

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE

PAR
FRANCISCO GALINDO

«CARACTÉRISATION ACOUSTO-OPTIQUE
DES PÂTES À PAPIER: MISE AU POINT DU PROCÉDÉ»

AVRIL 1994

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

*«Los problemas son para solucionarlos. La libertad para
comprobarla. Y en tanto tengamos fé en nuestros
sueños, nada sucede por simple azar.»*
Richard Bach

*«Pose-moi comme un sceau sur ton cœur
car l'amour est plus fort que la mort.»*
Viktor E. Frankl.

À la mémoire de Jesús et Fernando.

À María Magdalena et à María Fernanda

À mon village: San Joaquín, au Vénézuéla.

RÉSUMÉ

L'étude porte sur une technique ultrasonore de caractérisation rapide des fibres, particulièrement celles de pâtes à papier. Le procédé utilise le fait que la stratification et la réorientation des fibres en suspension aqueuse et soumises à un champ ultrasonore intense, se produisent à des vitesses qui dépendent de leurs dimensions.

Nous travaillons à l'amélioration de ce procédé de caractérisation acousto-optique des pâtes à papier. Dans ce but, nous avons conçu de nouveaux transducteurs pour former le résonateur ultrasonore et assurer un meilleur fonctionnement.

Nous avons utilisé systématiquement avec succès l'analogie des lignes électriques. La conception des transducteurs a été faite à partir de logiciels développés à partir de ces modèles sur *MATLAB*^{MC}. Les résultats sont bien en accord avec les mesures, compte tenu de l'approximation monodimensionnelle du modèle, pour différentes structures de transducteur. Notre recherche nous a permis présenter une nouvelle structure pour la réalisation des transducteurs où le problème de décollement par infiltration d'eau n'existe plus.

Le taux d'onde stationnaire a été calculé, et les résultats obtenus permettent de connaître la fréquence à laquelle le résonateur doit être excité.

La vitesse de propagation du son dans l'eau étant une fonction de la température, nous avons considéré ce facteur dans la simulation du résonateur pour nous assurer de résultats conformes à ceux de la mesure.

REMERCIEMENTS

Avant tout je dois remercier Dieu, pour tout le bien de ma vie, et toute ma famille, en particulier María Magdalena et María Fernanda pour leur appui et le temps que je leurs ai pris.

Ce travail a été effectué au Laboratoire d'Ultrasonique et Capteurs de l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR), sous la direction de M. le Professeur Jean-Luc Dion de la Section de Génie Électrique de l'UQTR.

Qu'il veuille trouver ici l'expression de ma plus vive reconnaissance pour m'avoir offert la possibilité de travailler à son côté dans le développement de ma recherche en ultrasons, et celle de présenter ce mémoire, ainsi que pour ses encouragements, ses conseils et sa patience.

Je remercie toutes les personnes qui, d'une manière ou d'autre, m'ont aidé dans mon travail, en particulier MM. A. Barwicz, Y. Dubé, A Sévigny et A. Chériti, professeurs à l'UQTR, ainsi que M. R. Simard. Je remercie également mes collègues et amis MM Pierre Jacob, Ernesto Corniélès et Hugues Paquin.

Je remercie également la *Fundación Gran Mariscal de Ayacucho* au Vénézuéla et LASPAU aux États Unis, organismes qui ont administré mon prêt pour le financement de mon programme d'étude, en particulier Mme Violeta Estrada et M. Peter O'Meara.

Je remercie aussi mes amis et amies ici au Québec, en particulier MM V. M. Peña, C. Soriano, C. Ortiz, M. Hissem et M.L. Doumbia.

TABLE DE MATIÈRES

RÉSUMÉ	i
REMERCIEMENTS	ii
LISTE DE TABLEAUX	vi
LISTE DE FIGURES	vii
LISTE DE SYMBOLES.....	ix
INTRODUCTION	1
1 PROCÉDÉ ACOUSTO-OPTIQUE	3
1.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	3
1.1.1 Aspects acoustiques	3
1.1.2 Vitesses de dérive et de rotation sous l'action du champ acoustique.....	4
1.1.3 Aspects optiques	8
1.1.4 Distribution spatiale et angulaire des cylindres	9
1.2 MODÈLE DE LA LUMIÈRE TRANSMISE	11
1.3 MONTAGE EXPÉRIMENTAL.....	12
1.3.1 Sous-système ultrasonique	12
1.3.2 Sous-système optique	12
1.3.3 Sous-système hydraulique.....	12
2 TRANSDUCTEURS PIÉZOÉLECTRIQUES	14
2.1 MODÉLISATION DES TRANSDUCTEURS PIÉZOÉLECTRIQUES	14
2.2 MÉTHODE D'ANALYSE.....	14

3	TRANSDUCTEURS PIÉZOÉLECTRIQUES	17
3.1	LOGICIEL D'ACQUISITION DES DONNÉES.....	17
3.2	TRANSDUCTEURS EXISTANTS: (T12,T14,T15).....	18
3.2.1	Mesures de caractérisation du transducteur	18
3.2.2	Comparaison entre la mesure et la simulation	18
3.2	NOUVEAUX TRANSDUCTEURS: (T16,T17)	25
3.2.1	Schéma de la couche de laiton vers l'eau.....	25
3.2.2	Structure du nouveau transducteur.....	26
3.2.3	Transducteur T16: données, simulation et mesure.....	27
3.2.4	Transducteur T17: données, simulation et mesure.....	31
3.3	TRANSDUCTEUR AMÉLIORÉ: T18.....	35
3.3.1	Réarrangement des carreaux.....	35
4	RÉSONATEUR ULTRASONORE.....	41
4.1	MODÈLE DU RÉSONATEUR	41
4.2	RÉSONATEUR T16 //T17	43
4.2.1	Données pour la simulation du résonateur formé par les transducteurs T16 et T17.....	43
4.3	RÉSONATEUR T17 // T18.....	45
4.3.1	Détermination de la vitesse du son dans l'eau.	45
4.3.2	Données, simulation et mesure.....	48
4.4	CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT.....	59
4.4.1	Détermination dU taux d'onde stationnaire (TOS).....	59
4.4.2	Vérification expérimentale.....	59
5	MONTAGE FINAL	63
5.1	AMÉLIORATION DU MODULE DE PUISSANCE.....	63
5.2	GÉNÉRATION DE LA FRÉQUENCE D'EXCITATION.....	63
5.3	RACCORDEMENT D'IMPÉDANCES.....	64

5.3.1 Auto-transformateur AT-05.....	64
5.4 RÉPONSE DU SYSTÈME À UN ÉCHANTILLON DE FIBRES	65
CONCLUSIONS	68
BIBLIOGRAPHIE.....	69
ANNEXES	72
A: JUINMEN.M	
B: NOVTRA17.M	
C: NOVTRA18.M	
D: NOVRES.M	
E: OCTRA16.M	
F: OCTRES.M	
G: RÉSON14E.M	

LISTE DE TABLEAUX

Tableau 3.1	Paramètres des éléments piézoélectriques de T14.....	19
Tableau 3.2 a	Paramètres des éléments non-piézoélectriques de T14	20
Tableau 3.2 b	Paramètres des éléments non-piézoélectriques de T14	21
Tableau 3.3	Données pour la simulation du transducteur T16	27
Tableau 3.4	Paramètres des éléments non-piézoélectriques de T16	28
Tableau 3.5	Données pour la simulation du transducteur T17	31
Tableau 3.6	Paramètres des éléments non-piézoélectriques de T17	32
Tableau 3.7	Fréquence d'antirésonance f_a (kHz) pour les différents carreaux de la céramique C21	35
Tableau 3.8	Réarrangement des carreaux de la céramique C21 d'après sa fréquence d'antirésonance	36
Tableau 3.9	Données pour la simulation du transducteur T18	38
Tableau 4.1	Paramètres des éléments piézoélectriques du résonateur T16//T17.....	43
Tableau 4.2a	Paramètres des éléments non-piézoélectriques du résonateur T16//T17.....	44
Tableau 4.2b	Paramètres des éléments non-piézoélectriques du résonateur T16//T17.....	45
Tableau 4.3	Paramètres des éléments piézoélectriques du résonateur T17//T18.....	48
Tableau 4.4a	Paramètres des éléments non-piézoélectriques du résonateur T17//T18.....	50
Tableau 4.4b	Paramètres des éléments non-piézoélectriques du résonateur T17//T18.....	51
Tableau 4.5	Vérification du fonctionnement du système G-3 à différentes valeurs de fréquence d'excitation	60
Tableau 5.1	Conditions expérimentales.....	66

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Principe de fonctionnement du résonateur acoustique.....	4
Figure 1.2	Forces agissant sur des particules cylindriques dans un champ acoustique stationnaire	6
Figure 1.3	Configuration du sous-système optique	8
Figure 1.4	Distribution de concentration en fonction du temps et de la distance	10
Figure 2.1	Système modélisé.....	15
Figure 2.2	Modèle en forme de ligne du système de la figure 2.1	16
Figure 3.1	Transducteur T14. Système simulé avec RÉSON14.M.....	20
Figure 3.2	Modèle en forme de ligne du transducteur T14	22
Figure 3.3	Mesure du transducteur T14 (Deux éléments piézoélectriques).....	23
Figure 3.4	Comparaison entre la mesure et la simulation de T14	24
Figure 3.5	Schéma de la couche de laiton pour la construction des nouveaux transducteurs.....	25
Figure 3.6	Transducteur nouveau au complet	26
Figure 3.7	Système en forme de lignes pour la simulation des nouveaux transducteurs	26
Figure 3.8	Mesure du transducteur T16.....	29
Figure 3.9	Comparaison de la simulation avec la mesure du transducteur T16.....	30
Figure 3.10	Mesure du transducteur T17.....	33
Figure 3.11	Comparaison de la simulation avec la mesure du transducteur T17.....	34
Figure 3.12	Disposition finale des carreaux de la céramique C19 pour la construction de T18	37
Figure 3.13	Mesure du transducteur T18.....	39

Figure 3.14	Comparaison de la simulation avec la mesure du transducteur T18	40
Figure 4.1	Modèle du résonateur ultrasonore	41
Figure 4.2	Modèle du résonateur en forme de lignes	42
Figure 4.3	Mesure du résonateur formé par les transducteurs T16 et T17	46
Figure 4.4	Comparaison de la mesure de T16//T17 avec sa simulation	47
Figure 4.5	Mesure du résonateur T17//T18 à 19,4 °C.....	52
Figure 4.6	Comparaison de la mesure du résonateur T17//T18 à 20°C avec sa simulation	53
Figure 4.7	Mesure du résonateur T17//T18 à 22°C.....	54
Figure 4.8	Comparaison de la mesure du résonateur T17//T18 à 22°C avec sa simulation	55
Figure 4.9	Mesure du résonateur T17//T18 à 24,85°C.....	56
Figure 4.10	Comparaison de la mesure du résonateur T17//T18 à 24,85°C avec sa simulation	57
Figure 4.11	Simulation du résonateur T17//T18 à trois températures différentes	58
Figure 4.12	Vitesse acoustique dans la cellule G-3	61
Figure 4.13	Graphique du TOS	62
Figure 5.1	Auto-transformateur AT-05	65
Figure 5.2	Courbes d'excitation (Lumière diffusée).....	67

LISTE DES SYMBOLES

Symbole	Description
A	Constante (H/b)
A_1	Surface de l'élément piézoélectrique 1
A_2	Surface de l'élément piézoélectrique 2
a	Rayon du disque (chapitre 1) ou,
a	Épaisseur d'un milieu (chapitre 2)
a	Épaisseur des milieux entre le piézo 1 et le piézo 2
α	Coefficient d'atténuation du milieu
aa	Épaisseur des milieux à droite du piézo 1
aa_2	Épaisseur des milieux à gauche du piézo 2
ap	Épaisseur du piézo 1
ap_2	Épaisseur du piézo 2
α_r	Atténuation à la fréquence de référence
ArgR	Argument de l'impédance électrique du transducteur (1 seul piézo)
B	Constante
b	Constante relié à la viscosité du fluide
β	ρ_0/ρ (chapitre 1) ou,
β	$\omega\nu$
C	Couple s'exerçant sur le disque
C_0	Capacité électrique bloquée (à déformation nulle)
C_0	Capacité électrique du piézo 1
C_{02}	Capacité électrique du piézo 2
C_r	Couple résistif

D	Champ quand la charge électrique est constante ou nulle
D_0	Intensité de lumière transmise
D_X	Intensité de lumière diffuse, dans l'axe X
D_Y	Intensité de lumière diffuse, dans l'axe Y
d	Épaisseur du disque
E	Champ électrique
E	Densité d'énergie acoustique
F	Force résultante
F_{\perp}	Force sur un objet perpendiculaire à la gravité
f	Fréquence de vibration
f_1-f_9	Fréquences d'excitation aux transducteurs
f_a	Fréquence d'antirésonance
f_i	Fréquence inférieure
f_m	Fréquence de référence
f_r	Fréquence de résonance
f_r	Fréquence de référence pour les programmes sur <i>MATLAB</i> ^{MC}
f_s	Fréquence inférieure
F_t	Force de traînée
G	Constante
γ	Fonction de propagation complexe
H	Constante
h	Distance du plan nodal de vitesse au centre du disque (chapitre 1), ou
h	Constante piézoélectrique du piézo 1
h_2	Constante piézoélectrique du piézo 2
h_H	Nœud
h_V	Ventre
I	Courant appliqué

I_g	Intensité de lumière diffusée due à la stratification
I_o	Intensité de lumière diffusée initiale
I_t	Intensité de lumière diffusée due à la réorientation
J	Constante
$KKr2$	Coefficient d'atténuation pour les milieux à droite du piézo 2
Kr	Coefficient d'atténuation pour les milieux entre le piézo 1 et le piézo 2
$Kr2$	Coefficient d'atténuation du piézo 2
Kra	Coefficient d'atténuation pour les milieux à gauche du piézo 1
Krr	Coefficient d'atténuation du piézo 1
k	$2\pi/\lambda$
L	Longueur du cylindre (équation 1.11)
L	Distance de séparation des transducteurs au résonateur
λ	Longueur d'onde
l	Longueur du cylindre
μ	Viscosité du fluide
N	Plan nodal
$N2$	Exposant pour le piézo 2
Nap	Exposant pour les milieux à gauche du piézo 1
Nd	Exposant pour les milieux à droite du piézo 2
Nn	Exposant pour le piézo 1
Np	Exposant pour les milieux entre le piézo 1 et le piézo 2
θ	Angle que fait la normale du cylindre avec l'axe X
R	Rayon du cylindre (équation 1.11)
ρ	Masse volumique du disque
R_A et R_B	Fonctions faisant intervenir les divers paramètres piézoélectriques et acoustiques du système
ρ_o	Masse volumique de l'eau

s	Fenêtre spatiale
T	Température en °C
T ₁	Transducteur piézoélectrique 1
T ₂	Transducteur piézoélectrique 2
T12	Transducteur piézoélectrique 12, ancienne structure avec deux piézos
T14	Transducteur piézoélectrique 14, ancienne structure avec deux piézos
T15	Transducteur piézoélectrique 15, ancienne structure avec deux piézos
T16	Transducteur piézoélectrique 16, nouvelle structure avec un piézo
T17	Transducteur piézoélectrique 17, nouvelle structure avec un piézo
T18	Transducteur piézoélectrique 18, nouvelle structure avec un piézo
T _A	Contrainte dans le milieu piézoélectrique A
T _B	Contrainte dans le milieu piézoélectrique B
TOS	Taux d'onde stationnaire
U	Vitesse acoustique
U _d	Vitesse acoustique à droite d'un élément piézo
U _g	Vitesse acoustique à gauche d'un élément piézo
V	Volume du disque (πda^2), ou
V	Plan ventral, ou
V	Tension appliquée au transducteur
v	Vitesse de propagation du son (chapitre 1), ou
v	Vitesse de propagation pour les milieux entre le piézo 1 et le piézo 2
v	Vitesse
V ^D	Vitesse du son dans un piézoélectrique à champ D constant.
V ^E	Vitesse du son dans un piézoélectrique à champ E constant.
v ₂	Vitesse de propagation pour le piézo 2
va	Vitesse de propagation pour les milieux à gauche du piézo 1
v(h)	Vitesse de migration des fibres

$v(h)$	Vitesse de migration des fibres
v_e	Vitesse de propagation en court circuit pour les piézos 1 et 2
v_{se}	Vitesse de propagation du son dans l'eau
v_v	Vitesse de propagation pour le piézo 1
v_{v2}	Vitesse de propagation pour les milieux à droite du piézo 2
ω	Pulsation
$\omega(\theta)$	Vitesse angulaire (chapitre 1)
XA	Argument de l'impédance électrique du résonateur
Z_0	Impédance caractéristique de l'élément piézoélectrique
Z2	Impédance acoustique de l'air à droite du système
Z10	Impédance acoustique du piézo 1
ZA1	Impédance acoustique de l'air à gauche du système
Zao	Impédance acoustique pour les milieux à gauche du piézo 1
Zd	Impédance acoustique à droite de l'élément piézoélectrique
Z_E	Impédance électrique du système
Z_g	Impédance acoustique à gauche de l'élément piézoélectrique
Zo	Impédance acoustique pour les milieux entre le piézo 1 et le piézo 2
Zo2	Impédance acoustique pour les milieux à droite du piézo 2
ZP2	Impédance acoustique du piézo 2
ZRT	Impédance électrique du résonateur
ZZ1	Impédance électrique du transducteur piézoélectrique 1
<u>ZZ2</u>	Impédance électrique du transducteur piézoélectrique 2
Z_+	Impédance acoustique vue à la droite

INTRODUCTION

Une nouvelle technique de caractérisation des pâtes à papier est étudiée au Laboratoire d'Ultrasonique et Capteurs de l'UQTR. Elle est basée sur le fait que les fibres de cellulose en suspension dans l'eau soumises à un champ ultrasonore stationnaire intense dans une cellule spéciale ont des mouvements ordonnés de réorientation et de regroupement. Sous l'effet du champ, les fibres en suspension se regroupent en strates dans les plans nodaux de pression acoustique et se réorientent parallèlement à ces plans [1,2]. Cette évolution se fait à des vitesses qui dépendent de la distribution des dimensions des fibres (longueur, diamètre). Un système électro-optique produit des signaux qui mesurent cette évolution, dont l'analyse fournit l'information sur les fibres de l'échantillon [9,10]. Parmi les problèmes à résoudre, on doit déterminer la structure [12-16] et le mode de raccordement des transducteurs ultrasonores qui donnent les meilleurs résultats; on doit revoir et améliorer certaines parties des logiciels de commande et de la saisie des données et le faire dans la perspective d'une implantation éventuelle en usine, avec intégration à l'instrumentation existante.

L'importance des nouvelles techniques de mesure électroniques s'est accrue considérablement dans l'industrie des pâtes et papier, dictée par les besoins du contrôle fréquent de la qualité et l'uniformité de la production. Or, les méthodes conventionnelles de mesure des grosseurs et longueurs sont lentes: environ une heure par test Bauer-McNett [23]. Depuis de nombreuses années on tente de mettre au point des méthodes permettant des mesures en continu en usine. Le groupe finlandais Kajaani a mis dans le commerce quelques modèles d'appareils faisant une mesure directe automatique (FS100-FS200) basée sur le passage des fibres dans un tube capillaire en trois ou quatre minutes [24-25]. Le Centre National de Recherche Forestière de France a développé un instrument pour la mesure en continu des longueurs de fibres dénommé *Histofibre* et comme la technique précédente utilise un capillaire [26]. Le Laboratoire Suédois de Recherche des Produits Forestiers (STFI) a développé une autre technique basée sur l'utilisation de trois faisceaux lumineux qui permettent de classer les fibres en trois fractions: courtes, moyennes et longues, cette technique a été mise sur les marchés européen et américain sous le nom de: «*Pulp Quality Monitor (PQM)*»[27]. Par rapport aux méthodes décrites ci-haut, nous avons établi que notre méthode devrait permettre une mesure en moins de deux minutes, sans problèmes de capillaires qui se bouchent.

La mise au point du procédé de caractérisation acousto-optique des pâtes à papier requiert, d'abord la conception des nouveaux transducteurs ainsi que la révision des méthodes de traitement des données reliées à la diffusion de la lumière.

Comme réponse au premier point, nous avons conçu des transducteurs ultrasonores au moyen d'un logiciel qui fait appel à une application systématique et rigoureuse de l'analogie des lignes électriques. Le travail que nous avons réalisé est **une première** dans le domaine des résonateurs acoustiques vibrant en une dimension: nous avons mis au point des logiciels permettant de calculer rigoureusement des structures composées de 1 à 4 éléments piézoélectriques électriquement en parallèle et mécaniquement en série, accolés à d'autres milieux quelconques dont le nombre peut dépasser 20 (limité simplement par la mémoire de l'ordinateur), tous les paramètres étant pris en compte, y compris le coefficient d'atténuation. Les résonateurs les plus complexes réalisés ailleurs à ce jour n'avaient que sept milieux dont on négligeait les pertes. Après la réalisation des transducteurs, on a pu vérifier expérimentalement le très bon accord des calculs et des mesures. Mais ces nouvelles structures répondent aussi aux besoins du projet en ajoutant leur capacité de fonctionner dans la cellule remplie d'eau sans risquer le décollage par infiltration d'eau, un des plus grands problèmes de l'ancienne structure. Étant donné qu'on peut maintenant bien caractériser les transducteurs ultrasonores, il est maintenant possible de préciser les différentes conditions de fonctionnement du résonateur ultrasonore formé par de nouveaux transducteurs, ce que nous avons fait. Il faut remarquer la possibilité de calculer le taux d'onde stationnaire (TOS). Le TOS est défini comme le rapport entre le maximum et le minimum de vitesse acoustique. Sa mesure permet de déterminer la fréquence optimale d'excitation du résonateur et d'assurer un transfert de puissance maximal.

Notre contribution au projet est tout particulièrement d'avoir rendu le système plus robuste et plus stable, en plus du développement de méthodes de calcul nouvelles des résonateurs acoustiques. Ceci permettra d'établir les critères nécessaires pour l'implantation éventuelle du traitement des données par un système de réseau de neurones ou autres techniques modernes de mesure et de caractérisation des échantillons de pâtes à papier en usine.

CHAPITRE 1

PROCÉDÉ ACOUSTO-OPTIQUE

1.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Le procédé de caractérisation des pâtes étudié ici est basé sur des principes d'acoustique et d'optique faisant particulièrement intervenir l'action d'une onde acoustique stationnaire sur une suspension de fibres [1]. On le décrira en définissant les aspects acoustiques et optiques du système.

1.1.1 Aspects acoustiques

La figure 1.1 représente le principe de fonctionnement du résonateur acoustique. Le résonateur est constitué par deux transducteurs piézoélectriques composés (T_1 et T_2) placés face-à-face à une distance de quelques centimètres, de chaque côté de la cellule avec, entre les deux, les fibres de cellulose en suspension aqueuse très diluée (environ 0,003% en poids). La face du transducteur doit vibrer suivant sa normale avec une amplitude uniforme de façon à produire des ondes stationnaires tel qu'illustré. La colonne de liquide entre en résonance quand la distance L entre les deux faces est assez exactement un multiple entier d'une demi-longueur d'onde [1,2] soit

$$L = n \lambda / 2 \quad \text{ou} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1.1)$$

où λ est la longueur d'onde en fonction de la vitesse de propagation du son v dans le milieu selon:

$$\lambda = v / f \quad (1.2)$$

f étant la fréquence de vibration. Pendant l'excitation du transducteur un champ d'ondes ultrasonores stationnaires de forte intensité est créé lorsque la fréquence appliquée satisfait la relation

$$f_r = nv / (2L) \quad \text{ou} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1.3)$$

On définit f_r comme étant les fréquences de résonances possibles du résonateur. Le signal d'excitation respectant (1.3) produit des plans nodaux N de vitesse acoustique minimale (pression acoustique maximale) à toutes les demi-longueur d'onde en alternance avec des plans ventraux V de vitesse acoustique maximale (pression acoustique minimale).

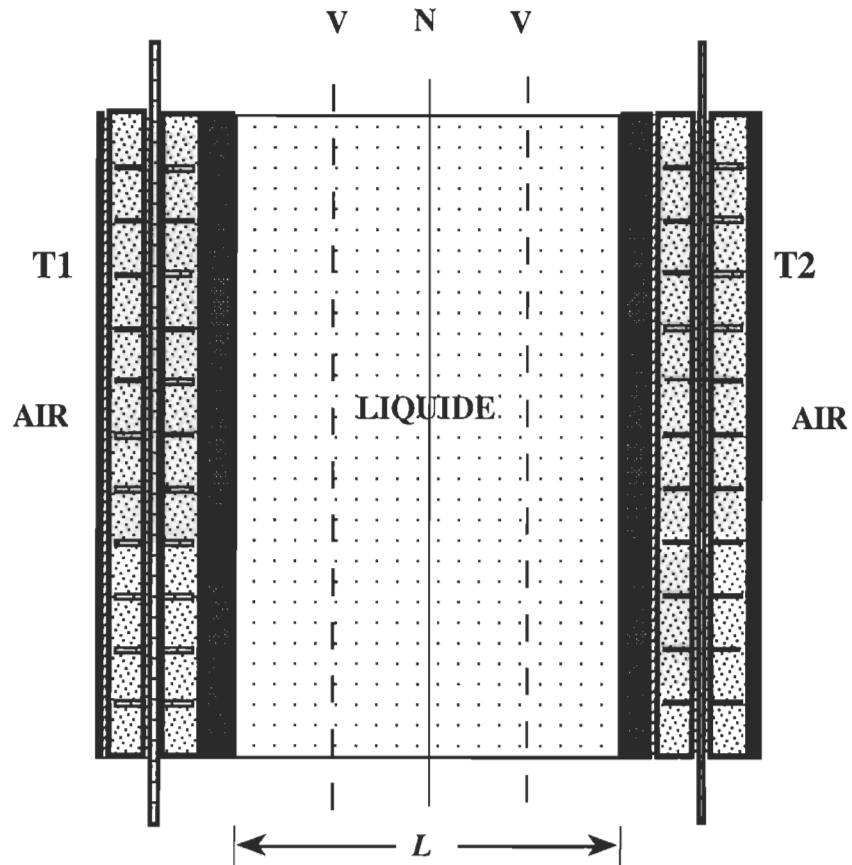


Figure 1.1 Principe de fonctionnement du résonateur acoustique

1.1.2 Vitesses de dérive et de rotation sous l'action du champ acoustique.

On considère un résonateur rempli d'une suspension aqueuse très diluée de fibres de pâte à papier soumise à un champ ultrasonore stationnaire dans le plan horizontal de longueur d'onde acoustique $\lambda = v/f$ où v est la vitesse de propagation du son dans le milieu, f étant la fréquence de vibration. Si l'on néglige la présence de bulles d'air, les effets de la température, la distorsion de l'onde (forces d'Oseen) et la poussée, en première approximation, le couple s'exerçant sur une fibre (assimilée à un cylindre) doit s'apparenter à celui s'exerçant sur un disque [3] :

$$C = - (4/3)a^3E \frac{1 + 0,4k^2a^2\cos^2\theta}{1 + (8\rho_o a / 3\pi\rho d)(1 + 0,2k^2a^2)} \sin 2\theta \sin^2(kh) \quad (1.4)$$

où ρ_o et ρ sont les masses volumiques de l'eau et du disque respectivement, d son épaisseur, a son rayon, E la densité d'énergie acoustique moyenne, $k = 2\pi/\lambda$, θ est l'angle que fait la normale du cylindre avec l'axe X (axe du champ ultrasonore stationnaire) et h est la distance du plan nodal de vitesse acoustique au centre du disque (figure 1.2). De même, la force résultante doit être de la forme suivante:

$$F = (4/3)a^3E \frac{1 + 0.25k^2a^2}{1 + (8\rho_o a / 3\pi\rho d)(1 + 0.2k^2a^2)} \sin 2kh \quad (1.5),$$

ces expressions, dans le cas où $ka \ll 1$ et $a \gg d$, se réduisent à:

$$C = \frac{-\pi\rho da^2E}{2\rho_o} \sin 2\theta \sin^2(kh) = -GVE \sin 2\theta \sin^2(kh) \quad (1.6)$$

où G est une constante et $V = \pi da^2$ est le volume du disque. Puis,

$$F = \frac{\pi\rho da^2E}{\rho_o} \sin 2kh = GkVE \sin 2kh \quad (1.7)$$

On constate donc que ces forces sont sensiblement proportionnelles au volume de la particule. Faisons l'hypothèse que le volume intervient de la même façon dans le cas d'un cylindre de longueur l , rayon a et volume $V = \pi la^2$

$$C = -Hla^2E \sin 2\theta \sin^2(kh) \quad (1.8),$$

$$F = Hkla^2E \sin 2kh \quad (1.9),$$

où H est une constante.

Brodeur [4] présente une expression pour la force par unité de longueur qui a été développée analytiquement par Wu *et al.* [5] de la forme:

$$F_{sw} = \{ [2(1 - \beta)/(1 + \beta)] + 1 \} \frac{\pi a^2}{2} E \sin [2kh] \quad (1.10)$$

où $\beta = \rho_o/\rho$. Pour les fibres de pâte à papier $\beta \approx 1$. L'expression (1.10) a été reprise par Czyz [6] pour obtenir une expression de la force de radiation de pression de dérive. Comme les

où $\beta = \rho_0/\rho$. Pour les fibres de pâte à papier $\beta \ll 1$. L'expression (1.10) a été reprise par Czyz [6] pour obtenir une expression de la force de radiation de pression de dérive. Comme les expressions des forces (1.9) et (1.10) sont semblables on gardera (1.9). Durant l'excitation du transducteur un champ d'ondes stationnaires de forte intensité est créé lorsque la fréquence appliquée satisfait la relation $f_r = n v / \lambda$ où $n=1,2,3,\dots$ on définit f_r comme étant les fréquences de résonance du résonateur. Le signal d'excitation produit des plans nodaux N de vitesse acoustique minimale (pression acoustique maximale) à tous les demi-longueurs d'ondes intercalés par des plans ventraux V de vitesse acoustique maximale (pression acoustique minimale). Les fibres vont se déplacer vers le ventre, le plus proche.

