend alors de la concentration de la pulpe, de la vitesse moyenne du fluide, du diamètre du tuyau et de constantes déterminées de façon empirique [2].

De plus, la pulpe de papier est considérée comme un fluide non Newtonien. La viscosité n'est pas une constante et dépend de différents paramètres. Un premier modèle est de considérer la viscosité du flux de pulpe comme le rapport entre la contrainte et le taux de cisaillement [3]. Un modèle plus complet a ensuite été validé par Cotas [4]. Ce modèle prend en compte la concentration de la pulpe et le taux de cisaillement. Cette loi empirique a été validée expérimentalement pour deux types de pulpe : pulpe d'eucalyptus et pulpe de pin. Le flux de pulpe est ainsi modélisé comme un flux turbulent avec un modèle $k - \epsilon$ [5] ou différents formalismes $Low Re k - \epsilon$ [6], [7]. Le formalisme $Low Re k - \epsilon$ est plus complet que le modèle $k - \epsilon$. En effet, il est possible de modéliser complètement le fluide avec le modèle $Low Re k - \epsilon$. Les couches limites aux parois sont modélisées, dans ce cas, avec un maillage de haute résolution, contrairement au modèle $k - \epsilon$ où une approximation est réalisée pouvant entraîner une vitesse de fluide non nulle aux parois.

Consistance de la pulpe

La consistance de la pulpe est le paramètre qui crée ce besoin d'amélioration du procédé. On définit la consistance de la pulpe comme le rapport de la masse de solide sur la masse totale de la pulpe :

$$\text{Consistance} = \frac{m_{\text{solide}}}{m_{\text{totale}}} * 100 \quad (2.1)$$

Le terme concentration massique peut aussi s'employer pour parler de la consistance de la pulpe. Dans la suite, les deux termes seront utilisés.

Taille de la pulpe

Les particules de pulpe sont des fibres de cellulose de forme cylindrique dont la longueur typique est de 1 à 6 mm et de diamètre 5 à 30 μm . [8]

Débit

Le flux entrant est aussi important. Dans une industrie de fabrication de pulpe une presse de lavage nettoie journalièrement 2000 tonnes de pulpe.

Température

Les températures de fonctionnement évoluent autour de 50-60°C.

Agressivité du milieu

Le milieu est un milieu fortement agressif. En effet de multiples substances chimiques sont présentes dans le flux de pulpe à ce moment de la production. Selon le procédé utilisé, le milieu peut être fortement acide (pH 1.5-5 pour le procédé au sulfite) ou fortement basique (pH 13-14 pour le procédé Kraft) [9]. En conséquence, l'acier inoxydable sera utilisé dans les technologies proposées par la suite du projet.

2.2. La lévitation acoustique pour la séparation de particules

2.2.1. Utilisation des ultrasons

Principe général

La lévitation acoustique permet de suspendre dans un milieu des particules de matière en utilisant la pression de rayonnement d'onde acoustique.

On considère une particule cylindrique rigide de rayon a très inférieur à la longueur d'onde incidente λ et de longueur unitaire.

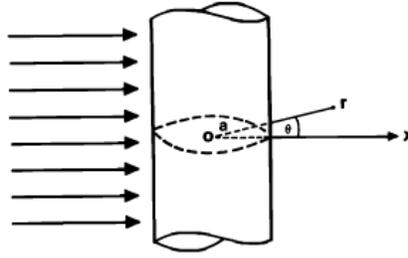


Figure 2.4 Illustration de la particule cylindrique [10]

On peut estimer dans ce cas la force de rayonnement nécessaire pour faire léviter une particule cylindrique rigide, dessinée sur la figure 2.4.

$$F = - \left\langle \int_S (p - p_0) \cos\theta \, ds \right\rangle \quad (2.2)$$

avec p : la pression dans le champ acoustique, p_0 : la pression statique

En considérant p d'après le modèle utilisé par King [11] on obtient la force de rayonnement requise:

$$F = \left\langle \int_S \left(\rho_0 \phi + \frac{1}{2} \left(\frac{\rho_0}{c^2} \right) \phi^2 - \frac{1}{2} \rho_0 q^2 \right) \cos\theta \, ds \right\rangle \quad (2.3)$$

avec : ϕ : le potentiel de vitesse, q le vecteur de vitesse tel que $q^2 = u^2 + v^2 + w^2$ avec u, v, w les composantes radiale, orthoradiale et axiale; et c : la vitesse du son dans le milieu. On considère ici une moyenne temporelle sur un nombre de cycle $\langle \ \rangle$.

Utilisation d'une onde stationnaire

La première méthode se base sur l'utilisation des ondes stationnaires. Les particules en suspension sont exposées au champ acoustique des ondes stationnaires. On peut exprimer le champ de pression acoustique sous cette forme :

$$p(x) = P_a \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) \quad (2.4)$$

Les nœuds de pression sont des multiples de la demie-longueur d'onde λ tels que $x = \frac{n\lambda}{2}$, $n \in [1,3,5 \dots]$. Ainsi comme expliqué sur la figure 2.5, le flux incident laminaire de particules, noté LF, peut être divisé en différents flux de particules, noté FS, grâce à cette technique utilisant l'onde stationnaire.

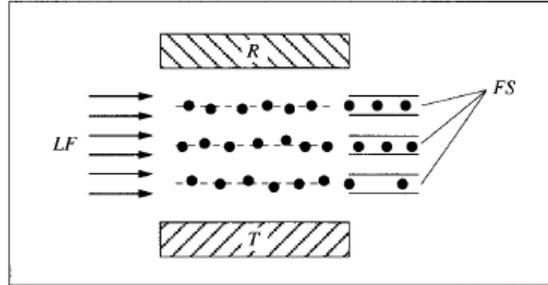


Figure 2.5 Principe de séparation des particules en champ stationnaire [12]

Wu et al. [10] obtiennent en reprenant la force acoustique de rayonnement générale et en l'appliquant pour une onde stationnaire la formulation de l'équation 2.5 que Brodeur [13] utilise dans ses recherches. Ainsi la force acoustique de rayonnement pour une unité de longueur sur un cylindre de rayon a dont l'axe est normal à l'onde stationnaire vaut :

$$F = \frac{f(\beta)\pi a^2}{2} E k \sin(2kh) \quad (2.5)$$

avec $f(\beta) = \left(\frac{2(1-\beta)}{1+\beta} + 1 \right)$ le facteur d'inertie ; $\beta = \rho_0/\rho_1$ le rapport entre les masses volumiques du milieu et celle du cylindre en suspension ; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$; λ : la longueur d'onde acoustique ; $E = \frac{(p_0 \setminus c)^2}{2\rho_0}$ la densité moyenne d'énergie ; p_0 la pression statique et h la position de la particule par rapport à un nœud de vitesse.

Le rayon de la particule est donc un facteur important pour la lévitation. La force obtenue ci-dessus n'est valable que si $a \ll \lambda$.

La force est donc maximale lorsque la particule se trouve à mi-distance entre un nœud et un ventre de vitesse. Cette force attire la particule au ventre de vitesse. Ce ventre de vitesse correspond à un nœud de pression. C'est donc bien au nœud de pression multiple de $\frac{\lambda}{2}$ que les particules sont attirées comme illustré sur la figure 2.6.

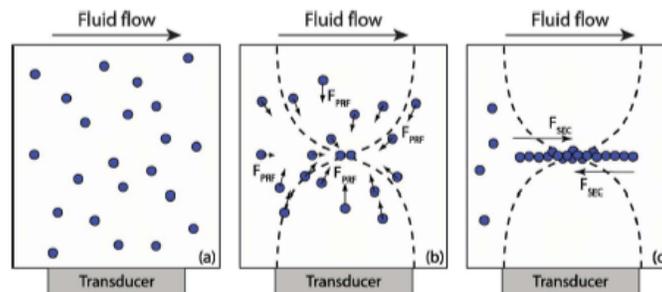


Figure 2.6 Transducteur émettant une onde stationnaire [14]

Utilisation d'une onde transitoire

La méthode consiste dans ce cas à pousser la particule avec une source acoustique transitoire.

Dans cette situation la formulation générale de l'équation (2.2) est valable. La pression du champ acoustique p est fonction du caractère de l'impulsion incidente.

2.2.2. Applications de la lévitation acoustique

Il existe plusieurs concepts appliqués de lévitation acoustique.

Lévitation acoustique dans l'air

C'est l'application à laquelle on pense tout de suite lorsque l'on parle de lévitation acoustique. De nombreux chercheurs ont travaillé sur la lévitation de multiples particules : goutte d'eau, balle de polystyrène et même des insectes, comme le montre les illustrations de la figure 2.7 [15]–[18]. Cependant, la lévitation acoustique dans l'air n'a pas encore d'utilisation à grande échelle. En effet, on ne peut, pour l'instant, faire léviter dans l'air que des objets de faible densité et de très petite taille ce qui n'est pas d'un grand intérêt.

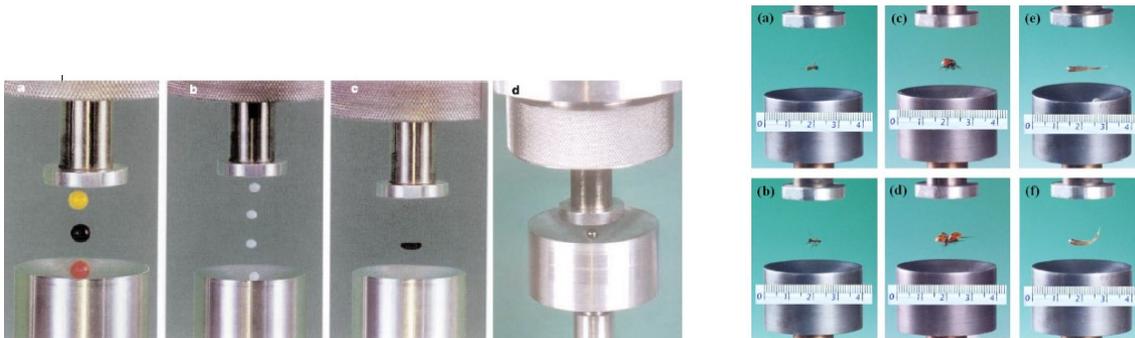


Figure 2.7 Illustrations de lévitations acoustiques dans l'air

Lévitation acoustique dans un fluide

La lévitation acoustique est aussi utilisée pour la séparation de particules dans des systèmes microfluidiques. Quelques applications ont été développées notamment en microbiologie. [19], [20]. Pour ce type de système, une deuxième force entre en jeu due à la viscosité du fluide: la force de traînée induite par le flux acoustique. Ainsi la force acoustique de rayonnement combinée à la force de traînée entraîne le mouvement des particules. Celui-ci dépend alors de plusieurs paramètres : le diamètre des particules, la géométrie du domaine ou encore la viscosité du fluide [21]. Ainsi, il est possible de choisir la force qui prédomine, et ainsi, de déterminer la trajectoire des particules. Si la force acoustique de rayonnement prédomine, les particules se concentrent au nœuds de vibrations. A l'inverse si la force de traînée prédomine, les particules sont poussées

grâce au flux acoustique. Bruus et Muller [21], dans un modèle numérique, étudient les spécificités de la lévitation acoustique en milieux micro fluidique.

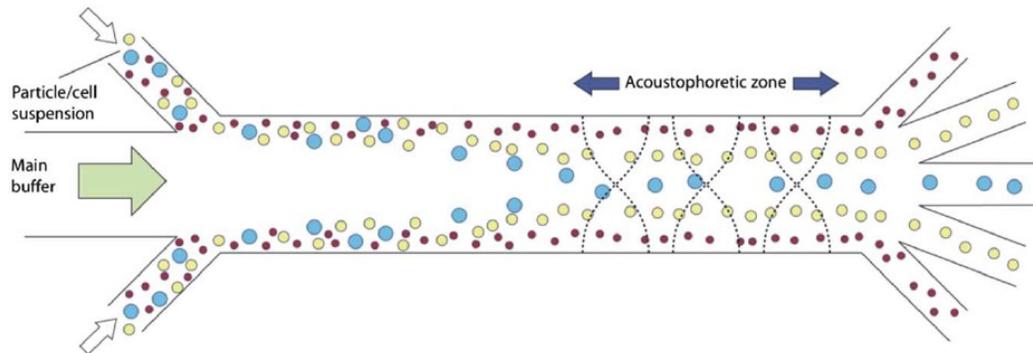


Figure 2.8 Schématisation de la séparation de particules dans un fluide [19]

Sur la figure 2.8, la lévitation acoustique est utilisée pour séparer en plusieurs flux les particules d'un fluide incident. Chaque particule, selon sa taille, est attirée dans une zone spécifique de l'onde stationnaire. Ainsi, il est possible de séparer et de trier des cellules ou des particules selon leur taille.

2.2.3. La lévitation acoustique pour la pulpe

Dans cette partie, on se concentre maintenant sur la séparation des particules qui concernent le projet, à savoir la pulpe de papier.

La séparation de la pulpe dans l'eau a été étudiée par Brodeur [13], [22], [23] il y a déjà plusieurs années. Au fil de ses recherches, Brodeur a testé différentes techniques de séparation et de concentration de la pulpe de papier.

Par onde stationnaire

La première méthode [13] utilise une onde stationnaire comme décrit à la section 2.2.1. On se rapproche dans ce cas de l'utilisation actuelle de la lévitation acoustique dans un fluide présenté précédemment. Il place un transducteur et un réflecteur en vis-à-vis. Ainsi, il crée une onde stationnaire.

Brodeur utilise ici ses recherches passées sur les mouvements des fibres en suspension dans un fluide [24], [25]. La figure 2.9 présente une fibre cylindrique soumise à un champ stationnaire.

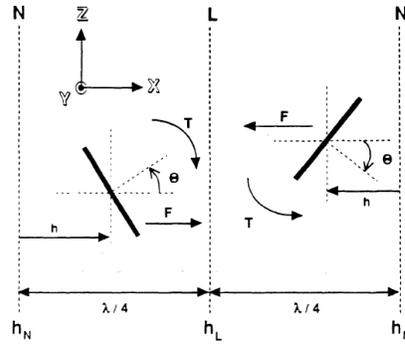


Figure 2.9 Schématisation de la fibre soumise au champ acoustique

Il exprime l'équation du mouvement d'une fibre cylindrique dans un champ stationnaire en et obtient l'expression de la vitesse angulaire de réorientation de la fibre :

$$\omega(\theta) = -B E \left(\frac{a}{l}\right)^2 \sin(2\theta) \sin^2(kh) \quad (2.6)$$

avec B une constante, l : la longueur de la fibre

Plus le rapport entre le rayon de la fibre et la longueur est important et plus la vitesse de rotation de la fibre vers son point d'équilibre est importante. Avec cette technique, Brodeur montre qu'il est aussi possible de trier la pulpe selon sa taille. Les fibres les plus longues ont plus tendance à être attirées vers les nœuds de pression, comme observé sur la figure 2.10.

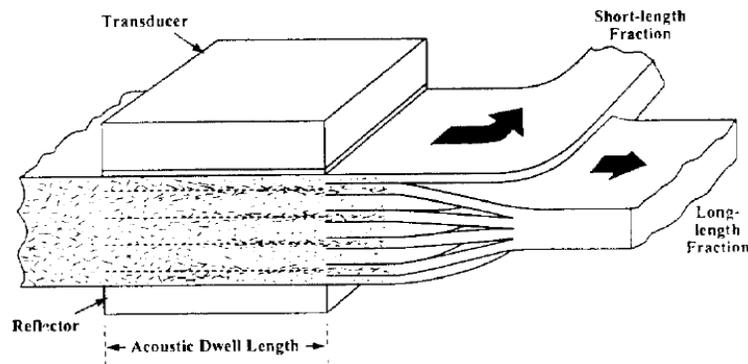


Figure 2.10 Schématisation du concept de Brodeur [13]

On peut estimer un ordre de grandeur pour la force acoustique de rayonnement nécessaire à partir de l'équation (2.5) et des valeurs du tableau 2.1.

Tableau 2.1 Données utilisées pour estimer la force acoustique de rayonnement

ρ_0	$\rho_1 = \rho_{fibre}$	a	$k = \frac{2\pi f}{c}$	p_o
1000 kg/m^3	500 kg/m^3	$10\mu\text{m}$	$2\pi * 1000$ Pour $f = 150 \text{ kHz}$	220 kPa D'après les résultats de Brodeur

On obtient une force $F = 2.6 \mu\text{N}$ pour une fibre de taille moyenne. La force nécessaire pour faire léviter une particule de fibre dans un champ stationnaire ainsi est de l'ordre du μN . Brodeur obtient cependant des résultats intéressants et parvient à rediriger la pulpe avec une consistance maximale de 1% pour une vitesse maximum de 0.125 m/s.

Par onde transitoire

Brodeur [22] explore par la suite une autre technique pour concentrer la pulpe. Cette configuration, schématisée sur la figure 2.11, utilise la force de rayonnement transitoire ou instationnaire pour pousser la pulpe de papier et la concentrer. Il utilise des transducteurs ultrasonores qui engendrent la force acoustique de rayonnement. En face, il place un matériau absorbant. Dans cette situation, il ne cherche pas à créer une onde stationnaire. L'objectif est simplement de pousser les particules de pulpe afin de les concentrer dans une zone. En séparant ensuite le tube en deux parties on peut récupérer la pulpe comme souhaité.

L'électronique de puissance est aussi important dans ce processus. Les générateurs de fonctions fournissent des signaux sinusoïdaux continus aux amplificateurs de puissance à large bande et aux dispositifs d'adaptation d'impédance qui optimisent le transfert de la puissance électrique vers les transducteurs.

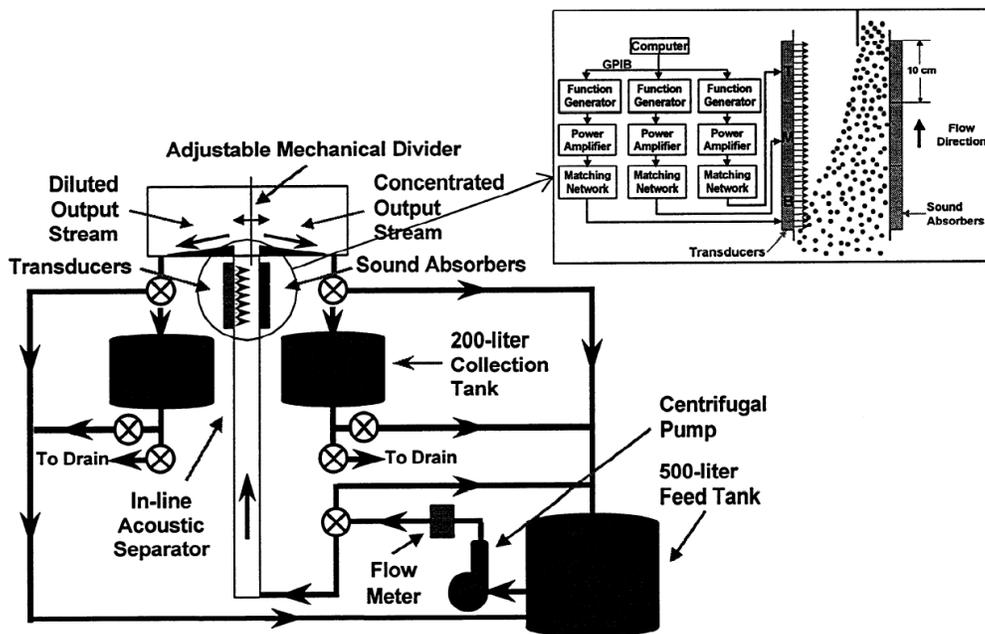


Figure 2.11 Schématisation de l'installation réalisé par Brodeur [22]

Il met en avant dans ce cas l'importance de trois effets non linéaires qui influencent la force acoustique : la pression acoustique de rayonnement, l'écoulement acoustique et la cavitation acoustique.

Brodeur [22] propose un modèle de déflexion de la pulpe à la suite de ses travaux. Il sépare en deux régions le flux : une région diluée et une région dense. L'effet de déflexion de la pulpe est fonction de la consistance, du flux, de la fréquence du transducteur et de l'intensité acoustique.

Il propose un modèle analytique de déflexion des fibres développé à partir de la figure 2.12.

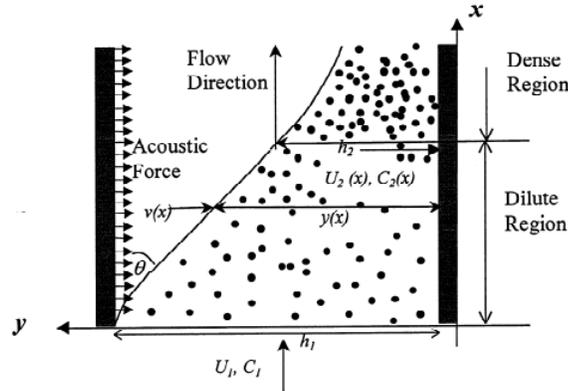


Figure 2.12 Déflexion des fibres selon le modèle analytique [22]

Il estime la région diluée comme un liquide visqueux où la consistance de la pulpe est inférieure à 1 %. Sur la figure 2.12, $y(x)$ représente l'épaisseur du flux et $v(x)$ est la vitesse de déflexion de la fibre.

Dans ce cas, il arrive à déterminer la vitesse limite de déflexion de la fibre qui ne dépend plus que de la force acoustique F et du coefficient d'amortissement c_d de la solution :

$$v_t = \frac{F}{c_d} \quad (2.7)$$

On peut estimer l'angle de déflexion θ à partir de la vitesse de déflexion de la fibre v et du flux de pulpe entrant U :

$$\tan \theta = \frac{v}{U} \quad (2.8)$$

Dans le cas du modèle de déflexion de la pulpe, il se base sur la seconde loi de Newton et sur le modèle de Darcy pour la région dense. Il est possible d'estimer ainsi la vitesse de déflexion de la fibre $\frac{dy}{dt}$:

$$\frac{d}{dt}(y(x)) = -v(x) \quad (2.9)$$

Ainsi, il est possible d'estimer la variation de consistance entre l'entrée C_1 et la zone dense C_2 , en connaissant le diamètre initial du tube h_1 , à partir de cette équation :

$$h_1 C_1 = y(x) C_2(x) \quad (2.10)$$

Les meilleurs résultats sont obtenus pour une fréquence de 150 kHz. Cependant il n'a testé que trois fréquences distinctes (60 kHz, 150 kHz et 1.5 MHz). D'autres fréquences permettraient peut-être d'obtenir de meilleurs résultats. Brodeur observe que la déflexion des fibres augmente lorsque l'intensité acoustique augmente à flux constant. Au contraire, la déflexion des fibres diminue lorsque la consistance de la pulpe augmente.

Par onde transitoire et floculation

Brodeur [26], [27] développe ensuite une nouvelle technologie à grande échelle avec Beloit, aujourd'hui VALMET Technologies. Cette nouvelle approche est un dérivé de la deuxième technique. En effet, il ajoute dans le flux de pulpe des flocculants qui permettent de créer de plus grosses particules en les regroupant. Ensuite le champ ultrasonore est appliqué pour pousser les particules de pulpe comme vu auparavant. L'article résume le travail effectué par l'équipe de Brodeur [23]. Cet article reprend les résultats scientifiques des rapports initiaux et finaux du projet industriel.

Les flocculants permettent d'uniformiser au maximum la taille des particules de fibres dans la solution. Comme expliqué dans la section 2.1.3, les fibres ont un diamètre variable inférieur à 30 μm . Les flocculants ont pour rôle de créer des particules de 75 μm de diamètre. À partir de cela, une étude complète a été faite pour estimer le meilleur flocculant dans cette situation. Le choix s'est alors porté sur un mélange PEO/PFR (PolyEthylene Oxide /Phenol Formaldehyde Resin).

La technologie développée, nommé Acoustic Separation Technology observable sur la figure 2.13, a permis de mettre en évidence à grande échelle la séparation des particules de pulpe. De nombreux paramètres ont été étudiés au cours du projet :

- Vitesse du flux: 0.05 m/s, 0.073 m/s, 0.1 m/s, 0.130 m/s
- Intensité acoustique : 0.5 W/cm², 1 W/cm², 3 W/cm²
- Section de division : 50-50, 30-70 (% flux dilué- flux dense)
- Flocculant :
 - o Phenol Formaldehyde Resin (PFR) - 15 ppm
 - o PolyEthylene Oxide (PEO) - 2, 5, 9, 12 ppm
- Consistance de la pulpe entrante : 0.022 %- 0.059%

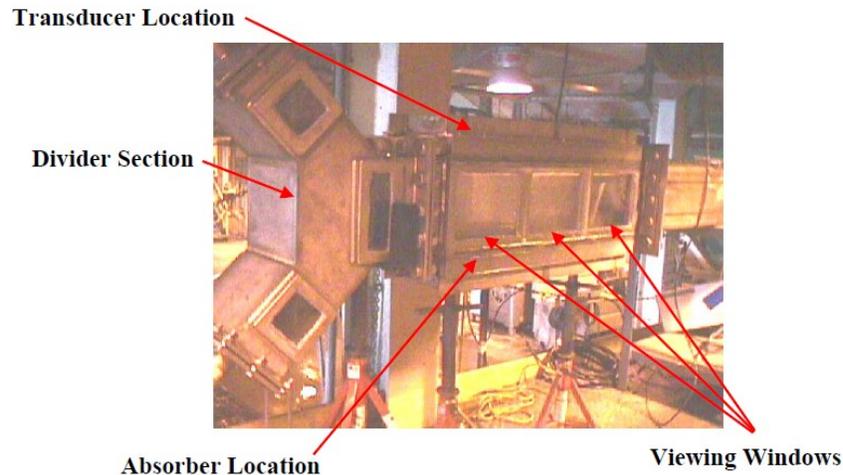


Figure 2.13 Image de la technologie développée à grande échelle [27]

À nouveau, Brodeur et son équipe obtiennent de meilleurs résultats pour 150 kHz. Cette fréquence semble être un optimale entre la création de la déflexion et l'apparition de cavitation que l'on veut éviter. Le maximum de déflexion est obtenu pour une intensité acoustique de 3 W/cm^2 .

Malheureusement, le projet n'a pas abouti à une solution utilisable en industrie. En effet, les tests ont été réalisés pour une consistance maximale à l'entrée de 0.06%. À cette consistance, l'application industrielle est inutile. De plus, les transducteurs utilisés durant le projet surchauffaient et certains ont même brûlés. La puissance nécessaire pour la séparation de la pulpe était trop importante pour les transducteurs. Pour diverses raisons, le projet a donc été arrêté.

Les avancées récentes, depuis la fin de ce projet avec Beloit en 2002, en matière de lévitation acoustique notamment en milieux micro fluidiques nous permettent de penser à une solution fonctionnelle à l'échelle industrielle. Brodeur n'a pas pu s'appuyer sur ces travaux ni sur des simulations numériques pour développer son prototype. De plus, les transducteurs de puissances ultrasonores sont aujourd'hui plus performants grâce à la recherche effectuée depuis. Ainsi, on s'intéresse dans la partie suivante à ceux-ci.

2.3. Les transducteurs de puissance ultrasonores

Afin de réaliser les ondes ultrasonores et donc de faire léviter la pulpe de papier, il est nécessaire de réaliser des transducteurs de puissance qui vont émettre les ondes ultrasonores.

2.3.1. Le principe

Un transducteur est un émetteur ou un récepteur d'onde acoustique. Dans notre situation, les transducteurs utilisés seront des émetteurs d'ondes ultrasonores.

Il existe plusieurs types de transducteurs suivant la direction de la source :

- Sphérique et ring : source omnidirectionnelle
- Piston : source unidirectionnelle (une seule direction visée)

Notre objectif est de créer une source unidirectionnelle dans le but d'obtenir notre onde stationnaire ou transitoire pour la séparation de la pulpe. On va donc s'intéresser uniquement à cette technologie par la suite.

Un transducteur est composé de matériaux piézoélectriques permettant de convertir un signal électrique en onde mécanique de vibration et inversement. Il est composé de trois parties (la base, l'empilement d'éléments piézoélectriques et la tête). Le principe repose sur la vibration de la base et la tête grâce à l'excitation du ou des éléments piézoélectriques.

Sur le transducteur de la figure 2.14, on aperçoit deux éléments piézoélectriques emprisonnés entre deux masses métalliques.