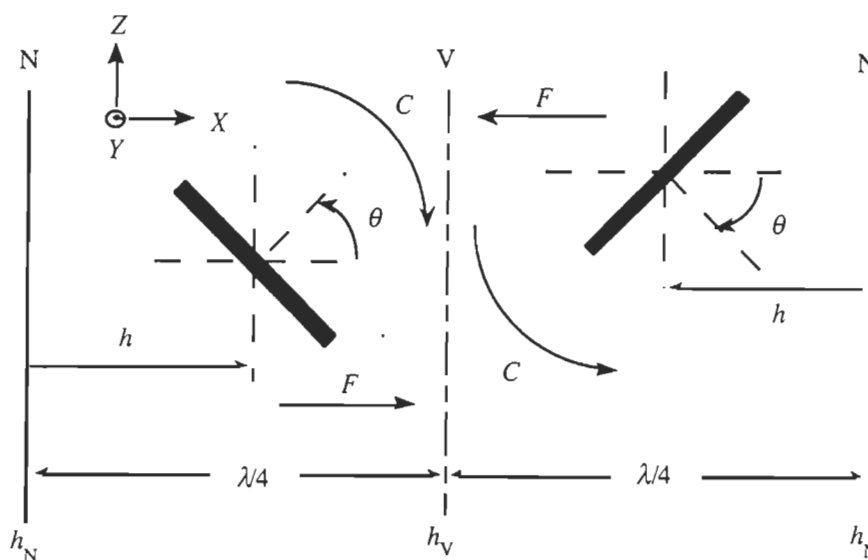


Figure 1.2 Forces agissant sur des particules cylindriques dans un champ acoustique stationnaire.

N: plan nodal où la vitesse acoustique est minimale.

V: plan ventral ou antinodal où la vitesse acoustique est maximale.

L'expression de la force de radiation [6] a été développée dans un système sans frottement, maintenant, il faut considérer la force de frottement ou traînée que le cylindre subit dans un fluide dit newtonien au repos avec viscosité μ . D'après Guyon, Hulin et Petit [7], on a d'une façon très générale, que la force sur un objet de taille finie et de dimension maximale L est voisine de celle sur une sphère de diamètre L . En particulier pour un cylindre allongé de rayon R et de longueur L perpendiculairement (F_{\perp}) à la gravité, un calcul élaboré donne l'expression:

$$F_{\perp} = \frac{8\pi\mu LU}{\ln(L/R)+1/2} \quad (1.11)$$

où U est la vitesse. Cette valeur est également voisine de la force sur la sphère circonscrite de rayon $L/2$. Ceci est une manifestation de la grande portée des interactions hydrodynamiques aux petits nombres de Reynolds: celle-ci entraîne une faible dépendance des profils d'écoulement ainsi que des forces par rapport aux détails de la forme de l'objet en déplacement.[7] Étant donné que le rayon est de l'ordre de $20 \mu\text{m}$ et que le $\ln(L/R)$ peut être développé par une série de Taylor [8] et si l'on exprime la force de traînée par unité de longueur on aura, donc, $\ln(1/R) \approx -JR$, pour notre cas $R = a$ et J une constante. On aura finalement :

$$F_t = bav(h) \quad (1.12)$$

où b est une constante reliée à la viscosité du fluide et $v(h) = dh/dt$ est la vitesse de migration des fibres vers un plan ventral de vitesse acoustique. En égalant (1.9) et (1.12) et par unité de longueur aussi, on aura:

$$v(h) = AkEa \sin(2kh) \quad (1.13)$$

où $A = H/b$ est une constante.

Si l'on prend l'équation (1.8), on peut constater que le couple est négatif par rapport à θ et que sa grandeur croît en fonction de h . La position d'équilibre est à $\theta = 0$. Quand le cylindre est à $h = h_v$, le cylindre est à la position d'équilibre et il ne peut pas tourner. Pour déterminer l'expression du couple résistif sur un cylindre on va la dériver d'après (1.12). Si l'on considère un élément dL de la longueur L du cylindre et que le cylindre pivote sur le point milieu, avec une vitesse angulaire ω , on a:

$$dC_r = l dF = ba\omega l^2 dl \quad (1.14)$$

$$C_r = ba\omega \int_0^L l^2 dl = ba\omega \left| \frac{l^3}{3} \right|_0^L \quad (1.15)$$

on a comme expression finale:

$$C_r = \frac{1}{3}ba\omega L^3 \quad (1.16).$$

Si on néglige l'inertie du cylindre, on a une expression pour la vitesse de réorientation du cylindre en fonction de l'angle θ , en égalant (1.8) et (1.16) :

$$\omega(\theta) = -B \left(\frac{a}{L^2} \right) E \sin 2\theta \sin^2(kh) \quad (1.17)$$

dans laquelle B est une constante. Contrairement à l'expression donnée par Brodeur [4] le couple n'est pas directement proportionnelle au carré du rayon, mais au rayon simplement. On peut aussi conclure que plus le cylindre (fibre) est court, plus vite il va se réorienter vers sa position d'équilibre.

1.1.3 Aspects optiques

Optiquement, les fibres de pâte de bois sont assimilables à des structures cylindriques creuses formées de dipôles électriques enroulés, dont l'effet sur la lumière diffusée a été analysé. Dion *et al.*[9] citent différentes études et analyses sur la diffusion de la lumière. Étant donné que ces analyses s'appliquent à des particules de dimensions inférieures à celles des fibres cellulosiques, on peut considérer que les paramètres de diffusion évoluent graduellement avec les dimensions des particules diffusantes [9].

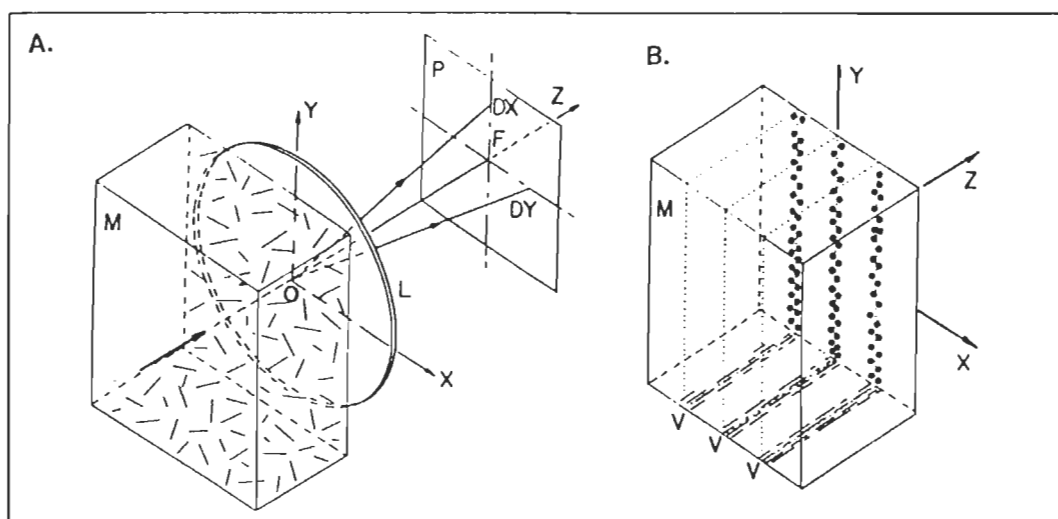


Figure 1.3 Configuration du sous-système optique
 A Orientation initiale aléatoire de fibres
 B Après l'excitation acoustique, les fibres sont à l'horizontale dans la direction Z.

La figure 1.3A montre la configuration du système de mesure. Un faisceau cylindrique de lumière selon $O-Z$ éclaire le volume M de fibres en suspension. Le foyer F de la lentille L de sortie se trouve dans le même plan de mesure P . Les faces des transducteurs sont parallèles au plan $Y-O-Z$ [9]. Des photodiodes mesurent l'intensité de la lumière diffusée D_X , D_Y et de la lumière transmise D_O [1]. L'intensité lumineuse convertie en signal électrique permet de suivre l'évolution des fibres dans la suspension. Après l'application de l'excitation acoustique: les fibres cylindriques devraient être à l'horizontale et orientées selon $O-Z$, dans les plans ventraux V de vitesse acoustique (zone non éclairées), comme montré dans la figure 1.3B. Au cours de ces déplacements, vu l'anisotropie croissante, les intensités lumineuses doivent varier différemment en D_X et D_Y [9]. et on voit diminuer ces intensités à cause de la diminution de concentration dans les interstrates qui sont éclairées.

1.1.4 Distribution spatiale et angulaire des cylindres

En pratique, les fibres ont évidemment des positions et des orientations initiales aléatoires. De plus, leur longueur et leur diamètre sont caractérisés par des distributions particulières, de sorte que l'évolution de la suspension est assez complexe. Brodeur a analysé le comportement d'une suspension [4], mais comme on a déjà dit au début, il s'agit d'une suspension aqueuse très diluée.

La concentration des particules $f(h, t)$ en fonction de la position et du temps le long de l'axe X ($h_N \leq h \leq h_V$), doit satisfaire l'équation de continuité suivante:

$$\frac{\partial f(h, t)}{\partial t} = - \frac{\partial [f(h, t)v(h)]}{\partial h} \quad (1.18)$$

$f(h, t)$ est le nombre de particules par unité de volume, dont l'orientation est comprise entre θ et $\theta + \Delta\theta$ à l'instant t .

Brodeur a démontré l'expression résultante [4], mais des considérations plus récentes au sujet de cette équation [6] nous ont amenés à y apporter certaines modifications. On aura donc finalement:

$$f(h, t) = \frac{f_0}{\sin^2[kh] \exp(2AE k^2 a t) + \cos^2[kh] \exp(-2AE k^2 a t)} \quad (1.19)$$

étant donné que la vitesse de déplacement est de la forme de (1.13). Les résultats obtenus par simulation sont montrés dans un graphique tridimensionnel de $f(h,t)$ à la figure 1.4 et sont très semblables à ceux qu'on retrouve dans [4]. Nous avons développé l'expression (1.18) en ajoutant (1.19) et (1.13). La grandeur f_0 est la concentration initiale des cylindres (à $t = 0$). Avec le temps, la concentration tend vers l'infini à $h = h_v$ dans les plans ventraux, où $h = \lambda/4, 3\lambda/4...$ Si on intègre par rapport à h sur la fenêtre $(h_v - s) \leq h \leq h_v$, où $0 \leq s \leq \lambda/4$ (fig. 1.4), on obtient l'expression de la concentration f_s dans le volume éclairé:

$$f_s(t) = \frac{f_0}{k} \operatorname{arctg} [\exp(-2AEk^2at) \operatorname{tg}(ks)] \quad (1.20).$$

Si $s = \lambda/4$, alors $f_s(t) = f_0 s$, c'est-à-dire indépendante du temps, comme prévu.

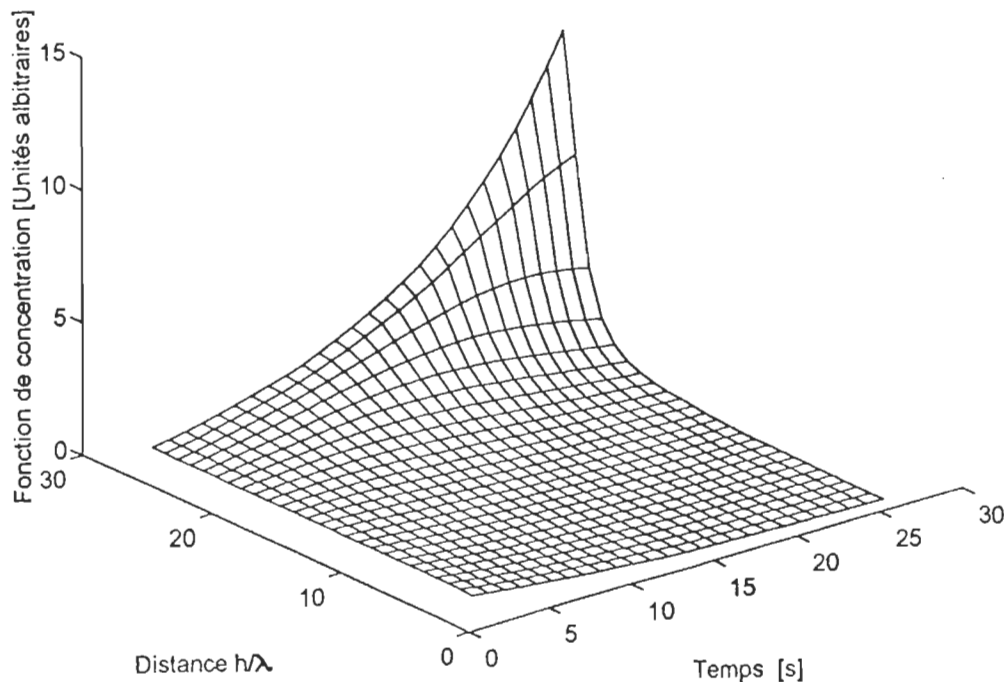


Figure 1.4 Distribution de concentration en fonction du temps et de la distance

Remarque: la position du zéro est un plan nodal de déplacement acoustique.

L'analyse de la distribution angulaire des cylindres orientés aléatoirement sur le plans X-Z, comme indiqué dans la figure 1.2, est faite de la même façon que celle de la distribution des positions. Dans ce cas ci on fait appel à l'équation de la conservation de l'orientation. Pour une étendue angulaire $0 \leq \theta \leq \pi/2$, la fonction de distribution, $g(h,t)$ est:

$$g(h,t) = \frac{g_0}{(\sin^2 \theta) \exp\left(2AEk \frac{a}{L^2} t\right) \sin^2(kh) + (\cos^2 \theta) \exp\left(-2AEk \frac{a}{l^2} t\right) \sin^2(kh)} \quad (1.21)$$

où g_0 est la distribution angulaire initiale.

1.2 ANALYSE DE LA LUMIÈRE TRANSMISE

Brodeur a considéré l'expression pour la lumière diffusée comme étant la somme des deux contributions soit la stratification et la réorientation, il l'a défini comme [4]:

$$I(t) = I_t(t) + I_g(t) \quad (1.23)$$

si l'on considère que: $I(0) = I_0$ est l'intensité de lumière diffusée avant l'excitation; $I_t(0) = pI_0$ sera la contribution due à la stratification et $I_g(0) = (1-p)I_0$ sera la composante due à la réorientation; où p est un facteur de pondération qui oscille entre 0 et 1. Maintenant, si on relie linéairement f_0 de la distribution spatiale initiale dans (1.20) avec I_0 , $I_f(t)$ sera donnée par:

$$I_f(t) = \frac{pI_0}{ks} \operatorname{arctg}\left[\exp(-2AEk^2 at) \operatorname{tg}(ks)\right] \quad (1.24)$$

où la normalisation à la largeur s de la fenêtre a été appliquée. Une équation semblable est disponible pour $I_g(t)$. Si on normalise l'équation (1.22) à une étendue angulaire arbitraire ϕ , on obtient:

$$I_g(t) = \frac{(1-p)I_0}{\phi} \operatorname{arctg}\left[\exp\left[-2BE \frac{a}{l^2} \sin^2(kh) t\right] \operatorname{tg}(\theta)\right] \quad (1.25)$$

1.3 MONTAGE EXPÉRIMENTAL

À partir de l'expérience acquise dans l'étude du procédé acousto-optique de caractérisation des fibres de pâtes à papier, on a précédemment développé trois sous-systèmes: ultrasonique, optique et hydraulique [1,10]. Chaque section de ces sous-systèmes a un rôle essentiel dans les mesures. L'étude approfondie de cette problématique a été présentée par Massicotte [1] et on a fait quelques modifications. Les plus importantes sont la conception et la réalisation des nouveaux transducteurs et le changement de la source de signal d'excitation.

1.3.1 Sous-système ultrasonique

On a considéré d'une part les particularités de l'excitation des transducteurs et d'autre part la variété des mesures à faire afin de concevoir les transducteurs requis. Quant au montage du résonateur, il a été précédé de la modélisation des transducteurs ultrasoniques devant créer un champ d'ondes ultrasonores stationnaires intense, stable et uniforme.

Les trois sections de ce sous-système sont: les transducteurs, le résonateur et l'excitation des transducteurs. On utilise deux transducteurs rectangulaires pour former le résonateur (figure 1.1): une structure différente de celle décrite par Massicotte [1] qui a basé son étude sur un résonateur composé d'un transducteur et d'un réflecteur.

Le montage du résonateur a été une partie essentielle de ce travail. On a dû concevoir de nouveaux transducteurs pour monter ce résonateur. Auparavant la conception des transducteurs ultrasonores a été considérée comme très difficile à optimiser. Mais, à la suite de longues études nous avons mis à point une méthode permettant de le faire.

1.3.2 Sous-système optique

Ce sous-système est formé de deux sections: la source lumineuse et les détecteurs [1], ce sous-système n'a pas été modifié. Seulement le masque placé à l'entrée de la cavité qui permet uniquement l'éclairage des interstrates doit être adapté à la fréquence de travail.

1.3.3 Sous-système hydraulique

Le sous-système hydraulique constitue la partie mécanique la plus importante du procédé. Ce sous-système a été divisé en trois sections: cellule de mesure, circulation du liquide, injecteur et mélangeur de fibres [1]. Sa fonction est le contrôle des différentes variables qui interviennent dans le procédé comme le niveau, la température et celui des différentes vannes et pompes. Parmi les tâches à réaliser, les plus importantes sont: le dégazage de l'eau et l'injection de l'échantillon de fibres vers la cellule.

CHAPITRE 2

TRANSDUCTEURS PIÉZOÉLECTRIQUES

Les transducteurs piézoélectriques sont essentiellement des convertisseurs réciproques d'énergie électrique en énergie acoustique [18]. Si la fréquence de travail est supérieure à 20 kHz, il s'agit de transducteurs ultrasonores. La conversion d'énergie est réalisée au moyen des effets piézoélectriques ou encore au moyen du phénomène d'électrostriction à polarisation rémanente qu'on peut observer dans certaines céramiques telles que les céramiques de zirconate et titanate de plomb [18].

On utilise couramment depuis de nombreuses années, le modèle de Mason pour représenter un élément piézoélectrique vibrant en une dimension [11]. Dion décrit quelques questions soulevées par ce modèle en proposant un nouveau modèle unidimensionnel de transducteur vibrant en épaisseur [12,13]. La particularité de la nouvelle approche est d'assimiler les contraintes sur les faces à des sources et d'appliquer la théorie des lignes électriques et le théorème de superposition.

2.1. MODÉLISATION DES TRANSDUCTEURS PIÉZOÉLECTRIQUES

La modélisation d'un transducteur piézoélectrique découle d'une application systématique et rigoureuse de l'analogie entre la propagation des ondes planes dans un milieu de propagation acoustique unidimensionnel et celle des ondes de courant et de tension sur une ligne électrique [14]. La méthode tient compte des pertes dans tous les milieux, le coefficient d'atténuation pouvant varier selon une loi de puissance ou selon les valeurs d'une table.

Dans le cas d'un milieu piézoélectrique à faces parallèles, les contraintes qui apparaissent sous l'effet d'un champ électrique imposé sont distribuées dans la masse d'une face à l'autre. Toutefois, l'examen de l'équation de propagation des ondes acoustiques dans un tel milieu montre que les contraintes sources peuvent être associées aux faces [12]. On sait d'ailleurs expérimentalement qu'une perturbation acoustique part de chaque face l'une vers l'autre à la suite d'une variation de tension électrique [12,16]. Dans un transducteur ayant plus d'un élément

piézoélectrique, ces éléments sont électriquement en parallèle et, dans ce cas, l'impédance interne de la source est supposée nulle.

2.2. MÉTHODE D'ANALYSE

La figure 2.1 représente le système modélisé: un élément piézoélectrique d'épaisseur a entre deux milieux A et B présentant des impédances Z_g et Z_d respectivement. Idéalement, dans le système montré, on suppose que la propagation d'énergie se fait en une dimension seulement suivant l'axe 0-Z.

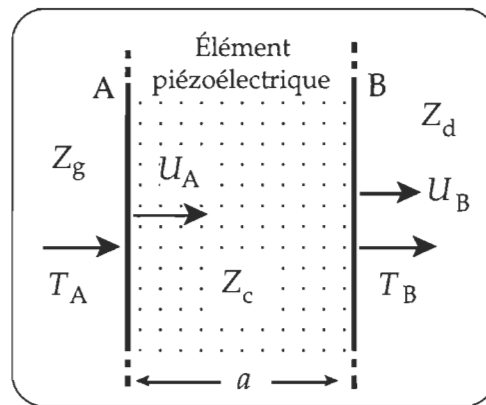


Figure 2.1 Système modélisé [16].

De cette façon nous pouvons utiliser l'analogie avec la propagation des ondes de courant et de tension sur les lignes électriques et utiliser l'ensemble des relations mathématiques qui s'appliquent. La figure 2.2 montre le système comme une ligne acoustique. Il a été démontré [12,14-18] que la relation entre la tension appliquée V , le courant I et les vitesses acoustiques U des faces A et B de l'élément piézoélectrique est :

$$V = -\frac{h}{j\omega} (U_B - U_A) + \frac{1}{j\omega C_o} I \quad (2.1)$$

où h est la constante piézoélectrique, ω la pulsation et C_o la capacité bloquée. L'impédance acoustique vue vers la droite (sens +) est de la forme [17]:

$$Z_+ = \frac{Z_d \cosh(\gamma \alpha) + Z_o \sinh(\gamma \alpha)}{Z_o \cosh(\gamma \alpha) + Z_d \sinh(\gamma \alpha)} Z_o \quad (2.2)$$

où Z_d est l'impédance acoustique vue à droite de l'élément suivant d'épaisseur a et d'impédance caractéristique Z_o , γ étant la fonction de propagation: $\gamma = \alpha + j\beta$, α est le coefficient d'atténuation du milieu et $\beta = \omega/v$, avec v la vitesse de phase. On a une expression semblable pour l'impédance vue vers la gauche de l'élément piézoélectrique. La gauche et la droite sont définies par rapport au sens de propagation de l'énergie acoustique à partir de l'élément actif. D'autre part, la relation entre la vitesse U_g à gauche d'une ligne et la vitesse U_d à droite est la suivante [17]:

$$U_g = [\cosh(\gamma a) + (Z_d/Z_o)\sinh(\gamma a)]U_d \quad (2.3)$$

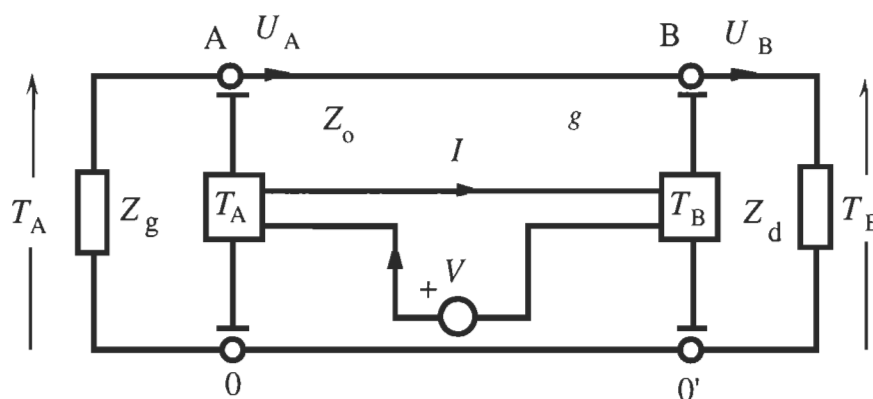


Figure 2.2 Modèle en forme de ligne du système de la figure 2.1 [16]

On obtient également des formes explicites de l'impédance électrique présentée par un élément piézoélectrique, ainsi que des vitesses acoustiques de ses faces à gauche (A) et à droite (B) [17]:

$$Z_E = \frac{1}{j\omega} (R_B - R_A) + \frac{1}{j\omega C_o} \quad (2.4)$$

$$U_A = \frac{R_A}{Z_E} V \quad U_B = \frac{R_B}{Z_E} V \quad (2.5)$$

où R_A et R_B sont des fonctions faisant intervenir les divers paramètres piézoélectriques et acoustiques du système [11, 14-17].

CHAPITRE 3

CALCUL DES TRANSDUCTEURS PIÉZOÉLECTRIQUES

Les diverses structures de transducteur piézoélectrique ont été calculées au moyen de programmes réalisés avec le logiciel *MatLab*®.

3.1 LOGICIEL D'ACQUISITION DES DONNÉES

Un logiciel d'acquisition et de traitement automatique de données MESLAB sur *LabWindows*^{MC} permet de déterminer à partir de la mesure des transducteurs la fréquence de résonance, l'impédance et autres caractéristiques permettant d'évaluer ses performances.

Ce logiciel permet d'effectuer les tâches suivantes [1]:

- a.- Acquisition de données avec l'analyseur d'impédance HP-4192A via une communication avec carte suivant le protocole IEEE-488 (GPIB).
- b.- Affichage graphique de différents types tels que: affichage d'un vecteur avec échelle linéaire ou semi-logarithmique, affichage de deux vecteurs sur le même graphique avec échelles différentes, en abscisse et en ordonnée.
- c.- Entrée et sortie des données: selon le format du logiciel afin de conserver le maximum d'information et en format ASCII pour avoir la possibilité de transfert de données avec d'autres logiciels.
- d.- Différentes analyses mathématiques telles que: détermination des valeurs minimale et maximale des vecteurs d'un graphique.

3.2 TRANSDUCTEURS EXISTANTS: (T12,T14,T15)

Depuis quelques années on utilise dans ce projet des transducteurs formés par céramiques carrées d'environ 100 x 100 mm assemblées avec des éléments métalliques. Parmi ces transducteurs formés par deux céramiques piézoélectriques sciées à 90% de profondeur, figurent: T12, T14 et T15 décrits plus loin. Un des plus grands problèmes est l'infiltration d'eau qui entraîne le décollage des céramiques du métal. Dans cette étude on a travaillé avec le transducteur T14, étant donné que l'on connaît tous ses paramètres pour le simuler correctement pour, ensuite, comparer les résultats de simulation avec les mesures. Les transducteurs T12 et T15 formaient le résonateur précédant et ont subi le décollement par infiltration d'eau.

3.2.1 Mesures de caractérisation du transducteur

Dans le menu du logiciel d'acquisition on choisit MESLAB qui permet d'obtenir à l'aide de l'impédancemètre vectoriel HP-4192A, un graphique de l'impédance en fonction de la fréquence, ainsi que le graphique de la phase. Ces données originales permettent de caractériser le transducteur mesuré en plus des valeurs de fréquence de résonance et d'antirésonance.

Les mesures du transducteur T14 sont enregistrées dans un fichier tel que 92092310.Z, qu'il faut modifier (enlever les commentaires) pour obtenir des données en ASCII. Il faut ensuite le convertir en fichier *MATLAB*^{MC} et son nom devient: 92092310.mat. Cette conversion est possible grâce au programme TRANSLAT.exe.

3.2.2 Comparaison entre la mesure et la simulation

Pour simuler le transducteur T14 on a fait appel au fichier RÉSON14e.m sur *MATLAB*^{MC} et essentiellement ce fichier est une version modifiée de RÉSON10.m, qui fait appel au programme MEMOIRE.m [14]. La raison des changements est reliée au fait que RÉSON10.m considérait un transducteur formé par deux céramiques piézoélectriques identiques et seulement deux couches à droite et deux couches à gauche du système. Maintenant, à partir de RÉSON14E.m, la condition de symétrie disparaît.

Les tableaux 3.1 et 3.2 montrent des données du fichier de simulation du transducteur T14 (RÉSON14e.m) et la figure 3.1 représente le système simulé: deux éléments piézoélectriques avec quatre milieux à gauche du piézo 1, trois milieux entre les deux piézos et quatre milieux à droite du piézo 2.

L'élément piézoélectrique est du type céramique : Channel 5400, carré avec une densité d'environ 7600 kg/m^3 . Pour la construction du transducteur T14 on a utilisé les céramiques piézoélectriques pleinement caractérisées auparavant. La couche métallique centrale est d'acier, les autres pièces de métal sont de laiton. Le collage est fait par un mélange de colle *Super Bonder 324* et de poudre de tungstène pour garantir la conduction électrique à travers cette couche. Le modèle en forme de ligne du système simulé est représenté dans le fig 3.2.

Milieu	10 Céramique 1 (C23)	11 Céramique 2 (C30)
Impédance acoustique	$Z_{10} = 2,906 \cdot 10^7 \text{ R}$	$Z_{P2} = 2,913 \cdot 10^7 \text{ R}$
Épaisseur a	$a_p = 8,135 \cdot 10^{-3} \text{ m}$	$a_{p2} = 8,13 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
Constante piézoélectrique	$h = 2,29 \cdot 10^9 \text{ N/C}$	$h = 2,32 \cdot 10^9 \text{ N/C}$
Surface	$A = 8,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$	$A_2 = 8,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$
Capacité électrique C_o	$C_o = 7,46 \cdot 10^{-9} \text{ F}$	$C_{o2} = 7,4 \cdot 10^{-9} \text{ F}$
Vitesse V^D	$v_v = 3800 \text{ m/s}$	$v_2 = 3805 \text{ m/s}$
Vitesse V^E	$v_e = 3005 \text{ m/s}$	$v_e = 3005 \text{ m/s}$
Atténuation	$K_{rr} = 3,2 \text{ Np/m}$	$K_{r2} = 3,2 \text{ Np/m}$
Exposant	$N_n = 1,5$	$N_2 = 1,5$

La vitesse de propagation des ondes acoustiques V^D dans le piézoélectrique est la vitesse quand le champ \mathbf{D} est nul, c'est-à-dire la vitesse quand la charge électrique sur les électrodes est constante ou nulle. La vitesse V^E est la vitesse quand le champ électrique \mathbf{E} est constant ou nul,

par exemple quand les électrodes sont court-circuitées. L'exposant est celui utilisé dans la loi de variation du coefficient d'atténuation avec la fréquence:

$$\alpha = \alpha_r \left(\frac{f}{f_r} \right)^n$$

où α_r est l'atténuation à la fréquence de référence f_r .