Figure 2.14 Transducteur Langevin vendu par American Piezo [28]

La mécanique vibratoire du transducteur

La mécanique du transducteur se base sur le modèle de mécanique vibratoire. Comme expliqué précédemment, deux masses métalliques emprisonnent le ou les éléments piézoélectriques. Il est possible ainsi de modéliser la structure de la tête et de la base comme un modèle masse ressort avec amortissement excité par un déplacement forcé, illustré sur la figure 2.15.

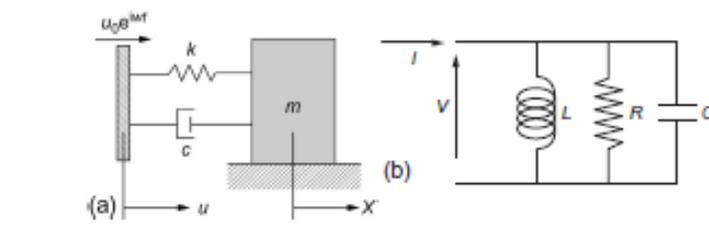


Figure 2.15 Modèle de vibration forcée d'une masse [29]

En appliquant la deuxième loi de Newton avec x le déplacement de la tête et u le déplacement forcé en régime harmonique de l'élément piézoélectrique on a cette équation :

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -c \left(\frac{dx}{dt} - \frac{du}{dt} \right) - k(x - u) \quad (2.11)$$

On obtient ainsi le déplacement de la tête en réponse à notre déplacement forcé en régime harmonique :

$$X(\omega) = \frac{(k + j\omega c)u_o}{m \left((\omega^2 - \frac{k}{m}) + \frac{j\omega c}{m} \right)} \quad (2.12)$$

Ce modèle, bien que simpliste, définit les fondements du transducteur. L'objectif est d'utiliser le mode de vibration longitudinal du transducteur. Les masses additionnées aux éléments piézoélectriques ont pour rôle de vibrer et d'accorder la fréquence de résonance du système.

Les vibrations longitudinales

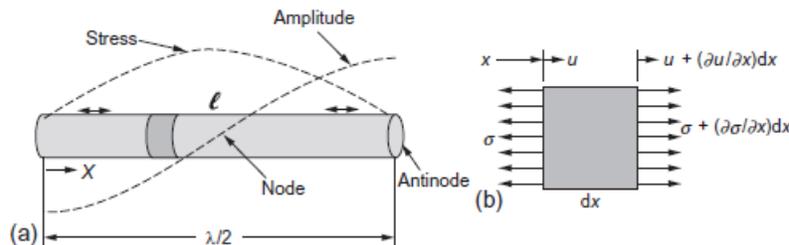


Figure 2.16 Modèle de vibration longitudinale d'une poutre [29]

Les masses additionnelles possèdent un mode de vibration longitudinal. À la résonance le déplacement est un multiple de la demi-longueur d'onde, comme identifié sur la figure 2.16. L'objectif dans la conception du transducteur est donc de dimensionner les masses additionnelles de façon à faire vibrer le transducteur selon la longueur d'onde souhaitée et donc selon la fréquence souhaitée.

2.3.2. Le modèle électrique du transducteur

Le transducteur se base sur le caractère piézoélectrique du matériau coincé entre les deux masses. On détaille ici les modèles mécanique et électrique d'un transducteur typique.

Le modèle piézoélectrique

Les matériaux piézoélectriques sont des matériaux qui sont capables de transformer un champ électrique en une onde mécanique. Ces matériaux ont donc la capacité de combiner des propriétés mécaniques et électriques.

En considérant dans un premier temps un modèle 3D, les normes définissent un matériau piézoélectrique à partir de ces équations :

$$S = s^E T + d_t E \quad (2.13)$$

$$D = dT + \epsilon^T \quad (2.14)$$

avec S et T , les tenseurs de contraintes et de déformations; et D et E , le déplacement électrique et le champ électrique. De plus, s^E représente la matrice élastique de compliance, d est la matrice des coefficients piézoélectriques, d_t sa transposée et ϵ^T la matrice de permittivité diélectrique.

On a donc ici une modélisation complète du matériau piézoélectrique si on connaît toutes les valeurs des coefficients. On obtient une matrice totale de 9x9 pour représenter tous les coefficients. Cependant, certaines valeurs sont nulles dès la présence d'une symétrie.

Dans notre cas, nous nous intéressons seulement aux modes de vibration d'un anneau qui représente notre élément piézoélectrique pour notre transducteur. Ainsi, en simplifiant à un modèle 1D pour une couche mince, on peut sortir une relation directe entre la déformation et le champ électrique pour les deux modes de vibrations : le mode 33 et le mode 31. Le tableau 2.2 décrit ces deux situations.

Tableau 2.2 Détermination des modes de vibration 31 et 33 [30]

Cas	Schéma	Formalisme	Résolution
Capteur mode 31		Variables S, E (Equations E1.10)	$T_1 = T_2 = -e_{31,eff} E_3$ $e_{31,eff} = e_{31} - \frac{C_{13}^E}{C_{33}^E} e_{33}$ [Muralt 1996]
Actionneur mode 33		Variables T, E (Equations E1.7)	$S_3 = d_{33,eff} E_3$ $d_{33,eff} = d_{33} - 2 \frac{S_{13}^E}{S_{11}^E + S_{12}^E} d_{31}$ [Lefki 1994]

Ce modèle est celui appliqué dans le cas d'un transducteur.

Le modèle électrique total du transducteur

La partie mécanique est modélisée par un circuit RLC comme montré précédemment. En parallèle on a l'élément piézoélectrique équivalent à un condensateur comme montré sur la figure 2.17. Mason [31], [32] et [33] est le premier à modéliser de cette façon. On appelle communément le modèle de Mason. Ce modèle a ensuite été développé par Berlincourt [34]. On est capable à partir du modèle piézoélectrique obtenu au-dessus de déterminer cette capacité c_0 .

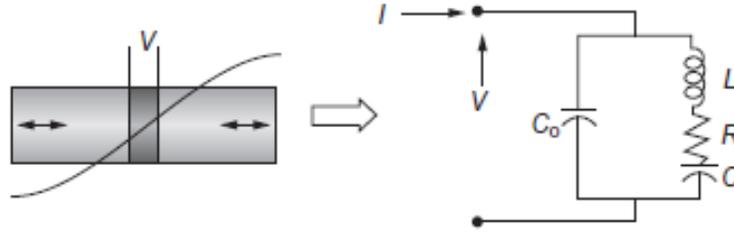


Figure 2.17 Modèle électrique du transducteur

L'impédance est définie comme suit :

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{1}{j\omega c_0} \frac{\left(\omega^2 - \frac{1}{L_1 c_1}\right) - \frac{j\omega R_1}{L_1}}{\left(\omega^2 - \frac{c_0 + c_1}{L_1 c_0 c_1}\right) - \frac{j\omega R_1}{L_1}} \quad (2.15)$$

En négligeant la résistance R_1 , on obtient une impédance:

$$Z = \frac{1}{j\omega c_0} \frac{\left(\omega^2 - \frac{1}{L_1 c_1}\right)}{\left(\omega^2 - \frac{c_0 + c_1}{L_1 c_0 c_1}\right)} \quad (2.16)$$

On est capable d'obtenir dans ce cas les fréquences de résonance et d'antirésonance qui définissent notre circuit :

Fréquence de résonance :

$$\omega = \left(\frac{1}{L_1 c_1}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.17)$$

Fréquence d'antirésonance :

$$\omega = \left(\frac{c_0 + c_1}{L_1 c_0 c_1}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.18)$$

On cherche donc à travailler à la fréquence de résonance pour maximiser l'efficacité de notre transducteur. À cette fréquence le déplacement longitudinal sera le plus important.

Cette méthode est très utile pour caractériser un transducteur. Sur la figure 2.18, on peut voir le tracé de l'impédance en fonction de la fréquence. On aperçoit plusieurs changements brutaux de l'impédance qui correspondent à plusieurs fréquences de résonance. En effet, comme vu auparavant les éléments piézoélectriques ont aussi leurs propres modes de résonances : modes 31 et 33. L'objectif est d'optimiser le transducteur pour la fréquence de résonance souhaitée par l'équation (2.17).

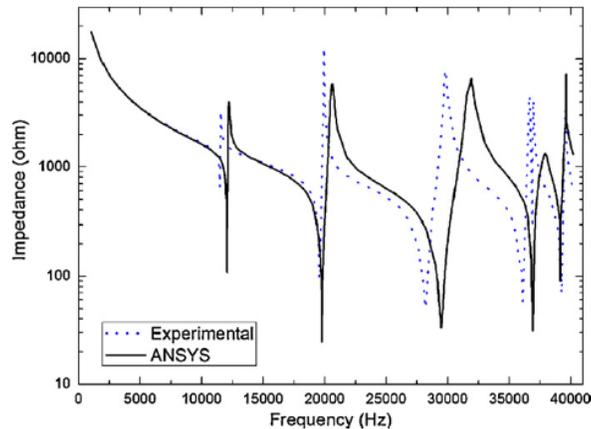


Figure 2.18 Impédance d'un transducteur [35]

2.3.3. La conception du transducteur

Il existe aujourd'hui différents formats de transducteurs découlant de ce modèle. Le premier modèle est le modèle Langevin ou Tonpilz développé il y a déjà de nombreuses années [29]. Ce modèle, dessiné sur la figure 2.19, est l'application directe de la théorie précédente.

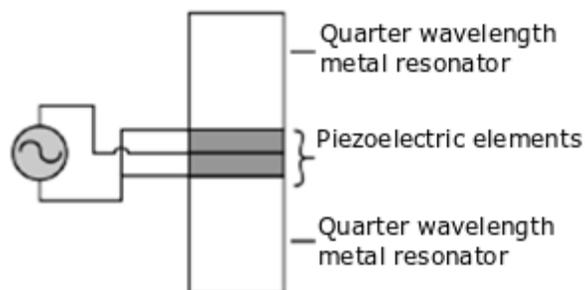


Figure 2.19 Parties indispensables au transducteur Langevin [36]

Comme vu auparavant, les longueurs des masses ont un impact sur la fréquence obtenue. En connaissant la longueur d'onde dans notre matériau, on peut estimer la longueur optimale de nos masses. En effet, on connaît la célérité de l'onde dans notre matériau qui dépend des caractéristiques mécaniques du matériau. On obtient ainsi la longueur de notre masse :

$$L = \frac{\lambda}{4} = \frac{c_L}{4f} = \frac{\sqrt{E/\rho}}{4f} \quad (2.19)$$

Optimisation du transducteur

L'objectif de notre transducteur est de travailler à une fréquence ou sur une plage de fréquence précise. Dans ce but, on a compris qu'il est nécessaire de concevoir les différents éléments du transducteur.

- Choix des éléments piézoélectriques :

Le choix des éléments piézoélectriques est très important dans le but d'optimiser le transducteur. Il existe différents éléments piézoélectriques. Les céramiques PZT sont les plus utilisées dans le cas des transducteurs.

Les dimensions et le nombre d'éléments piézoélectriques sont aussi à optimiser. L'épaisseur et la largeur des éléments piézoélectriques vont directement influencer la fréquence et l'amplitude mécanique obtenues. Plus l'élément est fin, plus l'élément piézoélectrique aura une fréquence de résonance élevée [37]. Enfin le nombre d'éléments piézoélectriques est à déterminer. Il est ainsi possible d'empiler les éléments piézoélectriques.

- Ajout d'un amplificateur :

L'objectif de notre transducteur est aussi d'amplifier au maximum les déformations afin d'avoir une onde ultrasonore de bonne amplitude. Dans ce sens, il est possible d'ajouter un convergent au bout du transducteur [38]. De façon à obtenir un déplacement maximal au bout du transducteur on ajoute une longueur de masse multiple de $\frac{\lambda}{2}$ [36].

- Ajout d'une tête :

Le transducteur doit aussi avoir une directivité convenable. On veut concentrer l'énergie autour d'une position bien précise pour obtenir la lévitation de nos particules.

Pour ce faire, le modèle de Kuttruff pour un piston rayonnant est utile [39]. Il démontre ici le lien direct entre la dimension du piston rayonnant et la directivité de l'onde. On peut ainsi dimensionner le rayon du haut de notre transducteur pour obtenir la meilleure directivité possible.

Une deuxième technologie a été développée plus récemment. Cette technologie utilise de même le modèle précédent. On ajoute cette fois-ci une plaque vibrante au sommet du transducteur. Ainsi on n'utilise plus ici les vibrations longitudinales pour créer notre onde acoustique. On utilise plutôt les modes de vibration de la plaque pour transmettre l'énergie. Cette technologie, illustrée sur la figure 2.20, a été créée par Gallego [40].

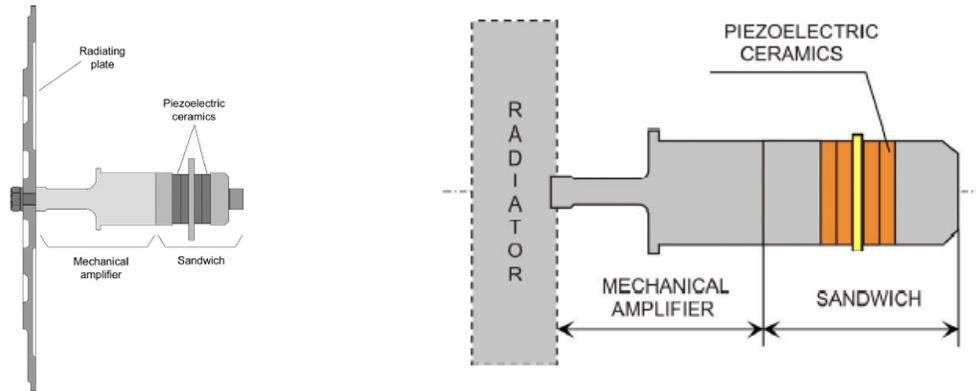


Figure 2.20 Structures de transducteurs proposés par Gallego [29] [40]

Depuis d'autres recherches ont été réalisées sur ce nouveau type de transducteur [41] [42]. Sur la figure 2.21, on peut voir l'analyse modale obtenue par simulation numérique du transducteur.

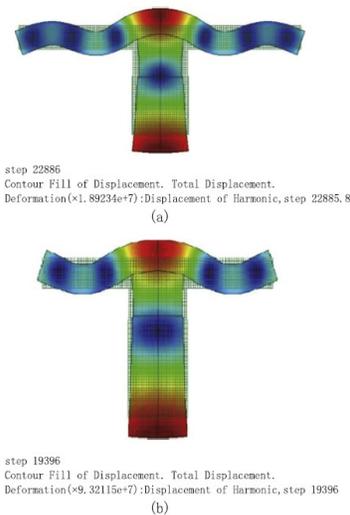


Figure 2.21 Simulation numérique des modes de flexion d'un transducteur [43]

- Influence du serrage :

Le transducteur obtenu est donc un assemblage de pièces mécaniques. De façon courante, le maintien en position des pièces est effectué à l'aide d'un assemblage vis écrou. Le serrage a une influence sur les caractéristiques finales du transducteur. Le fait d'appliquer un couple de serrage important va permettre d'accentuer la pression sur les éléments piézoélectriques et améliorer la réponse finale du transducteur. De ce fait, il est ainsi plus intéressant d'avoir un pas de vis fin sur l'écrou de serrage [44].

2.3.4. Propriétés acoustiques des transducteurs

Champ de pression acoustique

On considère la tête de notre transducteur comme un piston rayonnant encastré sur sa périphérie. Le piston est de rayon a . On se place dans un repère cylindrique comme présenté sur la figure 2.22.

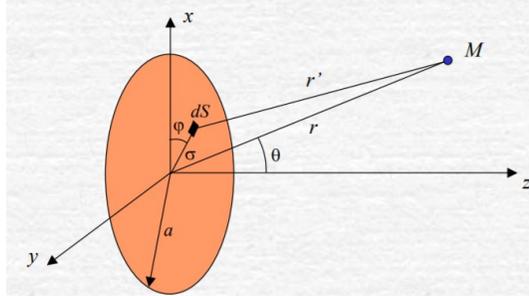


Figure 2.22 Schématisation de la tête supérieure du transducteur

On peut estimer le champ de pression acoustique par le piston évalué en un point M sous cette forme :

$$p(r, \theta) = j \frac{\rho_0 c U_0}{\lambda} \left(\int_0^{2\pi} \int_0^a \frac{e^{-jkr'}}{r'} \sigma d\sigma d\varphi \right) \quad (2.20)$$

Avec les paramètres suivants : a le rayon du piston, ρ_0 la masse volumique de l'eau, c la célérité de l'onde dans l'eau, U_0 la vitesse normale du piston et λ la longueur d'onde.

Cette solution est difficile à évaluer analytiquement. On peut résoudre l'équation numériquement en supposant un champ lointain c'est-à-dire pour $r \ll \lambda$. Ainsi, à partir du résultat de la fonction de Bessel au premier ordre, on obtient en approximant :

$$p(r, \theta) = \frac{j\rho_0 c k U_0 a^2 e^{-jkr}}{2r} \frac{2J_1(k a \sin\theta)}{k a \sin\theta} \quad (2.21)$$

Directivité

A partir de l'équation (2.21), on peut déterminer la fonction de directivité qui se définit comme :

$$\Gamma(\theta) = \frac{2J_1(k a \sin\theta)}{k a \sin\theta} \quad (2.22)$$

La directivité se définit aussi à l'aide du facteur de directivité qui se représente comme le rapport de l'intensité acoustique $I_0(r)$ produite à une distance r suivant une direction donnée par l'intensité acoustique moyenne W produite à une même distance par une source omnidirectionnelle.

$$D_f = \frac{I_0(r)}{W/4\pi r^2} \quad (2.23)$$

L'objectif sera d'obtenir un transducteur très directif pour concentrer le champ de pression à l'endroit souhaité.

Impédance de rayonnement

L'impédance de rayonnement est très importante dans la caractérisation du champ acoustique émis par le transducteur. Cette impédance caractérise le couplage entre le piston rayonnant et le fluide. C'est le rapport entre la pression sur la surface vibrante et la vitesse normale de vibration de la surface. On détermine ici cette impédance [45].

On l'obtient en intégrant le champ de pression sur la surface supérieure du transducteur. On obtient alors en simplifiant au premier ordre de la fonction de Bessel et de Struve :

$$Z = R + jX = \rho c \pi a^2 \left(1 - \frac{J_1(2ka)}{ka} + \frac{jS_1(2ka)}{ka} \right) \quad (2.24)$$

TVR

Le TVR (Transmitting Voltage Response) est une valeur couramment utilisée pour caractériser un transducteur et se définit par le rapport du champ de pression lointain par la tension en entrée sur l'élément piézoélectrique. Le TVR est exprimé en dB pour une pression de référence de 1 μ Pa à une distance de 1 m. On trace cette valeur en fonction de la fréquence. On est ainsi capable d'identifier la bande de fréquence où notre transducteur est performant.

2.4. Bilan de l'état de l'art

Dans la suite du projet, on s'appuie donc sur les travaux précédents de Brodeur, et les connaissances qui en découlent, pour l'utilisation de la lévitation acoustique pour la concentration de pulpe de papier. De plus, on s'appuie sur les caractéristiques du flux de pulpe combinées aux connaissances actuelles en lévitation acoustique en milieux micro fluidique afin de développer les différentes expérimentations et modélisations. Enfin, les notions acquises sur les transducteurs de puissances ultrasonores rendent possible le développement de transducteurs adaptés à notre objectif final : le développement d'un procédé industriel de concentration de pulpe par méthode ultrasonore.

CHAPITRE 3

3. EXPÉRIMENTATIONS PRÉLIMINAIRES DE LÉVITATION ACOUSTIQUE

Dans cette section, l'objectif est la réalisation de différentes expériences afin de valider l'utilisation de la lévitation acoustique pour la concentration de pulpe de papier. On confirme ainsi les travaux de Brodeur et la faisabilité d'un tel processus de concentration de pulpe. Afin de réaliser ces différentes expériences, on conçoit une enceinte expérimentale à partir de contraintes inhérentes au projet. On se concentre aussi sur la conception de transducteurs puisqu'ils sont primordiaux pour la lévitation acoustique. Le montage expérimental est ensuite détaillé notamment la partie électronique de puissance. Enfin, on s'intéresse aux expériences réalisées et aux résultats qui en découlent.

3.1. Conception et réalisation de l'enceinte expérimentale

Afin d'effectuer ces premiers tests de lévitation acoustique en laboratoire il est nécessaire de réaliser un montage expérimental. L'objectif est ici d'étudier différentes configurations de lévitation acoustique et d'évaluer dans des conditions stationnaires les paramètres optimaux pour la concentration de la pulpe de papier.

Pour ce faire, le montage doit répondre à des besoins spécifiques :

- Enceinte étanche avec possibilité de placer deux transducteurs en face à face pour créer des ondes stationnaires
- Possibilité d'ajouter une surface rayonnante et/ou absorbante et d'ajuster la hauteur de celle-ci
- Ajustable pour différents transducteurs
- Possibilité de mesurer la pression acoustique
- Possibilité de visualiser la lévitation acoustique optiquement
- Avoir des dimensions raisonnables : moins de 50 cm dans les trois axes

Sur la figure 3.1, on aperçoit un schéma qui résume toutes ces conditions.

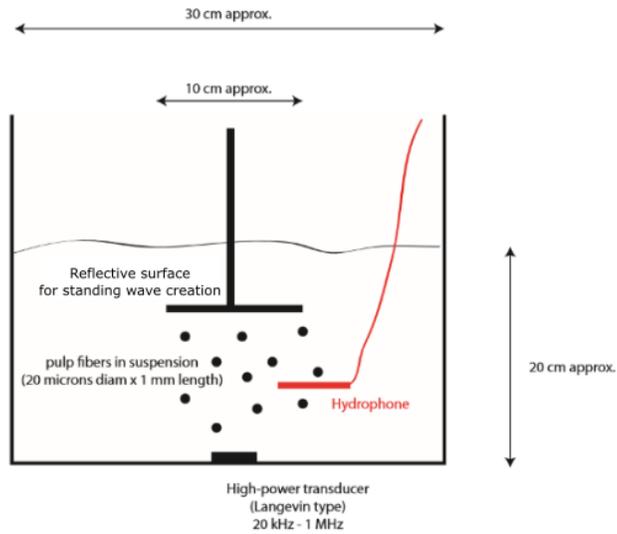


Figure 3.1 Schématisation de l'enceinte expérimentale

A partir de ce cahier des charges la conception et la réalisation de l'enceinte ont pu être réalisées. Tamara Krpic, étudiante au baccalauréat en génie mécanique, m'a aidé pendant son stage dans cette mission.

Sur les figures 3.2, on aperçoit le résultat final de ce travail. Au fond de l'enceinte qui s'apparente à un aquarium, on a une ouverture permettant de venir fixer un transducteur de puissance à l'origine de l'onde ultrasonore. Au-dessus un système vis sans fin permet d'ajuster la hauteur d'une plaque percée sur laquelle on peut fixer un deuxième transducteur ou alors une surface rayonnante/absorbante. Deux glissières permettent ensuite d'ajuster cet ensemble selon les axes parallèles au fond de l'enceinte. De plus, les parois latérales de l'enceinte expérimentale sont transparentes afin de permettre la visualisation.



Figure 3.2 Enceinte expérimentale finale sous différents angles

3.2. Développement de transducteurs

3.2.1. Objectif

En parallèle de la conception du montage expérimental, il est nécessaire de réfléchir à l'élément qui permet de générer l'onde ultrasonore : le transducteur de puissance. L'objectif de cette partie est de concevoir des transducteurs de puissance de haute fréquence utilisables pour l'expérimentation de la lévitation acoustique. En effet dans ses travaux [13], [22], [23], Brodeur estime que les hautes fréquences sont plus intéressantes pour la lévitation acoustique avec la pulpe de papier. De plus, il est facile d'acheter des transducteurs de puissance de basses fréquences (20-40 kHz) utilisés pour les dispositifs de nettoyage par ultrasons mais difficile d'en trouver à hautes fréquences (supérieures à 80 kHz) sur le marché. Pour les tests à basses fréquences on utilisera ainsi des transducteurs du marché.

3.2.2. Critères de conception

Comme présenté dans l'état de l'art, le transducteur est constitué d'un empilement d'éléments piézoélectriques piégés entre deux éléments métalliques. On se base sur l'état de l'art présenté en section 2.3 pour concevoir numériquement sur COMSOL des transducteurs ultrasonores fonctionnant à des fréquences supérieures à 80 kHz. L'objectif est de créer des transducteurs dont la/les fréquences de résonances sont les plus marquées possible c'est-à-dire que l'on souhaite obtenir le meilleur gain de puissance possible à chaque fréquence de résonance.

Pour ce faire, des simulations dans un environnement 2D axisymétrique sont réalisées sous COMSOL. De nombreux paramètres sont étudiés dans cette partie : nombre d'éléments piézoélectriques, épaisseur de l'élément piézoélectrique, polarisation des éléments piézoélectriques, dimension des masses métalliques, forme globale du transducteur. Ces simulations suivent une démarche bien précise, basée sur l'analyse de l'état de l'art en section 2.3, et nous permettent de concevoir les transducteurs ultrasonores de puissance.

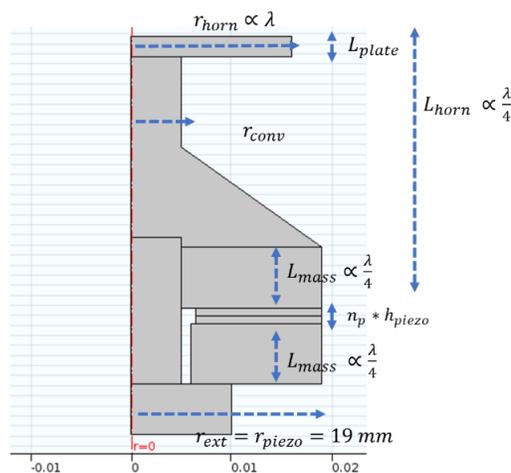


Figure 3.3 Géométrie du transducteur avec ses dimensions caractéristiques

Pour ce faire, il est nécessaire de choisir tout d'abord les éléments piézoélectriques. Pour commencer des éléments annulaires de diamètre extérieur 38 mm ont été utilisés pour leur disponibilité. Plus l'élément piézoélectrique est fin, hauteur h_{piezo} sur la figure 3.3, plus sa fréquence de résonance longitudinale est élevée comme présenté en section 2.3. Ensuite en combinant les éléments piézoélectriques on peut accroître l'efficacité de la résonance c'est-à-dire le déplacement maximal / l'accélération maximale. Les meilleures configurations sont des configurations où la polarisation des éléments piézoélectriques est opposée : +/- . Cependant la fréquence de résonance devient plus faible aussi lorsqu'on augmente le nombre d'éléments piézoélectrique n_p .

Ensuite la base doit avoir une longueur L_{mass} multiple du quart de la longueur d'onde comme expliqué en section 2.3.3 par l'équation (2.19). Il en est de même pour la partie supérieure de longueur L_{horn} . Cette partie peut être réalisée de différentes manières. Nous nous sommes basés sur le modèle de Gallego [40] avec un convergent pour concentrer l'énergie puis transformer cette énergie en une onde transverse dans le disque supérieur. La largeur L_{plate} et le rayon du disque supérieur r_{horn} sont donc des éléments aussi importants. En effet l'onde longitudinale doit se convertir en une onde transverse pour être transmise au milieu extérieur qui est l'eau dans notre cas.

La dernière partie de la conception du transducteur est une étape d'optimisation. Pour cela on se base sur les performances du transducteur que l'on souhaite obtenir : fréquence de résonance, vitesse surfacique, directivité ou encore TVR du transducteur. Une analyse modale est alors effectuée afin d'observer les fréquences propres du transducteur. Puis une analyse fréquentielle sur un domaine choisi est réalisée. Ainsi en combinant ces deux analyses, on peut connaître les performances du transducteur. On ajuste alors les différentes dimensions présentées précédemment suivant les performances visées.

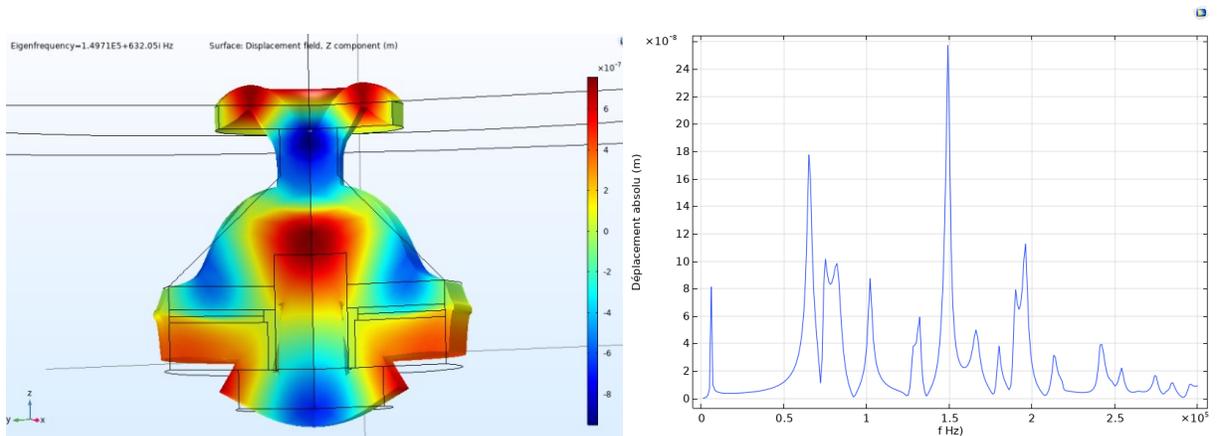


Figure 3.4 Déformée modale à 150 kHz (à gauche) et déplacement absolu du transducteur (à droite)

Sur la figure 3.4, on aperçoit la déformée modale pour la fréquence de résonance à 150 kHz du transducteur. A cette fréquence le mode de vibration longitudinale est bien marqué dans le corps

du transducteur. Ensuite, ce mode se transforme en un mode transverse dans le disque supérieur. Le déplacement absolu de la surface supérieure est très marqué pour la fréquence de résonance de 150 kHz. Il vaut 250 nm comme on le voit sur la figure 3.4 à droite pour une alimentation électrique de 1 V.

3.2.3. Fabrication et validation des performances électriques et vibratoires

Les éléments piézoélectriques ont ensuite été commandés selon les résultats de ces simulations puis l'usinage des pièces a été réalisé. On peut retrouver en annexe A le dessin d'usinage du transducteur de 150 kHz présenté sur la figure 3.8.

Une fois les phases d'usinage et de montage réalisées, il a été nécessaire de valider les caractéristiques et les performances de ce transducteur. La première étape a été de valider l'admittance électrique du transducteur. La mesure de l'admittance a donc été réalisée grâce à une interface réalisée sur LabVIEW. On impose un signal entrant de 1 Vcc puis on mesure l'intensité en sortie. En faisant le rapport de la tension et de l'intensité on obtient l'admittance, soit l'inverse de l'impédance comme présenté par l'équation (2.16) dans l'état de l'art. Celle-ci est composée des parties réelles et imaginaires. On compare cela aux simulations sur la figure 3.5.

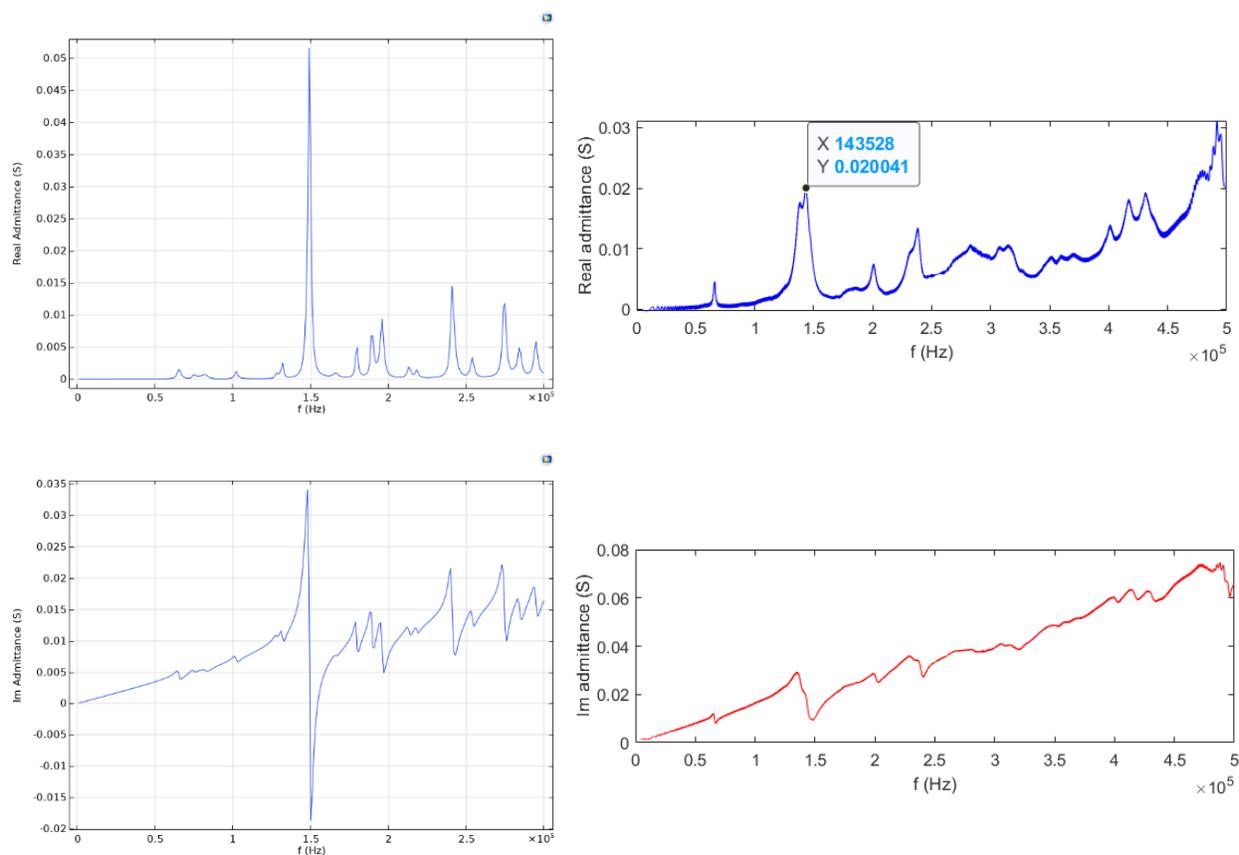


Figure 3.5 Admittance du transducteur : simulation (à gauche) et réalité (à droite)

On constate que la fréquence de résonance est en réalité autour de 140 kHz. Cet écart reste très faible à la vue des approximations réalisées dans les simulations. De plus, le montage des différents éléments du transducteur ne permet pas d'avoir des contacts parfaits aux surfaces. Ainsi on remarque que pour les hautes fréquences les parties réelles et imaginaires de l'admittance ont tendance à constamment augmenter, ce qui est le signe d'une résistance électrique non prise en compte dans le modèle. De même la valeur maximale de l'admittance caractérisée par un maximum à la résonance est plus faible en réalité, ce qui laisse présager d'un amortissement structural sous-estimé dans la simulation vraisemblablement dû à l'assemblage mécanique.

De plus, on détermine la vitesse maximale à la surface du transducteur grâce au vibromètre laser 3D, disponible au laboratoire, qui permet de déterminer les déformations de surface. Pour le transducteur de 150 kHz la vitesse maximale mesurée est 2 mm/s/V. On compare cette valeur à celle obtenue grâce aux simulations sur la figure 3.6. La valeur maximale est 4 mm/s/V. On a donc aussi un écart dû à l'imperfection de la réalisation finale. Cependant l'ordre de grandeur est conforme à nos attentes.

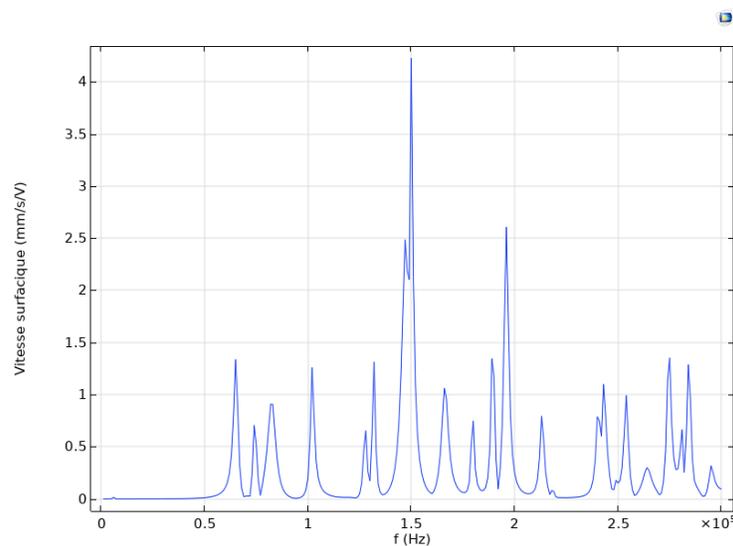


Figure 3.6 Vitesse absolue mesurée en surface du transducteur

Malgré les écarts de performance, le transducteur ainsi réalisé valide bien les simulations effectuées auparavant.

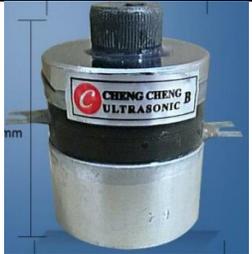
3.3. Mise en œuvre expérimentale

3.3.1. Transducteurs utilisés

Le tableau 3.1 répertorie les quatre transducteurs testés lors des expériences. On touche ainsi une large bande de fréquences tout en sachant que chaque transducteur a en réalité plusieurs

fréquences de résonance. La fréquence de résonance indiquée dans le tableau est la première fréquence de résonance dans l'épaisseur du transducteur pour laquelle le gain de puissance est optimal. Chaque transducteur possède sa propre impédance. C'est pour cela que l'adaptateur d'impédance entre l'amplificateur de puissance et le transducteur est important. Enfin les puissances indiquées sont les puissances maximales conseillées pour utiliser les transducteurs. Ainsi par exemple, le transducteur de 40 kHz a aussi été utilisé pour une puissance de 300 W sur une courte période de temps.

Tableau 3.1 Transducteurs testés lors des expériences

Fréquence de résonance	20 kHz	40 kHz	150 kHz	200 kHz
Puissance	1500 W	50 W	40 W	40 W
Photo				

3.3.2. Installation des transducteurs

Afin de pouvoir fixer de manière préliminaire les transducteurs à tester au fond de l'enceinte, il a été nécessaire d'ajouter une fine plaque d'acier inoxydable pour les transducteurs du marché. Pour ce faire, les transducteurs ont été collés à l'époxy ou soudés sur la plaque d'acier inoxydable. Ensuite on peut visser la plaque au fond de l'aquarium comme on le voit sur la figure 3.7.



Figure 3.7 Transducteurs adaptés (à gauche) et montage dans l'aquarium (à droite)

Pour le transducteur à 150 kHz réalisé au laboratoire il a fallu réaliser un adaptateur dans la conception pour le fixer au fond de l'enceinte. Cet adaptateur ne change pas les performances du transducteur. On peut l'apercevoir sur la figure 3.8.



Figure 3.8 Transducteur à 150 kHz adapté

3.3.3. Électronique de puissance

Pour contrôler les transducteurs il est nécessaire de posséder un montage d'électronique de puissance comme présenté sur la figure 3.9. Ce montage est composé d'un générateur de fonctions, d'un amplificateur de puissance, d'un adaptateur d'impédance et d'un oscilloscope. Le générateur permet de générer le signal électrique à la fréquence souhaitée. Ensuite un amplificateur de puissance capable de fonctionner dans le domaine ultrasonore permet d'amplifier la tension obtenue. Un adaptateur d'impédance est aussi nécessaire pour permettre le meilleur ajustement entre l'impédance 50Ω de l'amplificateur et l'impédance des transducteurs. L'oscilloscope permet de récupérer le signal de tension reçu par le transducteur afin de caractériser la puissance utilisée.

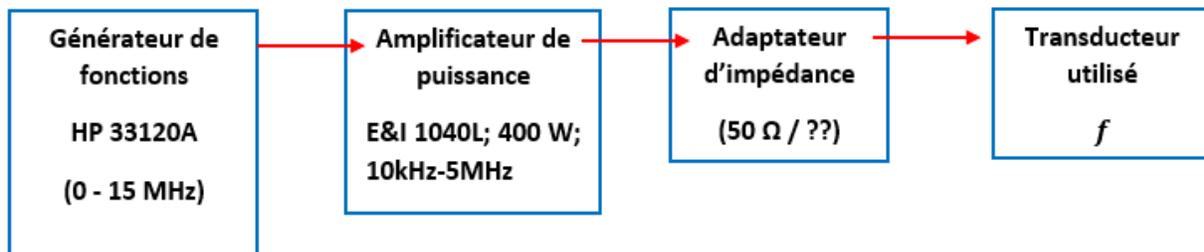


Figure 3.9 Schéma du montage électronique de puissance

3.3.4. Visualisation

Afin de visualiser la lévitation acoustique dans l'aquarium une caméra haute vitesse (résolution: 16MP – taux de rafraichissement: 1920x1080@60FPS) est placée en face d'une des deux parois transparentes comme observé à gauche de la figure 3.10. Un tunnel est aussi ajouté afin de bien visualiser ce qu'il se produit dans le plan en face du transducteur comme présenté à droite de la figure 3.10.



Figure 3.10 Montage final avec la caméra (à gauche) et le tunnel d'observation (à droite)

3.4. Expériences réalisées

Avec ce montage expérimental il a été possible de tester différentes configurations préliminaires dans le cas d'un fluide stationnaire.

3.4.1. Configuration testée

Différentes configurations ont été testées afin de déterminer les conditions nécessaires à la concentration de pulpe de papier pour un cas stationnaire :

- Configuration acoustique : Onde stationnaire ou non
- Fréquence ultrasonore: 20 kHz -200 kHz
- Consistance de la pulpe : 0.001% - 3%
- Type de pulpe : Eucalyptus / Pin

Ainsi deux types de pulpes sont testés : pulpe d'eucalyptus et pulpe de pin. Ces pulpes sont différentes à cause des caractéristiques physiques et dimensionnelles des fibres données par le fournisseur et présentées dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2 Caractéristiques des deux pulpes utilisées

Nature des fibres/ de la pulpe	Eucalyptus (Hardwood/ Bois dur)	Pin (Softwood/Bois tendre)
Longueur moyenne des fibres	1 mm	3 mm
Diamètre moyen des fibres	5 – 15 μm	20 – 30 μm

3.4.2. Création d'une onde stationnaire

Le premier test a été de réaliser une onde stationnaire pour une concentration très faible, c'est-à-dire pour quelques fibres isolées. Pour ce faire, une onde stationnaire a été créée dans le bassin sans placer un autre transducteur ou une surface rayonnante au-dessus du transducteur, mais plutôt en utilisant la réflexion à l'interface eau/air. En effet le coefficient de réflexion R eau/air, exprimé avec les impédances acoustiques Z , est très important comme calculé avec l'équation 3.1.

$$R = \frac{Z_{air} - Z_{eau}}{Z_{air} + Z_{eau}} = \frac{442 - 1.5e6}{442 + 1.5e6} = -0.99 \quad (3.1)$$

Toute l'onde est ainsi réfléchi. Ainsi en connaissant la fréquence de résonance (f) du transducteur et la célérité de l'onde dans l'eau (1500 m/s) on obtient la longueur d'onde ($\lambda = 1500/f$) et ainsi la hauteur des nœuds de pression. Le schéma de la figure 3.11 le montre.

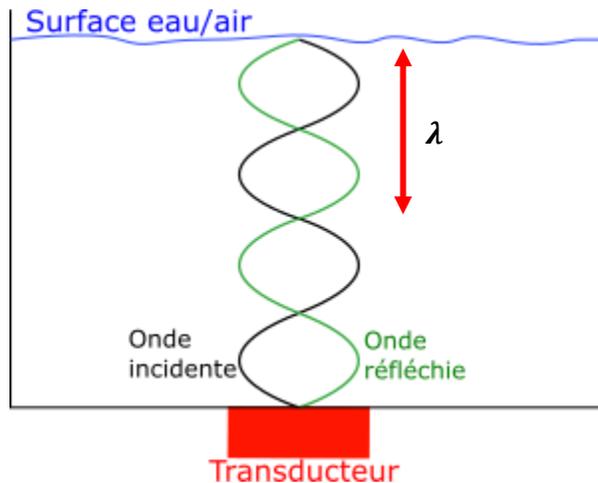


Figure 3.11 Schématisation de l'onde stationnaire

A l'aide de la caméra, on remarque que les fibres individuelles ont tendance à se regrouper pour former de plus grosses particules. Lorsque ce regroupement de fibres atteint une certaine taille, la moindre instabilité fait déplacer l'ensemble des fibres du nœud de pression dans lequel elles

étaient piégées. Sur la figure 3.12, une image captée par la caméra permet de montrer ce phénomène.

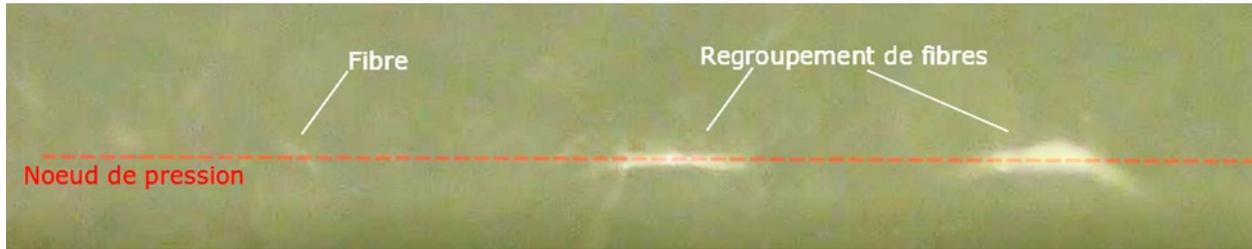


Figure 3.12 Image du regroupement des fibres

De plus, en augmentant la concentration, on se rend compte qu'il n'est plus possible de concentrer les fibres dans les nœuds de pression de l'onde stationnaire. En effet, la viscosité devient trop importante, puisque que celle-ci dépend directement de la concentration, comme on l'explique dans la section de l'état de l'art 2.1.1. Il se produit alors un autre phénomène. Les fibres présentes dans la pulpe sont poussées par le flux acoustique induit par le transducteur comme dessiné sur la figure 3.13. Comme présenté, dans la partie état de l'art 2.2.2, lorsque la viscosité devient importante la force de trainée induite par le flux acoustique prédomine sur la force acoustique de rayonnement. Le résultat ainsi observé est présenté par la figure 3.13.

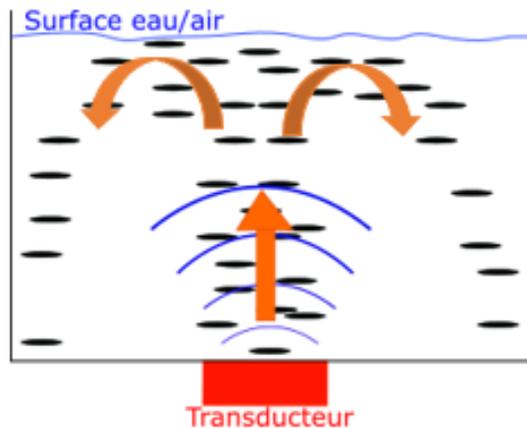


Figure 3.13 Schématisation de la recirculation des fibres

Dans la suite des expériences le phénomène d'onde stationnaire ne sera plus utilisé puisqu'il ne permet la déviation de la pulpe que lorsqu'elle est peu concentrée, moins de 0.1% dans ces premiers essais. Le phénomène de force de trainée sur les fibres est ainsi mis en avant.

3.4.3. Utilisation de la force de trainée

Plusieurs consistances/concentrations sont testées, pour les deux pulpes, dans le but d'estimer la concentration maximale sur laquelle il est possible d'agir avec la méthode ultrasonore. Les concentrations de 0.1 % jusqu'à 1.5%, comme présenté dans le tableau 3.3, sont étudiées. Les temps moyens nécessaires t_p pour pousser la pulpe et commencer à éclaircir la zone au-dessus du transducteur sont répertoriés dans le tableau 3.3.

Présentation du phénomène observé

Avant de présenter les résultats avec les temps moyens observés t_p pour pousser les différentes concentrations, il est nécessaire de détailler les étapes permettant la concentration de la pulpe dans cette situation. En effet, comme le présente la figure 3.13, la pulpe est poussée vers la surface et recircule sur les côtés grâce à la force de trainée.

Différentes étapes schématisées sur la figure 3.14 peuvent être distinguées. À la première étape les fibres sont réparties uniformément de façon à former une seule solution de concentration C introduite au début. Le transducteur est ensuite excité et émet l'onde ultrasonore à la fréquence f . Les fibres situées juste au-dessus du transducteur sont immédiatement poussées vers la surface et commencent à recirculer. Après quelques secondes, suivant la concentration initiale, les fibres situées en face du transducteur sont en grande partie arrivées à la surface; l'étape 3 de la figure 3.14 le montre. À ce moment, en fonction de la concentration C de départ, les fibres ont plus ou moins de mal à s'évacuer sur le côté. L'étape 4 correspond à l'instant où les fibres bloquées à la surface recirculent. Il est alors possible d'apercevoir le fond de l'enceinte lorsque l'observateur est placé au-dessus de la surface eau/air. C'est à ce moment précis que le temps t_p est obtenu. Avant d'arriver à l'étape 5, il faut ensuite attendre plus ou moins longtemps suivant la concentration initiale introduite.

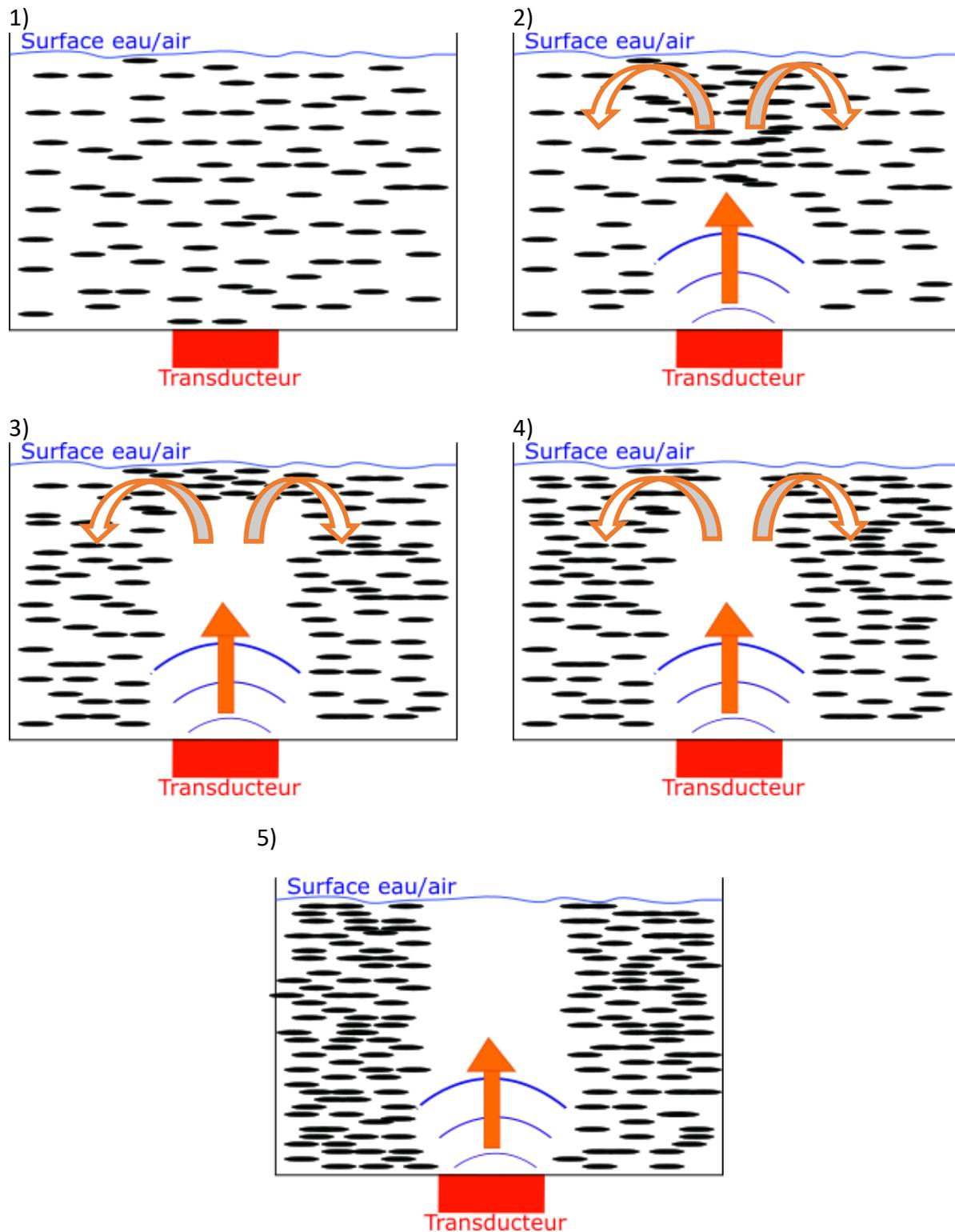


Figure 3.14 Les différentes étapes du processus : (1) Situation initiale; (2) Début de la recirculation causée par l'excitation du transducteur; (3) Accumulation de fibres à la surface; (4) Évacuation des fibres bloquées à la surface; temps t_p mesuré; (5) Situation finale

Impact de la pulpe

Les concentrations de 0.1 % jusqu'à 2%, comme présenté dans le tableau 3.3, sont testées pour le transducteur de 40 kHz excité avec une puissance de 50 W. Les temps moyens nécessaires t_p pour pousser la pulpe et commencer à éclaircir la zone au-dessus du transducteur, étape 4 sur la figure 3.14, sont répertoriés dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3 Temps moyen t_p nécessaire pour pousser la pulpe

	Eucalyptus (Hardwood/ Bois dur)	Pin (Softwood/Bois tendre)
$C = 0.1 \%$	$t_p = 10s$	$t_p = 7s$
$C = 0.2 \%$	$t_p = 15s$	$t_p = 10s$
$C = 0.3 \%$	$t_p = 20s$	$t_p = 15s$
$C = 0.4 \%$	$t_p = 40s$	$t_p = 40s$
$C = 0.5 \%$	$t_p = 55s$	$t_p = 60s$
$C = 0.6 \%$	$t_p = 80s$	$t_p = 70s$
$C = 0.7 \%$	$t_p = 60s$	$t_p = 90s$
$C = 0.8 \%$	$t_p = 65s$	<i>Indéfini</i>
$C = 0.9 \%$	$t_p = 85s$	<i>Indéfini</i>
$C = 1\%$	$t_p = 80s$	<i>Indéfini</i>
$C = 1.5 \%$	$t_p = 100s$	<i>Indéfini</i>
$C = 2 \%$	<i>Indéfini</i>	<i>Indéfini</i>

Comme attendu, plus la concentration initiale est importante et plus il est difficile de pousser la pulpe et ainsi de concentrer la pulpe. En effet, la viscosité de la pulpe devient plus importante. De plus la quantité de fibres et ainsi la masse totale de fibres à déplacer devient aussi plus importante.

La pulpe de pin est plus facile à concentrer que la pulpe d'eucalyptus lorsque la concentration est très faible, ici inférieure à 0.3%. Cependant lorsque la concentration est plus importante il devient très vite difficile de la concentrer. Ainsi, par exemple, il a été impossible d'observer réellement une zone sans pulpe à partir de $C = 0.8\%$. Cela ne veut pas pour autant dire que le phénomène

de concentration et de recirculation de la pulpe n'a pas lieu. L'étape 4 n'est juste pas atteinte dans ce cas. Notre méthode ne permet pas d'observer avant.

Lorsque la concentration augmente et dépasse 1.5%, il devient presque impossible de dévier la pulpe de papier. En effet, notre configuration sans écoulement empêche la pulpe de vraiment être éjectée vers l'extérieur. La pulpe déviée s'agglomère proche de la surface libre et forme une pâte très visqueuse qui ne peut se disperser puisque l'enceinte est close. Il faudrait ici pouvoir travailler avec un écoulement afin de récupérer la pulpe très concentrée.