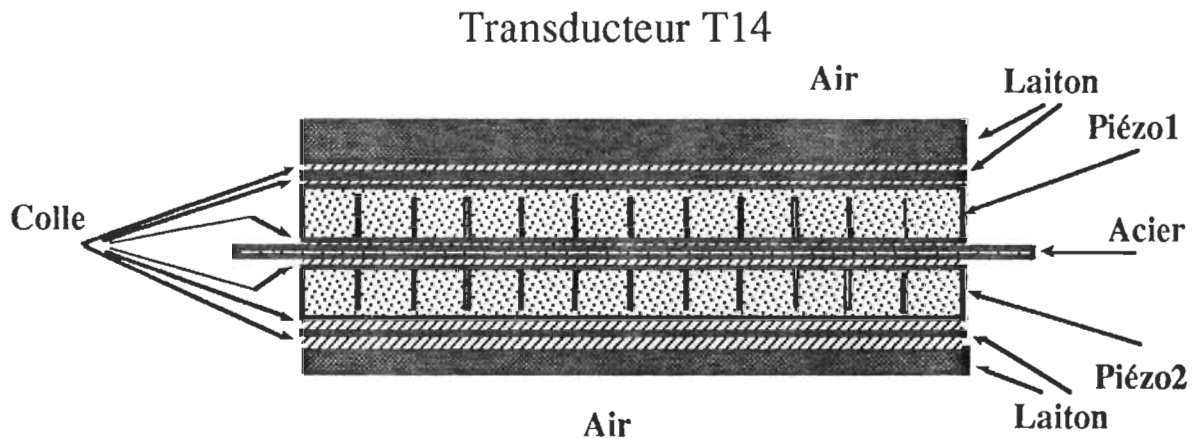


Figure 3.1 Transducteur T14. Système simulé avec RÉSON14E.m

TABLEAU 3.2a		
PARAMÈTRES DES ÉLÉMENTS NON-PIÉZOÉLECTRIQUES DE T14		
Milieu	5 (Air à gauche)	19 (Air à droite)
Impédance acoustique	ZA1 = 400 R	Z2 = 400 R

TABLEAU 3.2b				
PARAMÈTRES DES ÉLÉMENTS NON-PIÉZOÉLECTRIQUES DE T14				
Milieu	6 [Laiton (4)]	7 [Colle (3)]	8 [Laiton (2)]	9 [Colle (1)]
Imp.acoust. Zo	$3,184 \cdot 10^7$ R	$3 \cdot 10^6$ R	$3,184 \cdot 10^7$ R	$3 \cdot 10^6$ R
Épaisseur: aa	$3,175 \cdot 10^{-3}$ m	$12 \cdot 10^{-6}$ m	$75 \cdot 10^{-6}$ m	$12 \cdot 10^{-6}$ m
Vitesse: va	3480 m/s	2500 m/s	3480 m/s	2500 m/s
Attén.: Kra	2 Np/m	20 Np/m	2 Np/m	20 Np/m
Exposant: Nap	1,5	1,5	1,5	1,5
Milieu	11 [Colle (1)]	12 [Acier (2)]	13 [Colle (3)]	
Impédance acoust.: Zo	$3 \cdot 10^6$ R	$4,203 \cdot 10^7$ R	$3 \cdot 10^6$ R	
Épaisseur: a	$12 \cdot 10^{-6}$ m	$1,3 \cdot 10^{-3}$ m	$12 \cdot 10^{-6}$ m	
Vitesse: v	2500 m/s	5000 m/s	2500 m/s	
Atténuation: Kr	20 Np/m	1 Np/m	20 Np/m	
Exposant: Np	1,5	1,5	1,5	
Milieu	15 [Colle (1)]	16 [Laiton (2)]	17 [Colle (3)]	18 [Laiton (4)]
Imp.acoust.Zo2	$3 \cdot 10^6$ R	$3,184 \cdot 10^7$ R	$3 \cdot 10^6$ R	$3,184 \cdot 10^7$ R
Épaisseur aa2	$12 \cdot 10^{-6}$ m	$75 \cdot 10^{-6}$ m	$12 \cdot 10^{-6}$ m	$3,175 \cdot 10^{-3}$ m
Vitesse vv2	2500 m/s	3480 m/s	2500 m/s	3480 m/s
Atténuation KKr2	20 Np/m	2 Np/m	20 Np/m	2 Np/m
Exposant Nd	1,5	1,5	1,5	1,5

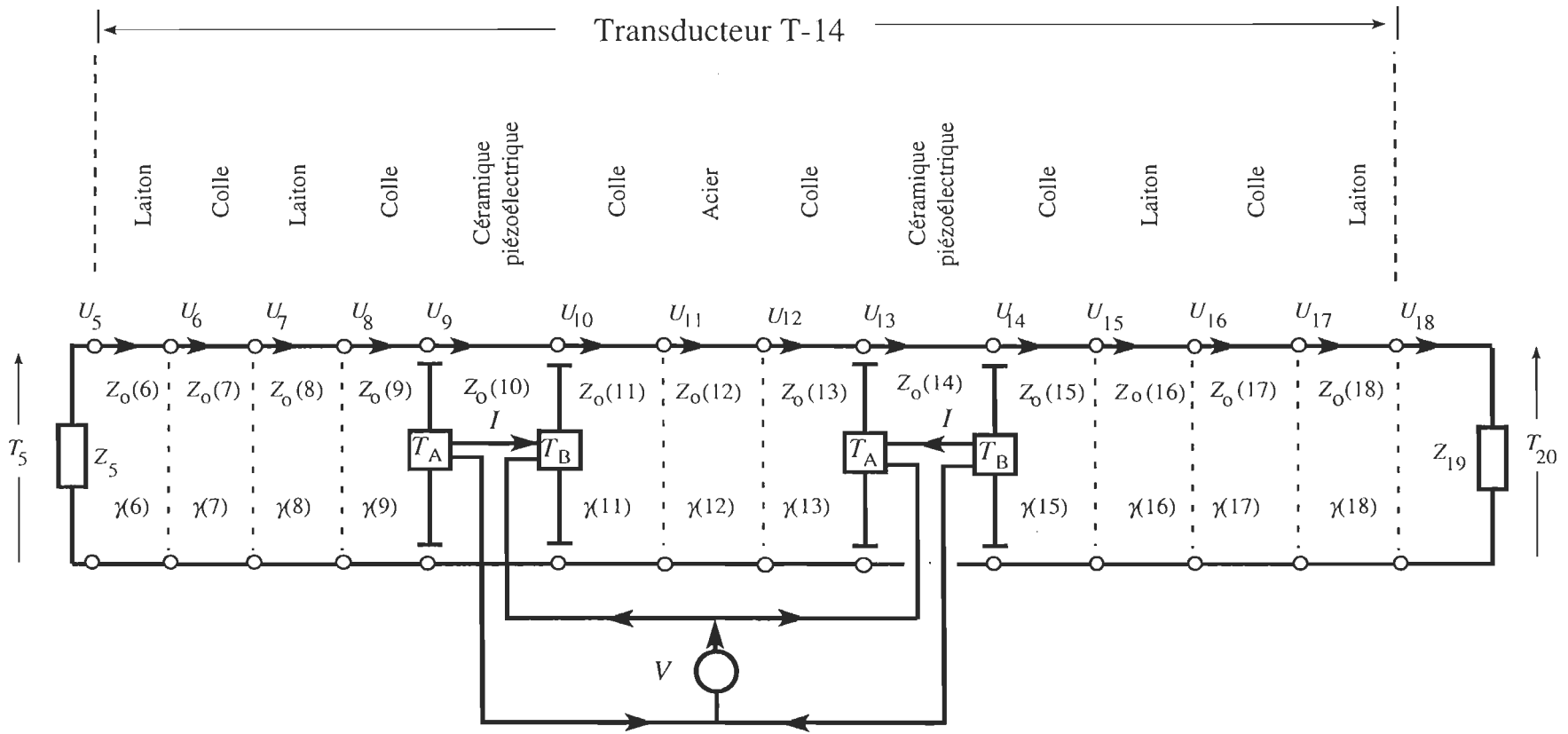


Figure 3.2 Modèle en forme de ligne du transducteur T-14 (RESON14E.m)
 Les éléments piézoélectriques portent les numéros 10 et 14.

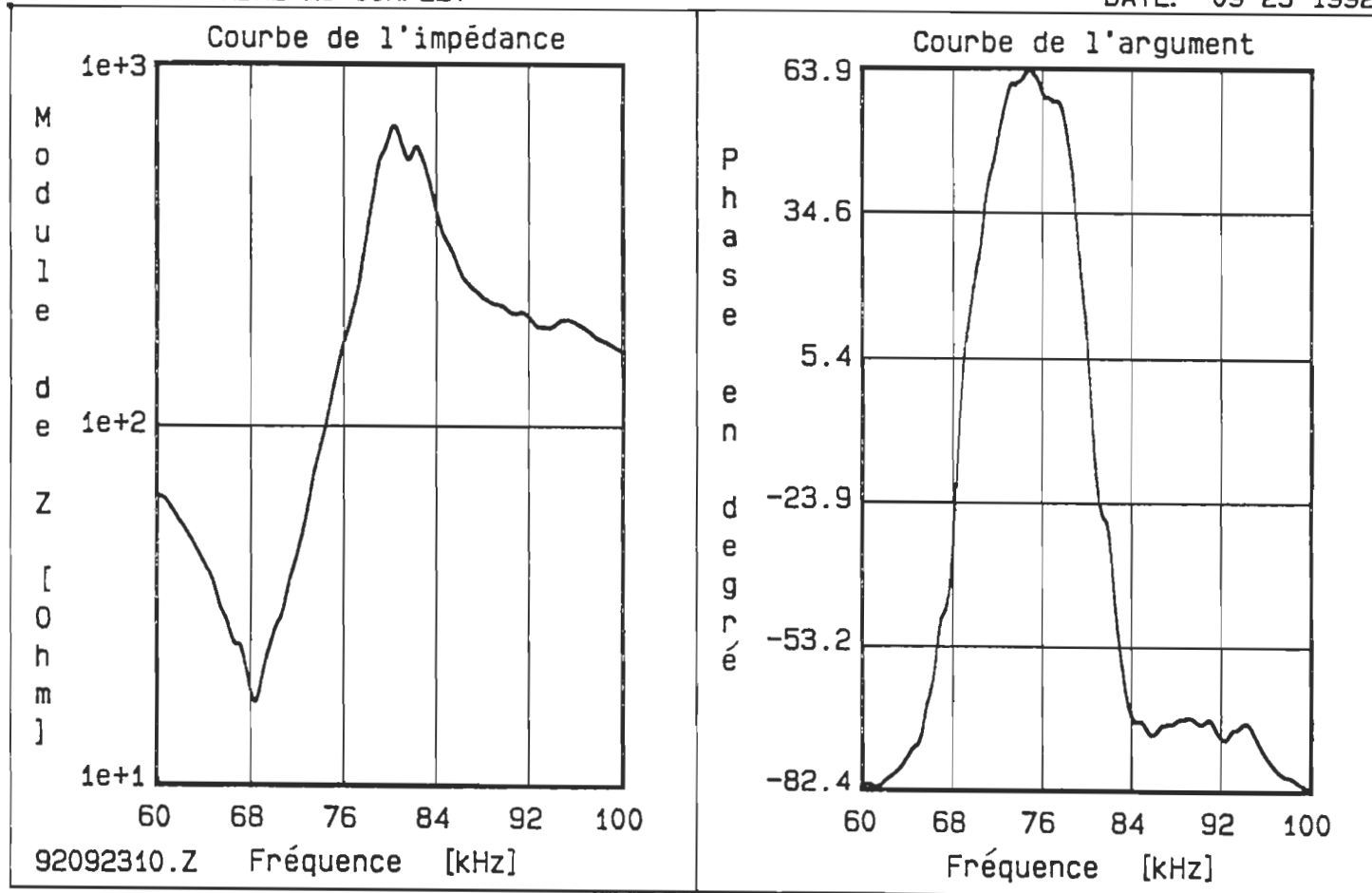


Figure 3.3 Mesure du transducteur T14 (Deux éléments piézoélectriques)

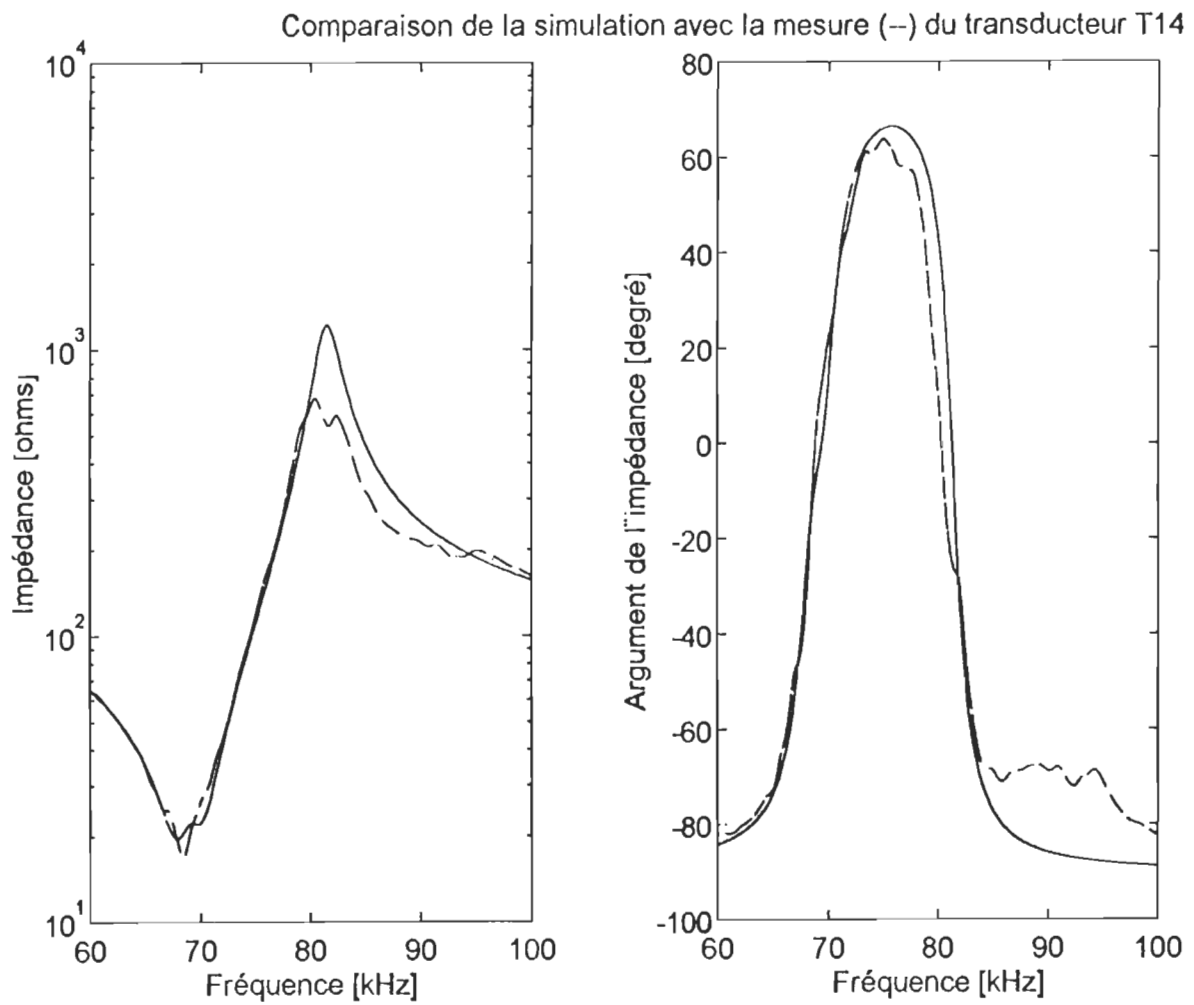


Figure 3.4 Comparaison entre la mesure et la simulation

3.2 NOUVEAUX TRANSDUCTEURS: (T16,T17)

Comme les transducteurs existants étaient endommagés à cause de l'infiltration d'eau, on a décidé de réaliser de nouveaux transducteurs. Au début, on a essayé diverses structures avec différentes épaisseurs de la couche de laiton. Mais, en considérant qu'on devait adapter la structure du transducteur aux dimensions de la cellule G-3, il y avait diverses possibilités. Toutes n'étaient pas physiquement possibles toutefois. Finalement, la solution applicable est une structure avec seulement une céramique piézoélectrique avec une couche de laiton de 6,35 mm et une autre de 3,175 mm. Aussi, pour obtenir un meilleur fonctionnement du transducteur, on a décidé de scier des céramiques à 100 % (36 carreaux indépendants) et la couche de laiton vers l'eau (1/4") a été sciée à 85% (figure 3.5).

3.2.1 Schéma de la couche de laiton vers l'eau.

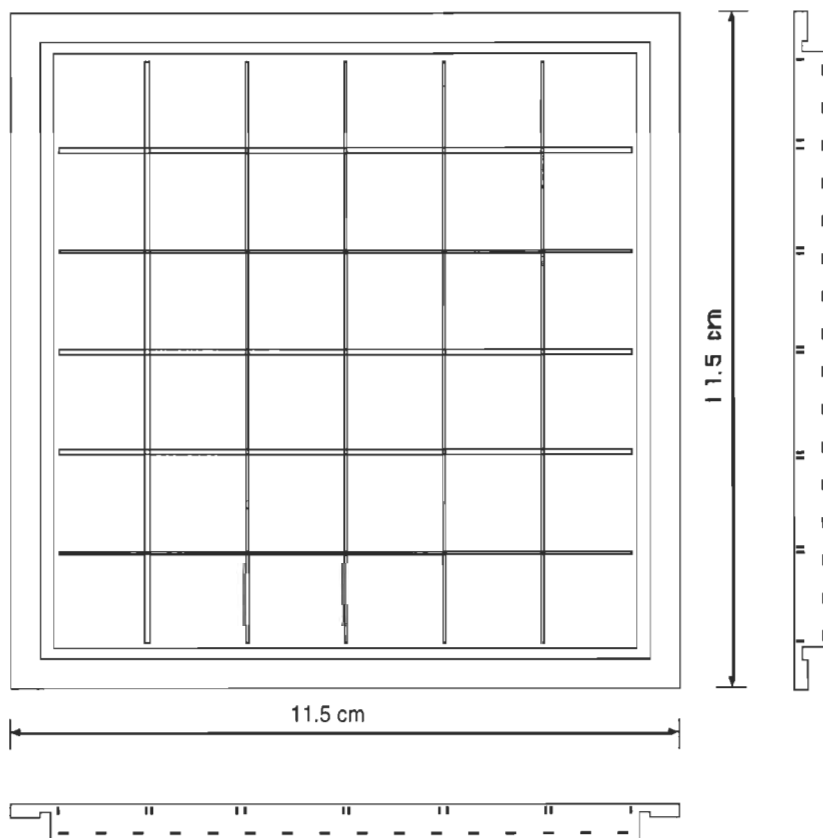


Figure 3.5 Schéma de la couche de laiton pour la construction des nouveaux transducteurs.

3.2.2 Structure du nouveau transducteur.

La figure 3.6 montre comment sont formés les nouveaux transducteurs, et permet de voir facilement la différence entre cette structure et l'ancienne, telle que T14.

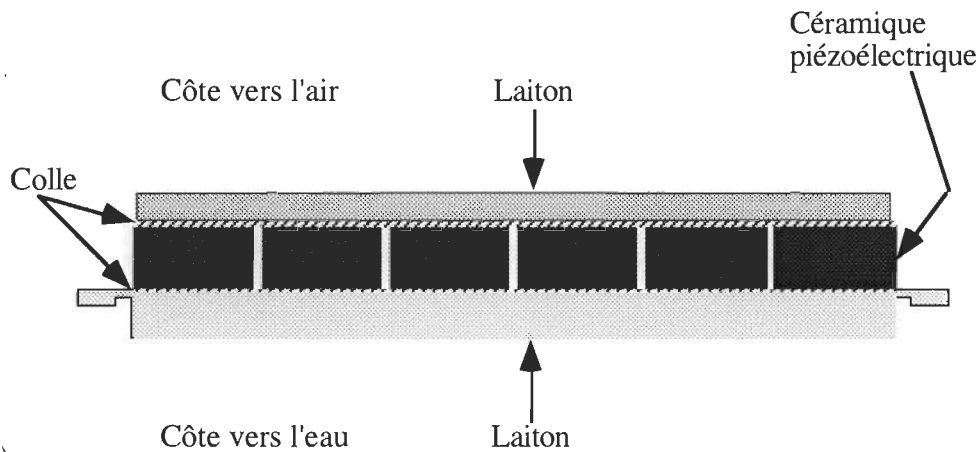


Figure 3.6 Transducteur nouveau au complet: deux couches de laiton, deux couches de colle et un piézo.

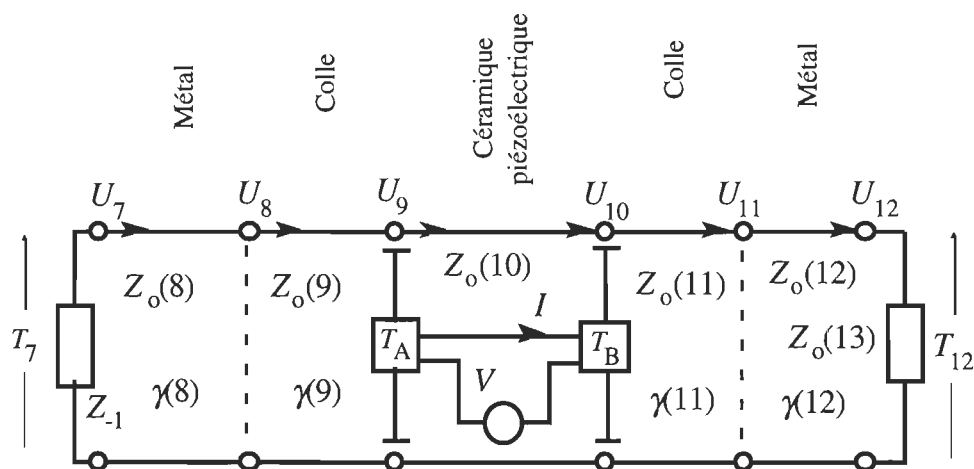


Figure 3.7 Système en forme de ligne pour la simulation des nouveaux transducteurs

La figure 3.7 est le modèle en forme de ligne électrique d'un transducteur piézoélectrique. La variable U représente les vitesses aux diverses interfaces, la variable Z_o est l'impédance acoustique de chaque milieu, la variable T est la contrainte (force par unité de surface), γ est la fonction de propagation complexe.

Parmi les nouveaux transducteurs figurent T16 et T17 dont on présente les données en forme de tableaux, on peut voir que les nouveaux transducteurs sont formés de sept milieux: deux couches extrêmes (air), dont on ne présente que l'impédance acoustique; deux couches de laiton; deux couches de colle et une de céramique piézoélectrique.

Les deux fichiers OCTRA16.m et NOVTRA17.m font appel au programme PROJET.m [14], qui permet la simulation de systèmes ultrasonores multicouches avec un seul piézo. Parmi les variables à modifier figurent les fréquences initiale et finale et le nombre d'intervalles à simuler, donc on ne présente pas ces données.

3.2.3 Transducteur T16: données, simulation et mesure

Les données pour simuler le transducteur T16 (OCTRA16.m) sont présentées dans le tableau 3.3 pour les éléments piézoélectriques et dans le tableau 3.4 les données des éléments non-piézoélectriques

TABLEAU 3.3	
DONNÉES POUR LA SIMULATION DU TRANSDUCTEUR T16	
Milieu (Élément piézoélectrique)	10 Céramique: Channel 5400 (C7)
Impédance acoustique	$Z_{10} = 2,65 \cdot 10^7$ rayls (R)
Épaisseur	$a_p = 8,12 \cdot 10^{-3}$ m
Constante piézoélectrique	$h = 2,3 \cdot 10^9$ newtons/coulomb (N/C)
Surface	$A = 9,216 \cdot 10^{-3}$ m ²
Capacité électrique C_0	$C_0 = 7,4 \cdot 10^{-9}$ F
Vitesse V^D	$v_v = 3462$ m/s
Atténuation	$K_{rr} = 3,2$ népers/m (Np/m)
Exposant	$N_n = 1,5$

TABLEAU 3.4				
PARAMÈTRES DES ÉLÉMENTS NON-PIÉZOÉLECTRIQUES DE T16				
Milieu	7 (Air à gauche)		13 (Air à droite)	
Impédance	ZA1 = 400 R		Z1 = 400 R	
Milieu	8 [Laiton (2)]	9 [Colle (1)]	11 [Colle (1)]	12 [Laiton (3)]
Impéd. Zao	$3,184 \cdot 10^7$ R	$3 \cdot 10^6$ R	$3 \cdot 10^6$ R	$3 \cdot 10^7$ R
Épaisseur aa	$3,15 \cdot 10^{-3}$ m	$45 \cdot 10^{-6}$ m	$12 \cdot 10^{-6}$ m	$6,02 \cdot 10^{-3}$ m
Vitesse va	3480 m/s	2500 m/s	2500 m/s	3480 m/s
Attén. Kra	2,5 Np/m	20 Np/m	20 Np/m	2,5 Np/m
Exposant Nap	1,5	1,5	1,5	1,5

On va présenter à la suite, les graphiques correspondants aux mesures du transducteur T16 avec l'impédancemètre vectoriel HP-4192A (figure 3.8), à travers le logiciel MESLAB. La comparaison entre la simulation et la mesure sera soulignée (figure 3.9).

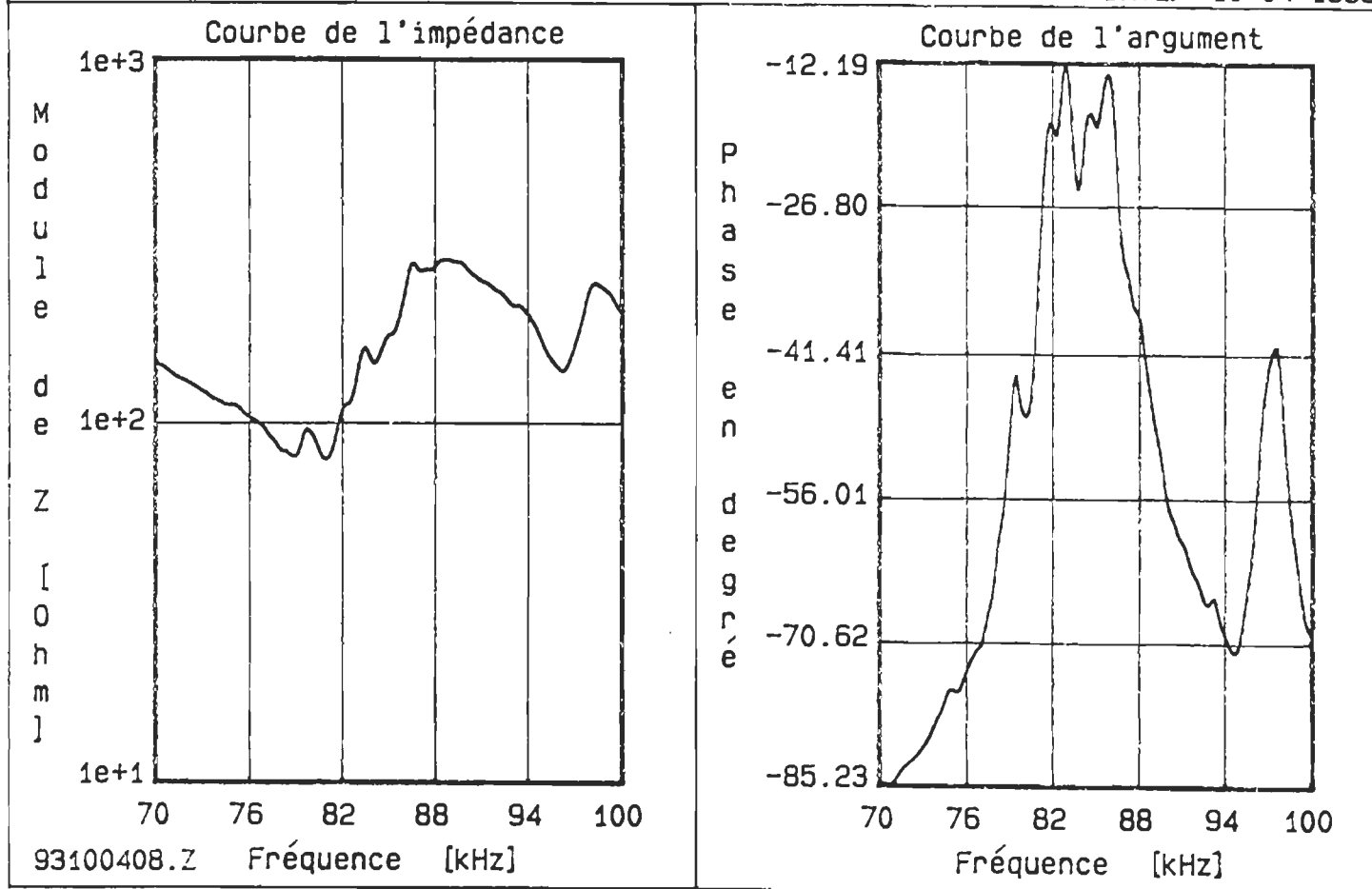


Figure 3.8 Mesure du transducteur T16

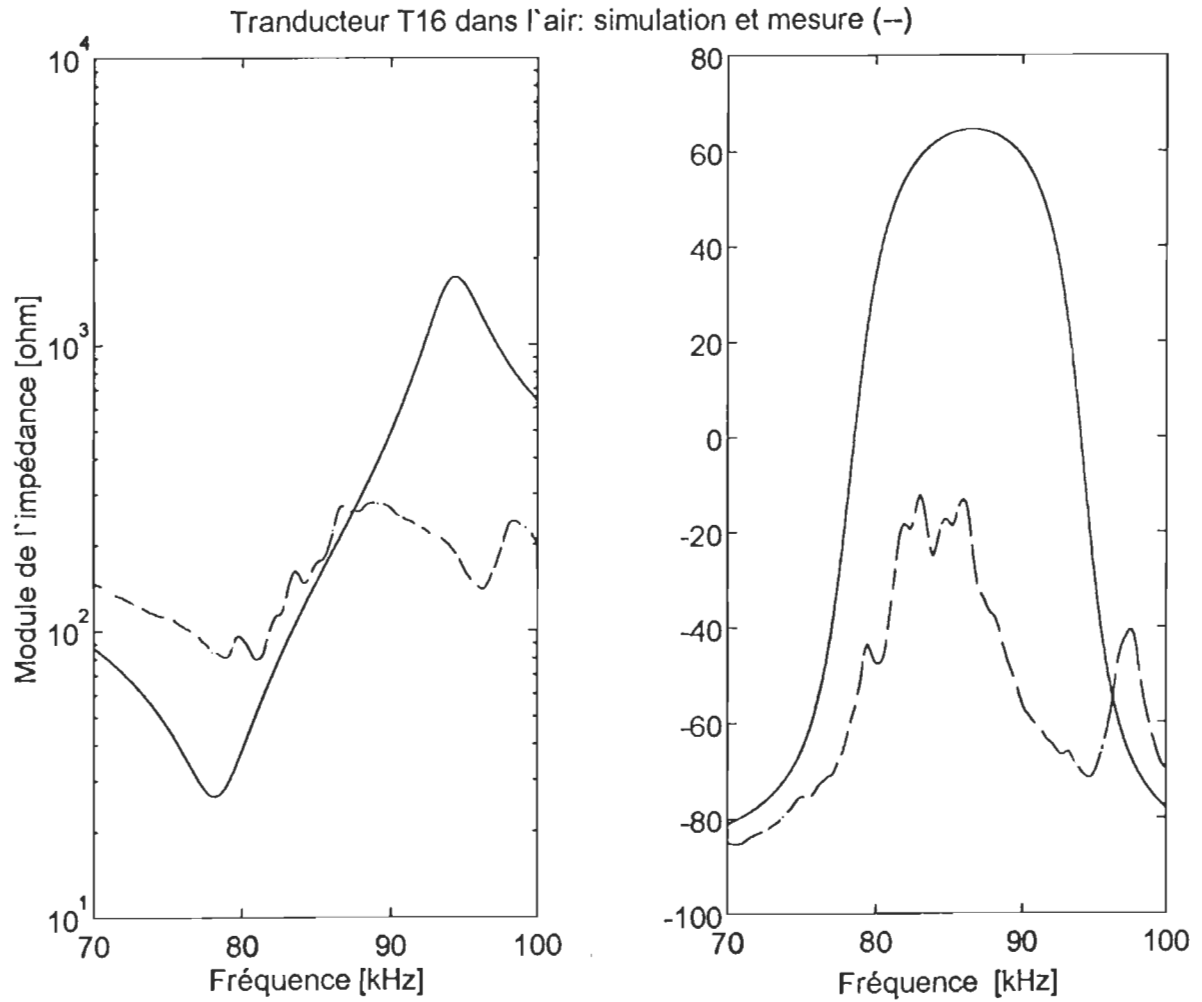


Figure 3.9 Comparaison de la simulation avec la mesure du transducteur T16

3.2.4 Transducteur T17: données, simulation et mesure

Pour la simulation du transducteur T17 (NOVTRA17.m) on présente ses paramètres dans le tableau 3.5 pour les éléments piézoélectriques et dans le tableau 3.6 pour les éléments non-piézoélectriques.