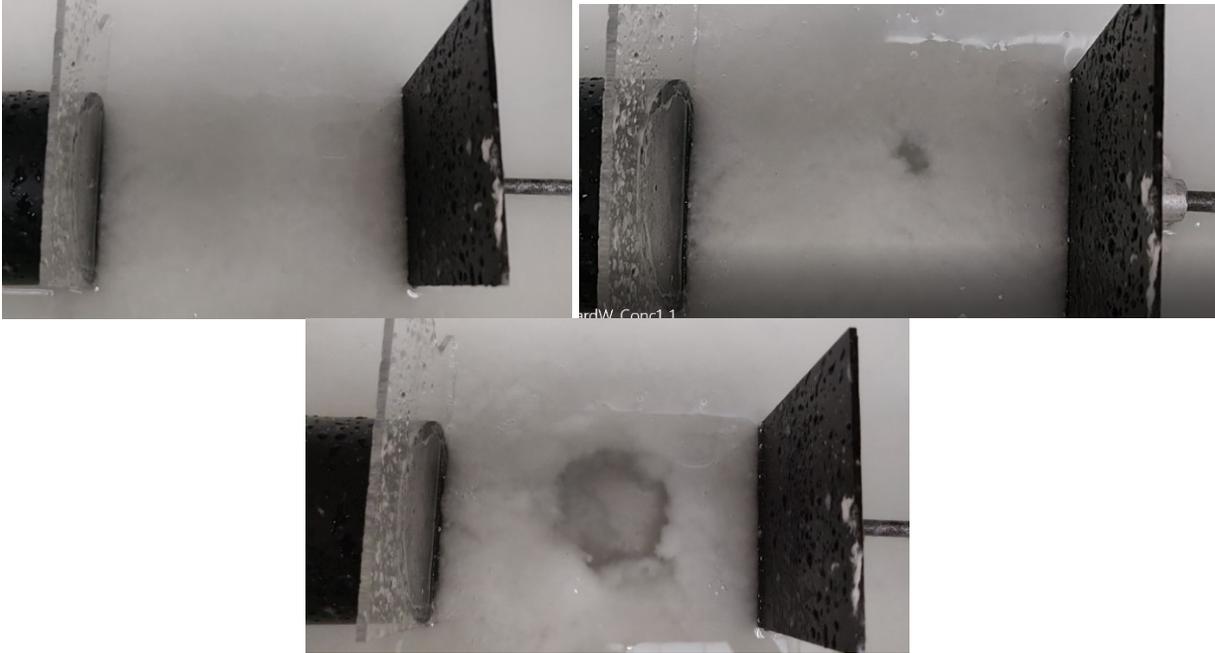


Figure 3.15 Situation pour une pulpe de 1% à $t = 0 s$, à $t = t_p = 80 s$ et à $t = 300 s$

Sur la figure 3.15, différentes photos sont présentées pour la pulpe d'eucalyptus à 1%. Dans ce cas, au bout de 80 secondes l'étape 4 apparaît. Il est ensuite nécessaire d'atteindre 300s avant d'observer un beau tunnel sans pulpe directement au-dessus du transducteur, ce qui est l'étape 5. Ainsi, on peut imaginer une solution dont le but est de concentrer la pulpe après seulement quelques secondes, étapes 3 ou 4, mais sans pour autant attendre d'avoir une zone sans pulpe au centre comme présentée ici.

Impact de la fréquence

De plus, un grand nombre de fréquences a été testé expérimentalement. En effet avec les différents transducteurs présentés dans le tableau 3.1, il a été possible de couvrir une grande plage de fréquence de 20 kHz à 200 kHz, chaque transducteur ayant plusieurs fréquences de résonance. Pour ce faire, la pulpe d'eucalyptus est choisie et la concentration est fixée à 0.5 %. Une puissance électrique de 150 W est envoyée aux transducteurs. Les résultats sont présentés dans le tableau 3.4.

Tableau 3.4 Temps moyen t_p nécessaire en fonction de la fréquence choisie

f	t_p
20 kHz	63 s
40 kHz	45 s
62 kHz	42 s
96 kHz	34 s
160 kHz	32 s
200 kHz	15 s

À la suite de cette expérience on remarque que les hautes fréquences permettent de concentrer la pulpe plus rapidement. Ainsi on a pu observer l'analyse de Brodeur [13], [22], [23] selon laquelle les hautes fréquences permettent d'agir plus efficacement sur les fibres.

Impact de la puissance

La puissance utilisée est aussi un paramètre important. La puissance électrique utilisée influence le temps nécessaire pour éjecter la pulpe. Ainsi une comparaison de plusieurs puissances entrantes a été réalisée pour le transducteur de 40 kHz à sa fréquence de résonance avec une pulpe d'eucalyptus à 0.5%. Ce transducteur a une puissance nominale de 50 W. Il est cependant possible de l'utiliser à plus haute puissance sur une courte période de temps. Ainsi le tableau 3.5 présente les temps t_p nécessaires en fonction de la puissance utilisée par le transducteur.

Tableau 3.5 Temps moyen t_p nécessaire en fonction de la puissance électrique

Puissance électrique	t_p
50 W	62 s
100 W	53 s
150 W	44 s
200 W	35 s
250 W	28 s

On constate bien l'importance de la puissance dans cette situation. Plus la puissance transmise au transducteur est importante plus la pulpe est éjectée rapidement. Ainsi le flux acoustique augmente avec la puissance électrique transmise.

3.5. Conclusion des tests préliminaires

A travers cette première phase expérimentale, on constate qu'il est bien possible de concentrer la pulpe de papier avec une technique ultrasonore. On remarque que dès que la concentration est assez importante la concentration se fait grâce au flux acoustique c'est-à-dire grâce à la force de trainée. La force acoustique de rayonnement caractéristique de la lévitation acoustique n'a pas d'influence puisque les fibres sont très nombreuses et forment un ensemble très visqueux. On s'aperçoit aussi qu'il est nécessaire de travailler avec des transducteurs à hautes fréquences (typiquement au-dessus de 100 kHz) mais aussi de hautes puissances (de l'ordre de 300W électrique).

Néanmoins ces différentes expériences ne nous ont pas permises de tester l'impact de cette méthode ultrasonore pour un écoulement de pulpe de papier. De plus, il est impossible de quantifier le gain de concentration ou encore le nombre de fibres déviées lors de nos expériences. C'est pourquoi il est nécessaire de réaliser des simulations numériques afin d'étudier les performances atteignables pour cette méthode de concentration de pulpe de papier.

CHAPITRE 4

4. NUMERICAL MODELING OF ACOUSTOPHORESIS FOR PAPER PULP CONCENTRATION

4.1. Avant-propos

Auteurs et affiliations :

Romain Le Magueresse : étudiant à la maîtrise, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique.

Nicolas Quaegebeur: professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique.

Robert Schiavi : ingénieur, Valmet - 27 Allen Street - Hudson Falls (NY) – 12839 – USA

Pierre Gelinas : ingénieur, Valmet - 3100 rue Westinghouse - Trois-Rivieres (QC) - G9A 5E1 – CANADA

Tamara Krpic : étudiante au baccalauréat, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique.

Date de soumission : 26 février 2020

Revue : *Ultrasonics Sonochemistry*

Titre français : Modélisation numérique de la lévitation acoustique pour la concentration de pulpe de papier

4.2. Résumé de l'article

Dans cette partie, un modèle numérique permettant de reproduire la concentration de la pulpe par notre méthode ultrasonore est développé. Il s'appuie sur le travail de Bruus et Muller [21]. La pâte est définie comme un fluide pseudo-homogène avec une viscosité caractérisée en fonction du taux de cisaillement et de sa consistance, et l'écoulement est modélisé avec un formalisme turbulent de type $k - \epsilon$ à bas nombre de Reynolds. Dans ce modèle, les particules du flux de pâte sont considérées comme sphériques et sont entraînées par les forces acoustiques : la force de rayonnement acoustique et la force de traînée de Stokes. Ces deux forces sont induites par une onde ultrasonore provenant de l'excitation d'un anneau de transducteurs. La valeur du débit moyen de la pâte est tout d'abord calculée. Ensuite, les forces acoustiques avec une perturbation des termes des premier et second ordres sont résolues. L'effet combiné de ces deux forces dans l'écoulement de la pâte permet de concentrer les particules au centre du tuyau.

Ainsi, le modèle de lévitation acoustique met en évidence, comme prévu, la dualité entre la force de rayonnement acoustique et la force de traînée. En raison de la viscosité élevée de la pâte à papier, la force de traînée est dominante dans nos simulations et permet une configuration qui dévie les fibres de la pâte vers le centre du tuyau. L'étude paramétrique menée permet d'étudier l'influence du transducteur et des paramètres de l'écoulement de la pâte sur les forces de traînée et de rayonnement. Enfin, grâce au suivi des particules, l'effet de ces deux forces est mis en évidence. Pour avoir un temps important d'exposition des particules à la zone de pression acoustique maximale, il est nécessaire d'avoir un écoulement à faible vitesse. Les particules sont alors déviées vers le centre de notre tuyau et leur position est déterminée afin de déduire l'efficacité du processus. Selon les paramètres utilisés à la fin de l'article, la déviation peut être relativement importante, jusqu'à 10 mm, et peut être assimilée à un gain de concentration de 15%.

4.3. Abstract

In pulp and paper mills, mechanical processes such as screening and washing are commonly used to remove accumulated solid suspensions and concentrate the pulp. For environmental reasons and to optimize paper production, the challenge today is to develop alternative methods to concentrate paper pulp between 3% and 6% consistency for which the mixed pulp-water flow is complex. Among the proposed solutions in the literature, solutions based on acoustic levitation, also referred as acoustophoresis, of low-consistency pulp have been demonstrated as a potential solution for efficient pulp concentration and water recirculation. However, no sensitivity analysis on the ultrasound and physical parameters was proposed, limiting the extension to a realistic application. Thus, this paper presents a numerical modeling of acoustophoresis for pulp flow concentration in a pipe. For this purpose, the pulp flow is defined as a pseudo-homogenous fluid with a turbulent *Low Re k - ε* formalism, and the pulp particles are considered spherical and deflected by two acoustic forces, namely the acoustic radiation force and the Stokes drag force, both induced by an ultrasound wave generated along the walls of a circular pipe. The combined action of these two forces in the pulp flow enables to concentrate the particles at the center of the pipe. The influences of particle size and mechanical properties, fluid properties and ultrasound parameters are analysed with a parametric study to optimize the particle deflection and the pulp concentration. Thus, the feasibility of the industrial use of acoustophoresis for the concentration of paper pulp is highlighted.

Keywords

Acoustophoresis – Papermaking – Fiber suspension flow - Numerical simulation – Paper pulp concentration

4.4. Introduction

In pulp and paper mills, mechanical processes [46] such as screening and washing are commonly used to remove accumulated solid suspensions and concentrate the pulp. Screening of the pulp is a step that separates, with the help of sieves, all the wood residues that are not cellulosic fibres: knots or debris. The pulp consistency is below 3%. After this screening step, pulp washing is used to recover the cooking chemicals and to increase the consistency from 6% to 30%. For environmental reasons and in order to optimize paper production, the challenge today is to develop new methods to concentrate paper pulp between 3% and 6% consistency for which the mixed pulp-water flow is complex (non-Newtonian fluid, existence of a transition phase between turbulent and laminar flow) [2], [8].

Indeed, the flow of pulp fiber suspension in a pipe is characterized by three distinct regimes. At low velocities (typically below 0.1 m/s), the flow exhibits the shape of a fibre plug, for which shear occurs in a boundary layer along the wall and the velocity profile is uniform in the bulk region. For higher velocities (typically around 0.5 m/s) a transition zone occurs where the central plug is surrounded by a ring where the water-fiber mixture is turbulent. At high speed (above 1 m/s typically) the entire fluid is turbulent and can be considered as water [2].

Among the proposed solutions in the literature, the experimental work of H. Brodeur based on acoustic levitation, also referred as acoustophoresis, of low-consistency pulp [22], [23], [47] has demonstrated a potential solution for efficient pulp concentration and water recirculation. The objective of this technique is to remotely act on the pulp fibers using a high-power ultrasonic field that will induce a displacement of the fibers and surrounding fluid through the combined effect of the radiation acoustic force and the drag force. However, these experimental studies did not lead to an industrial solution since the pulp consistencies were chosen below 1% and thus not aligned with industrial requirements. Moreover, since the published work was mostly experimental, no sensitivity analysis on the ultrasound and physical parameters was proposed, limiting the extension to a realistic application.

In the last decade, the numerical modeling of acoustophoresis has received much attention for micro-fluidic systems. Indeed, today there are many applications of the use of acoustic levitation in static microfluidic environments for biological and pharmaceutical applications [19], [48], [49]. The influence of particle size and mechanical properties, fluid properties and ultrasound parameters has been extensively studied using Finite Element Models (FEM) for micro-sized applications. However, to the best of our knowledge, no extension to macro-sized or industrial systems in the presence of a mean flow has been proposed in the literature. Thus, in order to investigate the feasibility and the extension of acoustophoresis for high-consistency pulp, the extension of existing numerical models developed for microfluidic environments is proposed in the present study for a pulp flow in a pipe in the presence of a mean flow.

In section 4.5, the governing equations of acoustophoresis are derived in the case of a fiber-pulp mixture in the presence of a mean flow. Subsequently in section 4.6, the numerical implementation of this model is proposed and the results are presented in section 4.7. Parametric

studies are then conducted and discussed in section 4.7 in order to optimize the deviation of paper pulp particles.

4.5. Modeling acoustophoresis in a pulp flow

In the present study, we consider a cylindrical configuration of acoustophoresis for which the aim is to concentrate the fibers towards the center of a cylindrical pipe using an axisymmetric ring of transducers as presented in Fig.4.1.

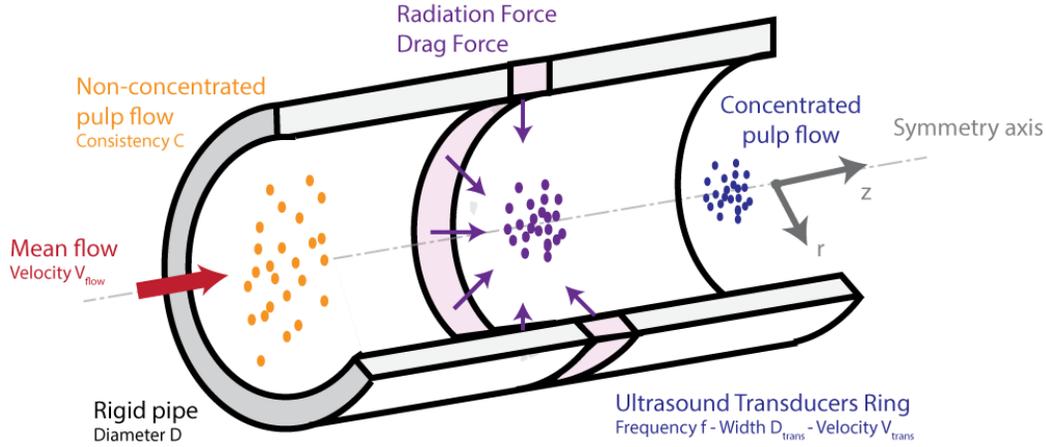


Figure 4.1 Schematics of the pulp concentration using acoustophoresis

The fluid is defined by its velocity \mathbf{u} , pressure p and density ρ . Each of these variables is defined as the sum of the average value ($\mathbf{u}_0, p_0, \rho_0$) induced by the mean flow and the first ($\mathbf{u}_1, p_1, \rho_1$) and second order ($\mathbf{u}_2, p_2, \rho_2$) terms :

$$\mathbf{u}(r, z, t) = \mathbf{u}_0(r) + \mathbf{u}_1(r, z, t) + \mathbf{u}_2(r, z) \quad (4.1.a)$$

$$p(r, z, t) = p_0(r) + p_1(r, z, t) + p_2(r, z) \quad (4.1.b)$$

$$\rho(r, z, t) = \rho_0(r) + \rho_1(r, z, t) + \rho_2(r, z) \quad (4.1.c)$$

The terms ($\mathbf{u}_0, p_0, \rho_0$) correspond to the average flow of pulp in the pipe and only depend on the radial position r since the mean flow is assumed to be established and thus independent of the z position. This flow is detailed in section 4.5.1. The first order disturbance terms ($\mathbf{u}_1, p_1, \rho_1$) presented in section 4.5.2 correspond to the harmonic acoustic fields induced by the transducers at the angular frequency ω . These terms allow the derivation of the acoustic radiation force. The second order terms ($\mathbf{u}_2, p_2, \rho_2$) are related to the acoustic streaming induced by the first order terms and thus time-independent. Those terms introduced in section 4.5.3, are responsible for the drag force.

4.5.1. Pulp flow model ($\mathbf{u}_0, p_0, \rho_0$)

In our study, the fluid is considered as pseudo-homogeneous, where interactions of particles with each other are neglected, such that each particle is independent. There are several ways to numerically model the pulp flow [50] depending on the velocity and consistency regimes. The first regime that corresponds to the plug flow can be modelled by a laminar flow by imposing sliding conditions on the walls [2]. The second regime, also referred as the transition regime, is very difficult to model. In this case, a laminar flow could be used for the central part and a turbulent flow in the lateral part. The third regime corresponding to high velocities can be considered as turbulent, and is commonly modeled using $k - \epsilon$ formalism [5] or the *Low Re* $k - \epsilon$ [6], [7]. For the $k - \epsilon$ model, the flow is not calculated in the viscous sublayer and in the buffer region close to the walls, since wall functions are used in order to avoid modeling the boundary layer at the walls. The *Low Re* $k - \epsilon$ model can be seen as an extension of the $k - \epsilon$ model since it does not require wall approximations and the flow is solved everywhere, requiring a very high mesh resolution, and thus a high computational cost.

In the present study, the *Low Re* $k - \epsilon$ formalism is used for computing the mean flow and allows modeling the plug and turbulent phases accurately. In the present study, the AKN (Abe, Kondoh, and Nagano [51]) formalism is chosen to model the pulp and can be expressed as the following system of nonlinear partial derivative equations [52]:

$$\frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} (r \rho_0 u \phi) + \frac{\partial}{\partial z} (r \rho_0 w \phi) \right) = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial z} \left(r \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) \right) + S_\phi \quad (4.2)$$

where z and r correspond to the axial and radial coordinates, u and w to the radial and axial components of the fluid velocity field u_0 , ρ_0 denotes the fluid density and the terms ϕ , Γ_ϕ and S_ϕ are defined in table 4.1 using $G_k = \mu_t \left(2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{u}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right)$. This generalized formulation allows extracting the 5 governing equations of the AKN model.

Table 4.1 Definition of the terms ϕ , Γ_ϕ and S_ϕ in the general expression of Eq.4.2

Equation	ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
Continuity	1	0	0
Momentum radial	u	$\mu_{eff} = \mu + \mu_t$	$-\frac{\partial p_0}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{2 \mu_{eff} u}{r^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial r} \right)$
Momentum axial	w	$\mu_{eff} = \mu + \mu_t$	$-\frac{\partial p_0}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial z} \right)$
Turbulence kinetic energy	k	$\mu + \mu_t / \sigma_k$	$G_k - \rho_0 \epsilon$
Turbulence dissipation rate	ϵ	$\mu + \mu_t / \sigma_\epsilon$	$(C_{\epsilon 1} f_1 G_k - C_{\epsilon 2} f_2 \rho_0 \epsilon) \epsilon / k$

The AKN model constants are: $C_\mu = 0.09$, $C_{\epsilon 1} = 1.50$, $C_{\epsilon 2} = 1.90$, $\sigma_k = 1.4$ and $\sigma_\epsilon = 1.5$. The turbulent viscosity μ_t is introduced, and defined through the coefficient $C_\mu = 0.09$, and the function f_μ from table 4.2:

$$\mu_t = \frac{\rho_0 C_\mu f_\mu k^2}{\epsilon} \quad (4.3)$$

The original functions of the AKN model are used. These functions are defined in table 4.2 [51]:

Table 4.2 AKN model functions

f_μ	f_2	f_1
$\left[1 - \exp\left(-\frac{Re_\epsilon}{14}\right)\right]^2 * \left[1 + 5 \exp\left(-\frac{\left(\frac{Re_t}{200}\right)^2}{Re_t^{\frac{3}{4}}}\right)\right]$	$\left[1 - \exp\left(-\frac{Re_\epsilon}{3.1}\right)\right]^2 * \left[1 - 0.3 \exp\left(-\left(\frac{Re_t}{6.5}\right)^2\right)\right]$	1

with $Re_t = \frac{k^2}{\epsilon \nu}$, $Re_k = \frac{k^2 y}{\nu}$, $Re_\epsilon = \frac{\left(\frac{\mu \epsilon}{\rho_0}\right)^{\frac{1}{4}} y}{\nu}$, $\nu = \frac{\mu}{\rho_0}$, y : dimensionless distance

In addition, the paper pulp-water mixture is considered as a non-Newtonian fluid whose viscosity μ is not constant and depends on different parameters. A simple model is to consider the viscosity of the pulp flow as the ratio between stress and shear rate [3]. A more complete model was then validated by Cotas [52], considering the pulp concentration and shear rate. This model has been experimentally validated for different pulp types:

$$\mu = K' C^\alpha (\dot{\gamma})^{\beta C} \quad (4.4)$$

where K' , α , β are defined for both eucalyptus pulp (Hardwood pulp) and pine pulp (Softwood pulp) in [3] in order to obtain the viscosity for each pulp type. Those viscosity parameters are then used for the calculation of the *Low Re k - ϵ* model and first order terms calculations.

4.5.2. First order terms ($\mathbf{u}_1, p_1, \rho_1$)

In this section, the first order terms ($\mathbf{u}_1, p_1, \rho_1$) are considered. For this purpose, the models developed for micro-fluidic environments [21] are introduced and adapted to the present study. For this purpose, the acoustic field induced by the transducers ring is computed assuming a harmonic regime at angular frequency ω . To derive the governing equations, the heat transfer equation is first considered for temperature T_1 and combined with the continuity equation and the Reynolds Average Navier-Stokes dynamic equation, assuming the fluid to be incompressible. Those fields are considered as first-order perturbations with respect to the mean fields induced by the pulp flow and since the pulp flow speed is very low compared to the acoustic wave speed, both fields are decoupled, and the transport terms are omitted [21] :

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = D_{th} \nabla^2 T_1 + \alpha \frac{T_0}{\rho_0 C_p} \frac{\partial p_1}{\partial t} \quad (4.5.a)$$

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \frac{1}{\gamma \kappa} \nabla \cdot \mathbf{u}_1 = \frac{\alpha}{\gamma \kappa} \frac{\partial T_1}{\partial t} \quad (4.5.b)$$

$$\rho_0 \frac{\partial \mathbf{u}_1}{\partial t} = -\nabla p_1 + \mu \nabla^2 \mathbf{u}_1 + \beta \mu \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}_1) \quad (4.5.c)$$

with β the viscosity ratio which is 1/3 for a simple liquid, D_{th} the thermal diffusivity of the fluid, γ the specific heat rate, κ the isentropic compressibility and α the thermal expansion coefficient. Under harmonic assumption at angular frequency ω , those equations are combined to obtain the following system [21]:

$$i\omega T_1 + \gamma D_{th} \nabla^2 T_1 = \frac{\gamma - 1}{\alpha} \nabla \cdot \mathbf{u}_1 \quad (4.6.a)$$

$$i\omega \mathbf{u}_1 + \nu \nabla^2 \mathbf{u}_1 + \nu \left(\beta + i \frac{1}{\gamma \rho_0 \kappa \nu \omega} \right) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}_1) = \frac{\alpha}{(\gamma \rho_0 \kappa)} \nabla T_1 \quad (4.6.b)$$

with $\nu = \frac{\mu}{\rho_0}$ the kinematic viscosity. As noted in [21], two distinct boundary layers are obtained for the variables \mathbf{u}_1 and T_1 are namely referred as the viscous and thermal boundary layer thicknesses:

$$\delta_{th} = \frac{\sqrt{2D_{th}}}{\omega} \quad (4.7.a)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2\nu}{\omega}} \quad (4.7.b)$$

These two penetration lengths define the thickness of the boundary layers at the walls, and thus the limit for the mesh when solving the first order terms.

Moreover the acoustic attenuation α_{acous} in pulp is considered in the model. We rely on the work of McFarlan [53] and Lofqvist [54] to have the values of acoustic attenuation as a function of the consistency of the pulp and the frequency used.

4.5.3. Second order terms ($\mathbf{u}_2, p_2, \rho_2$)

The second order terms are now considered to obtain the induced acoustic stream. In this case, the coupling between the temperature field T_2 and the fields p_2 and \mathbf{u}_2 is neglected, and the second order continuity equation as well as Navier Stokes' equation are used:

$$\frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \rho_0 \nabla \cdot \mathbf{u}_2 + \nabla(\rho_1 \mathbf{u}_1) = 0 \quad (4.8.a)$$

$$\rho_0 \frac{\partial \mathbf{u}_2}{\partial t} + \rho_1 \frac{\partial \mathbf{u}_1}{\partial t} + \rho_0 (\mathbf{u}_1 \cdot \nabla) \mathbf{u}_1 = -\nabla p_2 + \mu \nabla^2 \mathbf{u}_2 + \beta \mu \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}_2) \quad (4.8.b)$$

After time-averaging those two equations over a period of oscillation denoted $\langle \dots \rangle$ the following equations are obtained:

$$\rho_0 \nabla \cdot \langle \mathbf{u}_2 \rangle = -\nabla \cdot \langle \rho_1 \mathbf{u}_1 \rangle \quad (4.9.a)$$

$$\langle \rho_1 \frac{\partial \mathbf{u}_1}{\partial t} \rangle + \rho_0 \langle (\mathbf{u}_1 \cdot \nabla) \mathbf{u}_1 \rangle = \mu \nabla^2 \langle \mathbf{u}_2 \rangle + \beta \mu \nabla(\nabla \cdot \langle \mathbf{u}_2 \rangle) - \langle \nabla p_2 \rangle \quad (4.9.b)$$

4.5.4. Forces in action

In order to model acoustophoresis, different fibers are introduced in the model defined by their respective position. For the sake of simplicity, the fibers are modeled as spherical particles of radius a and density ρ_p instead of cylindrical particles [24]. This allows neglecting the degree of freedom in rotation [24] of each fiber. In addition, any interactions between particles and the gravity are neglected. Consequently, the radiation and drag forces characteristic of acoustophoresis can now be derived. The radiation force on a spherical particle of radius a subjected to the pressure field is defined as follows [55]:

$$F_{rad} = -\pi a^3 \left(\frac{2\kappa_0}{3} Re(f_{1,rad}^* p_1^* \nabla p_1) - \rho_0 Re(f_{2,rad}^* \mathbf{u}_1^* \cdot \nabla \mathbf{u}_1) \right) \quad (4.10)$$

with $\kappa_0 = \frac{1}{\rho_0 c_0^2}$ the fluid compressibility, $f_{1,rad}(\tilde{\kappa}) = 1 - \tilde{\kappa}$, with $\tilde{\kappa} = \frac{\kappa_p}{\kappa_0}$; $f_{2,rad}(\tilde{\rho}, \tilde{\delta}) = \frac{2(1-\Gamma(\tilde{\delta}))(\tilde{\rho}-1)}{2\tilde{\rho}+1-3\Gamma(\tilde{\delta})}$ with $\tilde{\rho} = \frac{\rho_p}{\rho_0}$; $\Gamma(\tilde{\delta}) = -\frac{3}{2}(1+i(1+\tilde{\delta}))\tilde{\delta}$, with $\tilde{\delta} = \frac{\delta}{a}$.

The time-averaged Stokes drag force on a spherical particle of radius a moving with velocity \mathbf{u} in a fluid having a mean flow \mathbf{u}_0 and a streaming velocity \mathbf{u}_2 is given by the expression [21]:

$$F_{drag} = 6\pi\mu a(\mathbf{u}_0 + \mathbf{u}_2 - \mathbf{u}) \quad (4.11)$$

These two forces act on each particle simultaneously such that the resulting movement of particles occurs through the combined effect of the radiation acoustic force and the drag force. The radiation acoustic force attracts particles into the pressure nodes of the p_1 sound field, while the drag force deflects the particles through the acoustic stream created by the harmonic excitation. It is therefore interesting to determine which force predominates over the other one for a given configuration or frequency.

4.6. Numerical implementation of the model

4.6.1. Simulation parameters

In this section, the numerical model and its implementation on the multiphysics software COMSOL 5.4 are presented. The studied area is an axisymmetric pipe of length L and diameter D such that a 2D numerical model is implemented in order to reduce the calculation time compared to a 3D model. The piezoelectric transducer is represented by a radiating surface of diameter D_{trans} with a normal vibration velocity V_{trans} at frequency f . For the fluid and wood particles, the parameters presented in Tab.1 are used based on [56]. Some parameters such as frequency f , particle radius a , density ρ_p , fluid viscosity μ , transducer velocity V_{trans} , and mean fluid velocity V_{flow} are not indicated in Tab. 4.3, since their influence will be studied in detail during the parametric study.

Table 4.3 Parameters for the domain, particles and fluid

Element	Parameter	Notation	Value	Reference value
Pipe	Diameter [mm]	D	300	
	Length [mm]	L	600	
Transducer	Diameter [mm]	D_{trans}	45 – 100	45
	Frequency [kHz]	f	20 – 300	40
	Excitation velocity [m. s ⁻¹]	V_{trans}	0.1 – 4	1
Wood particles	Radius [μm]	a	5 – 1000	10
	Density [kg. m ⁻³]	ρ_p	700 – 1500	900
	Speed of sound [m. s ⁻¹]	c_p	3300	
	Transverse speed of sound [m. s ⁻¹]	c_{pt}	1100	
	Poisson's ratio	σ_p	0.35	
	Compressibility [56]	κ_p	$\frac{3(1 - \sigma_p)}{1 + \sigma_p} \frac{1}{\rho_p c_p^2}$	
Fluid/Water	Consistency	C	0.5 – 3 %	3 %
	Viscosity (Eucalyptus)	μ	$10^{-2.07} C^{6.97} (\dot{\gamma})^{-0.26 C}$	
	Viscosity (Pine)	μ	$10^{-1.12} C^{5.90} (\dot{\gamma})^{-0.28 C}$	
	Inflow velocity [m. s ⁻¹]	V_{flow}	0.1 – 1	0.1
	Density [kg. m ⁻³]	ρ_0	1000	
	Speed of sound [m. s ⁻¹]	c_0	1500	
	Compressibility [pPa ⁻¹]	κ_0	448	
	Thermal conductivity [W. m ⁻¹ K ⁻¹]	k_{th}	0.603	
	Specific heat capacity [J. kg ⁻¹ K ⁻¹]	C_p	4183	
	Specific heat capacity ratio	γ	1.014	
	Thermal diffusivity [m ² s ⁻¹]	D_{th}	$1.43e - 7$	
	Thermal expansion ratio [K ⁻¹]	α	$3e - 6$	

4.6.2. Numerical implementation

The mean flow is implemented using the *Turbulent Flow Low Re $k-\epsilon$* module. The parameters are adjusted according to the model presented in the section 4.5 and Tab. 4.3. The boundary conditions are defined as follows: at the inlet, a normal mean velocity V_{flow} with turbulent flow constants as presented in section 4.5.1 and a turbulent intensity of 5%, and at the outlet, the pressure is considered null. A no-slip condition is applied to the side wall. For this step, a physics-controlled mesh is used with extra fine elements. Thus, a sequence type mesh for fluid dynamics in COMSOL is implemented with triangular elements, of a maximal length of 1 mm, and a local refinement with a element size scaling factor of 0.2 around the edge of the pipe is used in order to accurately describe the boundary layer of the mean flow. This step requires 75 000 elements for a total of approximately 200 000 degrees of freedom. As explained in the CFD Module User's guide of COMSOL [57], the nonlinear system that the Navier-Stokes (RANS) and turbulence transport equations constitute is solved using a segregated approach. Thus, for each iteration in the Navier-Stokes group, two or three iterations are performed for the turbulence transport equations. The default iterative solver for the turbulence transport equations is a damped Newton method with constant damping factor. In each iteration, a linearized version of the nonlinear system is solved using GMRES accelerated by Smoothed Aggregated Algebraic Multigrid (SAAMG). The default smoother is SOR Line.

For the first and second order terms, the *Thermoviscous Acoustics* and *Laminar Flow* modules are respectively used. The *Thermoviscous Acoustics* module allows calculating the first order acoustic field as proposed in [21]. This calculation is performed assuming harmonic excitation at the frequency f . For this purpose, an isothermal condition is applied to the side wall and the inlet and outlet faces are assumed to be located at an infinite distance, which is modelled using a Perfectly Matched Layer (PML) of three acoustic wavelengths long is added at both ends of the pipe. The excitation terms correspond to the transducer which imposes a normal velocity. In order to avoid the discontinuities at the edges of the transducer, a spatial windowing (Hanning window) is used over a length D_{trans} with a maximal value of V_{trans} .

Then, the second order terms are computed with the *Laminar Flow* module where the additional terms in Eq. (4.9.b) are added as weak contributions, as suggested in [21]. For this step, a second more refined mesh is used based on the acoustic and thermal field properties. Thus, the mesh is composed of triangular elements whose maximum size is defined as $1/10$ of the wavelength λ . In addition, it is necessary to refine the mesh at the domain boundaries in order to correctly model the thermo-viscous effects close to the pipe walls. To capture them, we use the built-in 10 boundary elements in COMSOL whose maximal size is defined as $d_{mesh} = 0.5\delta$; where δ is defined as the boundary layer size in section 4.5.2. Thus, the model contains 230 000 elements for a total number of approximately 2 000 000 degrees of freedom. The equations presented in section 4.5.2 and 4.5.3 are solved with a PARDISO solver.

Based on the first and second order terms, the acoustic radiation and drag forces are extracted at each point of the domain. The *Particle Tracing* module is then used to apply the forces involved to a set of particles injected at inlet with the same velocity than the mean pulp flow. The effect of gravitation is neglected and so only the radiation and drag forces induced by the acoustic field

are opposed to the drag force induced by the mean flow. At the inlet of the pipe, particles are equally distributed over the pipe radius and the trajectory of each particle is computed through to the outlet thereby allowing the calculation of the radial deflection for each particle.

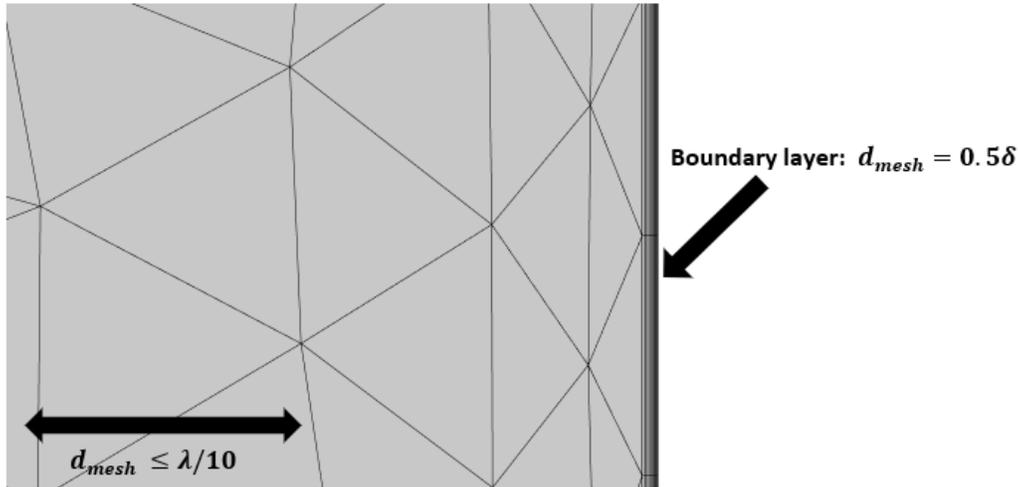


Figure 4.2 Details of the boundary layer used for computation of the first and second order terms

4.7. Numerical Results

4.7.1. Reference configuration

In this section, a reference configuration is first considered in order to present the typical results and allow for determining the influence of the parameters under consideration. In this case, the reference values from Tab.4.3 are used and determined based on preliminary experiments from the literature and experiments carried out in realistic conditions. For this purpose, a pulp consistency of 3 % for the eucalyptus wood is selected. Thus, the viscosity is obtained by considering the formula (4.4) for an inlet flow velocity of 0.1 *m/s*. The transducer size and velocity are based on typical values obtained for Langevin transducer excited around their resonance frequency.

Therefore, as a result of our model presented in sections 4.5 and 4.6, we obtain the first order and the second order fields in the figure 4.3.

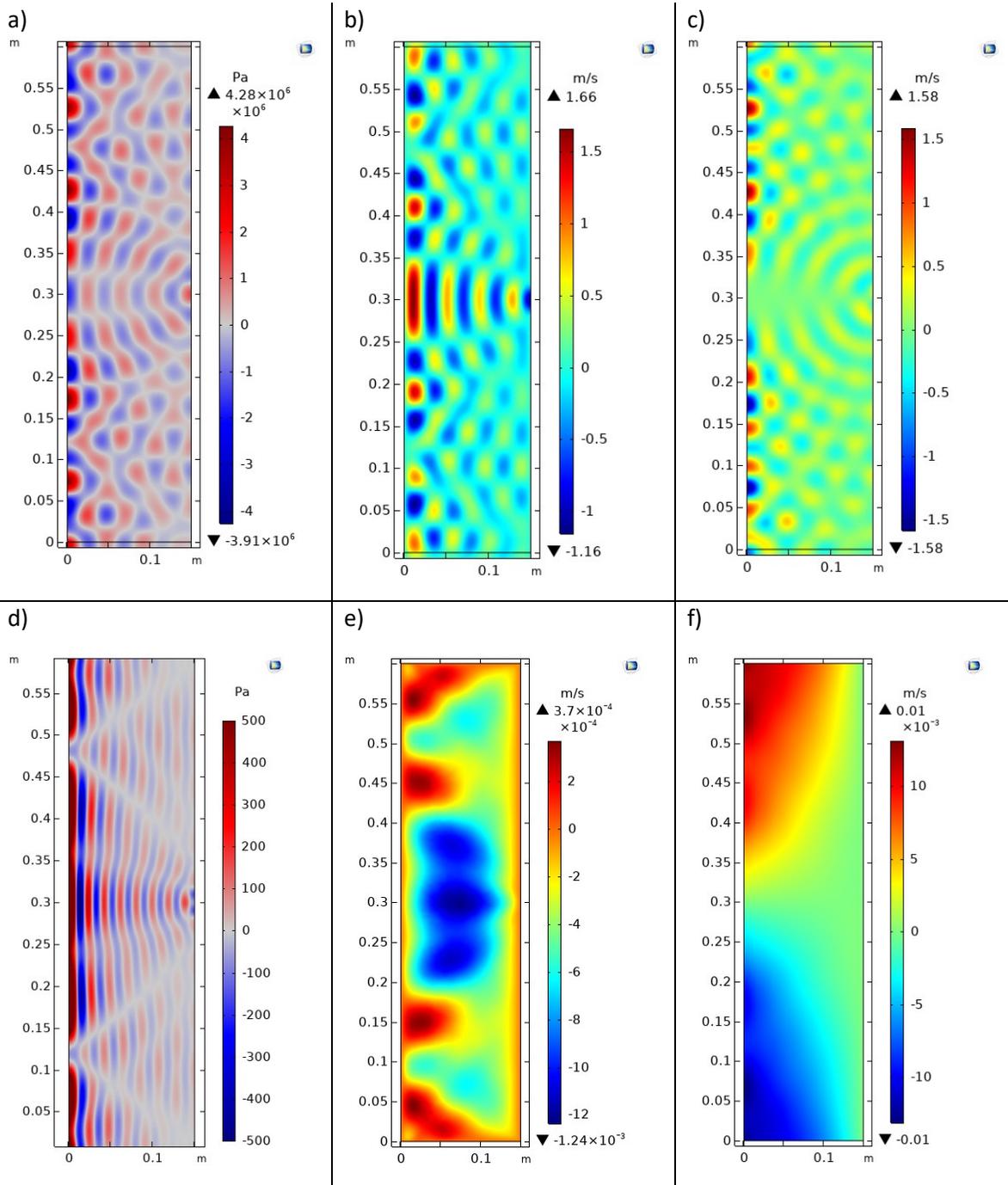


Figure 4.3 a) Pressure field p_1 , b) Radial velocity u_1 , c) Axial velocity w_1 , d) Pressure field p_2 , e) Radial velocity u_2 and f) Axial velocity w_2

Figure 4.3a) presents the pressure and velocity fields for the first and second order terms. The pressure and radial velocity fields p_1 and u_1 , in Figure 4.3a) and 4.3b) are characterized by a succession of minima and maxima. There are four of them in front of the transducer, corresponding to a resonance at the wavelength $\lambda = \frac{c}{f} = 37.5 \text{ mm}$, which corresponds to a quarter of the pipe radius of 150 mm . The maximal pressure obtained on the axis of symmetry

of the pipe is 4.28 MPa. Moreover, the pressure maxima p_1 corresponds to the velocity minima u_1 , and vice versa, creating an acoustic radiation that should trap the particles at the velocity nodes corresponding to pressure maxima. The axial velocity w_1 in Figure 4.3c), though not very interesting for our study, also exhibits maxima at the center of the pipe.

As for the first order pressure field p_1 , the second order pressure field p_2 is maximal on the axis of symmetry of the pipe. In Figure 4.3d) p_2 exhibits twice as many pressure nodes as p_1 . In the center of the domain, equal to half the pipe radius, a negative velocity area is observed corresponding to a zone of concentration of the pulp towards the center of the pipe. Indeed, in this zone, the velocity u_2 will push the particles towards the center of the pipe thanks to the drag force. The minimum value in the reference configuration is -1.24 mm/s . Finally, in Figure 4.3f) the axial velocity w_2 is presented. This velocity has a maximum value of only $10 \text{ }\mu\text{m/s}$, which is 120 times lower than u_2 , meaning this term has a very low impact on the drag force and therefore on the movement of the particles.

Thereafter only radial velocities are presented since they are preponderant and will be responsible for the radial compression of the pulp. Thus, the acoustic radiation and drag forces are computed over the whole domain and the radial components are presented in figures 4.4a) and 4.4c). These forces are also presented in the plane in front of the transducer for $z = L/2$ in figures 4.4b) and 4.4d).

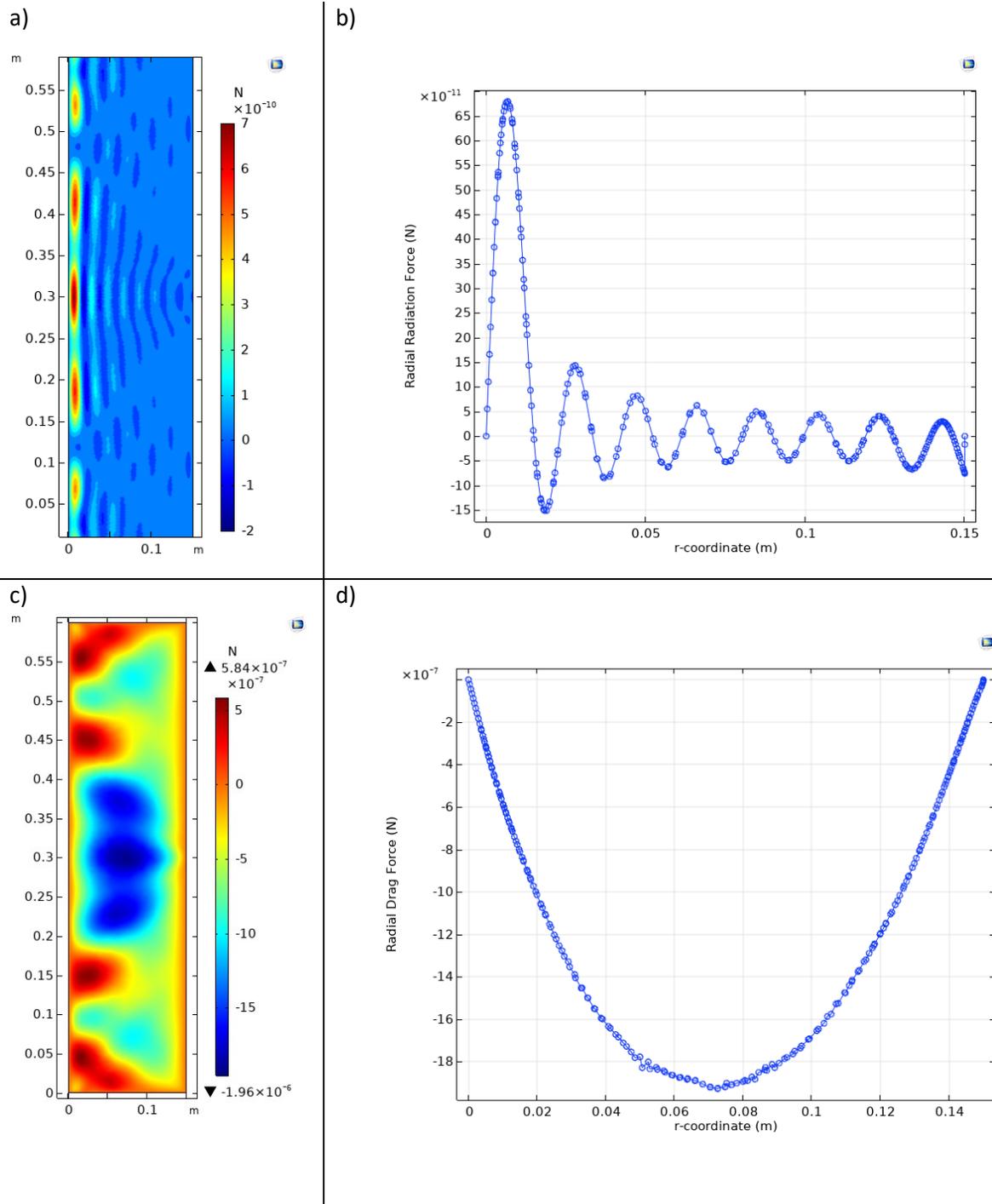


Figure 4.4 a) Surface radial acoustic radiation force; b) Radial acoustic radiation force for $z=L/2$; c) Surface radial drag force ; d) Radial drag force for $z=L/2$

The radial component of the acoustic radiation force has 8 maxima corresponding to the 8 pressure nodes of the acoustic field p_1 . The maximum radiation force is reached at the center of the pipe and is 0.68 nN . For the radial drag force, the pattern follows the one for the radial velocity u_2 and the central area provides a negative drag force that will concentrate the particles

towards the center of the pipe. The maximum force is $-1.96 \mu N$ and is predominant. Thus, the drag force is nearly 3 000 times higher than the acoustic radiation force for our application. Therefore, the acoustic streaming induced by the transducer excitation pushes the particles towards the center of the pipe (at $r = 0$) and the particles are not attracted toward sound pressure nodes as for acoustic levitation applications. This can be explained by the high viscosity of the fluid and the limited size of the particles. The objective of the following section is to study the influence of the parameters involved, in this model of acoustophoresis in a pulp flow, in order to determine if an optimal configuration for pulp concentration exists and determine its feasibility for industrial application.

4.7.2. Influence of the acoustic parameters

Excitation frequency

In this section, the reference parameters are used and only the transducer frequency is changed from 20 kHz to 300 kHz. Due to the large size of our domain ($L = 300 \text{ mm}$), and the frequency dependent meshing process used for the first and second orders computation, it is unfortunately difficult to test higher frequencies.

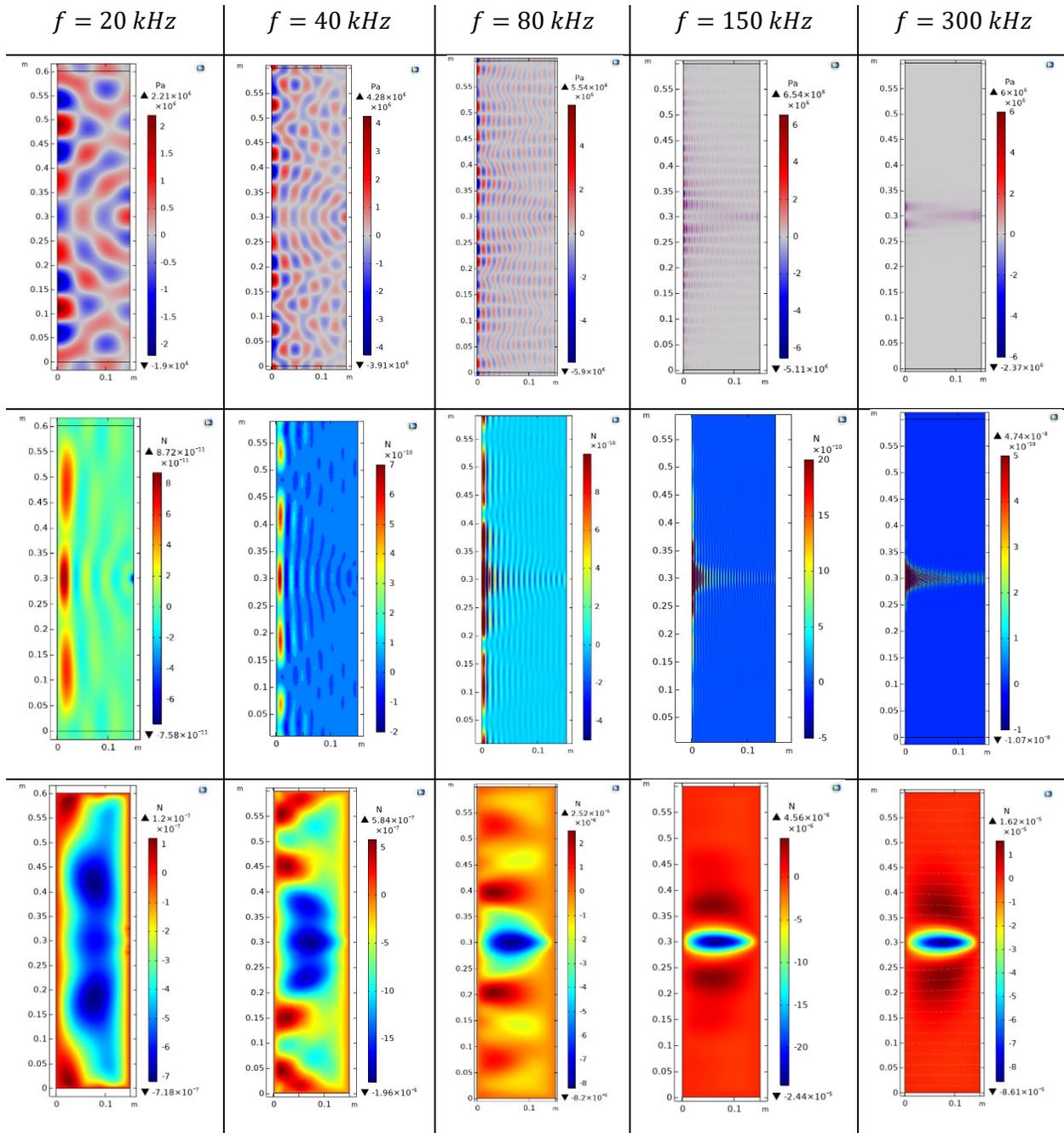


Figure 4.5 Pressure field p_1 (top); Radial radiation force (middle); Radial drag force (bottom) The first-order pressure fields, radiation and drag forces fields are presented in Fig.4.5 for each frequency.

The contribution of both forces in the axis of the transducer (for $z = 0$) are presented in Fig.4.6. The inverse of the drag force is plotted in the following figures for ease of understanding.

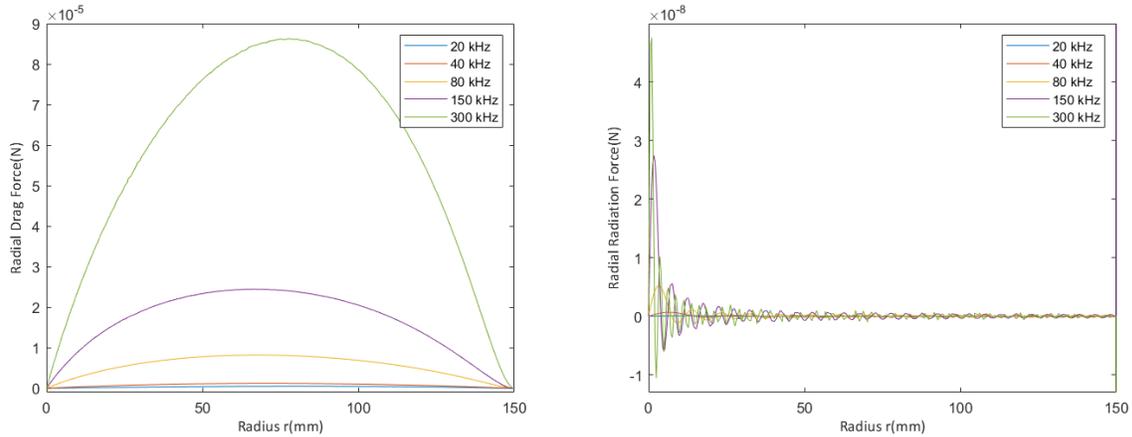


Figure 4.6 Influence of the transducer frequency on the radial drag (left) and radiation (right) forces

When the frequency increases, the wavelength decreases, and the number of pressure nodes naturally increases. In addition, the intensity of the radiation force increases as the frequency increases from $8.10^{-2} nN$ at 20 kHz to $5.10^{-2} \mu N$ at 300 kHz. For the drag force, the same effect is observed, with an increase in the absolute value in front of the transducer from $-0.71 \mu N$ at 20 kHz to $-86.1 \mu N$ at 300kHz. These observations confirm the experimental results of Brodeur [23] who observed that the radiation force was more pronounced at higher frequencies.

When the frequency increases the excitation becomes more directive as predicted by the plane piston model. Thus, the area of application where the radial component of the drag force is maximal decreases with respect to the frequency and the particles are affected by radiation and drag force over a smaller zone; however, the intensity of the drag force increases in absolute terms.

Transducer width

In this section, we study the impact of varying the transducer width from 45 mm to 200 mm at the reference frequency of 40 kHz. The radiation and drag forces are presented in Fig. 4.7 for each transducer width.

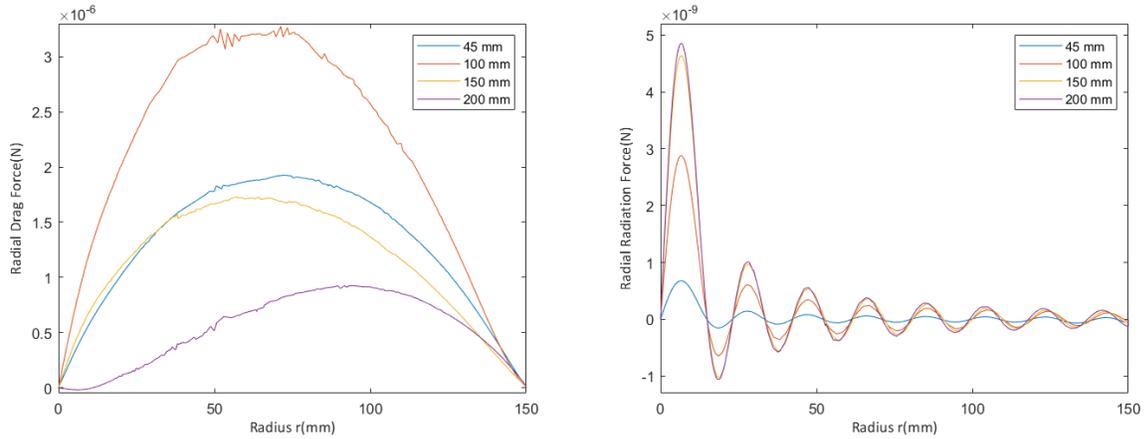


Figure 4.7 Influence of the transducer width on the radial drag (left) and radiation (right) forces

In Fig. 4.7 it is observed that the radiation force increases with respect to the transducer width before reaching a maximum at transducer widths above 150 mm. However, the drag force increases with respect to the transducer width up to 100 mm, corresponding to 3λ , before decreasing for larger transducer widths. The shape of the drag force field is also modified by the transducer width and the radius for which the force is maximal increases with respect to the transducer width. It must also be noted that, for a given frequency, the transducer width also has a strong influence on its directivity. As a result, the maximum pressure intensity area is modified. It is therefore necessary to adjust the transducer diameter accordingly to the selected frequency. This parameter should be adjusted once the optimal frequency is selected.

Excitation velocity

In this section, the normal excitation velocity of the transducer is varied from 0.1 m/s to 4 m/s and its influence on the radiation and drag forces in front of the transducer are presented in Fig. 4.8.