Le milieu 9 est forme par un mélange de colle *Super Bonder 324* avec de la poudre de cuivre. Le milieu 11 par contre est plus mince étant donné qu'il est formé d'un mélange de la même colle avec de la poudre de tungstène.

TABLEAU 3.5	
DONNÉES POUR LA SIMULATION DU TRANSDUCTEUR T17	
Milieu	10 Céramique: Channel 5400 (C19)
Impédance acoustique	$Z_{10} = 2,684 \cdot 10^7 \text{ R}$
Épaisseur	$a_p = 8,12 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
Constante piézoélectrique	$h = 2,22 \cdot 10^9 \text{ N/C}$
Surface	$A = 9,216 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$
Capacité électrique C_0	$C_0 = 7,23 \cdot 10^{-9} \text{ F}$
Vitesse V^D	$v_v = 3520 \text{ m/s}$
Atténuation	$K_{rr} = 3,2 \text{ Np/m}$
Exposant	$N_n = 1,5$

TABLEAU 3.6				
PARAMÈTRES DES ÉLÉMENTS NON-PIÉZOÉLECTRIQUES DE T17				
Milieu	7 (Air à gauche)		13 (Air à droite)	
Impédance	ZAI = 400 R		ZI = 400 R	
Milieu	8 [Laiton (2)]	9 [Colle (1)]	11 [Colle (1)]	12 [Laiton (2)]
Impéd. acoust.	$3,183 \cdot 10^7$ R	$3 \cdot 10^6$ R	$3 \cdot 10^6$ R	$3 \cdot 10^7$ R
Épaisseur	$3,12 \cdot 10^{-3}$ m	$45 \cdot 10^{-6}$ m	$12 \cdot 10^{-6}$ m	$5,99 \cdot 10^{-3}$ m
Vitesse	3480 m/s	2500 m/s	2500 m/s	3480 m/s
Atténuation	1,85 Np/m	20 Np/m	20 Np/m	1.85 Np/m
Exposant	1,5	1,5	1,5	1,5

Les graphiques de mesure (figure 3.10) du transducteur T17 sont présentés à la suite. On peut voir aussi la comparaison des deux graphiques (figure 3.11).

T17 DANS L'AIR

DATE: 11-03-1993

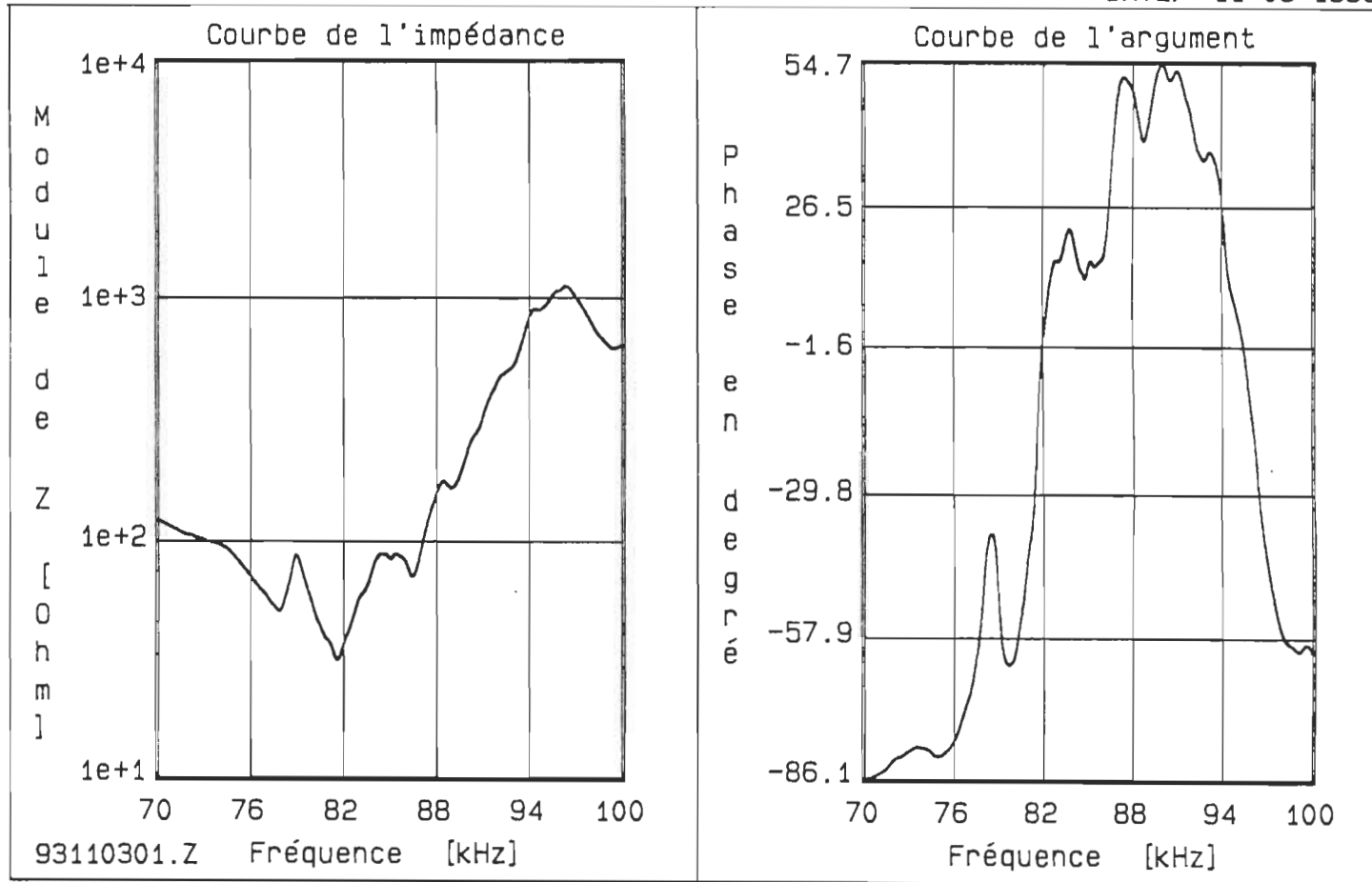


Figure3.10 Mesure du transducteur T17

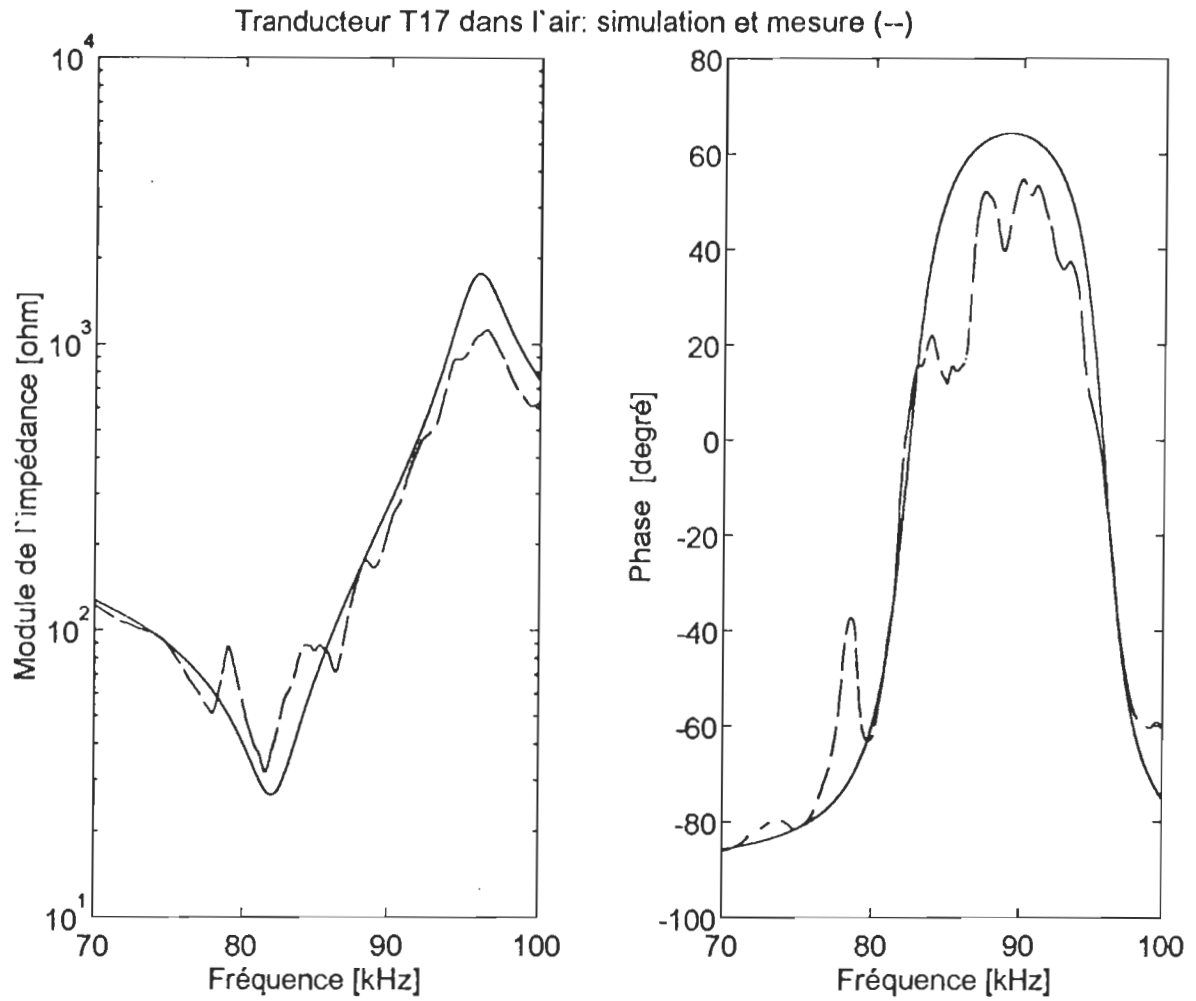


Figure 3.11 Comparaison de la simulation avec la mesure du transducteur T17

3.3 TRANSDUCTEUR AMÉLIORÉ: T18.

Les mesures faites sur T16 et T17 nous ont permis de vérifier que le transducteur T16 ne fonctionnait pas bien. Il fut décidé de le démonter pour en construire un nouveau: T18. On a utilisé la céramique C21, mais avant de la coller, on a mesuré l'impédance de chaque carreau pour déterminer les améliorations possibles de T18 par rapport à T16 et T17. Parmi les caractéristiques, la plus utile a été la fréquence d'antirésonance. Pour avoir une fréquence de vibration la plus uniforme possible sur toute la surface, on a réarrangé les 36 carreaux afin d'obtenir une moyenne similaire dans toutes les rangées et colonnes.

3.3.1 Réarrangement des carreaux.

Le tableau 3.7 montre la distribution initiale des carreaux dans la céramique C21. La variable mesurée est la fréquence d'antirésonance (f_a).

TABLEAU 3.7							
FRÉQUENCE D'ANTIRÉSONANCE f_a (kHz) POUR LES							
DIFFÉRENTS CARREAUX DE LA CÉRAMIQUE C21							
Rangée.. Colonne	1	2	3	4	5	6	Moy.
1	106,66	107,09	107,12	107,17	107,37	107,60	107,16
2	105,91	106,48	106,27	106,52	105,51	106,91	106,26
3	105,50	106,46	105,94	106,23	106,29	106,62	106,17
4	105,53	106,89	106,25	106,77	106,55	107,27	106,54
5	105,42	107,18	106,43	106,82	106,53	107,24	106,60
6	104,25	106,36	105,43	105,94	105,68	106,36	106,67
Moy.	105,54	106,74	106,24	106,57	106,32	107,00	106,40

Le tableau 3.8 montre la disposition finale des carreaux pour la construction de T18 considérant la fréquence d'antirésonance de chaque carreau.

TABLEAU 3.8							
RÉARRANGEMENT DES CARREAUX DE LA CÉRAMIQUE C21							
D'APRÈS SA FRÉQUENCE DE ANTIRÉSOSONANCE (kHz)							
Rangée.. Colonne	1	2	3	4	5	6	Moy.
1	106,91	105,68	107,17	105,94	107,18	105,43	106,39
2	106,23	106,55	105,50	106,89	106,27	107,37	106,47
3	107,12	106,48	106,52	106,36	106,62	105,42	106,42
4	106,46	106,77	106,36	106,53	106,43	105,94	106,42
5	107,24	106,25	106,66	106,29	106,82	105,51	106,46
6	104,25	107,27	105,91	107,09	105,53	107,60	106,28
Moy.	106,37	106,50	106,35	106,52	106,48	106,21	106,40

Pour mettre en évidence la différence entre les deux dispositions, la figure 3.12 montre les différents carreaux originellement numérotés selon la colonne et la rangé où chaque carreau se trouvait, par exemple 11 est le carreau de la colonne 1 et de la rangé 1 de la céramique C19, et le carreau 53 indique qu'il se trouvait dans la colonne 5 et la rangé 3.

	1	2	3	4	5	6
1	26	65	14	64	52	63
2	34	45	31	42	23	15
3	13	22	24	62	36	51
4	32	44	66	55	53	33
5	56	43	11	35	54	25
6	61	46	21	12	41	16

Figure 3.12 Disposition finale des carreaux de la céramique C19 pour la construction de T18

Après avoir réarrangé les carreaux de la céramique C19, on a construit le transducteur T18, dont les données utilisées pour la simulation sont présentées dans le tableau 3.9, et comme on a fait auparavant on présente aussi la mesure (figure 3.13), et après les résultats de la simulation avec la mesure pour souligner l'accord entre les deux (figure 3.14).

TABLEAU 3.9				
DONNÉES POUR LA SIMULATION DU TRANSDUCTEUR T18				
Milieu	10 Céramique: Channel 5400 (C21)			
Impédance acoustique	$Z_{10} = 2,70925 \cdot 10^7 \text{ R}$			
Épaisseur	$a_p = 8,1244 \cdot 10^{-3} \text{ m}$			
Constante piézoélectrique	$h = 2,325 \cdot 10^9 \text{ N/C}$			
Surface	$A = 9,216 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$			
Capacité électrique	$C_0 = 7,49 \cdot 10^{-9} \text{ F}$			
Vitesse V^D	$v_v = 3535 \text{ m/s}$			
Atténuation	$K_{rr} = 1,8 \text{ Np/m}$			
Exposant	$N_n = 1,5$			
Milieu	7 (Air à gauche)		13 (Air à droite)	
Impédance	$Z_{A1} = 400 \text{ R}$		$Z_1 = 400 \text{ R}$	
Milieu	8 [Laiton (2)]	9 [Colle (1)]	11 [Colle (1)]	12 [Laiton (3)]
Impédance	$3,184 \cdot 10^7 \text{ R}$	$3 \cdot 10^6 \text{ R}$	$3 \cdot 10^6 \text{ R}$	$3 \cdot 10^7 \text{ R}$
Épaisseur	$3,15 \cdot 10^{-3} \text{ m}$	$45 \cdot 10^{-6} \text{ m}$	$12 \cdot 10^{-6} \text{ m}$	$6,02 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
Vitesse	3480 m/s	2500 m/s	2500 m/s	3480 m/s
Atténuation	2,5 Np/m	20 Np/m	20 Np/m	2 Np/m
Exposant	1,5	1,5	1,5	1,5

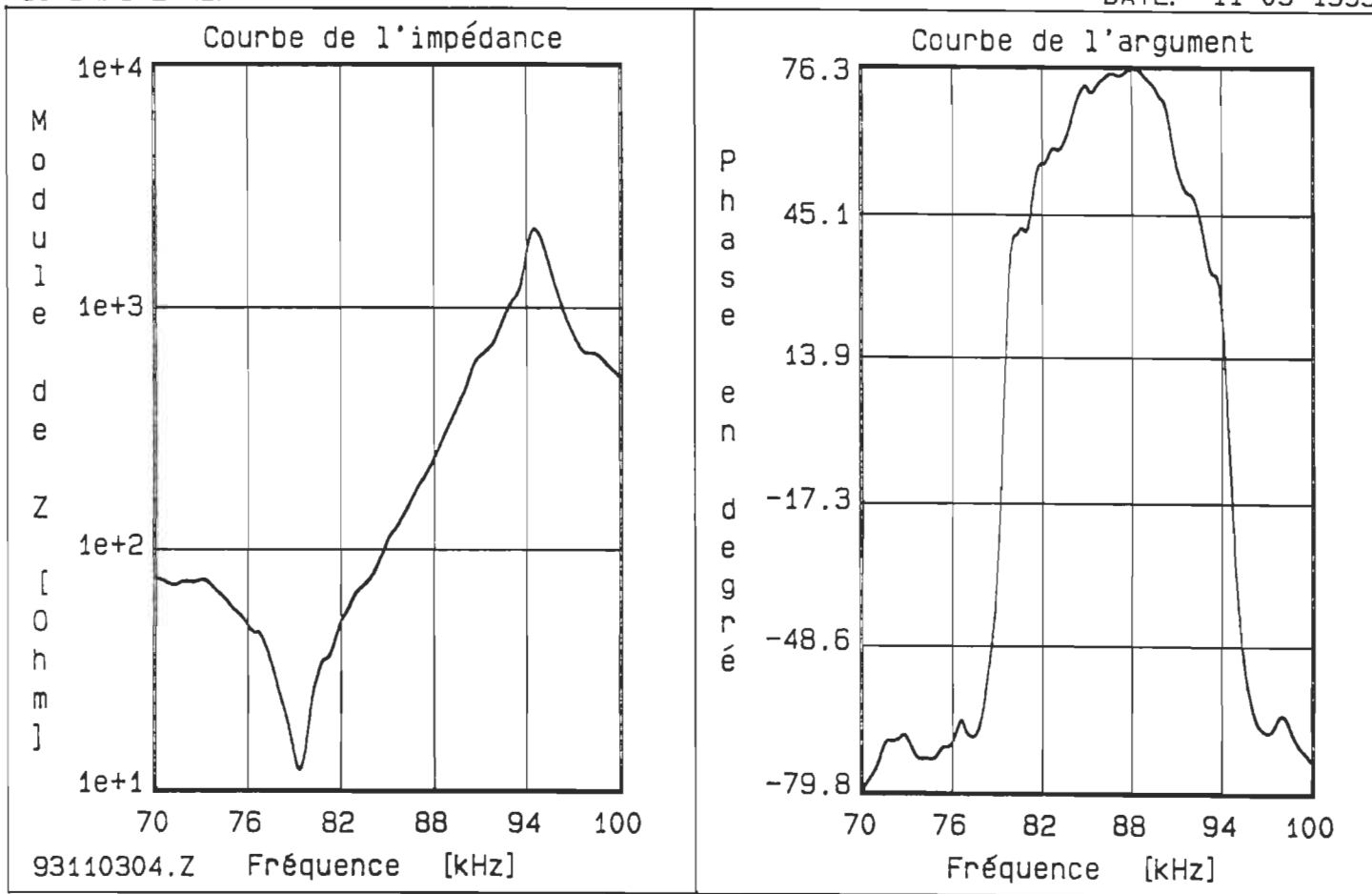


Figure 3.13 Mesure du transducteur T18

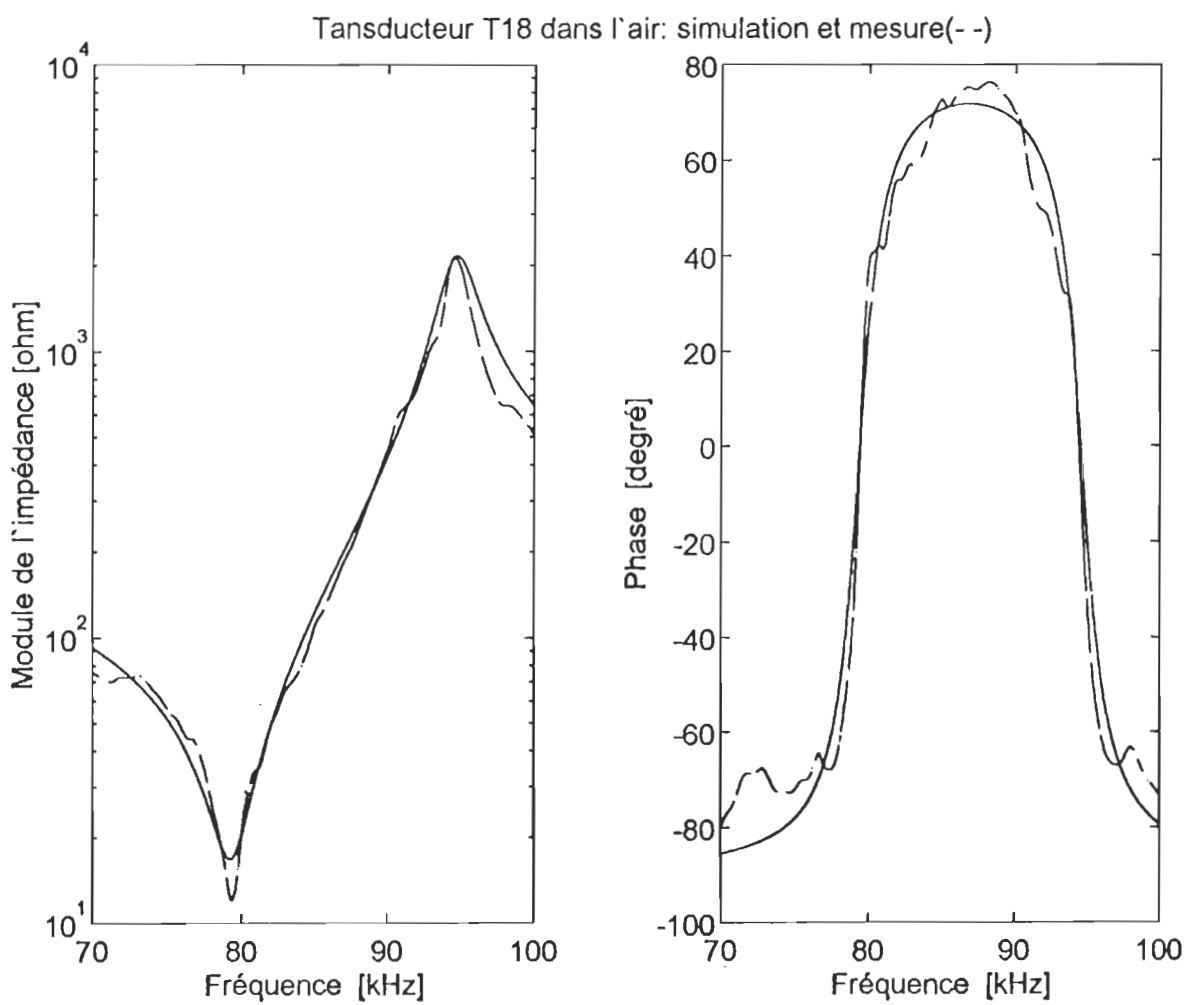


Figure 3.14 Comparaison de la simulation avec la mesure du transducteur T18

CHAPITRE 4

RÉSONATEUR ULTRASONORE

Le cœur du système de caractérisation des pâtes est le résonateur. Pour former un résonateur, on pose une paire de transducteurs ultrasonores face-à-face sur la cellule G-3 et après on emplit la cavité de la cellule avec les fibres de cellulose en suspension aqueuse très diluée (environ 0,003% en poids), on va considérer ici des transducteurs constitués d'une seule céramique piézoélectrique. Les céramiques sont électriquement en parallèle et mécaniquement en série. Si l'on tient compte des couches de colle et des milieux extrêmes (air), on a alors un total de 13 milieux pour modéliser le résonateur.

4.1 MODÈLE DU RÉSONATEUR

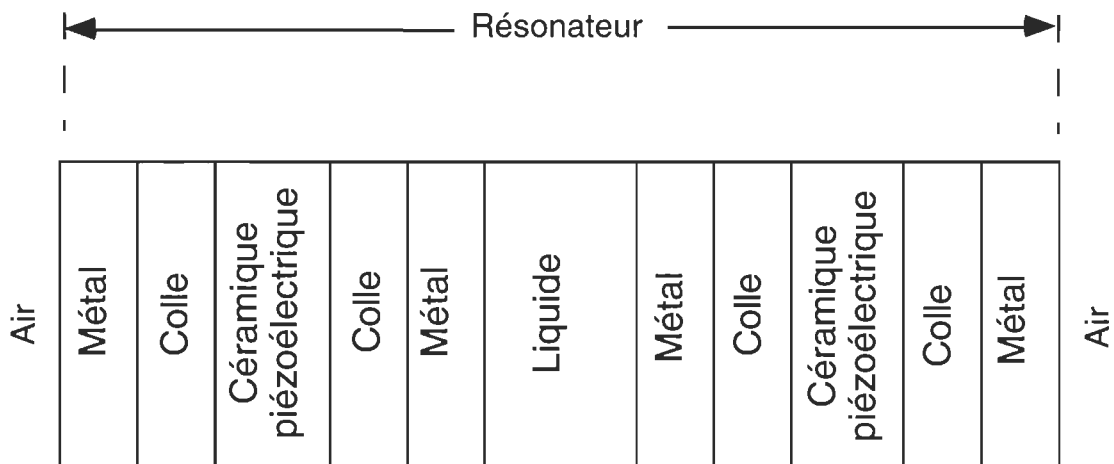


Figure 4.1 Modèle du résonateur ultrasonore

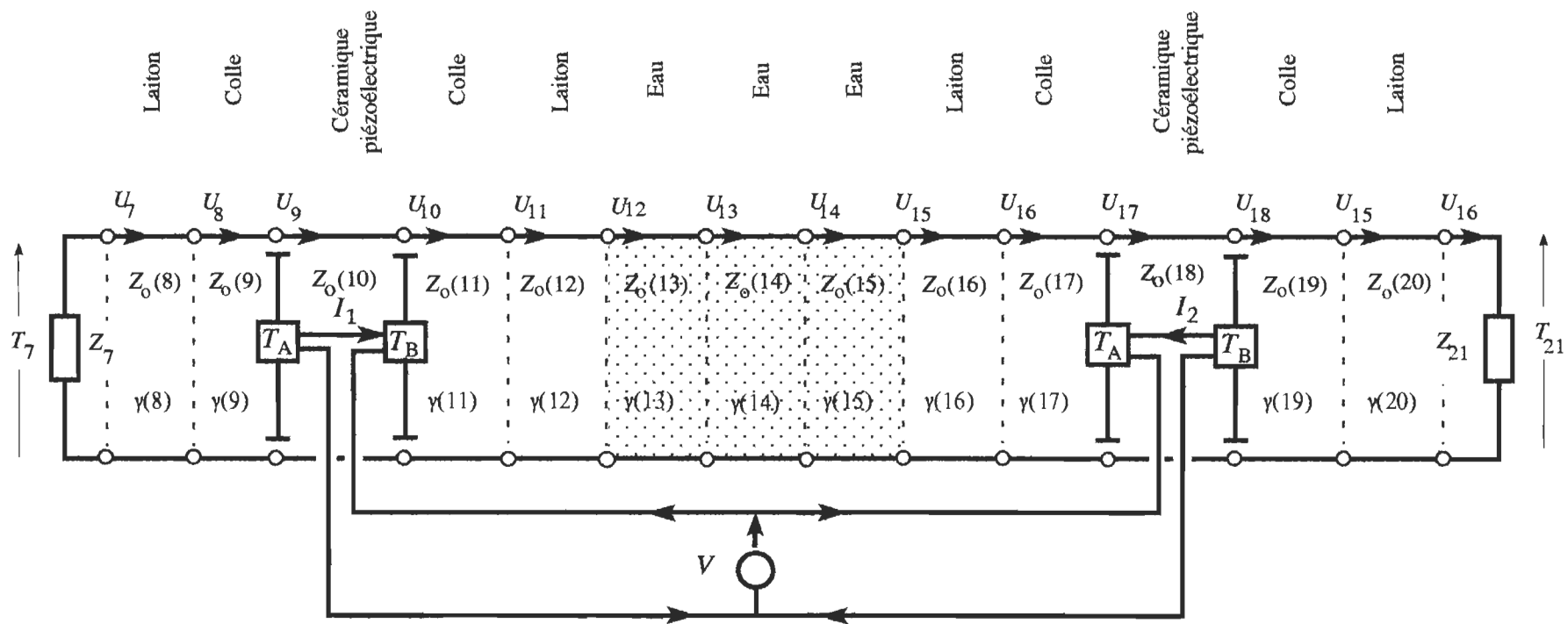


Figure 4.2 Modèle en forme de ligne du résonateur acoustique.