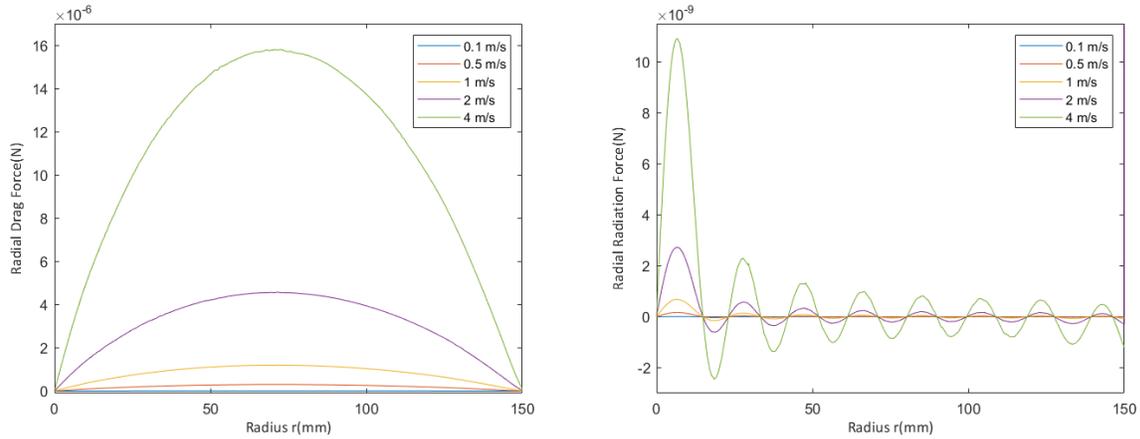


Figure 4.8 Influence of the transducer velocity on the radial drag (left) and radiation (right) forces

As expected, both radiation and drag forces increase with respect to the excitation velocity; however, for both forces, the tendency is not linear but quadratic with respect to the transducer velocity. In practice it is thus preferable to have an excitation velocity as high as possible, but practical limitations, such as cavitation, transducer heating, and fatigue of the transducer, limit the maximal possible value in practice. It is thus reasonable to envision transducer velocities up to $V_{trans} = 2 \text{ m/s}$ based on preliminary tests conducted with conventional Langevin transducers.

4.7.3. Influence of the particle and flow properties

Particle properties

As detailed in section 4.6, the particles are assumed spherical with a radius a and a density ρ_p . The radius of the particle plays a major role in the evolution of both drag and radiation forces. In practice, for pulp flow concentration, the fiber radius is not calibrated since the fiber particles tend to gather in a pulp stream to form larger particles. Thus, variations of pulp diameter from $5 \mu\text{m}$ to 1 mm are expected in practical cases [8]. We notice that the radius is present in both forces in action. Indeed, the drag force varies linearly with respect to the particle radius a , while the radiation force follows a cubic law, as described in Eq. 4.10. Thus, when considering the minimum pulp radius of $5 \mu\text{m}$, the drag force is highly dominant; however, by imagining a particle aggregate with a radius of 1 mm , the acoustic radiation force becomes dominant close to the axis of the pipe and reaches up to $700 \mu\text{N}$. In this case, the particles are attracted to the pressure nodes and a mixed regime between drag and radiation is observed.

The density of the particle is a less important element for our study. Indeed, this value has no influence on the drag force but plays a slight role in the value of the radiation force. In Eq. 4.10, the term $f_{2,rad}$ depends on the density of the particle. Thus, the radiation force increases with respect to the density of the pulp and its maximal value is almost doubled when the density is

increased from $900 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ to $1500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; however, the order of magnitude is always 1 nN in the case of small particles and so this value is therefore still negligible.

Pulp flow velocity

As presented in the section 4.5, the pulp flow is assumed to be either laminar or turbulent depending on the inlet flow velocity and modeled with the *Low Re k - ε* model. The impact of the mean flow on the deviation and therefore the concentration process is thus studied in this section for inlet velocities between 0.1 m/s and 1 m/s and pulp consistency of 3%. The viscosity model of Eq. 4.4 developed for paper pulp flows is used, allowing the calculation of the fluid viscosity μ in the model.

In the following, for simplicity, only the eucalyptus pulp is considered but the same tendencies can be observed for pine pulp. In Fig. 4.9, the evolution of the mean flow profile and radial drag force with respect to the inlet mean velocity is presented. As flow velocity increases the viscosity decreases inducing a modification of the flow profile along the radius with a transition from the laminar regime, exhibiting a quadratic profile below 0.2 m/s, to the turbulent regime above 0.7 m/s. Moreover, as observed in Fig. 4.9, this decrease of viscosity is responsible for a decrease of drag force up to a factor of 4 between 0.1 m/s and 1 m/s.

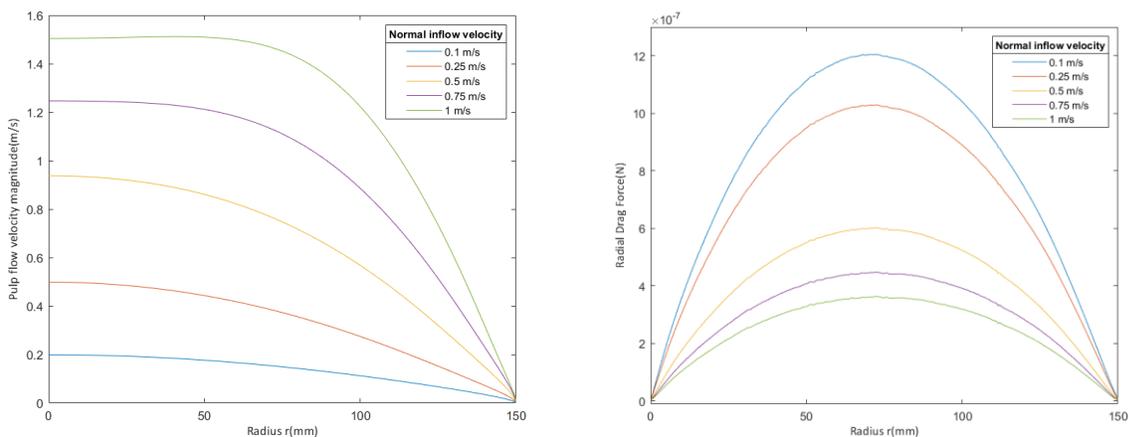


Figure 4.9 Evolution of the pulp flow velocity magnitude (left) and the radial drag force (right) with respect to the pulp flow.

Conversely, there is no influence on the acoustic radiation force. Thus, low velocities are more interesting for acoustophoresis in the case where the drag force is predominant. In addition, as presented in the introduction and observed in Fig. 4.9, at velocity below 0.2 m/s , the pulp flow behaves like a laminar fluid with a boundary layer at the pipe edges. By working at low velocities it is thus possible to avoid the inconveniences caused by the turbulence of the pulp flow, especially the turbulent and radial movements of the particles, facilitating the manipulation of the pulp fibers by the ultrasound field while increasing the exposition time to ultrasound.

Pulp consistency

In this section the inlet fluid velocity is fixed at 0.5 m/s, such that the mean flow is located at the transition between the laminar and turbulent regimes, and the influence of the pulp consistency is considered inducing a change of viscosity μ based on the model described in Eq. 4.4. For simplicity, only pine pulp is considered but the same observations are obtained for eucalyptus pulp.

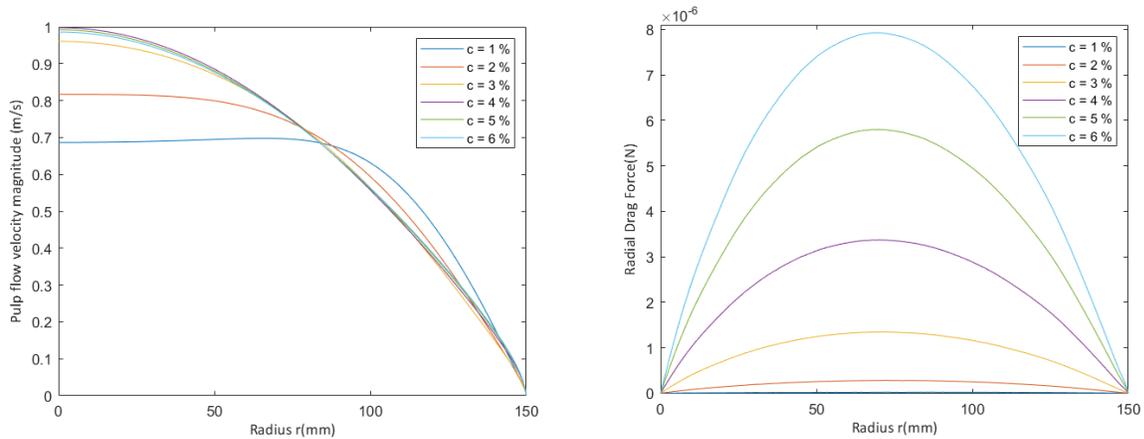


Figure 4.10 Evolution of the pulp flow velocity magnitude (left) and the radial drag force (right) with respect to the pulp consistency.

At low consistency a very low viscosity is observed, and the pulp flow can be approximated as laminar as shown in Fig. 4.10. This behavior is observed for consistency below 3%. For consistencies above 3%, high viscosities are present, and the turbulent regime is observed inducing a uniform flow velocity through the pipe as shown in Fig.10. As observed previously, this increase of consistency can be interpreted as an increase of the fluid viscosity increasing the drag force significantly by a factor of 100 between 1% and 6%. However, in the present model, the acoustic damping induced by the increased consistency and viscous terms is not considered. So, the pressure field and thus the radiation and drag force are somewhat overstated.

4.7.4. Feasibility of acoustophoresis for pulp concentration

Particle deflection

In order to determine if the acoustophoresis is a valid option for paper pulp concentration, the particle deviation is derived from the drag and radiation force fields. From the parametric study conducted in section 4.7.2 and 4.7.3, optimal parameters are derived as presented in Tab. 4.4. A pulp consistency of 3% for eucalyptus is selected as representative of the industrial process.

Table 4.4 Parameters selected to test particle deflection

Pipe	Diameter [mm]	D_{pipe}	300
	Length [mm]	L_{pipe}	600
Fluid	Inflow velocity [$m \cdot s^{-1}$]	V_{flow}	0.1
	Viscosity [Pa.s]	μ	$10^{-2.07} C^{6.97} (\dot{\gamma})^{-0.26} c$
Particles	Radius [μm]	a	10
	Density [$kg \cdot m^{-3}$]	ρ_p	900
Transducer	Diameter [mm]	D_{trans}	100
	Frequency [kHz]	f	150
	Excitation velocity [$m \cdot s^{-1}$]	V_{trans}	2

In Fig. 4.11, the particles are presented by dots at $t = 0$ s. These particles are released at the velocity $\mathbf{u}_0 + \mathbf{u}_2$ in a zone where z is smaller than 0.2 m. The particle velocity follows the pulp velocity, since the velocity \mathbf{u}_2 induced by the acoustic streaming, is negligible in this zone. The transducer is represented by a black line in Fig. 4.11.

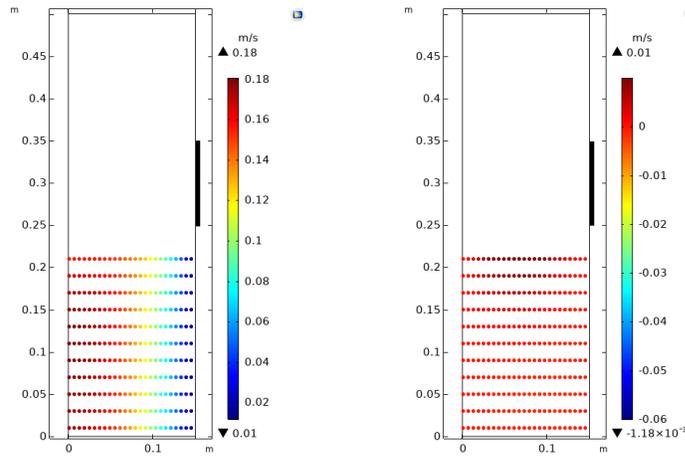


Figure 4.11 Initial axial particle velocity (left) and radial particle velocity (right)

In Fig. 4.12, the evolution of particles subjected to acoustophoresis is presented at different time steps representative of the process. The particle radial velocity is presented using a colormap. This velocity is between -0.06 m/s and 0.01 m/s.

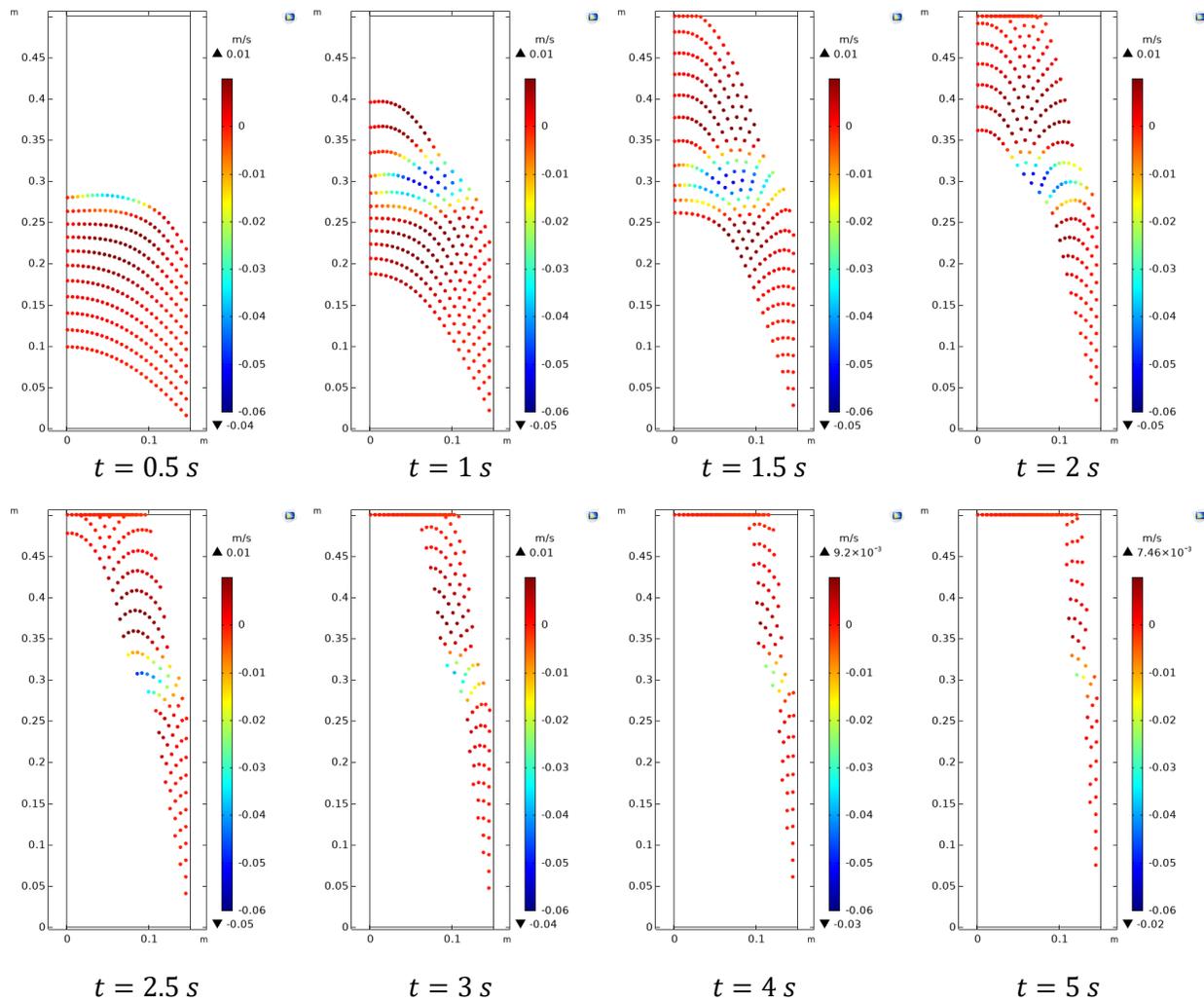


Figure 4.12 Evolution of the particle position and radial velocity over time between 0 and 5 s

Before the particles reach the zone where the radial velocity u_2 is maximal, the drag force is negligible. Thus, the particles are not deflected towards the center of the pipe. From 0.5 seconds onwards, a change in the trajectory of the first particles can be observed in Fig. 4.12. It is at this point that the first particles are exposed to the high intensity area of drag force as presented previously in Fig. 4.4c) and Fig. 4.5 (bottom). The radial velocity of the particles becomes negative, which is representative of a movement towards the center of the pipe. After 3 seconds the acoustic streaming no longer has any real impact on the particle deflection because the velocity u_2 is negligible near the wall as shown in Fig. 4.3e). The turbulent flow carries away at very low velocity the remaining particles. Moreover, the radiation force has no significant impact on the trajectory of the particles and no concentration around pressure nodes are observed.

Concentration gain and efficiency of the process

In Fig. 4.13, the deviation of a line of particles at the end of the modeled region is presented as a function of their initial position. The overall shape of the particle deviation function is different from the radial drag force plot in front of the transducer, since the turbulent pulp velocity increases the deflection of the particles close to the pipe wall ($r = 150 \text{ mm}$). However, this confirms that it is the drag force that is predominant in our study and a maximum deflection of 10 mm is observed for this configuration.

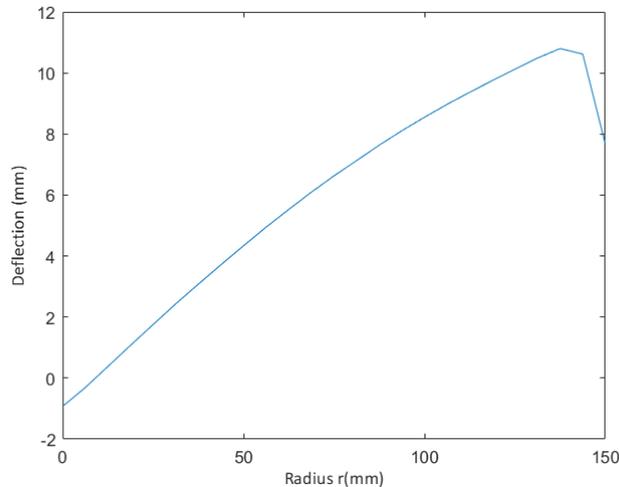


Figure 4.13 Particle deviation with respect to the radial position

It is thus possible to estimate the concentration gain achievable with these parameters. For this purpose, the number of particles arriving on either side of a virtual separator is estimated. This allows the outgoing flow to be divided into two parts: a central flow concentrated in particles and a peripheral flow non-concentrated in particles. In this situation, if a separator is located at a radius of 50 mm, a concentration gain of 15% is obtained, such that the central flow has a consistency of 3.45% and the peripheral flow has a concentration of 2.6% for an incident consistency of 3%. Acoustophoresis is thus realistic in this configuration but will require an iterative process of at least five transducer rows in order to achieve a concentration gain of 100% (from 3% to 6%).

4.8. Conclusion

In the present study, an axisymmetric numerical model of acoustophoresis for paper pulp concentration in a pipe is derived, combining acoustophoresis with a turbulent flow of particles in a viscous fluid. The acoustic levitation model highlights, as expected, the duality between the acoustic radiation force and the drag force. Due to the high viscosity of the pulp flow, the drag force is dominant in our simulations and set up a configuration that deflects the pulp fibers

towards the center of a pipe. A parametric study has been conducted allowing to derive the influence of the transducer and pulp flow parameters on the drag and radiation forces. Finally, thanks to particle tracking, the effect of these two forces are highlighted. To have an important time of exposure of the particles to the maximum sound pressure zone, it is necessary to have a low velocity flow. The particles are then deflected towards the center of our pipe and their position is determined in order to derive the efficiency of the process. Depending on the parameters used, the deviation can be relatively important, up to 10 mm, and can be assimilated to a gain in concentration of 15%. Thus, this study shows that it is possible to use acoustophoresis to concentrate paper pulp for consistencies higher than 1% and with flow velocities higher than 0.1 m/s. Therefore, an industrial application becomes feasible and viable. Consequently, ongoing studies concern the experimental validation and large-scale feasibility of this process for the paper industry.

4.9. Acknowledgements

We would like to acknowledge CMC Microsystems for the provision of products and services that facilitated this research. This research has been conducted with the financial support of the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC), MITACS and Valmet.

CHAPITRE 5

5. DÉVELOPPEMENT D'UN CONCEPT INDUSTRIEL

À partir des observations obtenues à l'aide du modèle numérique, un concept a été développé: un anneau de transducteurs agissant sur les particules en les concentrant au centre du flux de pulpe. Ainsi, l'objectif est maintenant de développer et de réaliser ce prototype afin de valider expérimentalement cette étude. Cette section se consacre ainsi à la réalisation de ce concept et à la validation de ces performances à travers une série de tests à grande échelle.

5.1. Conception du système

L'objectif présenté dans l'article est de concentrer la pulpe au centre du tuyau afin de récupérer par la suite ce flux central concentré. Le prototype développé est basé sur cette idée. Celui-ci n'est pas un développement final, mais il doit être modulable pour tester différentes configurations expérimentales afin de valider les simulations et d'estimer les performances réelles envisageables.

5.1.1. Cahier des charges

On présente ici les contraintes auxquelles le montage final doit répondre :

- Séparation du flux initial en deux : flux concentré et flux non concentré
- Maintenir un flux continu : circuit fermé avec pompe, vanne, réservoir de pulpe...
- Adapté aux transducteurs achetés en assurant l'étanchéité
- Pouvoir observer la déviation visuellement
- Rendre accessible les deux flux de sortie pour mesurer l'efficacité du processus

De plus, on souhaite tester différentes configurations afin de valider nos précédentes simulations. Le prototype final doit ainsi permettre ces configurations :

- Concentration en entrée: 0.1 – 3 %
- Vitesse du flux: 0.05 – 1 m/s
- Pulpe utilisée : hardwood / softwood
- Une ou deux rangées de transducteurs
- Diamètre du tuyau de récupération du flux concentré ajustable
- Distance entre les transducteurs et le tuyau de récupération du flux concentré ajustable

5.1.2. Transducteurs utilisés

Nos premiers tests expérimentaux et l'étude paramétrique réalisée avec la modélisation numérique ont montré qu'il était nécessaire de travailler à des fréquences supérieures à 100 kHz. Des transducteurs de puissance disponible sur le marché avec la fréquence de résonance la plus élevée possible ont été sélectionnés. Ainsi les transducteurs installés sur le prototype ont leur fréquence de résonance à 200 kHz pour une puissance de 40 W et proviennent de l'entreprise chinoise *Beijing Cheng-cheng Weiye Science and Technology Co* [58]. Les caractéristiques de ceux-ci sont présentées dans le tableau 5.1.

Tableau 5.1 Caractéristiques des transducteurs utilisés pour le système

Fréquence de résonance	200 <i>kHz</i>
Impédance	< 50 Ω
Puissance	40 <i>W</i>
Capacité	3200 <i>pF</i>
Poids	126 <i>g</i>
Longueur	42 <i>mm</i>
Diamètre de la surface rayonnante	38 <i>mm</i>

De la même façon que présenté dans la partie 3.2.3, l'admittance de de transducteur est mesurée. Ainsi la fréquence de résonance présentée par le fournisseur à 200 kHz est confirmée à 210 kHz sur la figure 5.1. De plus, des résonances autour de 51 kHz, 110 kHz, 136 kHz et 190 kHz sont mises en avant. Le transducteur peut donc être aussi utilisé à d'autres fréquences.

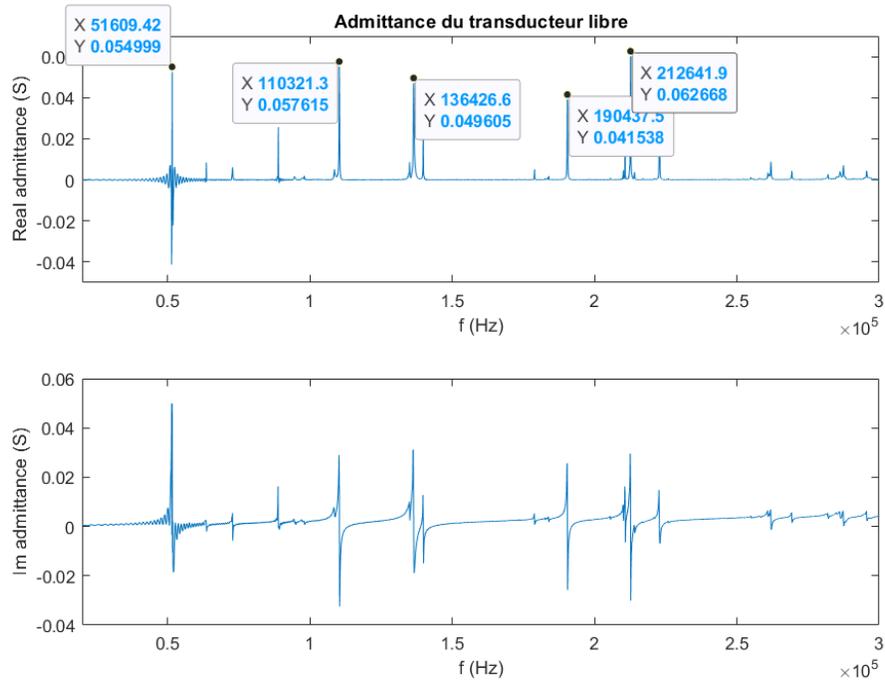


Figure 5.1 Admittance du transducteur à 200 kHz : partie réelle (haut) et imaginaire (bas)

De plus, on détermine la vitesse maximale à la surface du transducteur grâce au vibromètre laser 3D comme présenté dans la partie 3.2.3. On retrouve ainsi, sur la figure 5.2, les mêmes fréquences de résonances. Pour la fréquence de résonance de 210 kHz la vitesse surfacique mesurée est de 60mm/s/V.

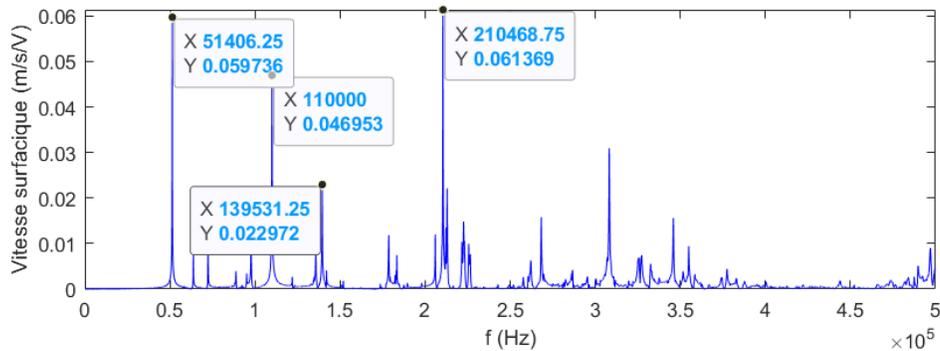


Figure 5.2 Vitesse absolue mesurée en surface du transducteur

5.2. Prototype réalisé

On retrouve en annexe B le dessin du concept final. Dans la suite de cette section on détaille les différents sous-ensembles de ce concept, chacun répondant à un besoin spécifique.

5.2.1. Adaptation des transducteurs/ chambre des transducteurs

Les transducteurs sont fixés sur une chambre de forme octogonale, que l'on observe sur les figures 5.3 et 5.4 mais aussi en annexe C. En effet, la forme cylindrique des transducteurs ne permet pas d'utiliser un tuyau cylindrique. Ainsi les transducteurs sont fixés sur le flan de la surface inférieure de la chambre, et ceci dans le but d'avoir un contact direct entre la surface des transducteurs et le flux de pulpe.

Sur chaque face de l'octogone un perçage a ainsi été réalisé. Dans le but d'assurer l'étanchéité, un anneau est fixé autour du perçage. Un joint « O-ring » est placé dans cet anneau. Le maintien en position des transducteurs est assuré par l'intermédiaire de deux demi-bagues. Ces demi-bagues sont aussi fixées dans l'anneau où se trouve le joint. Cette solution développée permet ainsi l'étanchéité, la mise en position et le maintien en position de nos transducteurs.