4.2 RÉSONATEUR T16 //T17

Le résonateur formé par les transducteurs T16 et T17 est simulé par le programme OCTRES.m (Annexe) qui fait appel au programme JUINMEM.m qui est une modification, permettant de calculer un résonateur asymétrique, que nous avons faites du programme MÉMOIRE.m élaboré par Cornieles [14].

4.2.1 Données pour la simulation du résonateur formé par les transducteurs T16 et T17

Les tableaux 4.1 et 4.2 contiennent les paramètres des éléments piézoélectriques et autres milieux utilisées pour calculer les caractéristiques du résonateur.

TABLEAU 4.1		
PARAMÈTRES DES ÉLÉMENTS PIÉZOÉLECTRIQUES DU RÉSONATEUR T16//T17		
Milieu	10 Céramique 1 (C7)	11 Céramique 2 (C19)
Impédance acoustique	$Z_{10} = 2,65 \cdot 10^7 \text{ R}$	$Z_{P2} = 2,684 \cdot 10^7 \text{ R}$
Épaisseur	$a_p = 8,12 \cdot 10^{-3} \text{ m}$	$a_{p2} = 8,12 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
Constante piézoélectrique	$h = 2,3 \cdot 10^9 \text{ N/C}$	$h = 2,22 \cdot 10^9 \text{ N/C}$
Surface	$A = 9,216 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$	$A_2 = 9,216 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$
Capacité électrique C_0	$C_0 = 7,4 \cdot 10^{-9} \text{ F}$	$C_{02} = 7,23 \cdot 10^{-9} \text{ F}$
Vitesse V^D	$v_v = 3462 \text{ m/s}$	$v_2 = 3520 \text{ m/s}$
Vitesse V^E	$v_e = 3005 \text{ m/s}$	$v_e = 3005 \text{ m/s}$
Atténuation	$K_{rr} = 3,2 \text{ Np/m}$	$K_{r2} = 3,2 \text{ Np/m}$
Exposant	$N_n = 1,5$	$N_2 = 1,5$
Impédance de court-circuit	$Z_{F1} = 2,2882 \cdot 10^7 \text{ R}$	$Z_{F2} = 2,2882 \cdot 10^7 \text{ R}$

TABLEAU 4.2a				
PARAMÈTRES DES ÉLÉMENTS NON-PIÉZOÉLECTRIQUES DE T16//T17				
Milieu	7 (Air à gauche)		21 (Air à droite)	
Impédance acoustique	ZA1 = 400 R		Z2 = 400 R	
Milieu	8 [Laiton (2)]	9 [Colle (1)]	11 [Colle (1)]	12 [Laiton (2)]
Impéd. acoust.	$3,184 \cdot 10^7$ R	$3 \cdot 10^6$ R	$3 \cdot 10^6$ R	$3,184 \cdot 10^7$ R
Épaisseur	$75 \cdot 10^{-6}$ m	$12 \cdot 10^{-6}$ m	$12 \cdot 10^{-6}$ m	$75 \cdot 10^{-6}$ m
Vitesse	3480 m/s	2500 m/s	2500 m/s	3480 m/s
Atténuation	2 Np/m	20 Np/m	20 Np/m	2 Np/m
Exposant	1,5	1,5	1,5	1,5
Milieu	13 [Eau (3)]		14 [Eau (4)]	
Impédance acoustique	1495004 R		1495004 R	
Épaisseur	$12,8206 \cdot 10^{-3}$ m		$8,5472 \cdot 10^{-3}$ m	
Vitesse	1498 m/s		1498 m/s	
Atténuation	2,25 Np/m		2,25 Np/m	
Exposant	1,5		1,5	

TABLEAU 4.2b				
PARAMÈTRES DES ÉLÉMENTS NON-PIÉZOÉLECTRIQUES DE T16//T17				
Milieu	16 [Laiton (6)]	17 [Colle (7)]	19 [Colle (1)]	20 [Laiton (2)]
Impédance	$3,184 \cdot 10^7$ R	$3 \cdot 10^6$ R	$3 \cdot 10^6$ R	$3,184 \cdot 10^7$ R
Épaisseur	$75 \cdot 10^{-6}$ m	$12 \cdot 10^{-6}$ m	$12 \cdot 10^{-6}$ m	$75 \cdot 10^{-6}$ m
Vitesse	3480 m/s	2500 m/s	2500 m/s	3480 m/s
Atténuation	2 Np/m	20 Np/m	20 Np/m	2 Np/m
Exposant	1,5	1,5	1,5	1,5

La figure 4.3 montre le graphique obtenu avec MESLAB, de la mesure du résonateur formé par T16 et T17. La figure 4.4 montre le résultat de simulation du même résonateur avec ceux de la mesure.

4.3 RÉSONATEUR T17 // T18

Pour la simulation du résonateur antérieur nous avons utilisé la vitesse de propagation du son dans l'eau comme une valeur fixe, celle correspondante à un température de 25 °C (1498 m/s), mais pour la simulation du résonateur formé par T17 et T18 nous allons considérer la vitesse du son dans l'eau en fonction de la température pour assurer le bon fonctionnement des programmes et sa correspondance avec les mesures. Le programme NOVRES.m (Annexe D) permet de simuler un résonateur formé par deux piézoélectriques.

4.3.1 Détermination de la vitesse du son dans l'eau

Pour plus de précision, nous avons utilisé ici la vitesse du son dans l'eau distillée mesurée sur une plage de température de 0 à 100 °C [19]. Cette vitesse v_{se} , en m/s, est donnée en fonction de la température T en °C par le polynôme:

$$v_{se} = 1402,736 + 5,03358T - 0,0579506T^2 + 3,31636 \cdot 10^{-4}T^3 - 1,45262 \cdot 10^{-6}T^4 + 3,0449 \cdot 10^{-9}T^5 \quad (4.1)$$

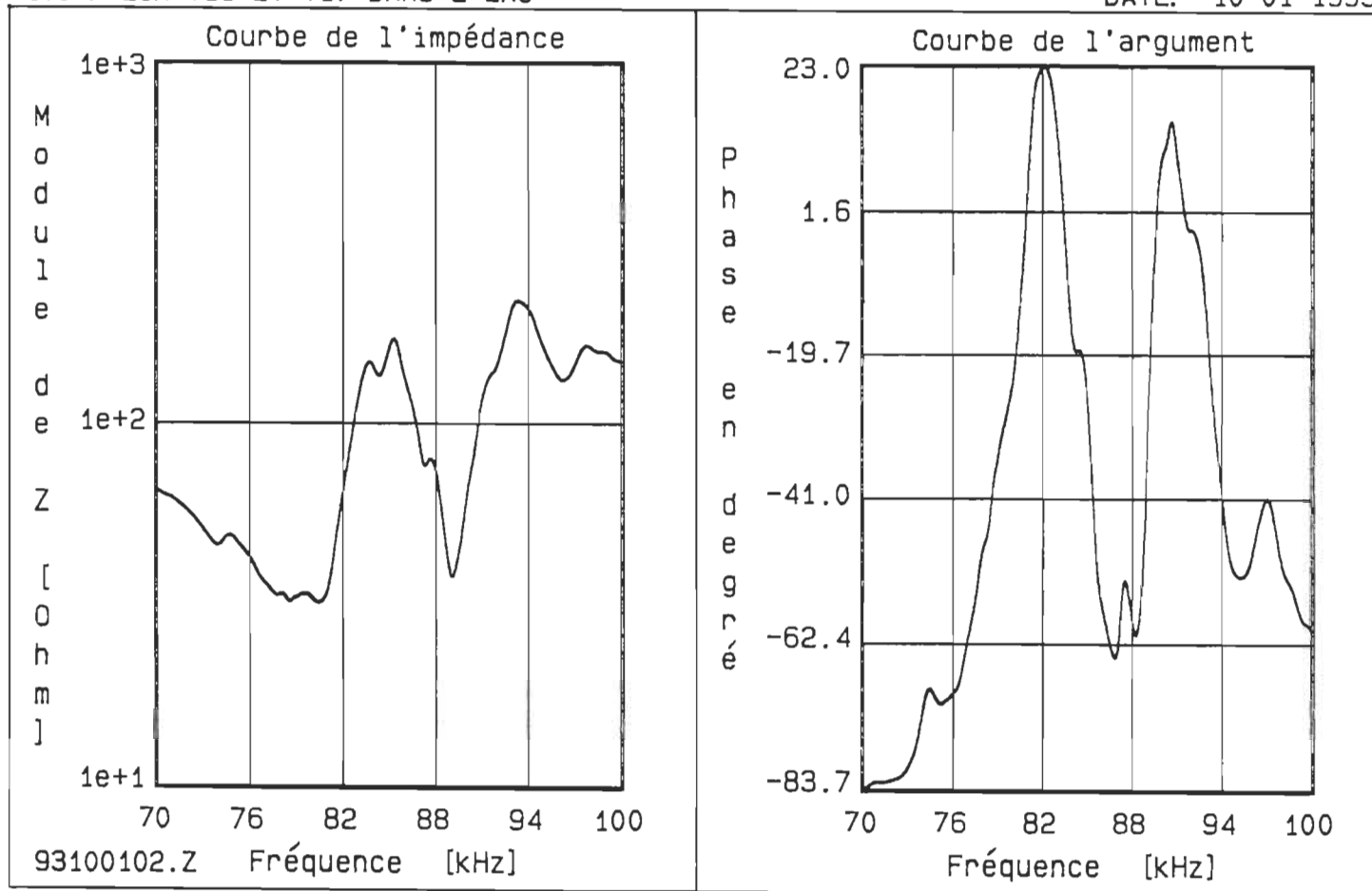


Figure 4. 3 Mesure du résonateur formé par les transducteurs T16 et T17.

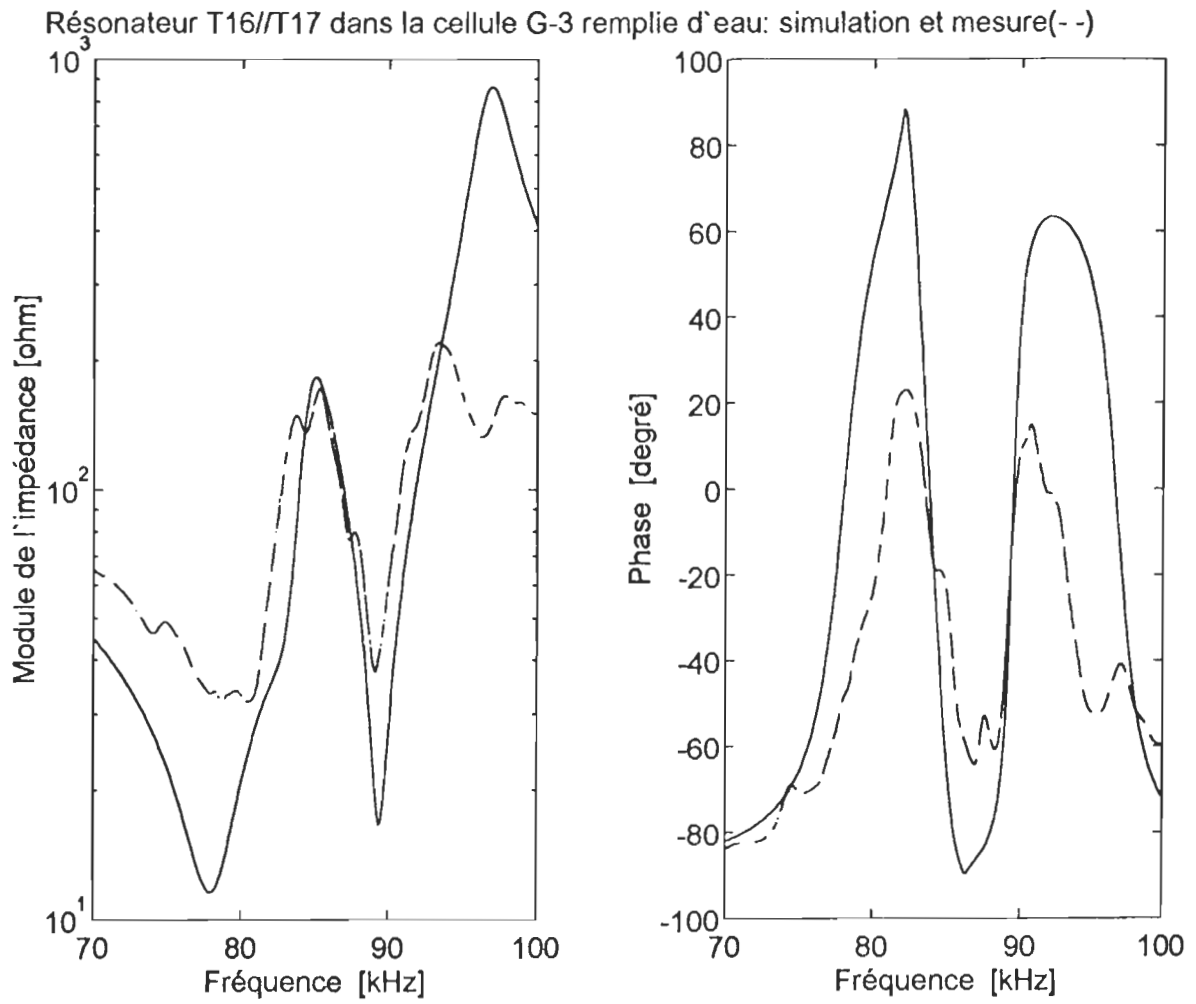


Figure 4.4 Comparation de la mesure de T16 // T17 avec sa simulation.

L'écart-type des 83 mesures à partir desquelles (4.1) a été obtenue est 0,0263 m/s, ou à peu près 17 ppm.[19]

4.3.2 Données, simulation et mesure.

Le tableau 4.3 présente les caractéristiques des éléments piezoélectriques et le tableau 4.4 contient celles des éléments non-piézoélectriques pour la simulation avec NOVRES.m (Annexe D) du résonateur formé par les transducteurs T17 et T18, qui permet de choisir la température de travail à laquelle on fera la simulation. Le programme qui permet de faire la simulation s'appelle JUINMEM.m (Annexe A).

TABLEAU 4.3		
PARAMÈTRES DES ÉLÉMENTS PIÉZOÉLECTRIQUES DU RÉSONATEUR T17//18		
Milieu	10 Céramique 1 (C19)	11 Céramique 2 (C21)
Impédance acoustique	$Z_{10} = 2,684 \cdot 10^7 \text{ R}$	$Z_{P2} = 2,709 \cdot 10^7 \text{ R}$
Épaisseur	$a_p = 8,12 \cdot 10^{-3} \text{ m}$	$a_{p2} = 8,1244 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
Constante piézoélectrique	$h = 2,22 \cdot 10^9 \text{ N/C}$	$h = 2,325 \cdot 10^9 \text{ N/C}$
Surface	$A = 9,216 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$	$A_2 = 9,216 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$
Capacité électrique C_o	$C_o = 7,23 \cdot 10^{-9} \text{ F}$	$C_{o2} = 7,49 \cdot 10^{-9} \text{ F}$
Vitesse V^D	$v_v = 3520 \text{ m/s}$	$v_2 = 3535 \text{ m/s}$
Vitesse V^E	$v_e = 2800 \text{ m/s}$	$v_e = 2800 \text{ m/s}$
Atténuation	$K_{rr} = 2,6 \text{ Np/m}$	$K_{r2} = 1,8 \text{ Np/m}$
Exposant	$N_n = 1,5$	$N_2 = 1,5$
Impédance de court-circuit	$Z_{F1} = 2,135 \cdot 10^7 \text{ R}$	$Z_{F2} = 2,146 \cdot 10^7 \text{ R}$

TABLEAU 4.4a				
PARAMÈTRES DES ÉLÉMENTS NON-PIÉZOÉLECTRIQUES DE T17//18				
Milieu	7 (Air à gauche)		21 (Air à droite)	
Impédance	ZA1 = 400 R		Z2 = 400 R	
Milieu	8 [Laiton (2)]	9 [Colle (1)]	11 [Colle (1)]	12 [Laiton (2)]
Impédance acoustique	$3,184 \cdot 10^7$ R	$3 \cdot 10^6$ R	$3 \cdot 10^6$ R	$3,184 \cdot 10^7$ R
Épaisseur	$3,12 \cdot 10^{-3}$ m	$45 \cdot 10^{-6}$ m	$12 \cdot 10^{-6}$ m	$5,99 \cdot 10^{-6}$ m
Vitesse	3480 m/s	2500 m/s	2500 m/s	3480 m/s
Atténuation	2 Np/m	20 Np/m	20 Np/m	2 Np/m
Exposant	1,5	1,5	1,5	1,5
Milieu	13 [Eau (3)]		15 [Eau (5)]	
Impédance acoustique Zo	$vse \cdot 998$ R		$vse \cdot 998$ R	
Épaisseur a	$12,573 \cdot 10^{-3}$ m		$12,573 \cdot 10^{-3}$ m	
Vitesse v	vse		vse	
Atténuation: Kr	2,25 Np/m		2,25 Np/m	
Exposant: Np	1,5		1,5	

TABLEAU 4.4b				
PARAMÈTRES DES ÉLÉMENTS NON-PIÉZOÉLECTRIQUES DE T17//T18				
Milieu	16 [Laiton (6)]	17 [Colle (7)]	19 [Colle (1)]	20 [Laiton (2)]
Impédance	$3,184 \cdot 10^7 \text{ R}$	$3 \cdot 10^6 \text{ R}$	$3 \cdot 10^6 \text{ R}$	$3,184 \cdot 10^7 \text{ R}$
Épaisseur	$5,954 \cdot 10^{-3} \text{ m}$	$20 \cdot 10^{-6} \text{ m}$	$87,9 \cdot 10^{-6} \text{ m}$	$3,142 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
Vitesse	3480 m/s	2500 m/s	2500 m/s	3480 m/s
Atténuation	2 Np/m	20 Np/m	20 Np/m	2 Np/m
Exposant	1,5	1,5	1,5	1,5

Les graphiques de mesure, pour le résonateur formé par les transducteurs T17 et T18, sont présentés à suite pour différentes valeurs de température (figures 4.5 à 4.11).

T18 // T17 EAU DÉGAZÉE A 19.4 DEGRÉ. (°C)

DATE: 10-27-1993

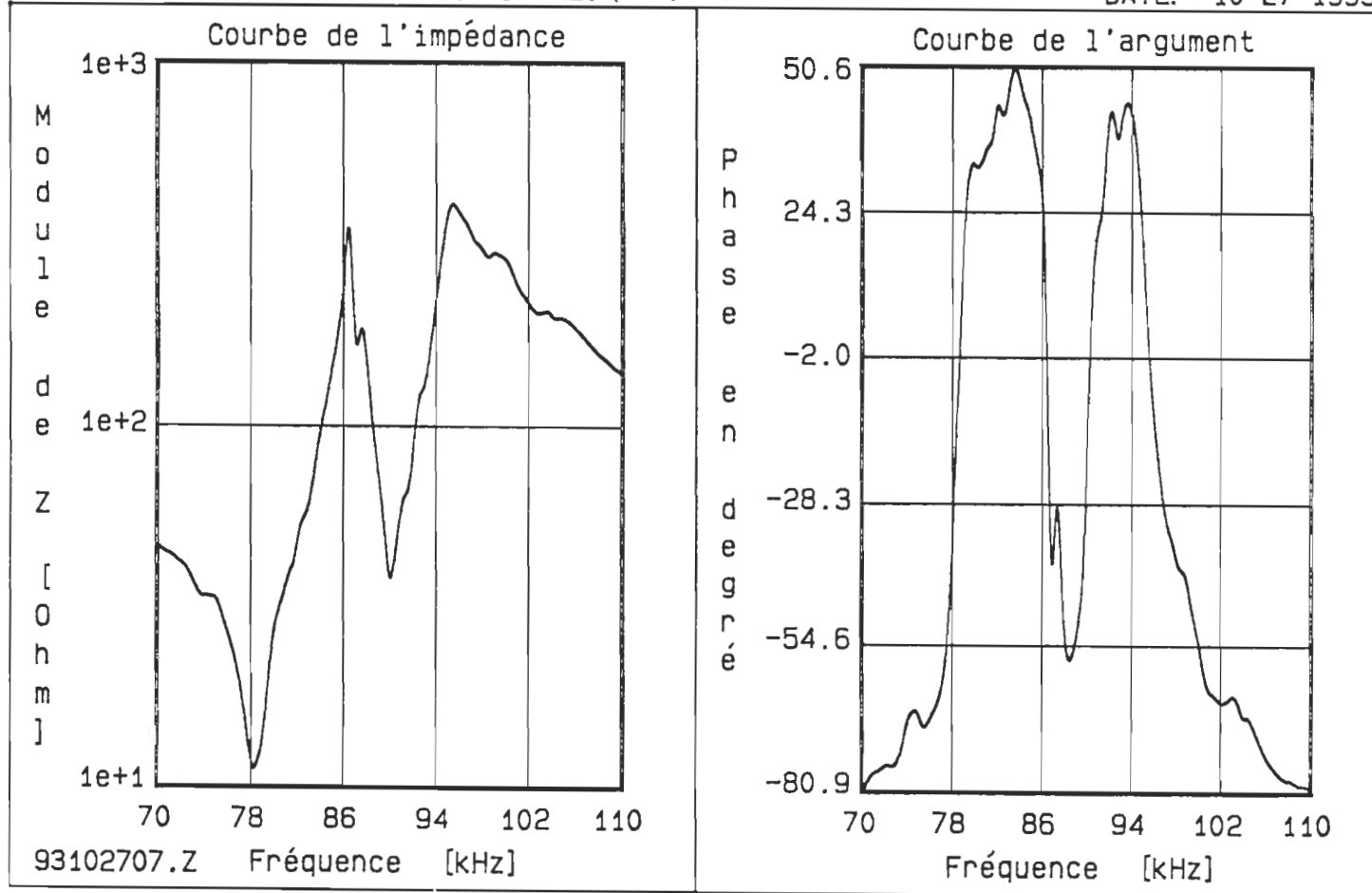


Figure 4.5 Mesure du résonateur T17//T18 à 19,4 °C

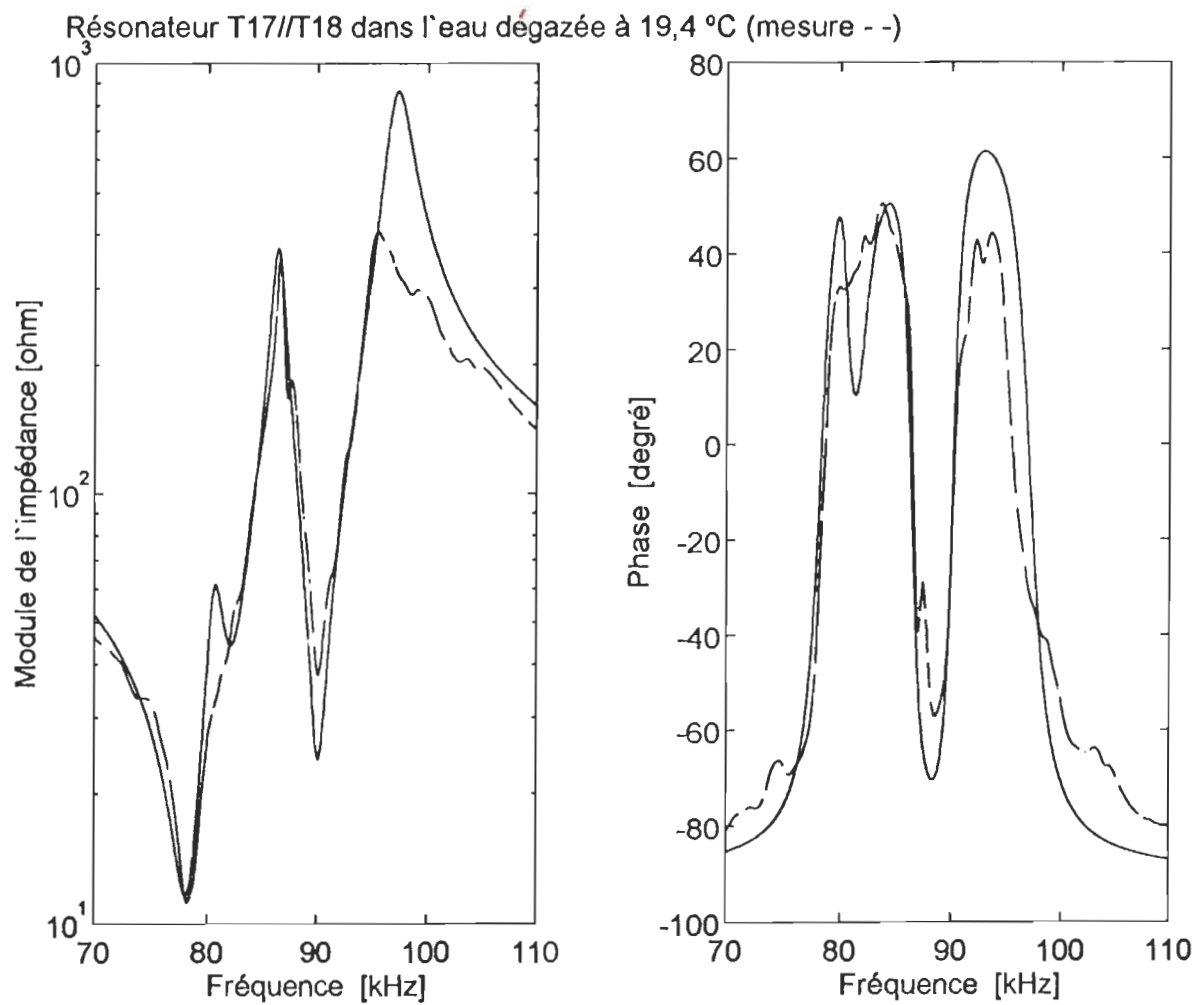


Figure 4.6 Comparaison de la mesure et la simulation du résonateur T17//T18 à 19,4 °C

T18 // T17 DANS L'EAU DÉGAZÉE À 21,57°C

DATE: 10-27-1993

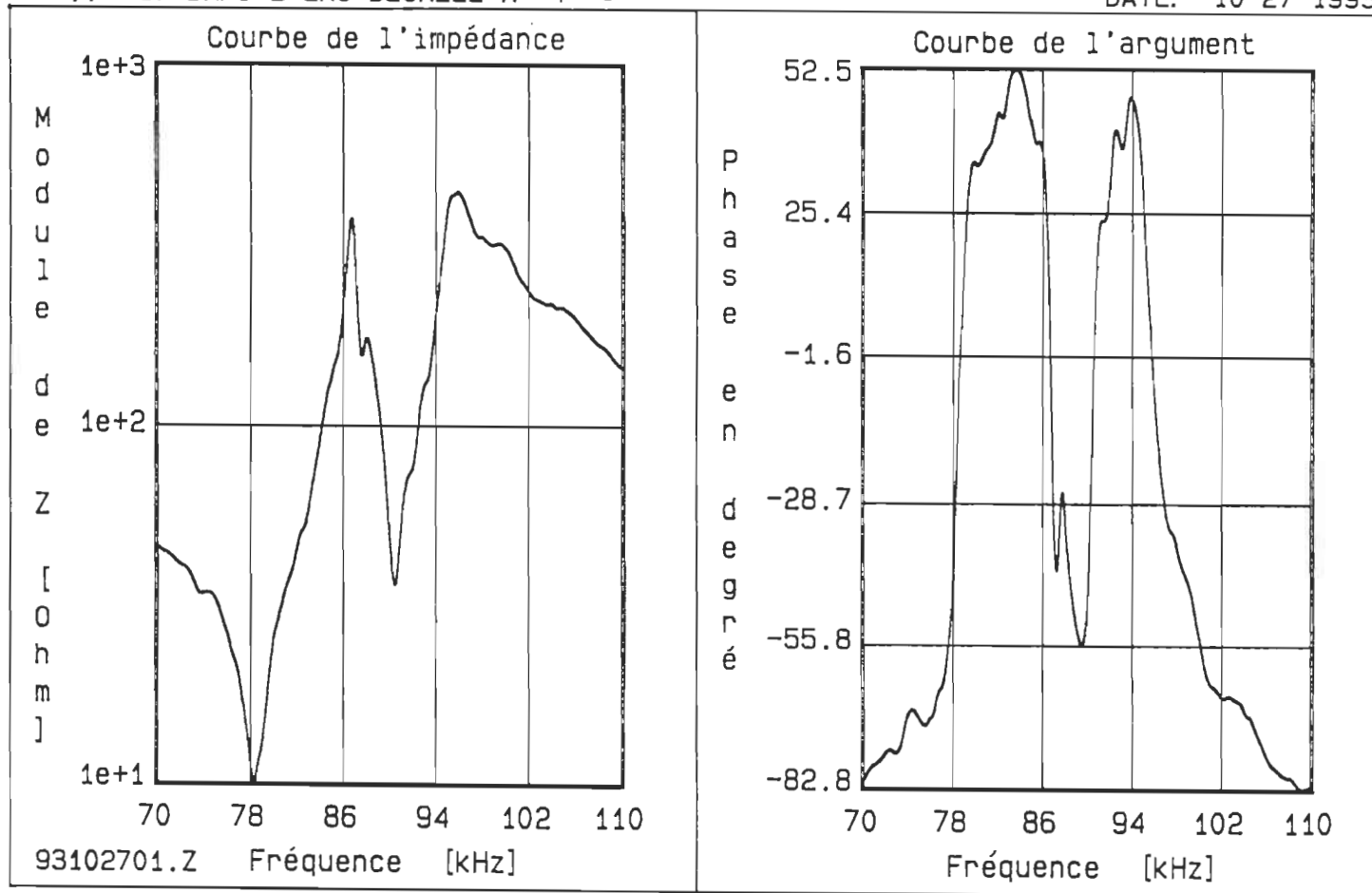


Figure 4.7 Mesure du résonateur T17 // T18 à 21,57 °C

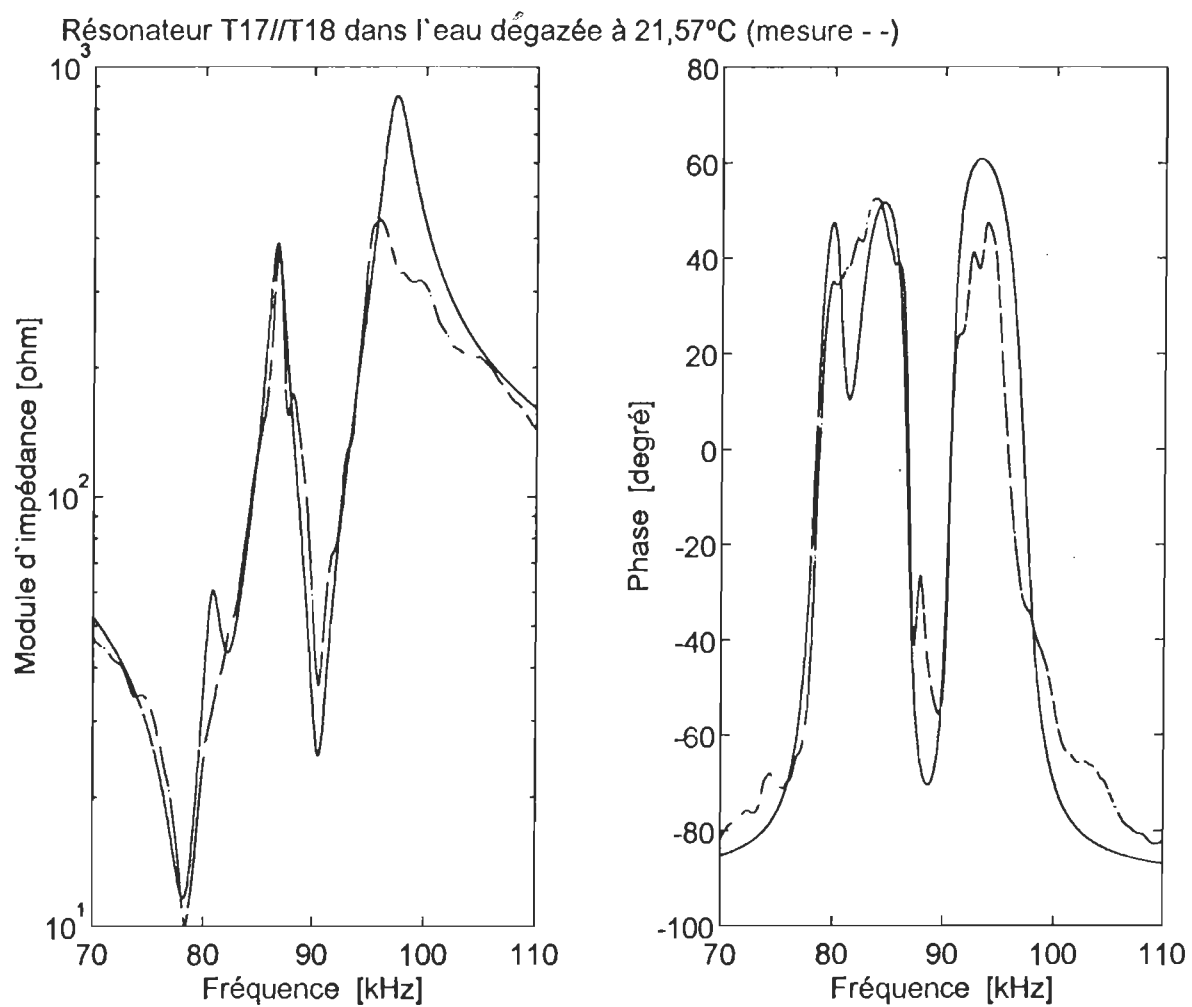


Figure 4.8 Comparaison de la mesure du résonateur T17//T18 à 21,57 °C avec sa simulation

T18 // T17 DANS L'EAU DÉGAZÉE A 24.85 C.

DATE: 10-27-1993

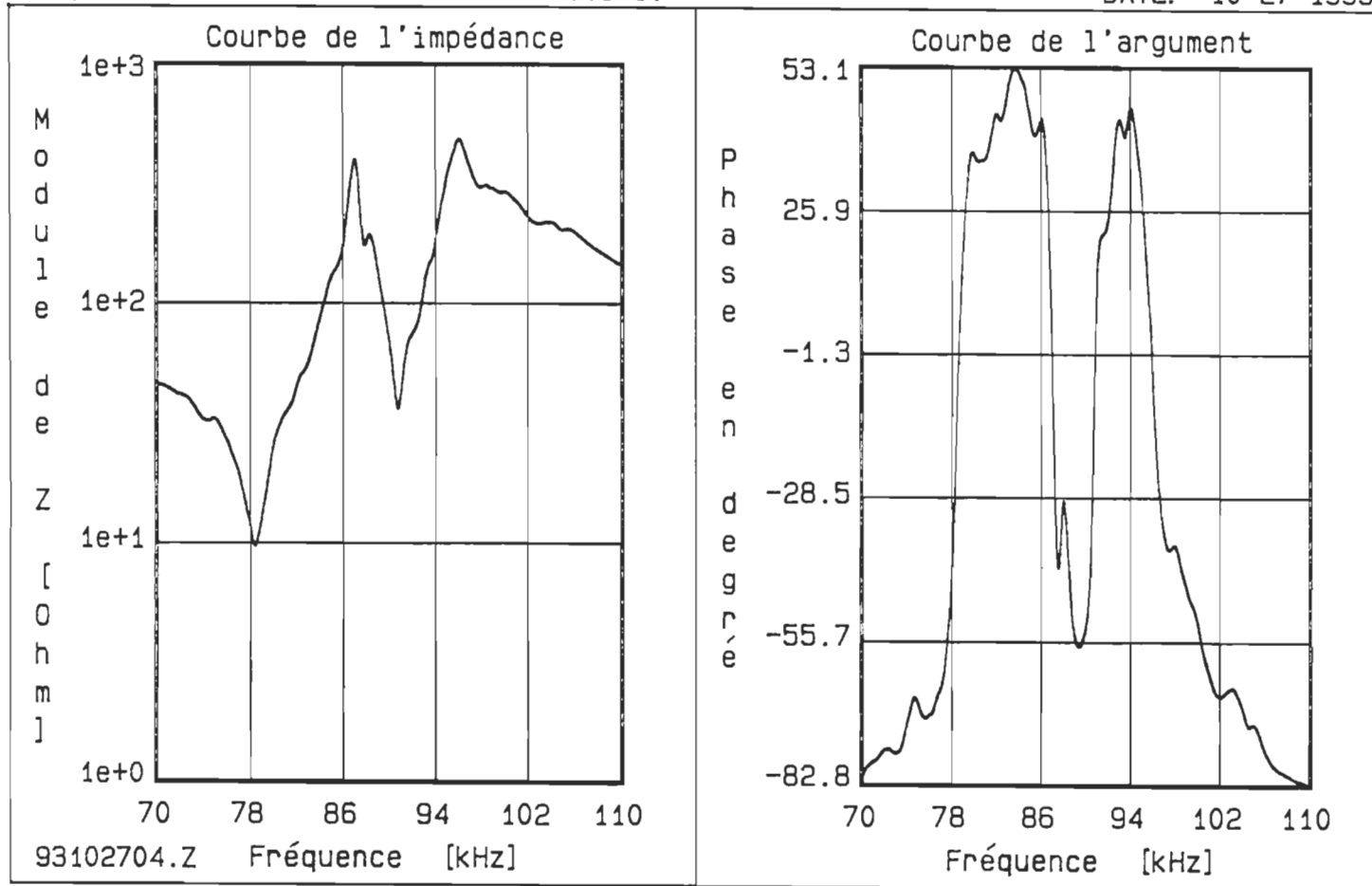


Figure 4.9 Mesure du résonateur T17//T18 à 24.85°C

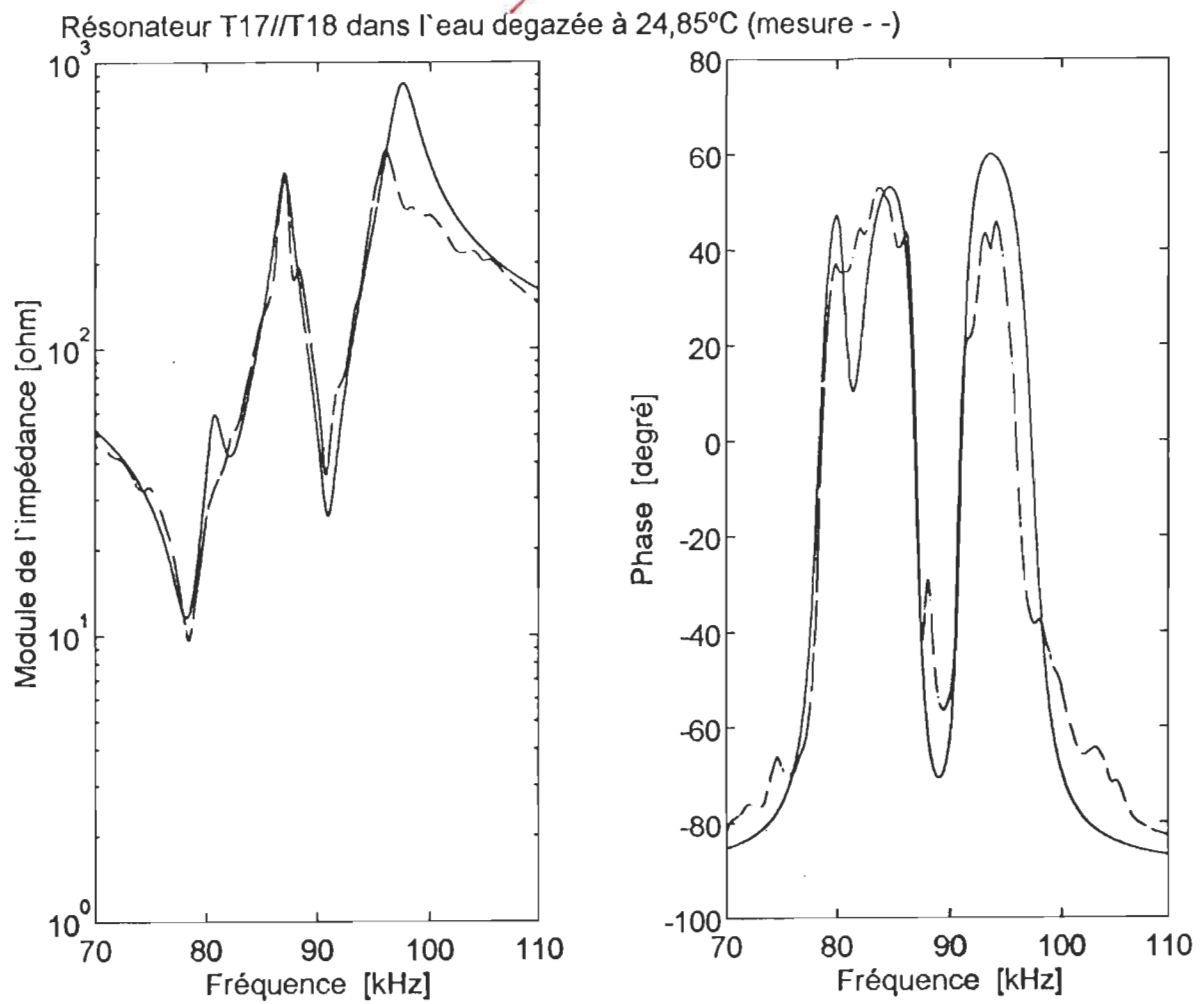


Figure 4.10 Comparaison de la mesure du résonateur T17//T18 à 24.85°C avec sa simulation

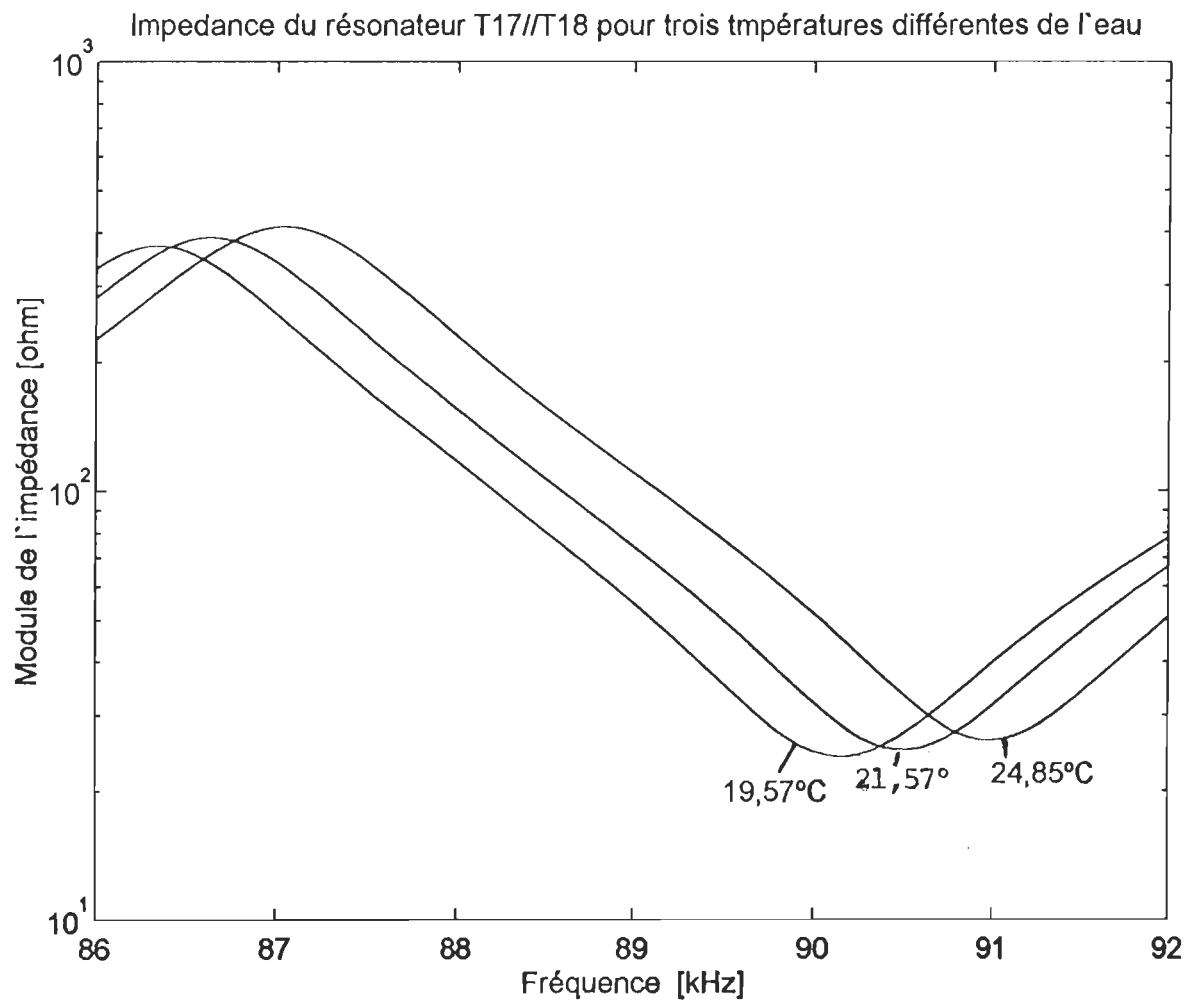


Figure 4.11 Simulation du résonateur T17//T18 à trois températures différentes

4.4 CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT

Nous avons fait diverses mesures avec le résonateur et vérifié que les résultats de simulation correspondent à ceux de la mesure. L'étape suivante est de trouver les conditions optimales de travail, le critère à considérer était la transmission maximale de puissance acoustique dans la cavité de la cellule, sans négliger la stabilité du champ ultrasonore.

La fréquence de résonance f_r , du système est celle où l'impédance électrique est minimale. L'autre fréquence caractéristique f_m est reliée à la distance séparant les faces des deux transducteurs: c'est celle pour laquelle la séparation des faces des transducteurs est un multiple entier d'une demi-longueur d'onde. Quand nous avons étudié le fonctionnement du résonateur à ces fréquences, les résultats n'étaient pas satisfaisants (mauvaise stratification, interstrates non vidés), il fallait donc trouver à quelle valeur de fréquence comprise entre f_r et f_m , on devait exciter les transducteurs. La réponse à cette question était: la fréquence à laquelle le taux d'onde stationnaire est maximal dans la cellule G-3.

4.4.1 Détermination du taux d'onde stationnaire (TOS)

Pour déterminer le taux d'onde stationnaire (TOS) on a créé un programme permettant d'évaluer la vitesse à chaque point de la distance que sépare les deux transducteurs (33,528 mm), pour cette raison on a divisé la couche d'eau en trois parties ou couches (13,14 et 15; figure 4.2), après on parcourt la distance qui sépare les deux transducteurs avec un pas aussi petit que $1 \mu\text{m}$. L'épaisseur de la couche 13 va augmenter et celle de la couche 14 va diminuer également. On utilise la couche 15 comme référence, ou on peut la négliger en plaçant une épaisseur de 0 m dans le fichier de données.

4.4.2 Vérification expérimentale

Pour vérifier la validité des résultats obtenus par la simulation du TOS, nous avons fait des essais avec le résonateur, ce qui nous a permis de déterminer la fréquence de travail.

Grâce aux essais antérieurs, nous avons déterminé que la valeur de la fréquence d'excitation doit être voisine de la fréquence de résonance f_r , dans notre cas la fréquence de référence f_m était inférieure à f_r , il y avait environ 2 kHz entre les deux. On a divisé cet intervalle en neuf valeurs et on les a numérotées de f_1 à f_9 . Par la suite, on a excité les transducteurs à chaque fréquence, et fait des essais à tension constante et d'autres à puissance constante. La raison des changements était que l'impédance électrique varie avec la fréquence.

Finalement nous avons constaté que les résultats les plus satisfaisants étaient à une fréquence d'excitation f_7 , si l'on considère maintenant les résultats obtenus par simulation on voit qu'ils coïncident avec les mesures.

Le tableau 4.5 montre les résultats observés à différentes valeurs de fréquence (f_1 à f_9) pour la détermination du taux d'onde stationnaire, ainsi que les conditions auxquelles on a travaillé.

TABLEAU 4.5			
VÉRIFICATION DU FONCTIONNEMENT DU SYSTÈME G-3 À DIFFÉRENTES VALEURS DE FRÉQUENCE D'EXCITATION			
Valeurs de fréquence	Tension appliquée	Stratification	Commentaires
$f_1=f_m=88700$ Hz	100 V-crête	Rapide et belle	10 s début , 50 s fin
$f_2=88917,75$ Hz	95,5 V-crête	Instable et non définie	25 s début, n'arrête pas de bouger
$f_3=89137,5$ Hz	93,5 V-crête	Instable et non définie	début aux 30 s mais n'arrête pas de bouger
$f_4=89356,25$ Hz	79,4 V-crête	Large et lente	25 s début, 45 s fin
$f_5=89575$ Hz	72 V-crête	Large et lente	15s début, 40 s fin
$f_6=89793,75$	71,5 V-crête	Rapide, droite et fine	15s début, 25 s fin
$f_7=90012,5$ Hz	57,5 V-crête	Nette, bonne, stable, droite et fine	25 s début, 40 s fin , interstates bien vidés
$f_8=90231,25$ Hz	42,27 V-crête	Rapide et bonne	début 15 s, fin 25 s
$f_9=f_r=90450$ Hz	44,5 V-crête	Bonne, fine, droite et rapide	15s début, interstrates vidés

Remarque: Nous avons fixé la puissance fournie au résonateur à 23 W, la tension d'alimentation présente au tableau 4.5 doit satisfaire cette condition.

La figure 4.12 montre la vitesse acoustique dans la cellule G-3 (pour une valeur de fréquence f_m), et la figure 4.13 montre la détermination par simulation du TOS en fonction de la fréquence d'excitation des transducteurs.

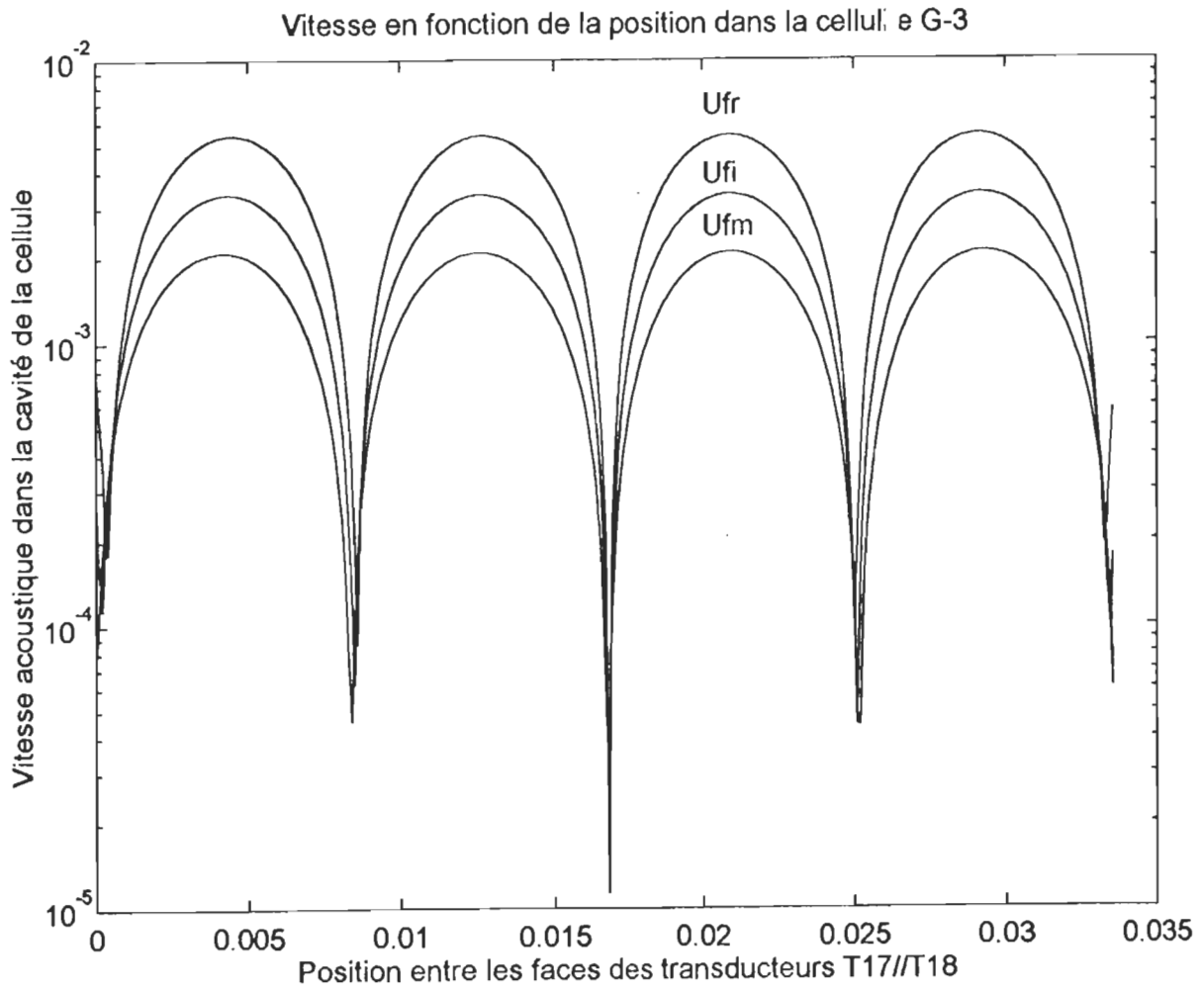


Figure 4.12 Vitesse acoustique dans la cellule G-3

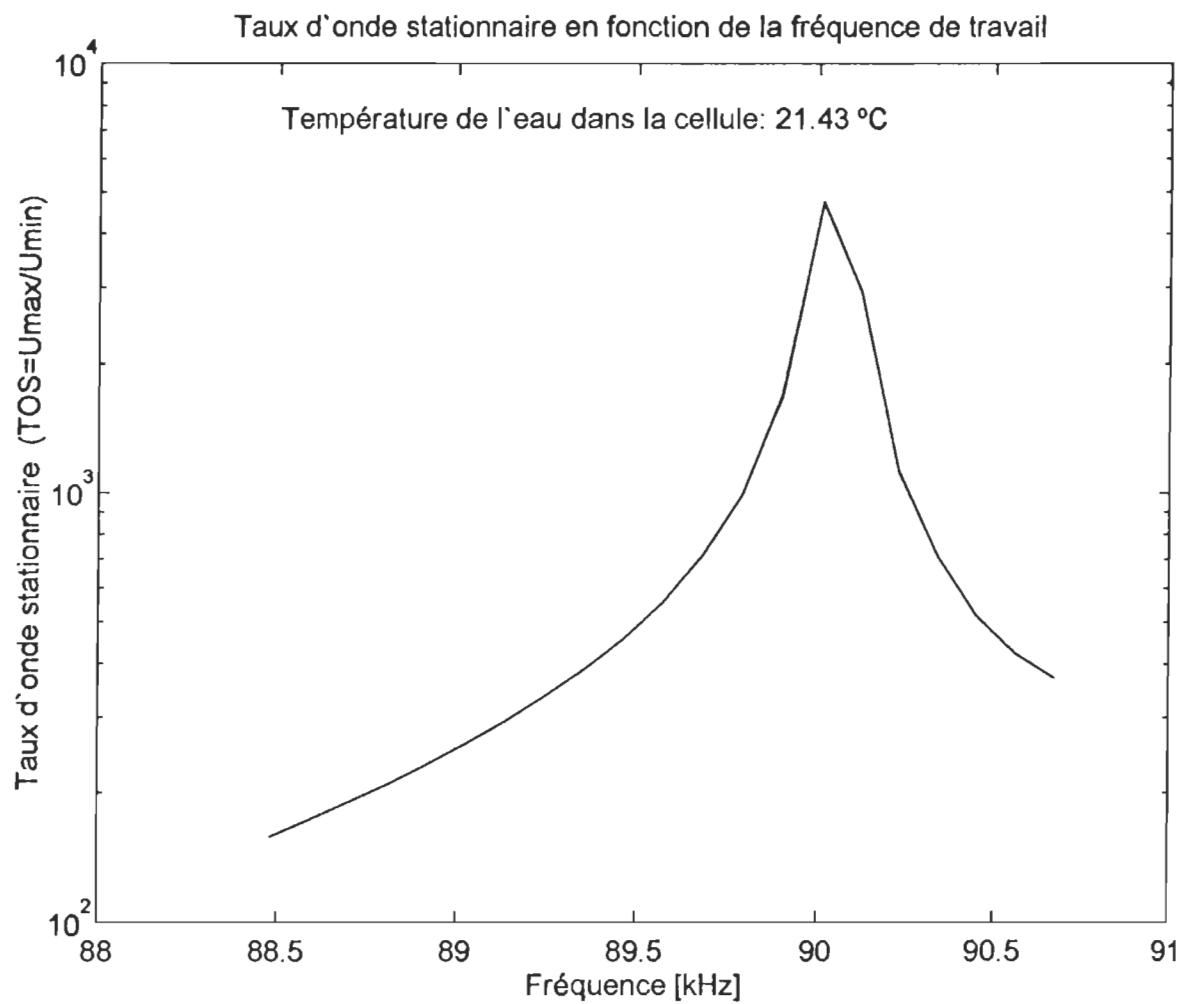


Figure 4.14 Graphique du TOS

CHAPITRE 5

MONTAGE FINAL

Le système de caractérisation acousto-optique des pâtes à papier décrit au chapitre 1 a subi des modifications pour assurer la réduction des facteurs indésirables qui agissent directement ou indirectement sur le procédé ainsi que la réduction des erreurs systématiques sur les mesures faites [1].

Mais tout l'ensemble ne fonctionnait pas comme prévu. Parmi les problèmes rencontrés, on peut citer la commande des électrovannes par le module de puissance et l'instabilité du signal d'excitation aux transducteurs.

5.1 AMÉLIORATION DU MODULE DE PUISSANCE.

La commande des électrovannes et pompes est faite à partir du module de puissance, où se trouvent des thyristors bidirectionnels SC141, dont le courant de maintien est de 50 mA (les électrovannes de 6 W ne satisfaisaient pas cette condition). On a résolu ce problème en plaçant des lampes de 3 W en parallèle avec ces électrovannes. Autrement dit, on demande quelques 30 mA de plus aux triacs.

Les lampes ont été placées à l'avant du panneau de puissance, de sorte qu'on puisse voir facilement laquelle des électrovannes est actionnée pendant le fonctionnement du système.

5.2 GÉNÉRATION DE LA FRÉQUENCE D'EXCITATION.

Le circuit électronique d'excitation asservie conçu par Massicotte [1] ne pouvait pas maintenir le signal d'excitation du résonateur à une fréquence stable, raison pour laquelle nous avons décidé d'utiliser un synthétiseur de fréquence, programmable: «Julie-Board» modèle JUL200 [21]. La variable de contrôle sera maintenant la température dans la cellule G-3, plutôt que le déphasage.

La température dans la cellule est mesurée par une thermistance. Cette mesure est importante pour la détermination de la vitesse du son dans l'eau qui permet par la suite de calculer la fréquence d'excitation des transducteurs piézoélectriques qui forment le résonateur.

Cette carte JUL200 peut être branchée au port LPT1 de l'ordinateur et un programme de commande en fonction de la température a été conçu: Hugues.exe [22].

Ce programme possède deux modes de fonctionnement:

- 1 On choisit une fréquence avec la commande f et on inscrit la fréquence désirée. On peut fixer un pas et après on peut incrémenter ou décrémenter la fréquence par le pas choisi en utilisant les touches (+) ou (-).
- 2 En mode automatique le programme attend que AUTOLAB [1] lui envoie le signal d'excitation, après quoi il active la sortie à la fréquence de travail correspondant à la température de l'eau dans la cellule.