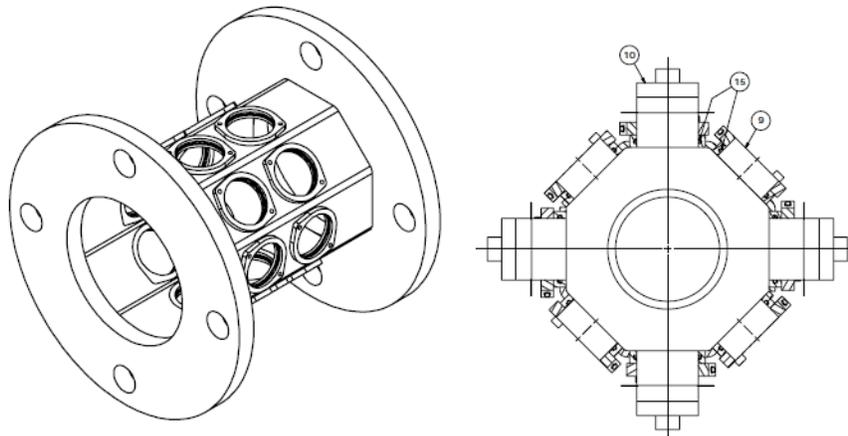


Figure 5.3 Dessins de la chambre des transducteurs : vue isométrique et vue coupée

La chambre des transducteurs est fabriquée à partir d'un plastique transparent. On peut donc observer la déviation de la pulpe. On souhaite aussi tester une configuration à deux rangées consécutives de transducteurs. Ainsi deux rangées de transducteurs sont réalisées sur la chambre.



Figure 5.4 Images de la chambre des transducteurs

5.2.2. Mécanisme de séparation des deux flux

Comme présenté dans l'article, l'objectif est de récupérer le flux concentré, situé au centre, par une méthode de séparation du flux sortant. Pour ce faire, la solution privilégiée est assimilable à un coude avec deux sorties. Elle est composée d'un tuyau intérieur de diamètre fixé, noté 5 sur la figure 5.5, qui permet la récupération du flux concentré et d'un deuxième tuyau fixé à 90° pour le flux non concentré. Le tuyau intérieur est ajusté selon la configuration à tester. Ainsi différents diamètres de tuyau D_{out} [50 mm; 62.5 mm; 75 mm] vont être testés et la distance Δ avec les transducteurs est ajustable [25 mm – 150 mm].

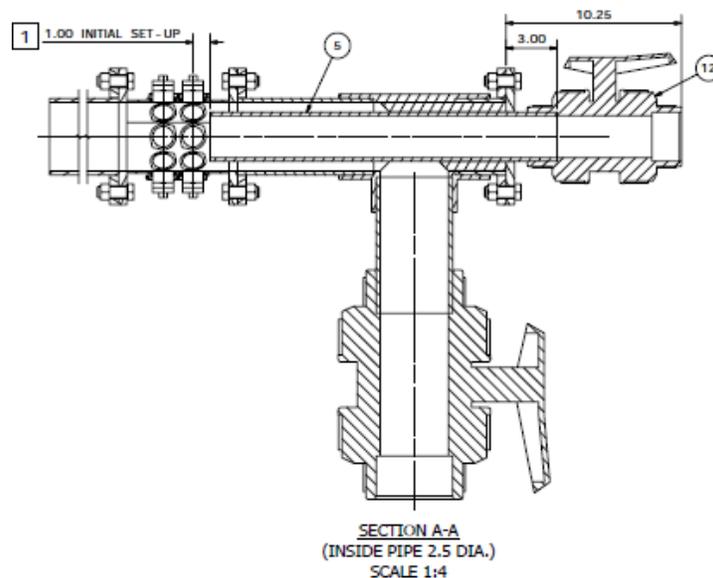


Figure 5.5 Dessin de la séparation des deux flux

Sur les figures 5.6 on aperçoit l'ensemble permettant la séparation des deux flux. A gauche de la figure 5.6 se trouve le coude avec la sortie à 90° qui permet d'évacuer le flux non concentré. Sur

la droite se trouve le tuyau intérieur, noté 5 sur la figure 5.5, qui permet l'évacuation du flux de pulpe concentré par la méthode ultrasonore.



Figure 5.6 Image du coude (à gauche) et du tuyau intérieur noté 5 sur la Fig.5.3 (à droite)

5.2.3. Circuit total

Le circuit total, dessiné sur la figure 5.7, est un circuit fermé constitué autour du concept.

La pulpe est acheminée à l'entrée du système grâce à une pompe. Cette pompe puise la pulpe, à la vitesse souhaitée, dans un réservoir dans lequel la pulpe est stockée et homogénéisée à l'aide d'un agitateur. Ensuite la pulpe entre dans le système développé puis est séparée en deux parties comme expliqué précédemment. Une vanne est fixée sur chaque sortie afin de pouvoir contrôler en tout temps les flux sortants. On mesure en sortie de ces vannes la concentration des flux en effectuant des prélèvements. Les deux flux sortants sont redirigés vers le réservoir de pulpe afin de former un circuit fermé.

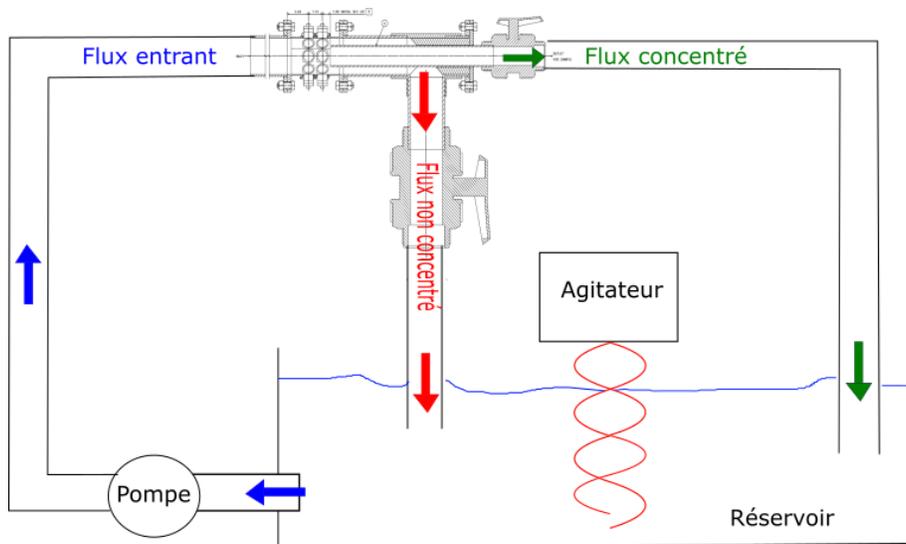


Figure 5.7 Schématisation du circuit hydraulique final

Pour produire la pulpe on pèse la masse de papier comme présenté avec l'équation (2.1) et on dilue cette masse dans le volume d'eau correspondant. L'agitateur permet de mélanger et d'homogénéiser la pulpe produite.

5.3. Validation des performances de la chambre des transducteurs

5.3.1. Performances vibratoires

Les transducteurs ont ensuite été câblés en parallèle comme présenté sur la figure 5.8. Ainsi deux rangées de huit transducteurs peuvent être pilotés. Ils sont numérotés de 1 à 16 de façon à avoir une rangée de transducteurs avec des numéros pairs et l'autre des numéros impairs.

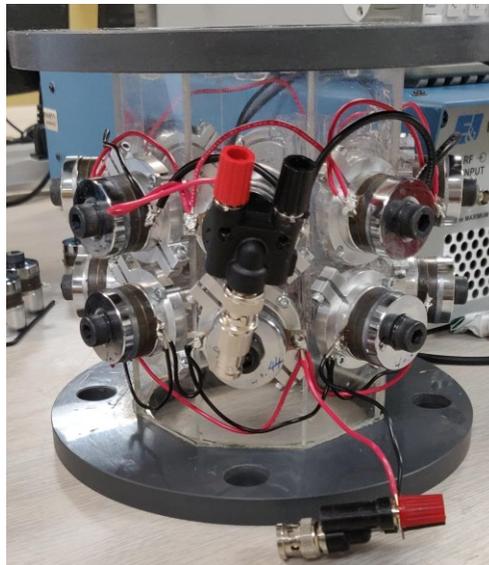


Figure 5.8 Chambre des transducteurs après câblage

L'admittance des huit transducteurs en parallèle est mesurée avec la méthode utilisée en 3.2.3. La figure 5.9 présente l'admittance pour une rangée de huit transducteurs. Cette valeur est identique pour l'autre rangée.

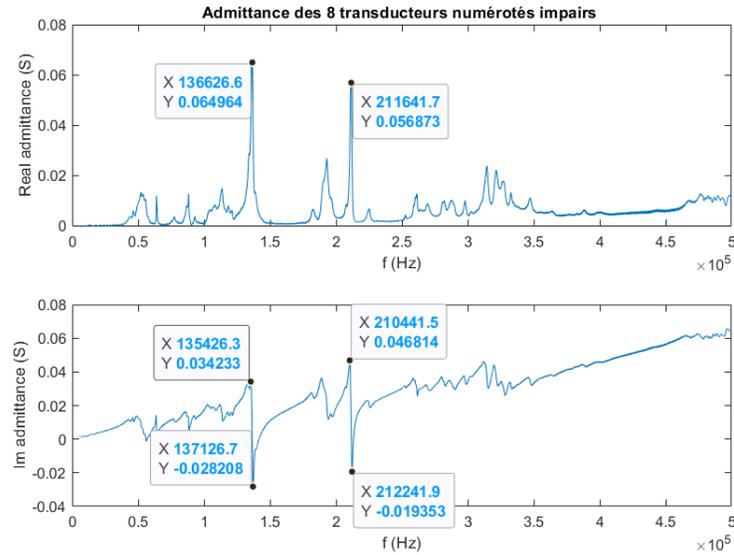


Figure 5.9 Admittance d'une rangée de transducteurs: partie réelle (haut) et imaginaire (bas)

Les fréquences à 136 kHz et 210 kHz sont les plus marquées suite au montage des huit transducteurs sur la chambre. La résonance à 51 kHz présente sur le transducteur libre, à la figure 5.1, est fortement atténuée. En effet, cette fréquence est caractéristique d'un mode radial. Ici, les transducteurs sont fixés et serrés; ainsi les modes radiaux sont éliminés. Il ne reste donc que le mode longitudinal à 210 kHz proposé par le fournisseur et un mode à 136 kHz. Il va donc être possible de tester notre prototype à deux fréquences distinctes.

L'impédance pour ces deux fréquences est ainsi de 13Ω pour une rangée de huit transducteurs. Ainsi le montage électronique correspond à celui de la figure 3.9. Le seul changement se situe donc avec les transducteurs qui sont placés en deux rangées de huit transducteurs.

5.3.2. Utilisation pour un cas statique

À la suite de cette validation, l'utilisation de la chambre des transducteurs afin de concentrer la pulpe de papier est testée. La chambre est ainsi placée à la verticale et une extrémité est bouchée comme le montre la figure 5.10.

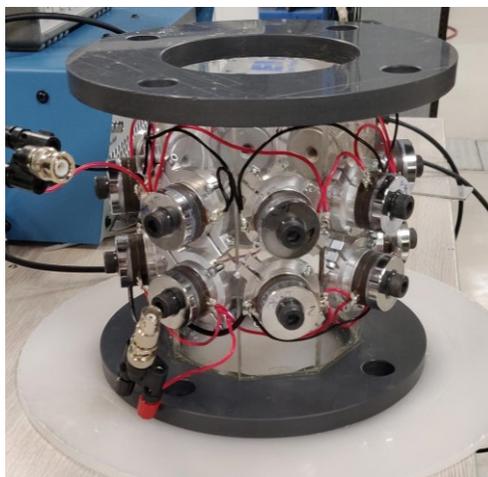


Figure 5.10 Chambre des transducteurs pour les essais en statique

Les essais sont effectués pour la pulpe d'eucalyptus avec une consistance variant de 1% à 2.5%. Les transducteurs sont excités à 136 kHz. En effet après avoir ajustés les différents transducteurs notamment le positionnement et le serrage de ceux-ci, on a remarqué que cette fréquence permet d'assurer les meilleurs résultats. Ainsi, les transducteurs ne sont plus positionnés à flan de la paroi interne, comme expliqué dans la section 5.2.1, afin de laisser leur surface supérieure libre. Chaque transducteur est avancé de 5 mm environ afin de permettre une meilleure efficacité. De plus, une puissance électrique maximale de 400 W est utilisée. Les deux rangées de transducteurs sont testées séparément. Les résultats sont sensiblement identiques pour les deux rangées.

Lorsque la concentration reste assez faible, c'est-à-dire inférieure ou égale à 1.5%, l'efficacité du concept est intéressante. Les huit transducteurs agissent bien comme attendus ce qui permet de concentrer la pulpe au centre après seulement quelques secondes. Ainsi par exemple sur la figure 5.11, on observe la situation initiale, intermédiaire à $t = 10$ s et finale à $t = 30$ s pour concentrer une pulpe à 1.5%.

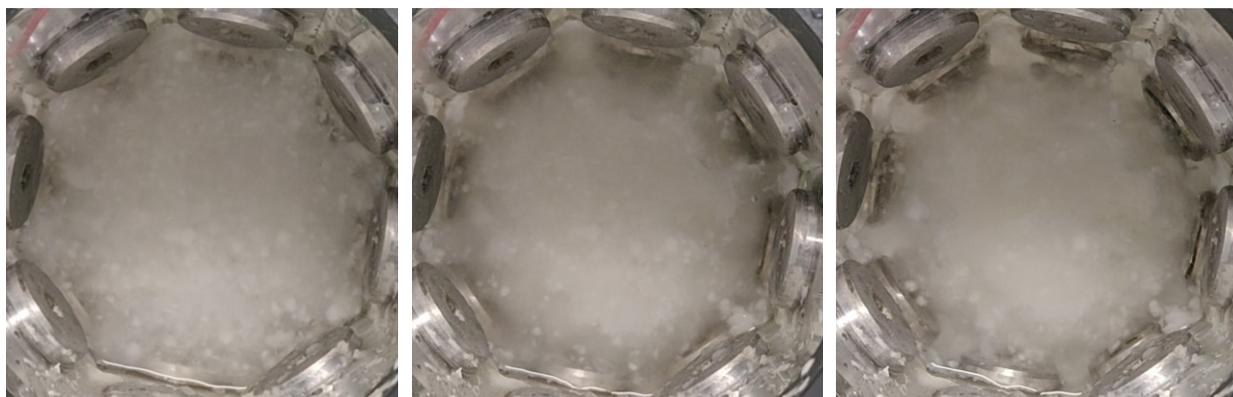


Figure 5.11 Situations initiale, intermédiaire à $t = 10$ s et finale à $t = 30$ s pour une pulpe à 1.5%

Il est difficile de concentrer une pulpe dont la consistance est plus importante. Sur la figure 5.12, une pulpe de concentration 2.5% est testée. Les transducteurs ne permettent pas vraiment de reconcentrer la pulpe au centre dans cette situation. Il semble que la pulpe soit trop dense pour être poussée. Cependant, il est difficile de conclure puisque notre méthode d'observation est limitée.

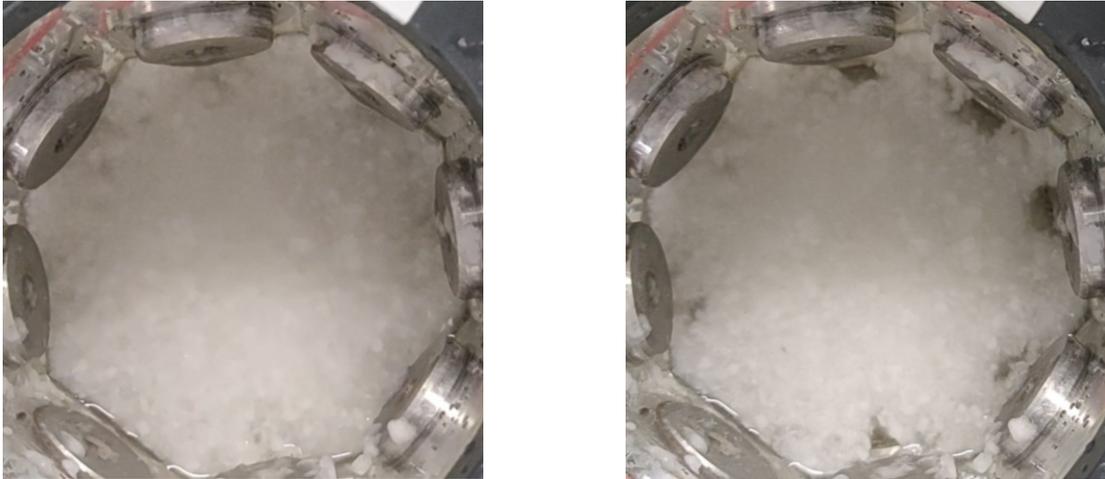


Figure 5.12 Situation initiale et finale à $t = 40$ s pour une pulpe à 2.5%

Des tests où les deux rangées de transducteurs sont excitées en même temps ont aussi été effectués. Cependant il est impossible de conclure sur leurs efficacités. En effet, nous ne pouvons pas observer l'action des deux rangées simultanément.

Ainsi notre concept est fonctionnel pour des conditions statiques où la concentration reste assez faible. Il est cependant difficile de conclure pour les concentrations plus importantes. Notre méthode d'observation est limitée et l'absence de flux incident ne permet pas d'évacuer la pulpe. De plus, les transducteurs ont tendance à chauffer lorsqu'ils sont fortement sollicités. Ce flux thermique est directement transmis à la pulpe. Ainsi, en l'absence d'écoulement la pulpe chauffe fortement.

Dans la suite, des expériences avec un écoulement de pulpe contrôlé sont réalisées dans les locaux de VALMET à Trois-Rivières.

5.4. Essais réalisés

5.4.1. Description du montage industriel

Le montage et l'assemblage expérimental ont été réalisés par les techniciens de VALMET à Trois-Rivières conformément au schéma hydraulique de la figure 5.7. Sur la figure 5.13, on aperçoit le montage expérimental utilisé pour nos essais industriels. La pompe hydraulique, entourée en bleu avec son système d'alimentation, permet la circulation de la pulpe dans le système mais aussi l'agitation dans le réservoir, entouré en blanc. Le concept développé, encerclé en rouge, est fixé à la structure en bois et présenté sur la figure 5.14.

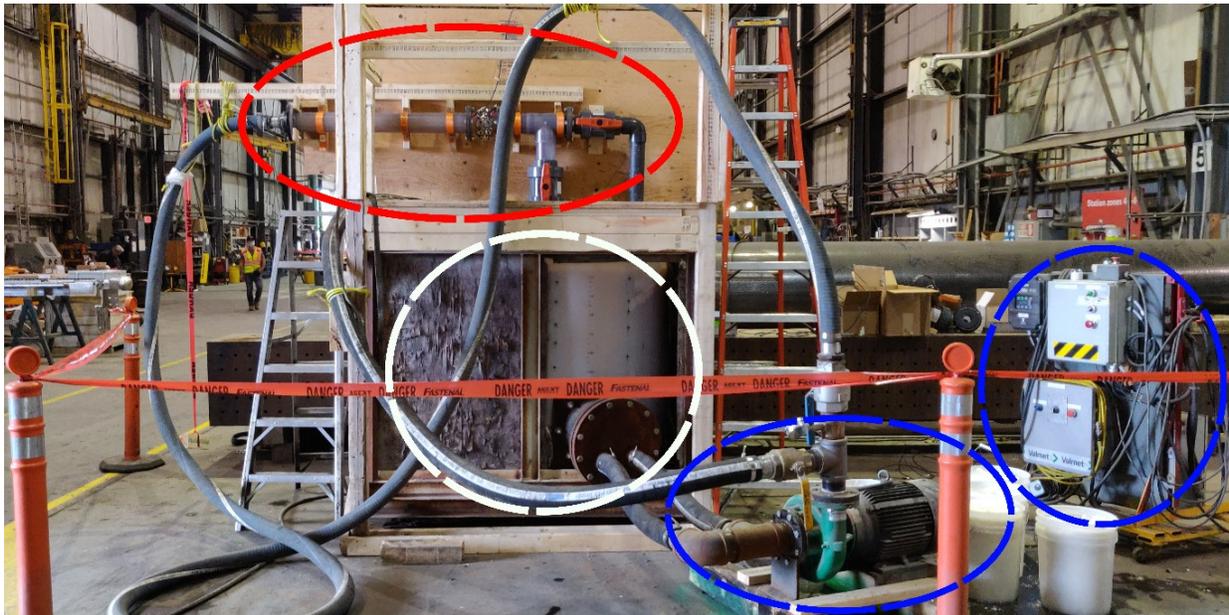


Figure 5.13 Montage réalisé à VALMET Trois-Rivières



Figure 5.14 Prototype fixé sur la structure

5.4.2. Configurations testées

Dans la suite, de la même manière que pour la partie 4, on étudie différents paramètres afin de déterminer les valeurs optimales de notre prototype. Des valeurs de références sont ainsi fixées conformément au tableau 5.2.

Tableau 5.2 Paramètres de références pour les expériences

Diamètre entrant	$D_{in} = 100 \text{ mm}$
Diamètre sortie	$D_{out} = 75 \text{ mm}$
Distance transducteur / sortie	$\Delta = 25 \text{ mm}$
Pulpe	Hardwood / Pulpe d'eucalyptus
Fréquence d'excitation	136 – 138 kHz
Puissance électrique	400 W

La pulpe d'eucalyptus est choisie pour cette phase de test. Ainsi, deux consistances sont testées dans le but de valider le prototype: 0.4 % et 0.8 %. Plusieurs vitesses de pulpe sont expérimentées. Pour cela, nous travaillons sur l'ouverture des différentes valves afin de réduire au maximum le débit entrant et ainsi la vitesse du flux. En effet, la pompe possède un débit trop important à pleine puissance pour notre utilisation. De plus, les deux rangées de transducteurs sont testées. Dans le tableau 5.3, on retrouve ainsi les configurations essayées à Trois-Rivières.

Tableau 5.3 Configurations testées à Trois-Rivières

		Concentration/ consistance entrante C_{in}			
		0.4 %		0.8 %	
Vitesse du flux entrant V_{flow}	0.1 m/s	$C_{out_{TP}}$	$C_{out_{TI}}$	$C_{out_{TP}}$	$C_{out_{TI}}$
	0.25 m/s	$C_{out_{TP}}$	$C_{out_{TI}}$	$C_{out_{TP}}$	$C_{out_{TI}}$
	0.5 m/s	$C_{out_{TP}}$	$C_{out_{TI}}$	$C_{out_{TP}}$	$C_{out_{TI}}$
	0.75 m/s	$C_{out_{TP}}$	$C_{out_{TI}}$	$C_{out_{TP}}$	$C_{out_{TI}}$

Les performances du prototype sont étudiées en comparant la concentration en entrée à celle en sortie du flux concentré. L'analyse de la concentration est réalisée par une méthode normalisée TAPPI T240 [59]. L'échantillon de pulpe est pesé puis filtré dans un entonnoir de Büchner. Les fibres et autres matières en suspension sont ainsi retenues sur un papier filtre séché au four et pré-pesé. Après séchage à poids constant à $105 \pm 3^\circ\text{C}$, le poids des matières retenues séchées à l'étuve est déterminé et calculé comme le pourcentage du poids initial de la suspension de pâte à papier. Ainsi, la consistance de la pulpe est déterminée par le laboratoire INNOFIBRE situé au sein de l'Université du Québec à Trois-Rivières.

5.4.3. Résultats / Discussion

Ces premiers résultats ne nous ont pas permis de valider notre prototype. Les consistances obtenues en sortie pour les rangées paires $C_{out_{TP}}$ et impaires $C_{out_{TI}}$ sont identiques à celles en entrées. La concentration de la pulpe par notre méthode ultrasonore n'est pas effective dans cette situation.

Il semble y avoir une raison principale à ce problème. En effet, le flux laminaire créé en entrée à la vitesse V_{flow} devient fortement turbulent lorsqu'il entre dans la chambre des transducteurs. Le passage de tuyau cylindrique à une forme octogonale entraîne des turbulences importantes. Le flux est d'ailleurs accéléré à la suite de cette variation de surface. De plus, l'avancement des transducteurs afin d'optimiser le caractère vibratoire présenté dans la partie 5.3.2 ne fait qu'accroître le caractère irrégulier et turbulent du flux. Ainsi, l'effet de la lévitation acoustique permettant la concentration de la pulpe au centre est annulé par les fortes turbulences créées à l'entrée de la chambre des transducteurs. Ainsi pour ces raisons, sur la figure 5.15, on aperçoit une zone foncée, encerclée en rouge, où les fibres s'accumulent entre l'entrée de la chambre et la première rangée de transducteurs.

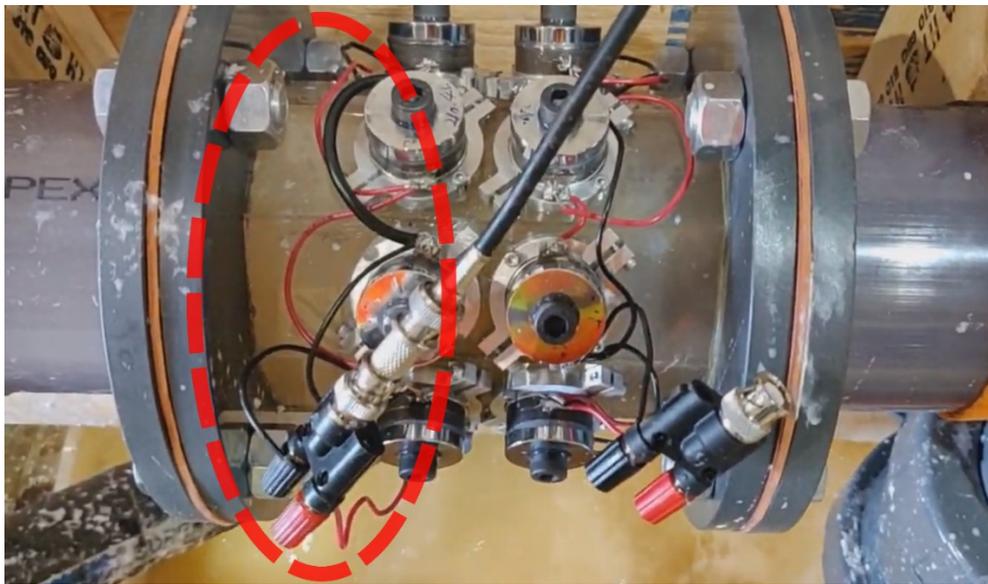


Figure 5.15 Situation causant l'inefficacité du concept

Il semble donc nécessaire de repenser la conception du prototype afin d'éviter la création de zones de turbulences qui empêchent l'efficacité du processus. Ainsi, la chambre des transducteurs avec une forme octogonale est à modifier. Un tuyau cylindrique usiné dans l'épaisseur pour abriter et fixer les transducteurs pourrait être la solution à ce problème.

De plus, il pourrait être utile de modifier le circuit hydraulique afin de contrôler plus facilement l'écoulement. La pompe et les vannes utilisées ne permettent pas de connaître le débit entrant. En effet, nous avons dû mesurer le temps nécessaire au remplissage d'un bac de 20 L pour connaître le débit et remonter à la vitesse du flux dans chaque situation.

5.5. Conclusion

Dans cette partie, un prototype a été développé à partir des résultats du modèle numérique puis adapté afin d'être testé dans les locaux du partenaire industriel VALMET. Celui-ci est composé d'une chambre de forme octogonale permettant le placement et la fixation des transducteurs de 200 kHz. La séparation des flux sortants est réalisée par l'intermédiaire d'un coude à deux sorties.

Lors de la préparation des essais à Trois-Rivières, des tests en statique ont permis de valider les performances acoustiques du concept et ont montré des résultats encourageants pour des consistances de pulpe inférieures à 1.5 %. La pulpe est concentrée au centre de la chambre après seulement quelques secondes.

Malheureusement les expérimentations à Trois-Rivières n'ont pas permis de valider le prototype réalisé. Ainsi, la conception du prototype ne permet pas ici de concentrer la pulpe de papier comme souhaité. Il est nécessaire de repenser la chambre des transducteurs afin d'éviter des zones de turbulence qui nuisent à l'efficacité de la méthode ultrasonore.

CHAPITRE 6

CONCLUSION

Le projet a permis de réfléchir à un nouveau procédé de concentration de pulpe de papier. Pour ce faire, une étude paramétrique à travers des expériences et des simulations numériques a mis en avant les conditions optimales pour la concentration de pulpe de papier par méthode ultrasonore. Les expériences, dans des conditions de pulpe stationnaires de la première partie, ont montré l'importance de la force de traînée; les fibres de la pulpe sont poussées vers la surface et recirculent lors de nos expérimentations. En effet, la viscosité de la pulpe ne permet pas de considérer la force de rayonnement acoustique comme une force influente dans cette étude. La concentration ou consistance de la pulpe est ainsi un paramètre important au même titre que la fréquence ou la puissance utilisée. Il est nécessaire de travailler à haute fréquence, au-dessus de 100 kHz, et avec une puissance électrique élevée.