La carte «Julie-Board» introduit un délai d'environ 0,8 s. Ce délai doit être considéré au moment de prendre les signaux résultants pour la caractérisation des fibres.

5.3 RACCORDEMENT D'IMPÉDANCES

Un autre problème à résoudre était le raccordement des transducteurs à l'amplificateur, vu que l'impédance varie avec la fréquence d'excitation. À cette fin, nous avons conçu un auto-transformateur: AT-05, qui permet avec un choix approprié de ses prises d'avoir une impédance autour des 100 ohms vue par l'amplificateur DCA-50 de Krohn-Hite.

5.3.1 Autotransformateur AT-05.

Pour la construction de l'auto-transformateur AT-05, nous avons utilisé comme noyau un tore de ferrite (4C4) de haute perméabilité magnétique avec des pertes relativement faibles à la fréquence de travail (environ 100 kHz). Le bobinage est fait avec du fil gainé de PCV, type AWG-24. La figure 5.1 montre les différentes prises d'AT-05.

5.4 RÉPONSE DU SYSTÈME À UN ÉCHANTILLON DE FIBRES

Finalement on va présenter les courbes de caractérisation des fibres de pâte à papier obtenues par le système G-3 (figure 5.2) avec le résonateur formé par des transducteurs T17 et

T18 et excité avec le signal de fréquence provenant de la carte «Julie-Board». Les courbes présentées peuvent être modifiées en plaçant le départ à la même valeur (à concentrations égales). Cette approche diminue la dispersion entre les différentes mesures de l'échantillon.

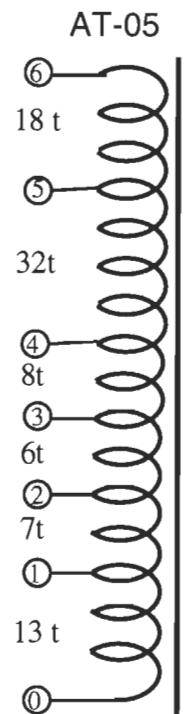


Figure 5.1 Auto-transformateur AT-05

Les conditions expérimentales sont montrées dans le tableau 5.1. Le délai a été considéré en mettant 9 s comme temps d'attente (période pour mesurer l'intensité de la lumière diffusée par les fibres avant l'excitation). Cette valeur additionnée aux 0,8 s que prend la carte JUL200, fait un temps de 9,8 s avant que le résonateur soit excité. On fait ces opérations de commande avec le logiciel AUTOLAB [1] développé sur *LabWindows^{MC}*. Ce logiciel emmagasine les résultats sur des fichiers avec un format USR. Pour bien évaluer le signal de lumière diffusée par des particules (fibres), on prend une mesure avant d'ajouter des fibres que l'on appelle: fichier en eau claire.

TABLEAU 5.1
CONDITIONS EXPÉRIMENTALES

Longueur des fibres	Kraft L-28
Concentration des fibres	0,003 %
Pourcentage d'oxygène dans l'eau	5 %
Température de l'air ambiant	21,2 °C
Température de l'eau dégazée	21,2 °C
Température du mélange	21,6 °C
Fréquence d'excitation	88730 Hz
Masse des fibres	394 mg
Temps mort (Stabilisation de la turbulence)	20 s
Temps d'attente (Mesure à conc. initiale)	9 s
Temps d'excitation	31 s
Temps de dégazage	1,5 h
Gain	10
Fréquence d'échantillonnage	30 Hz
Fichier en eau claire	93120930.USR
Impédance du résonateur	130,2 ohms
Argument de l'impédance du résonateur	-51,74 degré
Tension à l'entrée du résonateur (crête)	100,1 V
Puissance	23,8 W

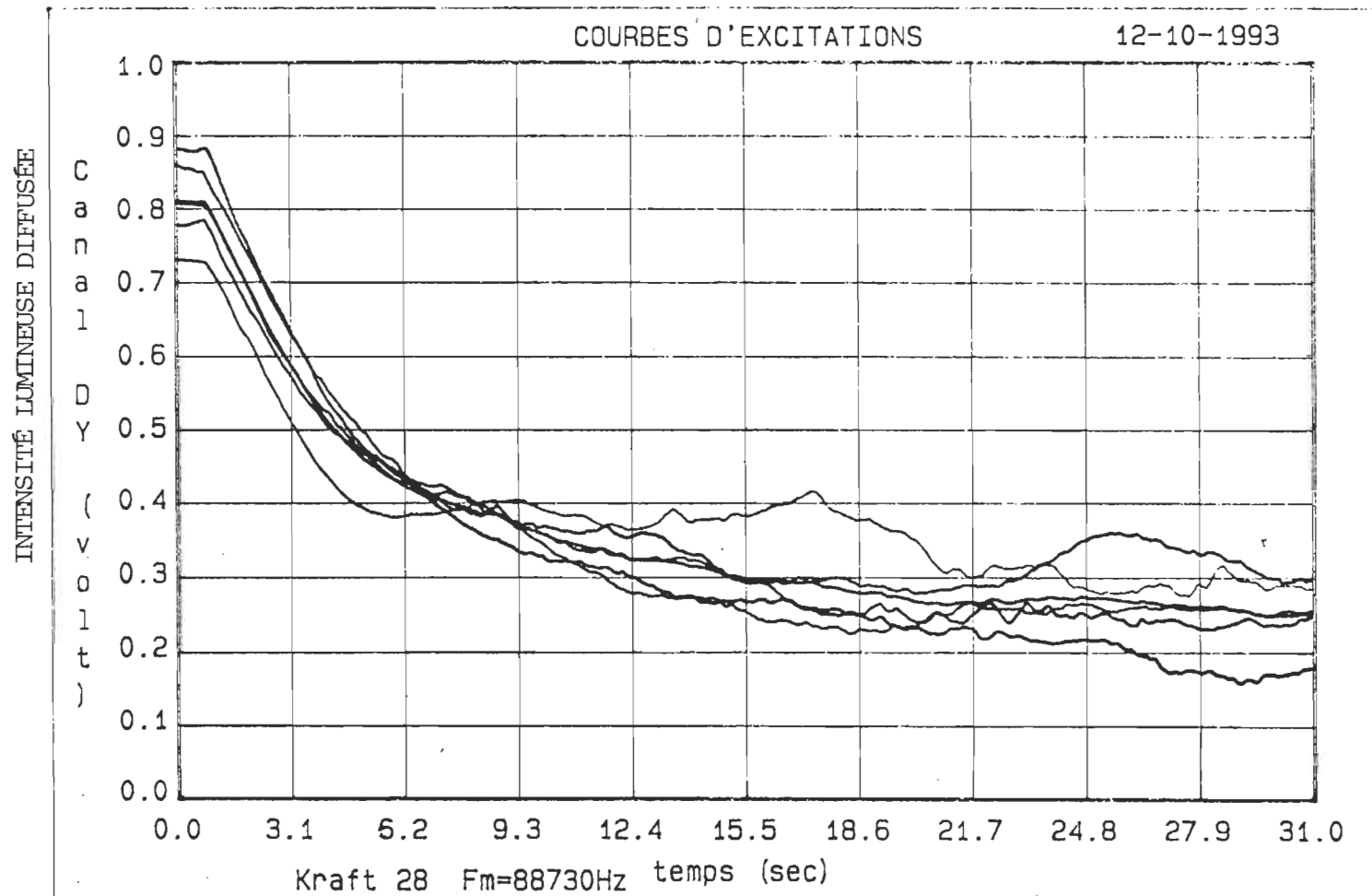


Figure 5.2 Courbes d'excitation (Lumière diffusée)

CONCLUSION

Robin Williams a dit dans une entrevue: «La question n'est pas de travailler davantage, mais d'être critique envers soi-même, en choisissant les chemins escarpés plutôt que les autoroutes». Dans cette recherche travailler davantage était nécessaire, étant donné que nous mêmes avons fait ce chemin.

Nous avons tâché dans ce travail d'atteindre un objectif qui paraissait au départ assez haut et difficile, vu la nature relativement innovatrice du projet. Il s'agissait de s'approcher de la mise au point d'un prototype industriel d'un nouveau procédé acousto-optique de caractérisation des pâtes à papier. Il s'est avéré qu'une étape essentielle et difficile restait à franchir: le calcul et la réalisation de nouveaux transducteurs piézoélectriques à couches multiples constituant le résonateur acoustique au coeur du système. Un sérieux problème d'infiltration d'eau était apparu dans les précédents transducteurs. Nous pouvons dire avec satisfaction que la solution de ce problème a été trouvée et essayée avec succès. Il faut noter que nombre de milieux total dans ce résonateur dépasse largement celui de tout autre résonateur calculé ailleurs.

Parmi les problèmes rencontrés, nous pouvons citer en particulier la rigidité des programmes initialement disponibles pour la simulation des transducteurs piézoélectriques. Nous avons réussi à les modifier et ajouter les milieux requis pour le calcul du TOS, en plus d'être capable de modifier les épaisseurs de n'importe quel milieu. Autrement dit, la structure peut être asymétrique maintenant, ce qui n'était pas le cas auparavant.

L'excitation des transducteurs a été améliorée au moyen d'une carte de synthèse de fréquence directement branchée à l'ordinateur et asservie à la température de la cellule de mesure. Ayant déterminé les conditions optimales de fonctionnement du résonateur, une étape suivante serait d'étudier la possibilité d'asservir en la fréquence à une valeur maximale de la puissance fournie au système.

L'accord entre les mesures et la simulation souligne la bonne performance des programmes élaborés au cours de cette recherche, ainsi que l'amélioration de la technique de construction des transducteurs ultrasoniques. Nous avons aussi mis au point une méthode pratique de calcul du

TOS, qui permet d'éviter la difficulté de prendre cette mesure sans modifier le champ d'onde stationnaire existant dans la cellule G-3. Nous avons eu la satisfaction de calculer et réaliser avec succès des structures de résonateur acoustique d'une complexité jamais atteinte dans des travaux antérieurs en électro-acoustique.

Nous souhaitons que les concepts et résultats contenus dans ce travail puissent servir de base à diverses études des phénomènes reliés aux ultrasons, en particulier le procédé de caractérisation des pâtes à papier vers son éventuelle implantation en usine.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] D.Massicotte, "Étude du problème de l'automatisation du procédé de caractérisation acousto-optique des fibres de pâte à papier," Mémoire de maîtrise. GREI - UQTR. Trois-Rivières, Québec. (1990)
- [2] J.-L. Dion, J.-L. Valade et K.N. Law, "Évolution d'une suspension de fibres dans un champ ultrasonore stationnaire," *Acustica*, vol. 14 (1988), n°. 6, pp. 284-289.
- [3] L.V. King, "On the acoustic radiation pressure on circular discs: Inertia and diffraction corrections," *Proc. Royal Soc. London*, vol. 153A (1935), pp. 1-40.
- [4] P. Brodeur, "Motion of fluid suspended fibres in a standing wave field," *Ultrasonics*, vol. 29 (1991), pp. 302-307.
- [5] J. Wu, G Du, S. S. Work, et D.M. Warshaw, "Acoustic radiation pressure on a rigid cylinder: An analytical theory and experiment," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol 87 (1990), pp. 581-586
- [6] H. Czyz, "Forces due to diffraction of sound wave on small-diameter cylindrical particles," Document de travail, Institute of Physics, Pedagogical University of Rzeszów, Poland, janvier 1992. 4 pages.
- [7] E. Guyon, J.-P. Hulin et L. Petit, *Hydrodynamique physique*, InterÉditions/Éditions du CNRS. Paris, 1991, pp. 357-360..
- [8] M.R.Spiegel, M. R., "Manual de fórmulas y tablas matemáticas," McGraw-Hill, Serie Shaum, Bogotá, 1981.
- [9] J.-L.Dion, P. Brodeur, J.J. Garceau et R. Chen, "Caractérisation acousto-optique: nouveaux résultats," *J. Pulp and Paper Sci.*, vol. 14 (1988), n°. 6, pp. J141-J144.

-
- [10] Brodeur, P., J.-L.Dion, Garceau J. J., Pelletier, G. et Massicotte, D., "Fibre characterization in a stationary ultrasonic field," IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control.,vol. 36 (1989), n°.5, pp. 549-553.
- [11] W.P. Mason, Electromechanical transducers and wave filters, McGraw-Hill, New-York (1948).
- [12] J.-L.Dion, "Un nouveau modèle unidimensionnel de transducteur piézoélectrique," Colloque de physique, C2, Tome 51. Premier congrès français d'acoustique. Lyon, avril (1990). pp. C2-607 - C2-610.
- [13] J.-L. Dion, "A intuitive multilayered transducer model with losses based on transmission line theory," IEEE 1987 Ultrasonics Symposium Proc., Denver, CO, octobre (1987) pp 711-715.
- [14] E. Cornieles, "Étude théorique et expérimentale d'un résonateur ultrasonore composé: développement d'un logiciel basé sur l'analogie des lignes électriques," Mémoire de maîtrise. GREI-UQTR. Trois-Rivières, Qc. (1992).
- [15] J.-L. Dion, "A new approach to one-dimensional piezoelectric transducer modelling," IEEE 1990 Ultrasonics Symposium Proc., Honolulu, HI, décembre (1990) pp. 379-382.
- [16] J.-L. Dion, "New transmission line analogy applied to single and multilayered piezoelectric transducers," IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control.,vol.40, n° 5, septembre (1993) pp 577-583.
- [17] J.-L. Dion et M. Brissaud., "Modélisation de moteurs piézoélectriques modulaires," Journal de physique IV, colloque C1, supplément au Journal de physique III, vol. 2. Paris, avril (1992) pp C1-373 - C1-376.
- [18] R. H. Coursant, "Les transducteurs ultrasonores," Acte Électronique, vol. 22. (1979) n° 2, pp 129-141.
- [19] M. Greenspan et C. E. Tsciegg, "Tables of the speed of sound in water," The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 31, n° 1, janvier (1959) pp 75-76.
- [20] B. Hodgkinson, "JULIE-BOARD-JUL200 Synthesizer Card Manual".Meadford Systems. BP 232, Pakenham, Ontario K0A 2X0, 21 pages, 1992.

-
- [21] H.Paquin, "Manuel d'utilisation du système G-3", Rapport interne au Laboratoire d'Ultrasonique et Capteurs.de l'UQTR, Trois-Rivières, Québec, Janvier 1993. 11 pages, 2 annexes
- [22] "Manuel d'utilisateur de Matlab 4.0," The Math Works Inc., mars (1993).
- [23] J .d'A. Clark, "Some thoughts on fiber classification and length", Tappi, vol. 68, n° 8, (1985), pp.119-121
- [24] A. Kaunonen, "Use of fiber length and drainage measurement to control mechanical pulp production," Valmet Seminar. Kajaani Automation, janvier (1991), 6 pages.
- [25] M. Luukkonen, H. Suutari et L.Paavilainen, "Utilization of pulp drainage and fibre length measurements at a TMP mill," Appita vol 43, n° 3, mai (1990), pp. 213-216
- [26] J. M. Ory, G.Jannin, F. Thiercelin, "Automatic measurement of fiber length with the aid of a *Histofibre* apparatus," ATIP vol. 43 , n°9, novembre (1989), pp 451-452 et 455-462
- [27] J. Nordin, M. Jackson, H. Sköld et J.-P, Larose, "Continuous on-line measurement of pulp quality," Compte rendu du 77^e Congrès annuel de la CPAA/Section technique, janvier (1991) pp. A139-A150.

☒ - ☒ - ☒ - ☒ - ☒ - ☒ - ☒ - ☒

ANNEXES

A JUINMEM.M

B NOVTRA17.M

C NOVTRA18.M

D NOVRES.M

E OCTRA16.M

F OCTRES.M

G RÉSON14E.M


```

%*****
%* PROGRAMME POUR SIMULER UN RÉSONATEUR COMPOSÉ DE DEUX *
%* ÉLÉMENTS PIÉZOS EN PARALLÈLE (7 COUCHES DE SÉPARATION). *
%* JUIN 93 JUINMEM.M F.G., LABO. D'ULTRASONIQUE ET CAPTEURS *
%*****

fprintf('*****\n')
fprintf('*   CALCUL EN COURS   *\n')
fprintf('*****\n')
clg
hold off

%=====
%*           DONNÉES DU PROBLÈME           *
%=====
%*****
Fi=fi;
Fs=fs;
Ni=ni;
%*****PLAGE DE FRÉQUENCE*****
f=Fi:(Fs-Fi)/Ni:F_s;
%*****
%*           ALGORITHME DE CALCUL           *
%*****
W=2*pi.*f;
%*****
%*   PREMIER CAS TENSION TRANSDUCTEUR 2 NULLE (V=0)   *
%*****
c1=ZF2.*ve;
C20=(c1.*ve.*Kr2./(f.*pi)).*((f./fr2).^N2);
Z02=(ZF2.*(1+j.*(C20./(2.*c1))));
K00=W./ve;
K10=Kr2.*((f./fr2).^N2);
gk=(K10+j.*(K00));
for m2=id:-1:1;
    c11=Zo2(m2).*vv2(m2);

```

```

C21=(c11.*vv2(m2).*KKr2(m2)./(f.*pi)).*((f./fr2).^Nd(m2));
c2=c11+j.*C21;
Koo=W./vv2(m2);
K12=KKr2(m2).*((f./fr2).^Nd(m2));
g2=(K12+j.*(Koo));
Zo21=c2.*g2./(j.*W);
NUN2=(Z2+Zo21.*tanh(g2.*aa2(m2))).*Zo21;
DEN2=(Zo21+Z2.*tanh(g2.*aa2(m2)));
if m2==4,
    Z14=NUN2./DEN2;
    Z2=Z14;
elseif m2==3,
    Z13=NUN2./DEN2;
    Z2=Z13;
elseif m2==2,
    Z12=NUN2./DEN2;
    Z2=Z12;
elseif m2==1,
    Z2=NUN2./DEN2;
end
end
Zn2=(Z2+Z02.*tanh(gk.*ap2)).*Z02;
Zd2=(Z02+Z2.*tanh(gk.*ap2));
Zee2=Zn2./Zd2;
Z1=Zee2;
%*****
%* CALCUL DE L`IMPÉDANCE À DROITE DU PIÉZO 1 *
%*****
for m=i:-1:1;
    c1=Zo(m).*v(m);
    C2=(c1.*v(m).*Kr(m)./(f.*pi)).*((f./fr).^Np(m));
    c=c1+j.*C2;
    Ko=W./v(m);
    K1=Kr(m).*((f./fr).^Np(m));
    g=(K1+j.*(Ko));

```

```

Zoo1=c.*g./(j.*W);
NUN=(Z1+Zoo1.*tanh(g.*a(m))).*Zoo1;
DEN=(Zoo1+Z1.*tanh(g.*a(m)));
if m==7,
    Z71=NUN./DEN;
    Z1=Z71;
elseif m==6,
    Z61=NUN./DEN;
    Z1=Z61;
elseif m==5,
    Z51=NUN./DEN;
    Z1=Z51;
elseif m==4,
    Z41=NUN./DEN;
    Z1=Z41;
elseif m==3,
    Z31=NUN./DEN;
    Z1=Z31;
elseif m==2,
    Z21=NUN./DEN;
    Z1=Z21;
elseif m==1,
    Z11=NUN./DEN;
    Z1=Z11;
end
end
%*****
%*  CALCUL DE L IMPÉDANCE A GAUCHE DU PIÉZO 1      *
%*****
for K=ia:-1:1;
    c1=Zao(K).*va(K);
    C2=(c1.*va(K)*Kra(K)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nap(K));
    c=c1+j.*C2;
    Koa=W./va(K);
    K1a=Kra(K).*((f./fr).^Nap(K));

```

```

ga=(K1a+j.*(Koa));
Zoo=c.*ga./(j.*W);
NUNa=(ZA1+Zoo.*tanh(ga.*aa(K))).*Zoo;
DENa=(Zoo+ZA1.*tanh(ga.*aa(K)));
if K==4,
    Za4=NUNa./DENa;
    ZA1=Za4;
elseif K==3,
    Za3=NUNa./DENa;
    ZA1=Za3;
elseif K==2,
    Za2=NUNa./DENa;
    ZA1=Za2;
elseif K==1,
    Za1=NUNa./DENa;
    ZA1=Za1;
end
end
%*****
%* ÉLÉMENT PIÉZO 1 COMME ÉMETTEUR *
%*****
c10=Z1o*vv;
CH=(c10.*vv.*Krr./(f.*pi)).*((f./fr).^Nn);
c1=c10+j.*CH;
K00=W./vv;
K10=Krr.*((f./fr).^Nn);
go1=(K10+j.*(K00));
Z01=c1.*go1./(j.*W);
F11=Z01.*cosh(go1.*ap)./sinh(go1.*ap);
F21=Z01./sinh(go1.*ap);
KX=h./(j.*W.*A);
%*****
%* CALCUL DE L'IMPÉDANCE ÉLECTRIQUE DU PIÉZO 1 *
%*****
D1=F21.^2-F11.^2-Z1.*ZA1-F11.*(Z1+ZA1);

```

```

G1=((F11-F21+Z1).*KX./D1);
G2=((F21-F11-ZA1).*KX./D1);
Vs=1;
FF=A.*KX.*(G1-G2);
ZE1=(FF-j./(W.*Co));
ZZ1=abs(ZE1);
U91=(G1.*Vs./ZE1);
U101=(G2.*Vs./ZE1);
%*****
*
%* CALCUL DE LA VITESSE ACOUSTIQUE SUR CHAQUE FACE À DROITE DU
PIÉZO 1 *
%*****
*
for y=1:1:i;
    c1=Zo(y).*v(y);
    CC2=(c1.*v(y).*Kr(y)./(f.*pi)).*((f./fr).^Np(y));
    c=c1+j.*CC2;
    KKo=W./v(y);
    KK1=Kr(y).*((f./fr).^Np(y));
    gg=(KK1+j.*KKo);
    Zop=c.*gg./(j.*W);
    if y==1,
        Vn1=U101.*Zop;
        Vd1=Zop.*cosh(gg.*a(y))+Z21.*sinh(gg.*a(y));
        U111=(Vn1./Vd1);
    elseif y==2,
        Vn2=U111.*Zop;
        Vd2=Zop.*cosh(gg.*a(y))+Z31.*sinh(gg.*a(y));
        U121=(Vn2./Vd2);
    elseif y==3,
        Vn3=U121.*Zop;
        Vd3=Zop.*cosh(gg.*a(y))+Z41.*sinh(gg.*a(y));
        U131=(Vn3./Vd3);
    elseif y==4,
        Vn4=U131.*Zop;

```

```

    Vd4=Zop.*cosh(gg.*a(y))+Z51.*sinh(gg.*a(y));
    U141=(Vn4./Vd4);
elseif y==5,
    Vn5=U141.*Zop;
    Vd5=Zop.*cosh(gg.*a(y))+Z61.*sinh(gg.*a(y));
    U151=(Vn5./Vd5);
elseif y==6,
    Vn6=U151.*Zop;
    Vd6=Zop.*cosh(gg.*a(y))+Z71.*sinh(gg.*a(y));
    U161=(Vn6./Vd6);
elseif y==7,
    Vn7=U161.*Zop;
    Vd7=Zop.*cosh(gg.*a(y))+Zee2.*sinh(gg.*a(y));
    U171=(Vn7./Vd7);
end
end
Vn8=U171.*Z02;
Vd8=Z02.*cosh(gk.*ap2)+Z2.*sinh(gk.*ap2);
U181=Vn8./Vd8;
for K=1:1:id
    c1=Zo2(K).*vv2(K);
    C2=(c1.*vv2(K).*KKr2(K)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nd(K));
    c=c1+j.*C2;
    Ko=W./vv2(K);
    K1=KKr2(K).*((f./fr).^Nd(K));
    gy=(K1+j.*(Ko));
    ZR2=c.*gy./(j.*W);
    if K==1,
        if K==id,
            Z12=ZD;
        end
        Vn9=U181.*ZR2;
        Vd9=ZR2.*cosh(gy.*aa2(K))+Z12.*sinh(gy.*aa2(K));
        U191=(Vn9./Vd9);
    elseif K==2,

```

```

    if K==id,
        Z13=ZD;
    end
    Vn10=U191.*ZR2;
    Vd10=ZR2.*cosh(gy.*aa2(K))+Z13.*sinh(gy.*aa2(K));
    U201=(Vn10./Vd10);
elseif K==3,
    if K==id,
        Z14=ZD;
    end
    Vn11=U201.*ZR2;
    Vd11=ZR2.*cosh(gy.*aa2(K))+Z14.*sinh(gy.*aa2(K));
    U211=(Vn11./Vd11);
elseif K==4,
    if K==id,
        Z15=ZD;
    end
    Vn12=U211.*ZR2;
    Vd12=ZR2.*cosh(gy.*aa2(K))+Z15.*sinh(gy.*aa2(K));
    U221=(Vn12./Vd12);
end
end
end
%*****
%*      ALGORITME DE CALCUL DU DEUXIEME CAS      *
%*      TENSION DU TRANSDUCTEUR 1 NULLE (V=0)    *
%*****
c10=ZF1.*ve;
CH=(c10.*ve.*Krr./(f.*pi)).*((f./fr).^Nn);
c1=c10+j.*CH;
K00=W./ve;
K10=Krr.*((f./fr).^Nn);
go1=(K10+j.*(K00));
%Z011=(ZF1.*(1+j.*(C20./(2.*c1))));
Z011=c1.*go1./(j.*W);

```

```

Zn1=(ZA1+Z011.*tanh(go1.*ap)).*Z011;
Zd1=(Z011+ZA1.*tanh(go1.*ap));
Zee1=Zn1./Zd1;
ZA11=Zee1;
%*****
%**CALCUL DE L'IMPEDANCE A GAUCHE DU PIEZO 2 (V1=0)**
%*****
for K=1:1:i;
    c11=Zo(K).*v(K);
    C22=(c11.*v(K)*Kr(K)./(f.*pi)).*((f./fr2).^Np(K));
    CD=(c11+j.*C22);
    Koa=W./v(K);
    K1a=Kr(K).*((f./fr2).^Np(K));
    ga=(K1a+j.*(Koa));
    X=CD.*ga;
    P=j.*W;
    Zoo=X./P;
    NUNa=(ZA11+Zoo.*tanh(ga.*a(K))).*Zoo;
    DENa=(Zoo+ZA11.*tanh(ga.*a(K)));
    if K==1,
        Za20=NUNa./DENa;
        ZA11=Za20;
    elseif K==2,
        Za19=NUNa./DENa;
        ZA11=Za19;
    elseif K==3,
        Za18=NUNa./DENa;
        ZA11=Za18;
    elseif K==4,
        Za17=NUNa./DENa;
        ZA11=Za17;
    elseif K==5,
        Za16=NUNa./DENa;
        ZA11=Za16;
    elseif K==6,

```



```

    Za15=NUNa./DENa;
    ZA11=Za15;
elseif K==7,
    Za14=NUNa./DENa;
    ZA11=Za14;
end
end
c1o=ZP2*v2;
C20=(c1o.*v2.*Kr2./(f.*pi)).*((f./fr2).^N2);
c=c1o+j.*C20;
K00=W./v2;
K10=Kr2.*((f./fr2).^N2);
go=(K10+j.*(K00));
Z02=c.*go./(j*W);
F1=Z02.*cosh(go.*ap2)./sinh(go.*ap2);
F2=Z02./sinh(go.*ap2);
K2=h2./(j.*W.*A2);
%*****
%Calcul de l'impédance *
%*****
%Numérateur de l'impédance première partie *
%*****
N=(K2.^2).*(Z2+ZA11-2*(F2-F1))*A2;
%*****
%Dénominateur de l'impédance première partie *
%*****
D=F2.^2-F1.^2-Z2.*ZA11-F1.*(Z2+ZA11);
%*****
ZE2=(N./D-j./(W.*Co2));
ZZ2=abs(ZE2);
%*****
%*Expressions de la vitesse acoustique *
%*****
G11=((F1-F2+Z2).*K2./D);
G21=((F2-F1-ZA11).*K2./D);

```

```

U172=(G11.*Vs./ZE2);
U182=(G21.*Vs./ZE2);
%*****
%*CALCUL DE LA VITESSE ACOUSTIQUE SUR CHAQUE FACE DROITE *
%*****
for H=1:1:id;
    cc1=Zo2(H).*vv2(H);
    CC2=(cc1.*vv2(H).*KKr2(H)./(f.*pi)).*((f./fr2).^Nd(H));
    ck=cc1+j.*CC2;
    KKo=W./vv2(H);
    KK1=KKr2(H).*((f./fr2).^Nd(H));
    gg=(KK1+j.*KKo);
    Zoo=ck.*gg./(j*W);
    if H==1,
        if H==id,
            Z12=ZD;
        end
        Un1=U182.*Zoo;
        Ud1=Zoo.*cosh(gg.*aa2(H))+Z12.*sinh(gg.*aa2(H));
        U192=Un1./Ud1;
    elseif H==2,
        if H==id,
            Z13=ZD;
        end
        Un2=U192.*Zoo;
        Ud2=Zoo.*cosh(gg.*aa2(H))+Z13.*sinh(gg.*aa2(H));
        U202=(Un2./Ud2);
    elseif H==3,
        if H==id,
            Z14=ZD;
        end
        Un3=U202.*Zoo;
        Ud3=Zoo.*cosh(gg.*aa2(H))+Z14.*sinh(gg.*aa2(H));
        U212=(Un3./Ud3);
    elseif H==id,

```

```

    if H==id,
        Z15=ZD;
    end
    Un4=U212.*Zoo;
    Ud4=Zoo.*cosh(gg.*aa2(H))+Z15.*sinh(gg.*aa2(H));
    U222=(Un4./Ud4);
end
end
end
%*****
%*ALGORITHME DE CALCUL POUR LES VITESSES À GAUCHE DU PIÉZO 2*
%*****
for K=i:-1:1;
    c1=Zo(K).*v(K);
    CC2=(c1.*v(K).*Kr(K)./(f.*pi)).*((f./fr).^Np(K));
    c=c1+j.*CC2;
    KKo=W./v(K);
    KK1=Kr(K).*((f./fr).^Np(K));
    gg=(KK1+j.*KKo);
    Zoo=c.*gg./(j.*W);
    if K==7,
        Vn=U172.*Zoo;
        Vd=Zoo.*cosh(gg.*a(K))+Za15.*sinh(gg.*a(K));
        U162=(Vn./Vd);
    elseif K==6,
        Vn=U162.*Zoo;
        Vd=Zoo.*cosh(gg.*a(K))+Za16.*sinh(gg.*a(K));
        U152=Vn./Vd;
    elseif K==5,
        Vn=U152.*Zoo;
        Vd=Zoo.*cosh(gg.*a(K))+Za17.*sinh(gg.*a(K));
        U142=Vn./Vd;
    elseif K==4,
        Vn=U142.*Zoo;
        Vd=Zoo.*cosh(gg.*a(K))+Za18.*sinh(gg.*a(K));