A la suite de cette première phase expérimentale, un modèle numérique complet a été développé. Ce modèle, reprenant les théories de la lévitation acoustique et du flux de pulpe, permet de simuler la lévitation acoustique pour un écoulement de pâte à papier dans un tuyau. La pâte est définie comme un fluide pseudo-homogène avec une viscosité caractérisée en fonction du taux de cisaillement et de la consistance, et l'écoulement est modélisé avec un formalisme turbulent de type $k - \epsilon$ à bas nombre de Reynolds. Dans ce modèle, les particules du flux de pâte sont considérées comme sphériques et sont entraînées par les forces acoustiques: la force de rayonnement acoustique et la force de traînée de Stokes. Une étude, sur les paramètres acoustiques et sur ceux du flux de pulpe, est ainsi réalisée et confirme les observations faites lors des premières expériences. Ainsi en raison de la viscosité élevée de l'écoulement de la pâte à papier, la force de traînée est dominante et permet une configuration avec un anneau de transducteurs qui dévie les fibres de la pâte vers le centre du tuyau. De cette étude numérique découle une configuration où les performances du modèle sont estimées. Ainsi une augmentation de la concentration de 15% est possible avec une seule rangée de transducteurs.

Finalement un prototype est réalisé à partir de ces précédents résultats. Le prototype s'articule autour d'un élément octogonal hébergeant les transducteurs de 200 kHz. La séparation des flux est ensuite réalisée à l'aide d'un système de deux tuyaux imbriqués. Un tuyau central permet de récupérer le flux concentré alors qu'un tuyau placé à 90° évacue le flux non concentré. Des essais ont ensuite été effectués dans le but de valider les performances de concept. Malheureusement, ces tests ne sont pas concluants. Ainsi la conception du prototype ne permet pas dans l'état actuel des choses de concentrer la pulpe de papier comme souhaité. Il est donc nécessaire de repenser l'aspect hydraulique/mécanique des fluides du système afin d'éviter des zones de turbulence qui nuisent à l'efficacité de la méthode ultrasonore. Des travaux futurs devraient ainsi porter sur l'amélioration du prototype dans le but de prouver l'efficacité de cette méthode ultrasonore à l'échelle industrielle. Le modèle numérique développé pourrait permettre d'améliorer rapidement le concept.

LISTE DES RÉFÉRENCES

- [1] Canadian Industry Program for Energy Conservation et Pulp and Paper Research Institute of Canada, Éd., *Benchmarking energy use in Canadian pulp and paper mills*. Ottawa: CIPEC, 2008.
- [2] C. Ventura, F. Garcia, P. Ferreira, et M. Rasteiro, « Flow dynamics of pulp fiber suspensions », *Tappi Journal*, p. 7, août 2008.
- [3] C. A. F. Ventura, F. A. P. Garcia, P. J. Ferreira, et M. Graça Rasteiro, « Modeling the Turbulent Flow of Pulp Suspensions », *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 50, n° 16, p. 9735-9742, août 2011, doi: 10.1021/ie101500h.
- [4] C. Cotas, D. Asendrych, F. Garcia, P. Faia, et M. G. Rasteiro, « Turbulent flow of concentrated pulp suspensions in a pipe – numerical study based on a pseudo-homogeneous approach », in *COST Action FP1005 Final Conference, EUROMECH Colloquium 566*, Trondheim, Norway, 2015, p. 4.
- [5] C. A. F. Ventura, F. A. P. Garcia, P. J. Ferreira, et M. G. Rasteiro, « CFD simulation of the turbulent flow of pulp fibre suspensions », in *Proceedings 2008 AIChE Annual Meeting*, Philadelphia, USA, p. 11.
- [6] C. Cotas, R. Silva, F. Garcia, P. Faia, D. Asendrych, et M. G. Rasteiro, « Application of Different Low-Reynolds k- ϵ Turbulence Models to Model the Flow of Concentrated Pulp Suspensions in Pipes », *Procedia Engineering*, vol. 102, p. 1326-1335, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.01.263.
- [7] C. Cotas, F. Garcia, P. Ferreira, P. Faia, D. Asendrych, et M. G. Rasteiro, « CHANG-HSIEH-CHEN Low-Reynolds k- ϵ Turbulence model adaptation to study the flow of concentrated pulp suspensions in pipes », in *Proceedings 11th World Congress on Computational Mechanics; 5th European Conference on Computational Mechanics; 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics*, Barcelone, Espagne, 2014, p. 12.
- [8] B. Derakhshandeh, « Rheology of low to medium consistency pulp fiber suspensions », The University Of British Columbia, 2011.
- [9] C. J. Biermann, *Hanbook of Pulping and Papermaking*. Elsevier, 1996.
- [10] J. Wu, G. Du, S. S. Work, et D. M. Warshaw, « Acoustic radiation pressure on a rigid cylinder: An analytical theory and experiments », *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 87, n° 2, p. 581-586, févr. 1990, doi: 10.1121/1.398927.
- [11] L. V. King, « On the acoustic radiation pressure on spheres », *Proceedings of the Royal Society of London. Series A-Mathematical and Physical Sciences*, vol. 147, n° 861, p. 212-240, 1934.
- [12] M. Gröschl, « Ultrasonic Separation of Suspended Particles - Part II: Design and Operation of Separation Devices », *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 84, n° 4, p. 632-642, juill. 1998.
- [13] P. H. Brodeur, « Acoustic separation in a laminar flow », in *1994 Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium*, oct. 1994, vol. 3, p. 1359-1362 vol.3, doi: 10.1109/ULTSYM.1994.401842.
- [14] M. Evander et J. Nilsson, « Acoustofluidics 20: Applications in acoustic trapping », *Lab on a Chip*, vol. 12, n° 22, p. 4667, 2012, doi: 10.1039/c2lc40999b.
- [15] M. A. B. Andrade, A. L. Bernassau, et J. C. Adamowski, « Acoustic levitation of a large solid sphere », *Applied Physics Letters*, vol. 109, n° 4, p. 044101, juill. 2016, doi: 10.1063/1.4959862.
- [16] W. J. Xie, C. D. Cao, Y. J. Lü, Z. Y. Hong, et B. Wei, « Acoustic method for levitation of small living animals », *Appl. Phys. Lett.*, vol. 89, n° 21, p. 214102, 2006.
- [17] E. H. Brandt, « Suspended by sound », *Nature*, vol. 413, n° 6855, p. 474-475, oct. 2001, doi: 10.1038/35097192.
- [18] A. Marzo, A. Barnes, et B. W. Drinkwater, « TinyLev: A multi-emitter single-axis acoustic levitator », *Review of Scientific Instruments*, vol. 88, n° 8, p. 085105, août 2017, doi: 10.1063/1.4989995.

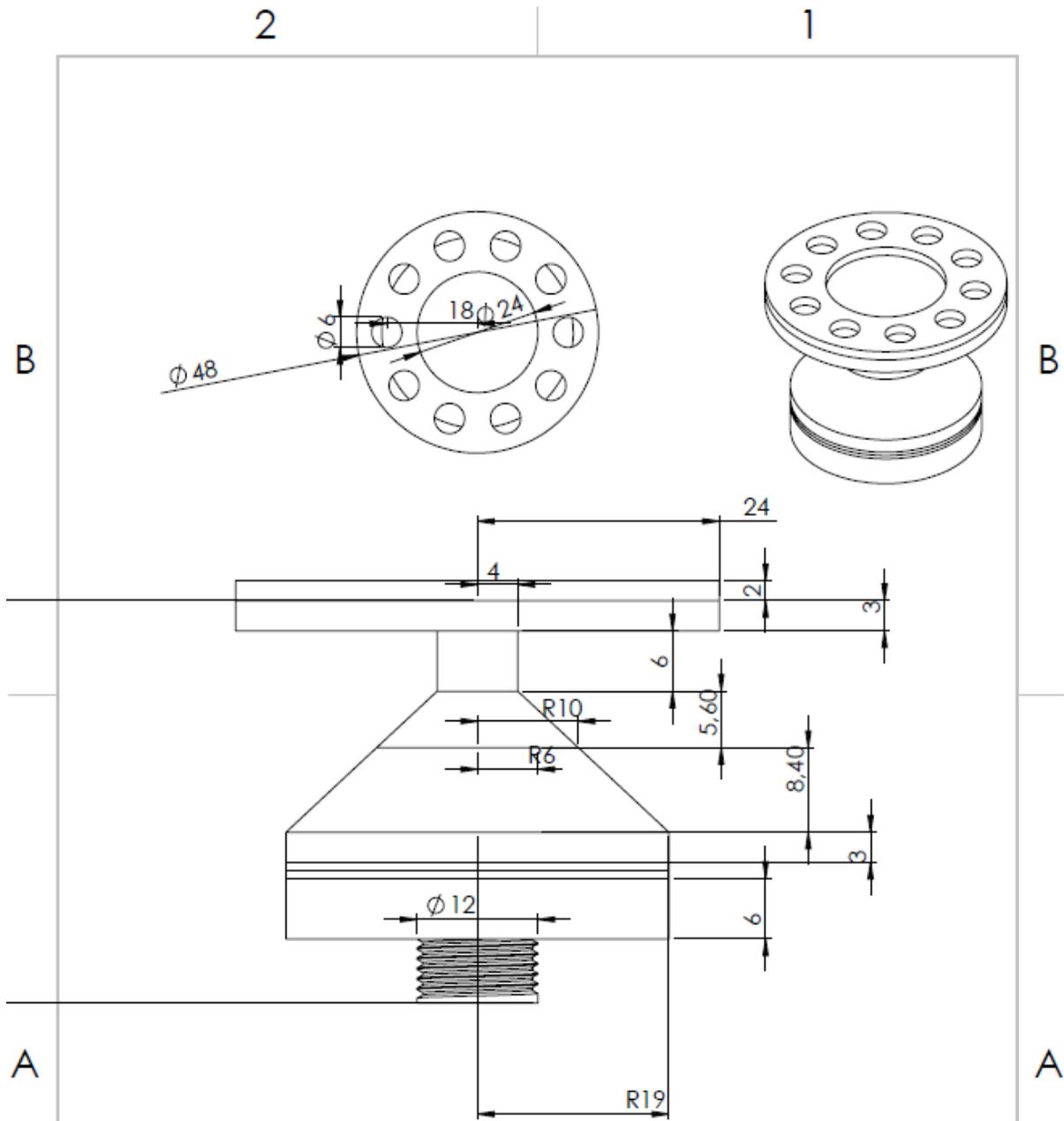
- [19] A. Lenshof, C. Magnusson, et T. Laurell, « Acoustofluidics 8: Applications of acoustophoresis in continuous flow microsystems », *Lab on a Chip*, vol. 12, n° 7, p. 1210, 2012, doi: 10.1039/c2lc21256k.
- [20] J. Wang, M. M. Maw, X. Yu, B. Dai, G. Wang, et Z. Jiang, « Applications and perspectives on microfluidic technologies in ships and marine engineering: a review », *Microfluidics and Nanofluidics*, vol. 21, n° 3, mars 2017, doi: 10.1007/s10404-017-1873-z.
- [21] P. B. Muller, R. Barnkob, M. J. H. Jensen, et H. Bruus, « A numerical study of microparticle acoustophoresis driven by acoustic radiation forces and streaming-induced drag forces », *Lab Chip*, vol. 12, n° 22, p. 4617, 2012, doi: 10.1039/c2lc40612h.
- [22] J. H. Jong, M. H. Choi, J. P. Gerharclstein, et P. H. Brodeur, « IPST Technical Paper Series Number 87 », *Tappi Journal*, n° 871, p. 25, 2000.
- [23] « Brodeur et al. - 2000 - Whitewater Clarification Using a Dual Flocculation/Ultrasonic Method ». Consulté le: mars 14, 2018. [En ligne]. Disponible sur: <https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/2014/tps-838.pdf>.
- [24] P. Brodeur, « Motion of fluid suspended fibers in a standing wave field », *Ultrasonics*, vol. 29, n° 4, p. 302-307, 1991.
- [25] P. Brodeur, J. L. Dion, J. J. Garceau, G. Pelletier, et D. Massicotte, « Fiber characterization in a stationary ultrasonic field », *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 36, n° 5, p. 549-553, sept. 1989, doi: 10.1109/58.31799.
- [26] P. H. Brodeur, « Acoustic Separation Technology - Phase II », IPST / BELOIT, 2000.
- [27] F. Ahrens. et T. Patterson, « Acoustic Separation Technology - Final Report », DOE/ID/13553, 793330, févr. 2002. doi: 10.2172/793330.
- [28] « Cleaning transducer », *American Piezo*. <https://www.americanpiezo.com/standard-products/ultrasonic-power-transducers.html>.
- [29] J. A. Gallego-Juárez et K. F. Graff, *Power Ultrasonics: Applications of High-Intensity Ultrasound*. Elsevier, 2014.
- [30] J. Abergel, « Matériaux piézoélectriques à forte déformation pour l'actionnement microsystème », Université de Grenoble, 2014.
- [31] « W.P. Mason, Electromechanical Transducers and Wave Filters, 2nd ed., Van Nostrand, New York, 1948, pp. 195, 399. »
- [32] A. Iula, R. Carotenuto, M. Pappalardo, et N. Lamberti, « An approximated 3-D model of the Langevin transducer and its experimental validation », *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 111, n° 6, p. 2675-2680, juin 2002, doi: 10.1121/1.1476684.
- [33] S. Sherrit, « Characterization of Piezoelectric Materials for Transducers », *Dielectric and Ferroelectric Reviews*, p. 175-244, 2012.
- [34] « D.A. Berlincourt, D.R. Curran, H. Jaffe, Piezoelectric and piezomagnetic materials and their function in transducers, in: W.P. Mason (Ed.), Phys. Acoustic, Academic, New York, 1964. »
- [35] J. Li, P. Liu, H. Ding, et W. Cao, « Modeling characterization and optimization design for PZT transducer used in Near Field Acoustic Levitation », *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 171, n° 2, p. 260-265, nov. 2011, doi: 10.1016/j.sna.2011.06.020.
- [36] S. H. Kristensen, « Design, construction and characterization of high power ultrasound sources », Master's thesis, Univ. of Southern Denmark, 2009.
- [37] D. Chacón, G. Rodríguez-Corral, L. Gaete-Garretón, E. Riera-Franco de Sarabia, et J. A. Gallego-Juárez, « A procedure for the efficient selection of piezoelectric ceramics constituting high-power ultrasonic transducers », *Ultrasonics*, vol. 44, p. e517-e521, déc. 2006, doi: 10.1016/j.ultras.2006.05.117.
- [38] T. Li, J. Ma, et Adrian. F. Low, « Horn-Type Piezoelectric Ultrasonic Transducer: Modelling and Applications », in *Advances in Piezoelectric Transducers*, F. Ebrahimi, Éd. InTech, 2011.
- [39] H. Kuttruff, *Ultrasonics fundamentals and applications*. Elsevier Applied Science, 1991.

- [40] J. A. Gallego-Juárez, G. Rodriguez, V. Acosta, et E. Riera, « Power ultrasonic transducers with extensive radiators for industrial processing », *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 17, n° 6, p. 953-964, août 2010, doi: 10.1016/j.ultsonch.2009.11.006.
- [41] Y. Hwang et W. Moon, « A wide-band in-air parametric array source composed of a circular plate with steps and a Langevin transducer with a horn », *Applied Acoustics*, vol. 141, p. 223-233, déc. 2018, doi: 10.1016/j.apacoust.2018.07.022.
- [42] S. Zhao et J. Wallaschek, « A standing wave acoustic levitation system for large planar objects », *Archive of Applied Mechanics*, vol. 81, n° 2, p. 123-139, févr. 2011, doi: 10.1007/s00419-009-0401-3.
- [43] X. Zhang et B. Liang, « Piezoelectric ultrasonic transducer for longitudinal-flexural vibrational mode-conversion », *Applied Acoustics*, vol. 129, p. 284-290, janv. 2018, doi: 10.1016/j.apacoust.2017.08.009.
- [44] K. Adachi, T. Takahashi, et H. Hasegawa, « Analysis of screw pitch effects on the performance of bolt-clamped Langevin-type transducers », *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 116, n° 3, p. 1544-1548, sept. 2004, doi: 10.1121/1.1777852.
- [45] J. L. Butler, *Transducers and arrays for underwater sound*. New York, NY: Springer Science+Business Media, 2016.
- [46] P. Bajpai, « Basic Overview of Pulp and Paper Manufacturing Process », in *Green Chemistry and Sustainability in Pulp and Paper Industry*, P. Bajpai, Éd. Cham: Springer International Publishing, 2015, p. 11-39.
- [47] « Brodeur - 1994 - Acoustic separation in a laminar flow ». Consulté le: mars 14, 2018. [En ligne]. Disponible sur: <http://ieeexplore.ieee.org/ielx2/3188/9056/00401842.pdf?tp=&arnumber=401842&isnumber=9056>.
- [48] M. Wiklund, R. Green, et M. Ohlin, « Acoustofluidics 14: Applications of acoustic streaming in microfluidic devices », *Lab Chip*, vol. 12, n° 14, p. 2438, 2012, doi: 10.1039/c2lc40203c.
- [49] T. Leong, L. Johansson, P. Juliano, S. L. McArthur, et R. Manasseh, « Ultrasonic Separation of Particulate Fluids in Small and Large Scale Systems: A Review », *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 52, n° 47, p. 16555-16576, nov. 2013, doi: 10.1021/ie402295r.
- [50] C. I. P. Cotas, « Modelling of Fiber Suspensions Flow in Pipes », Thèse de doctorat, Université de Coimbra, 2016.
- [51] K. Abe, T. Kondoh, et Y. Nagano, « A new turbulence model for predicting fluid flow and heat transfer in separating and reattaching flows-I. Flow field calculations », *International journal of heat and mass transfert*, vol. 37, n° 1, p. 139-152, 1994.
- [52] C. Cotas, D. Asendrych, et M. Graça Rasteiro, « Numerical simulation of turbulent pulp flow of concentrated suspensions: Influence of the non-Newtonian properties of the pulp », *Particulate Science and Technology*, vol. 34, n° 4, p. 442-452, juill. 2016, doi: 10.1080/02726351.2015.1112330.
- [53] I. D. McFarlane et J. D. Llewellyn, « Measurement of Pulp Consistency by Ultrasonic Attenuation », *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 4, n° 1, p. 71-77, mai 1971, doi: 10.1016/S1474-6670(17)68694-4.
- [54] T. Lofqvist, « Ultrasonic wave attenuation and phase velocity in a paper-fibre suspension », in *1997 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. An International Symposium (Cat. No.97CH36118)*, Toronto, Ont., Canada, 1997, vol. 1, p. 841-844, doi: 10.1109/ULTSYM.1997.663144.
- [55] M. Settnes et H. Bruus, « Forces acting on a small particle in an acoustical field in a viscous fluid », *Physical Review E*, vol. 85, n° 1, p. 016327, janv. 2012, doi: 10.1103/PhysRevE.85.016327.
- [56] D. W. Green, J. E. Winandy, et D. E. Kretschmann, *Mechanical Properties of Wood*, Wood handbook: wood as an engineering material., vol. 113. Madison, WI: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999.
- [57] COMSOL, *CFD Module User's Guide*. 2018.
- [58] « Beijing Cheng-cheng Weiye Science and Technology Co ». <http://www.bjccwy.com/>.

[59] « Consistency (concentration) of pulp suspensions, T240 om-93 ». TAPPI Press, 1993.

ANNEXE A

Dessin de l'assemblage du transducteur



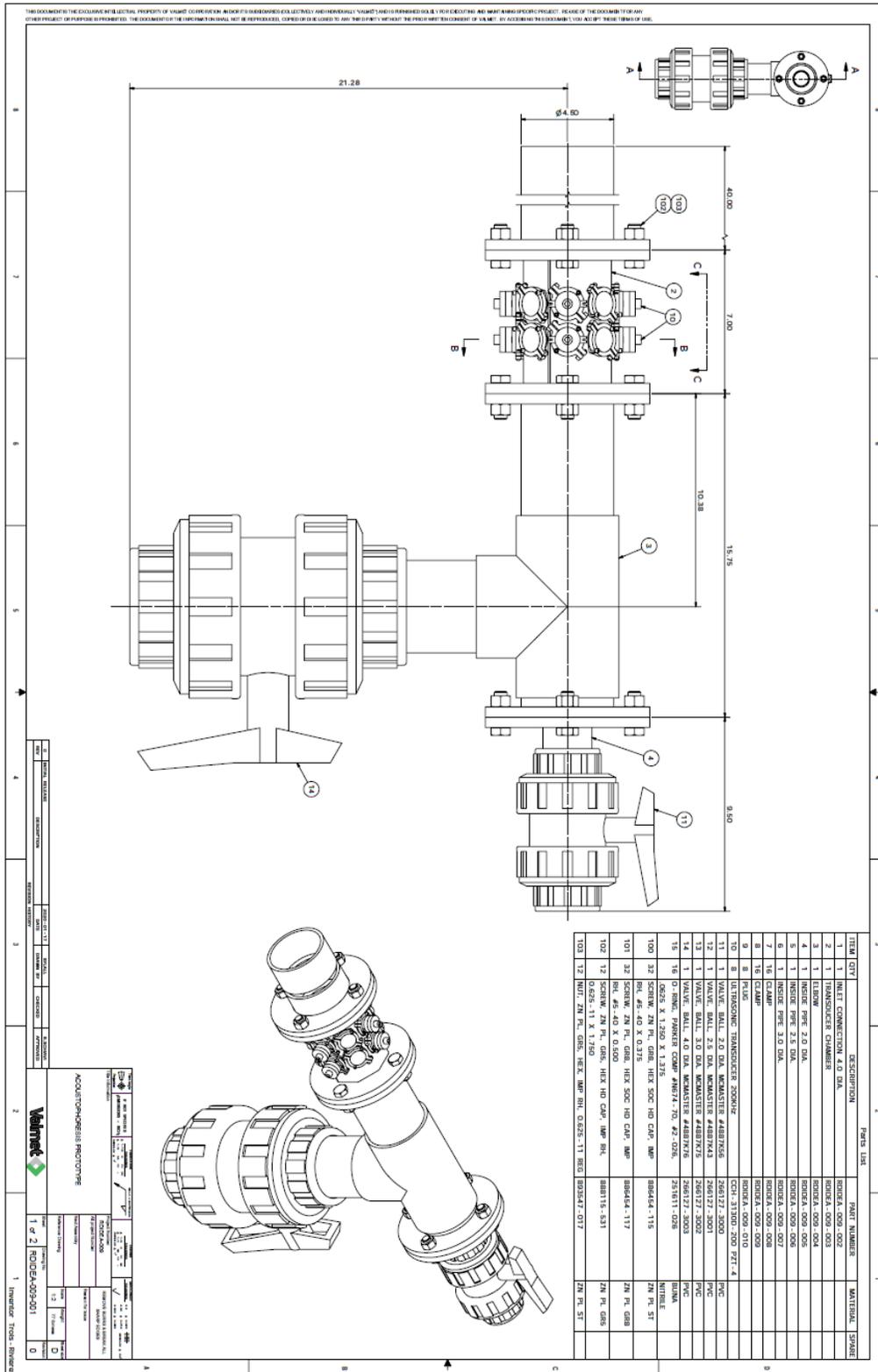
<p>EXCLUSIF ET CONFIDENTIEL LES INFORMATIONS CONTENUES DANS CETTE MISE EN PLAN SONT LA PROPRIETE DE <NOM DE VOTRE SOCIETE>. TOUTE REPRODUCTION PARTIELLE OU TOTALE SANS L'AUTORISATION ECRITE DE <NOM DE VOTRE SOCIETE> EST INTERDITE.</p>		LES COTES SONT EN POUCES TOLERANCES: FRACTIONS ± ANGLES: USINES ± P11 ± DEUX DECIMALES ± TROIS DECIMALES ±		NOM	DATE
		AUTEUR VERIF. APPR. B.E. APPR. FAB. QUAL. COMMENTAIRES:			
ASM. SUIV. UTILISE DANS	MATERIAU FINITION	No. DE PLAN A assemblage_vf		REV.	
APPLICATION	NE PAS CHANGER L'ECHELLE	ECHELLE: 1:1	MASSE	FEUILLE 1 SUR 1	

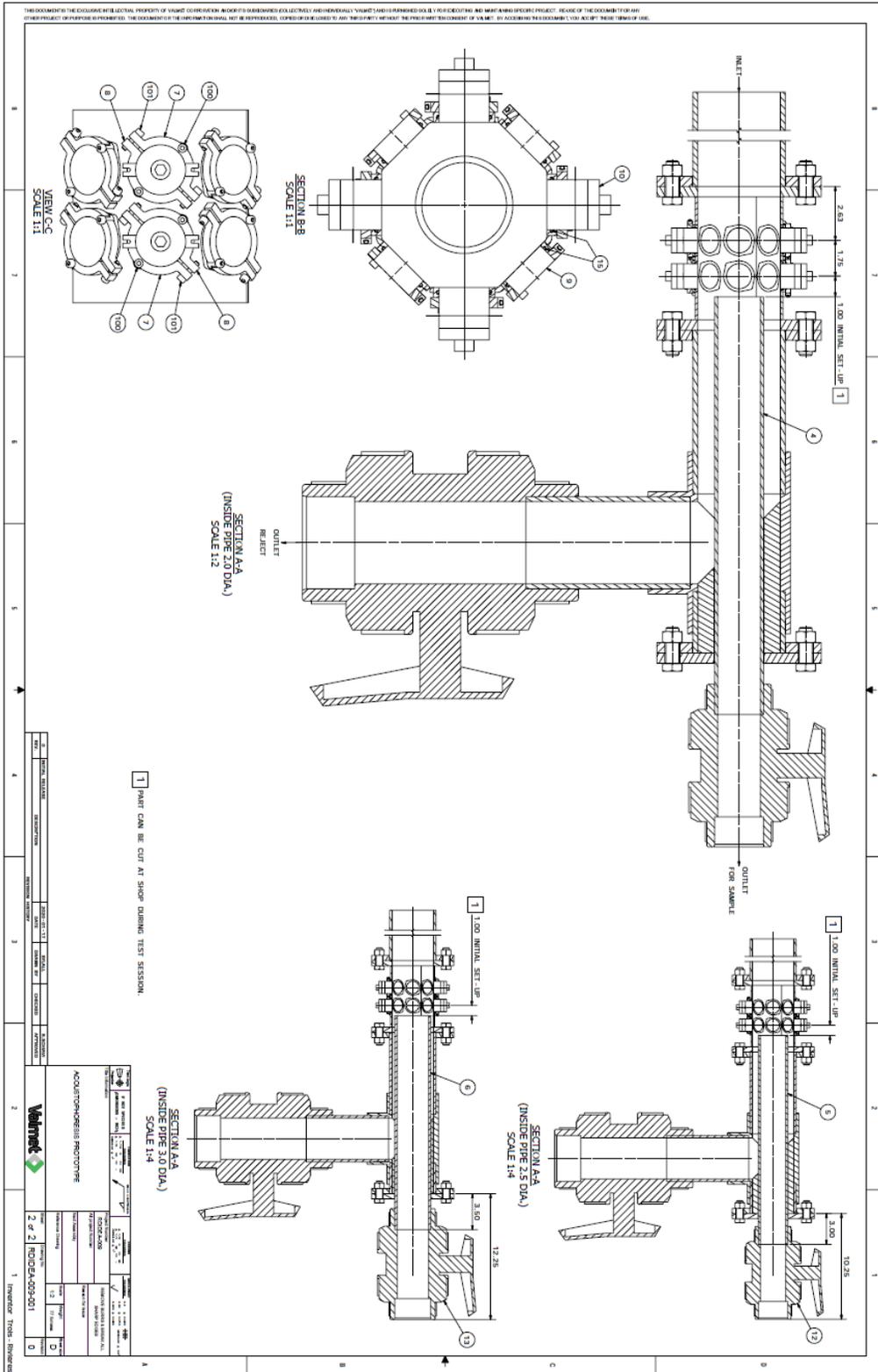
2

1

ANNEXE B

Dessin du prototype industriel





ANNEXE C

Dessin de la chambre des transducteurs