```

```

    U132=Vn./Vd;
elseif K==3,
    Vn=U132.*Zoo;
    Vd=Zoo.*cosh(gg.*a(K))+Za19.*sinh(gg.*a(K));
    U122=(Vn./Vd);
elseif K==2,
    Vn=U122.*Zoo;
    Vd=Zoo.*cosh(gg.*a(K))+Za20.*sinh(gg.*a(K));
    U112=(Vn./Vd);
elseif K==1
    Vn=U112.*Zoo;
    Vd=Zoo.*cosh(gg.*a(K))+Zee1.*sinh(gg.*a(K));
    U102=(Vn./Vd);
end
end
Vn=U102.*Z011;
Vd=Z011.*cosh(go1.*ap)+ZA1.*sinh(go1.*ap);
U92=(Vn./Vd);
for K=1:1:ia;
    c1=Zao(K).*va(K);
    C2=(c1.*va(K).*Kra(K)./(f.*pi)).*((f./fr2).^Nap(K));
    c=c1+j.*C2;
    Ko=W./va(K);
    K1=Kra(K).*((f./fr2).^Nap(K));
    g=(K1+j.*(Ko));
    Zoo=c.*g./(j.*W);
    if K==1
        Vn=U92.*Zoo;
        Vd=Zoo.*cosh(g.*aa(K))+Za2.*sinh(g.*aa(K));
        U82=(Vn./Vd);
    elseif K==2,
        if K==ia,
            Za3=ZM;
        end
        Vn=U82.*Zoo;

```

```

Vd=Zoo.*cosh(g.*aa(K))+Za3.*sinh(g.*aa(K));
U72=(Vn./Vd);
elseif K==3,
    if K==ia,
        Za4=ZM;
    end
    Vn=U72.*Zoo;
    Vd=Zoo.*cosh(g.*aa(K))+Za4.*sinh(g.*aa(K));
    U62=(Vn./Vd);
elseif K==4,
    if K==ia,
        Za5=ZM;
    end
    Vn=U62.*Zoo;
    Vd=Zoo.*cosh(g.*aa(K))+Za5.*sinh(g.*aa(K));
    U52=(Vn./Vd);
end
end
end
end
%*****
%*ALGORITHME DE CALCUL POUR VITESSES À GAUCHE DU PIÉZO 1. *
%*****
j=sqrt(-1);
for K=1:1:ia;
    c1=Zao(K).*va(K);
    CC2=(c1.*va(K).*Kra(K)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nap(K));
    c=c1+j.*CC2;
    KKo=W./va(K);
    KK1=Kra(K).*((f./fr).^Nap(K));
    gg=(KK1+j.*KKo);
    Zoo=c.*gg./(j*W);
    if K==1,
        Vn=U91.*Zoo;
        Vd=Zoo.*cosh(gg.*aa(K))+Za2.*sinh(gg.*aa(K));

```

```

    U81=(Vn./Vd);
elseif K==2,
    if K==ia,
        Za3=ZM;
    end
    Vn=U81.*Zoo;
    Vd=Zoo.*cosh(gg.*aa(K))+Za3.*sinh(gg.*aa(K));
    U71=(Vn./Vd);
elseif K==3,
    if K==ia,
        Za4=ZM;
    end
    Vn=U71.*Zoo;
    Vd=Zoo.*cosh(gg.*aa(K))+Za4.*sinh(gg.*aa(K));
    U61=(Vn./Vd);
elseif K==4,
    if K==ia
        Za5=ZM;
    end
    Vn=U61.*Zoo;
    Vd=Zoo.*cosh(gg.*aa(K))+Za5.*sinh(gg.*aa(K));
    U51=(Vn./Vd);
end
end
end
%*****
%** THÉORÈME DE SUPERPOSITION  *
%*****
U5=abs(U51+U52);
U6=abs(U61+U62);
U7=abs(U71+U72);
U8=abs(U81+U82);
U9=abs(U91+U92);
U10=abs(U101+U102);
U11=abs(U111+U112);
U12=abs(U121+U122);

```

```

U13=abs(U131+U132);
U14=abs(U141+U142);
U15=abs(U151+U152);
U16=abs(U161+U162);
U17=abs(U171+U172);
U18=abs(U181+U182);
U19=abs(U191+U192);
U20=abs(U201+U202);
U21=abs(U211+U212);
U22=abs(U221+U222);
U1A=U91+U92;
U1B=U101+U102;
U2A=U171+U172;
U2B=U181+U182;
Vs=1;
%*****
%* CALCUL DES IMPÉDANCES DES TRANSDUCTEURS *
%*****
I1=j.*W.*Co.*(Vs-h.*(U1A-U1B)./(j.*W));
I2=j.*W.*Co2.*(Vs-h2.*(U2A-U2B)./(j.*W));
Ze1=Vs./I1;
Ze2=Vs./I2;
Z=Vs./(I1+I2);
X=length(f);
A=0;
for I=1:1:X
    A=A+1;
    if real(Z(A))<0
        Z1(A)=conj(Z(A));
        Z1(A)=-Z1(A);
    else
        Z1(A)=Z(A);
    end
end
%*****

```

```

%* IMPÉDANCE DU RÉSONATEUR *
%*****
ZZe1=abs(Ze1);
ZZe2=abs(Ze2);
ZRT=abs(Z1);
XA=180.*(angle(Z1))./pi;
npt=length(f);
D=ZZ1(2)-ZZ1(1);
if D>0
    Mn=[ZZ1(1);f(1)];
    Mx=[];
else
    Mx=[ZZ1(1);f(1)];
    Mn=[];
end
I=2;
while I+1<npt
    D=ZZ1(I+1)-ZZ1(I);
    Max=[];
    while D>0 & I+1<npt
        Max=[ZZ1(I+1);f(I+1)];
        I=I+1;
        D=ZZ1(I+1)-ZZ1(I);
    end
    if I+1==npt
        Mx=[[Mx] [ZZ1(I+1);f(I+1)]];
    else
        Mx=[Mx Max];
        Min=[];
        while D<0 & I+1<npt
            Min=[ZZ1(I+1);f(I+1)];
            I=I+1;
            D=ZZ1(I+1)-ZZ1(I);
        end
        if I+1==npt

```



```
Mn=[[Mn] [ZZ1(I+1);f(I+1)]];
else
Mn=[Mn Min];
end
end
end
D=ZZ2(2)-ZZ2(1);
if D>0
Mn1=[ZZ2(1);f(1)];
Mx1=[];
else
Mx1=[ZZ2(1);f(1)];
Mn1=[];
end
I=2;
while I+1<npt
D=ZZ2(I+1)-ZZ2(I);
Max1=[];
while D>0 & I+1<npt
Max1=[ZZ2(I+1);f(I+1)];
I=I+1;
D=ZZ2(I+1)-ZZ2(I);
end
if I+1==npt
Mx1=[[Mx1] [ZZ2(I+1);f(I+1)]];
else
Mx1=[Mx1 Max1];
Min1=[];
while D<0 & I+1<npt
Min1=[ZZ2(I+1);f(I+1)];
I=I+1;
D=ZZ2(I+1)-ZZ2(I);
end
if I+1==npt
Mn1=[[Mn1] [ZZ2(I+1);f(I+1)]];
end
```

```

    else
      Mn1=[Mn1 Min1];
    end
  end
end
D=ZRT(2)-ZRT(1);
if D>0
  Mn2=[ZRT(1);f(1)];
  Mx2=[];
else
  Mx2=[ZRT(1);f(1)];
  Mn2=[];
end
I=2;
while I+1<npt
  D=ZRT(I+1)-ZRT(I);
  Max2=[];
  while D>0 & I+1<npt
    Max2=[ZRT(I+1);f(I+1)];
    I=I+1;
    D=ZRT(I+1)-ZRT(I);
  end
  if I+1==npt
    Mx2=[[Mx2] [ZRT(I+1);f(I+1)]];
  else
    Mx2=[Mx2 Max2];
    Min2=[];
    while D<0 & I+1<npt
      Min2=[ZRT(I+1);f(I+1)];
      I=I+1;
      D=ZRT(I+1)-ZRT(I);
    end
    if I+1==npt
      Mn2=[[Mn2] [ZRT(I+1);f(I+1)]];
    else

```

```

    Mn2=[Mn2 Min2];
    end
    end
end
[m,n]=size(Mx);
[qq,q]=size(Mn);
[r,s]=size(Mx1);
[t,d]=size(Mn1);
[n3,n1]=size(Mx2);
[q4,q1]=size(Mn2);
for Tr=1:1:100
    clg
    hold off
    fprintf(' *****\n')
    fprintf(' * UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS RIVIÈRES * \n')
    fprintf(' * LABORATOIRE D"ULTRASONIQUE ET CAPTEURS * \n')
    fprintf(' * RÉSONATEUR ULTRASONORE: 2 PIÉZOS * \n')
    fprintf('*****\n')
    fprintf('* RÉSULTATS GRAPHIQUES IMPÉDANCE ET VITESSE * \n')
    fprintf('*****\n')
    fprintf('* 1.-IMPÉDANCE ÉLECTRIQUE TRANSDUCTEUR 1 * \n')
    fprintf('* 2.-IMPÉDANCE ÉLECTRIQUE TRANSDUCTEUR 2 * \n')
    fprintf('* 3.-IMPÉDANCE ÉLECTRIQUE RÉSONATEUR * \n')
    fprintf('* 4.-ARG. IMPÉDANCE ÉLECT.RÉSONATEUR * \n')
    fprintf('* 5.-SUPERPOSITION GRAPHIQUES IMPÉDANCES * \n')
    fprintf('* 6.-VITESSES ACOUSTIQUES AUX DIVERSES INT. * \n')
    fprintf('* 7.-PLUSIEURS GRAPHIQUES SUR L-ÉCRAN * \n')
    fprintf('* 8.-VALEURS MAX-MIN DES IMPÉDANCES * \n')
    fprintf('*****\n')
    WW=input('CHOISIR 1.....8 ET " 0 " POUR SORTIR=')
    if WW==0
        fprintf('FIN DE CALCUL\n')
        break
    elseif WW==8
        for K=1:1:n

```

```
fprintf('*****\n')
fprintf('* MAX.IMPÉDANCE ÉLECT.TRANSDUCTEUR 1*\n')
fprintf('*****\n')
fprintf('VALEUR MaxZ1=%e\n',Mx(1,K))
fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mx(2,K))
fprintf('*****\n')
end
pause
for R=1:1:q
    fprintf('*****\n')
    fprintf('* MIN.IMPÉDANCE ÉLECT.TRANSDUCTEUR 1*\n')
    fprintf('*****\n')
    fprintf('VALEUR MinZ1=%e\n',Mn(1,R))
    fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mn(2,R))
    fprintf('*****\n')
end
end
pause
for T=1:1:s
    fprintf('*****\n')
    fprintf('* MAX.IMPÉDANCE ÉLECT.TRANSDUCTEUR 2*\n')
    fprintf('*****\n')
    fprintf('VALEUR MaxZ2=%e\n',Mx1(1,T))
    fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mx1(2,T))
    fprintf('*****\n')
end
end
pause
for Q=1:1:d
    fprintf('*****\n')
    fprintf('* MIN.IMPÉDANCE ÉLECT.TRANSDUCTEUR 2*\n')
    fprintf('*****\n')
    fprintf('VALEUR MinZ2=%e\n',Mn1(1,Q))
    fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mn1(2,Q))
    fprintf('*****\n')
end
end
pause
```

```

for W=1:1:n1
    fprintf('*****\n')
    fprintf('* MAX. IMPÉDANCE ÉLECT. RÉSONATEUR *\n')
    fprintf('*****\n')
    fprintf('VALEUR MaxZt=%e\n',Mx2(1,W))
    fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mx2(2,W))
    fprintf('*****\n')
end
pause
for F=1:1:q1
    fprintf('*****\n')
    fprintf('* MIN.IMPÉDANCE ÉLECT.RÉSONATEUR *\n')
    fprintf('*****\n')
    fprintf('VALEUR MinZt=%e\n',Mn2(1,F))
    fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mn2(2,F))
    fprintf('*****\n')
end
pause
elseif WW==1
    semilogy(f,ZZ1,'g')
    title('IMPÉDANCE ÉLECTRIQUE TRANSDUCTEUR 1')
    xlabel('FRÉQUENCE EN Hz')
    ylabel('IMPÉDANCE EN Ohms')
    pause
elseif WW==2
    semilogy(f,ZZ2,'g')
    title('IMPÉDANCE ÉLECTRIQUE TRANSDUCTEUR 2')
    xlabel('FRÉQUENCE EN Hz')
    ylabel('IMPÉDANCE EN Ohms')
    pause
elseif WW==3
    semilogy(f,ZRT,'g')
    title('IMPÉDANCE ÉLECTRIQUE RÉSONATEUR')
    xlabel('FRÉQUENCE EN Hz')
    ylabel('IMPÉDANCE EN Ohms')

```

```
    pause
elseif WW==4
    plot(f,XA,'g')
    title('ARG.IMPÉDANCE RÉSONATEUR')
    xlabel('FRÉQUENCE EN Hz')
    ylabel('ARG. EN DEGRÉS')
    pause
elseif WW==5
    semilogy(f,ZRT,f,ZZ1,f,ZZ2)
    title('IMP. ÉLECT. DES TRANSD. 1 ET 2 ET DU RÉSONATEUR')
    xlabel('FRÉQUENCE EN Hz')
    ylabel('IMPÉDANCE EN Ohms')
    pause
elseif WW==6
    b=input('QUELLE VITESSE ACOUSTIQUE=')
    clg
    hold off
    if b==10
        U=U10;
        semilogy(f,U10,'g')
        title('VITESSE ACOUSTIQUE U10 À DROITE DU PIÉZO 1')
        xlabel('FRÉQUENCE EN Hz')
        ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
        pause
    elseif b==11
        U=U11;
        semilogy(f,U11,'g')
        title('VITESSE ACOUSTIQUE U11 À DROITE DU PIÉZO 1')
        xlabel('FRÉQUENCE EN Hz')
        ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
        pause
    elseif b==12
        U=U12;
        semilogy(f,U12,'g')
        title('VITESSE ACOUSTIQUE U12 À DROITE DU PIÉZO 1')
```

```
xlabel('FRÉQUENCE EN Hz')
ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
pause
elseif b==13
    U=U13;
    semilogy(f,U13,'g')
    title('VITESSE ACOUSTIQUE U13 À DROITE DU PIÉZO 1')
    xlabel('FRÉQUENCE EN Hz')
    ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
    pause
elseif b==14
    U=U14;
    semilogy(f,U14,'g')
    title('VITESSE ACOUSTIQUE U14 À DROITE DU PIÉZO 2')
    xlabel('FRÉQUENCE EN Hz')
    ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
    pause
elseif b==15
    U=U15;
    semilogy(f,U15,'g')
    title('VITESSE ACOUSTIQUE U15 À DROITE DU PIÉZO 2')
    xlabel('FRÉQUENCE EN Hz')
    ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
    pause
elseif b==16
    U=U16;
    semilogy(f,U16,'g')
    title('VITESSE ACOUSTIQUE U16 À DROITE DU PIÉZO 2')
    xlabel('FRÉQUENCE EN Hz')
    ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
    pause
elseif b==17
    U=U17;
    semilogy(f,U17,'g')
    title('VITESSE ACOUSTIQUE U17 À DROITE DU PIÉZO 2')
```

```
xlabel('FRÉQUENCE EN Hz')
ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
pause
elseif b==18
    U=U18;
    semilogy(f,U18,'g')
    title('VITESSE ACOUSTIQUE U18 À DROITE DU PIÉZO 2')
    xlabel('FRÉQUENCE EN Hz')
    ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
    pause
elseif b==5
    U=U5;
    semilogy(f,U5,'g')
    title('VITESSE ACOUSTIQUE U5')
    xlabel('FRÉQUENCE EN Hz')
    ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
    pause
elseif b==6
    U=U6;
    semilogy(f,U6,'g')
    title('VITESSE ACOUSTIQUE U6')
    xlabel('FRÉQUENCE EN Hz')
    ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
    pause
elseif b==7
    U=U7;
    semilogy(f,U7,'g')
    title('VITESSE ACOUSTIQUE U7')
    xlabel('FRÉQUENCE EN Hz')
    ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
    pause
elseif b==8
    U=U8;
    semilogy(f,U8,'g')
    title('VITESSE ACOUSTIQUE U8')
```



```
xlabel('FRÉQUENCE EN Hz')
ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
pause
elseif b==9
    U=U9;
    semilogy(f,U9,'g')
    title('VITESSE ACOUSTIQUE U9')
    xlabel('FRÉQUENCE EN Hz')
    ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
    pause
end
NN=input('VOUS VOULEZ LES MAX-MIN DE LA VITESSE(1/0)=')
if NN==1
    fprintf('*****\n')
    fprintf('*   CALCUL EN COURS   *\n')
    fprintf('*****\n')
    npt=length(f);
    D3=U(2)-U(1);
    if D>0
        Mn3=[U(1);f(1)];
        Mx3=[];
    else
        Mx3=[U(1);f(1)];
        Mn3=[];
    end
    end
    I=2;
    while I+1<npt
        D3=U(I+1)-U(I);
        Max3=[];
        while D3>0 & I+1<npt
            Max3=[U(I+1);f(I+1)];
            I=I+1;
            D3=U(I+1)-U(I);
        end
        if I+1==npt
```

```

    Mx3=[[Mx3] [U(I+1);f(I+1)]];
else
    Mx3=[Mx3 Max3];
    Min3=[];
    while D3<0 & I+1<npt
        Min3=[U(I+1);f(I+1)];
        I=I+1;
        D3=U(I+1)-U(I);
    end
    if I+1==npt
        Mn3=[[Mn3] [U(I+1);f(I+1)]];
    else
        Mn3=[Mn3 Min3];
    end
end
end

[K,L]=size(Mx3);
[M,N]=size(Mn3);
for R=1:1:L
    fprintf('*****\n')
    fprintf('*   VALEURS MAX. DE LA VITESSE   *\n')
    fprintf('* *****\n')
    fprintf('Valeur MaxZ=%e\n',Mx3(1,R))
    fprintf('Valeur Freq=%e\n',Mx3(2,R))
    pause
end
for R=1:1:N
    fprintf('*****\n')
    fprintf('*   VALEURS MIN. DE LA VITESSE   *\n')
    fprintf('* *****\n')
    fprintf('Valeur MinZ=%e\n',Mn3(1,R))
    fprintf('Valeur Freq=%e\n',Mn3(2,R))
    pause
end
elseif NN==0

```

```
KK=input('UNE AUTRE VITESSE(1/0)=')
if KK==0
    break
    fprintf('FIN DE CALCUL\n')
end
end
elseif WW==7
    subplot(221),semilogy(f,ZZ1,'g')
    title('Imp. du piezo 1')
    xlabel('Freq. en Hz')
    ylabel('Imp. en Ohms')
    subplot(222),semilogy(f,ZZ2)
    title('Imp. du piezo 2')
    xlabel('freq. en Hz')
    ylabel('Imp. en Ohms')
    subplot(223),semilogy(f,ZRT,'b')
    title('Imp. du transducteur')
    xlabel('Freq. en Hz')
    ylabel('Imp. en Ohms')
    subplot(224),plot(f,XA,'w')
    title('Arg. du transducteur')
    xlabel('Freq. en Hz')
    ylabel('Arg. en degres')
    pause
    clg
    hold off
    subplot(221),semilogy(f,U7,'g')
    title('Vitesse U7')
    xlabel('Freq. en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
    subplot(222),semilogy(f,U8,'g')
    title('Vitesse U8')
    xlabel('Freq. en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
    subplot(223),semilogy(f,U9)
```

```
title('Vitesse U9')
xlabel('Freq. en Hz')
ylabel('Vitesse en m/s')
subplot(224),semilogy(f,U10,'b')
title('Vitesse U10')
xlabel('Freq. en Hz')
ylabel('Vitesse en m/s')
pause
clg
hold off
subplot(221),semilogy(f,U11,'g')
title('Vitesse U11')
xlabel('Freq. en Hz')
ylabel('Vitesse en m/s')
subplot(222),semilogy(f,U12,'g')
title('Vitesse U12')
xlabel('Freq. en Hz')
ylabel('Vitesse en m/s')
subplot(223),semilogy(f,U13,'g')
title('Vitesse U13')
xlabel('Freq. en Hz')
ylabel('Vitesse en m/s')
subplot(224),semilogy(f,U14,'g')
title('Vitesse U14')
xlabel('Freq. en Hz')
ylabel('Vitesse en m/s')
pause
clg
hold off
subplot(221),semilogy(f,U15,'g')
title('Vitesse U15')
xlabel('Freq. en Hz')
ylabel('Vitesse en m/s')
subplot(222),semilogy(f,U16,'g')
title('Vitesse U16')
```



```
%*****  
*  
%* PROGRAMME DES NOUVELLES DONNÉES POUR LES PARAMÈTRES  
PIÉZOÉLECTRIQUES *  
%* POUR LE CALCUL DU TRANSDUCTEUR nouveau NOVEMBRE 93 F.G.  
novtra17.m *  
%*****  
*  
clear  
hold off  
%*****DONNÉES PIEZO 1*****  
ap=8.120e-3;  
A=92.16E-4;  
Co=7.13e-9;  
h=2.22e9;  
vv=3525;  
Z1o=2.6878e7;  
fr=100E3;  
Krr=2.6;  
Nn=1.5;  
V=1;  
fi=70e3;  
fs=100e3;  
ni=900;  
E=2;  
ZA1=400;  
Z1=400;  
ZM=400;  
i=2;  
ia=2;  
%**** COUCHE 8 *****  
Zao(2)=3.183e7;  
aa(2)=3.12e-3;  
va(2)=3480;  
Kra(2)=2;  
Nap(2)=1.50;
```

```
%**** COUCHE 9 ****
Zao(1)=3e6;
aa(1)=45e-6;
va(1)=2500;
Kra(1)=20;
Nap(1)=1.5;
%***** COUCHE 11 *****
Zo(1)=3E6;
a(1)=12e-6;
v(1)=2500;
Kr(1)=20;
Np(1)=1.5;
%***** COUCHE 12 *****
Zo(2)=3.000e7;
a(2)=5.99e-3;
v(2)=3480;
Kr(2)=2;
Np(2)=1.5;
T=input('VOUS VOULEZ FAIRE LA SIMULATION OU QUITTER (1/0)=')
if T==1,
    projet
end
if T==0,
    Q=input('VOUS VOULEZ SORTIR DU PROGRAMME OU NON(1/0)=')
end
if Q==0,
    novtra17
end
if Q==1
    break
end
```

```
%*****  
*  
%* PROGRAMME DES NOUVELLES DONNÉES POUR LES PARAMÈTRES  
PIÉZOÉLECTRIQUES *  
%* POUR LE CALCUL DU TRANSDUCTEUR nouveau NOVEMBRE 93 F.G.  
novtra18.m *  
%*****  
*  
clear  
hold off  
%*****DONNÉES PIÉZO 1*****  
ap=8.1244e-3;  
A=92.16E-4;  
Co=7.49e-9;  
h=2.325e9;  
vv=3535;  
Z1o=27092505;  
fr=100E3;  
Krr=1.6;  
Nn=1.5;  
V=1;  
fi=70e3;  
fs=100e3;  
ni=600;  
E=2;  
ZA1=400;  
Z1=400;  
ZM=400;  
i=2;  
ia=2;  
%**** COUCHE 8 *****  
Zao(2)=3.184e7;  
aa(2)=3.1423e-3;  
va(2)=3480;  
Kra(2)=2;
```



```
Nap(2)=1.5;
%**** COUCHE 9 ****
Zao(1)=3e6;
aa(1)=87.9e-6;
va(1)=2500;
Kra(1)=20;
Nap(1)=1.5;
%**** COUCHE 11 ****
Zo(1)=3E6;
a(1)=20.4e-6;
v(1)=2500;
Kr(1)=20;
Np(1)=1.5;
%**** COUCHE 12 ****
Zo(2)=3.000e7;
a(2)=5.9544e-3;
v(2)=3480;
Kr(2)=2;
Np(2)=1.5;
T=input('VOUS VOULEZ FAIRE LA SIMULATION OU QUITTER (1/0)=')
if T==1,
    projet      (*)
end
if T==0,
    Q=input('VOUS VOULEZ SORTIR DU PROGRAMME OU NON(1/0)=')
end
if Q==0,
    novtra18
end
if Q==1,
    break
end
```

(*) Ernesto Cornieles, «Étude théorique et expérimentale d'un résonateur ultrasonore composé: développement d'un logiciel basé sur l'analogie des lignes électriques», mémoire de maîtrise, UQTR, novembre 1992.

```
%*****  
*  
%* PROGRAMME DES NOUVEAUX DONNÉES POUR LES PARAMÈTRES *  
%* PIÉZOÉLECTRIQUES POUR LE CALCUL DU RÉSONATEUR T17 // T18. *  
%* LABO. D'ULTRASONIQUE ET CAPTEURS. Novembre 1993. N0VTRES.M F.G.  
*  
%*****  
*  
clear  
hold off  
%*****DONNÉES PIÉZO 1*****  
ap=8.12e-3;  
A=9.216e-3;  
Co=7.13e-9;  
h=2.22e9;  
vv=3525;  
Z1o=2.6878e7;  
ZF1=2.135e7;  
fr=100E3;  
Krr=2.6;  
Nn=1.5;  
Vs=1;  
%*****DONNÉES PIÉZO 2*****  
ap2=8.1244e-3;  
A2=9.216e-3;  
Co2=7.49e-9;  
h2=2.325e9;  
v2=3535;  
ZP2=2.70925e7;  
ZF2=2.146e7;  
fr2=100e3;  
Kr2=1.8;  
N2=1.5;  
fi=70e3;  
fs=10e4;
```

```
R=1;
X=1;
ZD=400;
ZA1=400;
Z2=400;
ZM=400;
ik=7;
i=7;
id=2;
ia=2;
ve=2800;
T=input('température de l'eau en degrés Celsius= ');
vse=1402.736+(5.03358*T)-(0.0579506*T^2)+(3.31636e-4*T^3)-(1.45262e-6*T^4)
+(3.0449e-9*T^5)
%**COUCHE 8***
Zao(2)=3.184e7;
aa(2)=3.12e-3;
va(2)=3480;
Kra(2)=2;
Nap(2)=1.5;
%**COUCHE 9***
Zao(1)=3e6;
aa(1)=45e-6;
va(1)=2500;
Kra(1)=20;
Nap(1)=1.5;
%**COUCHE 11**
Zo(1)=3e6;
a(1)=12e-6;
v(1)=2500;
Kr(1)=20;
Np(1)=1.5;
%**COUCHE 12**
Zo(2)=3.0e7;
```

a(2)=5.99e-3;
v(2)=3480;
Kr(2)=2;
Np(2)=1.5;
%**COUCHE 13**
Zo(3)=vse*998;
a(3)=12.573e-3;
v(3)=vse;
Kr(3)=2.25;
Np(3)=1.5;
%**COUCHE 14**
Zo(4)=vse*998;
a(4)=8.382e-3;
v(4)=vse;
Kr(4)=2.25;
Np(4)=1.5;
%**COUCHE 15**
Zo(5)=vse*998;
a(5)=12.573e-3;
v(5)=vse;
Kr(5)=2.25;
Np(5)=1.5;
%**COUCHE 16**
Zo(6)=3.0e7;
a(6)=5.9544e-3;
v(6)=3480;
Kr(6)=2;
Np(6)=1.5;
%**COUCHE 17**
Zo(7)=3e6;
a(7)=20.4e-6;
v(7)=2500;
Kr(7)=20;
Np(7)=1.5;

```
%**COUCHE 19**  
Zo2(1)=3e6;  
aa2(1)=87.9e-6;  
vv2(1)=2500;  
KKr2(1)=20;  
Nd(1)=1.5;  
%**COUCHE 20**  
Zo2(2)=3.184e7;  
aa2(2)=3.1423e-3;  
vv2(2)=3480;  
KKr2(2)=2;  
Nd(2)=1.5;  
T=input('VOUS VOULEZ FAIRE LA SIMULATION OU QUITTER (1/0)=')  
if T==1,  
    juinmem  
end  
if T==0,  
    break  
end
```

```
%*****
%*PROGRAMME DE DONNÉES POUR LES PARAMÈTRES PIÉZOÉLECTRIQUES *
%*   POUR LA SIMULATION DE T16. OCTOBRE 93 F.G. OCTRA16.m   *
%*****

clear
hold off
%*****DONNÉES DU PIÉZO *****
ap=8.120e-3;
A=92.16E-4;
Co=7.4e-9;
h=2.3e9;
vv=3462;
Z1o=2.65e7;
fr=100E3;
Krr=3.2;
Nn=1.5;
V=1;
fi=70e3;
fs=100e3;
ni=600;
E=2;
ZA1=400;
Z1=400;
%ZM=Z1;
ZM=400;
i=2;
ia=2;
%**** COUCHE 8 *****
Zao(2)=3.184e7;
aa(2)=3.15e-3;
va(2)=3480;
Kra(2)=2.5;
Nap(2)=1.50;
%**** COUCHE 9 *****
Zao(1)=3e6;
```

```
%*****  
%PROGRAMME DE DONNÉES POUR LES PARAMÈTRES PIÉZOÉLECTRIQUES *  
% POUR LE CALCUL DU RÉSONATEUR T16//T17. Octobre 93 OCTRES.M.F.G. *  
%*****  
*  
clear  
hold off  
%*****DONNÉES PIÉZO 1*****  
ap=8.123e-3;  
A=9.216e-3;  
Co=7.4e-9;  
h=2.3e9;  
vv=3462;  
Z1o=2.65e7;  
ZF1=2.2882e7;  
fr=100E3;  
Krr=3.2;  
Nn=1.5;  
Vs=1;  
%*****DONNÉES PIÉZO 2*****  
ap2=8.1e-3;  
A2=9.216e-3;  
Co2=7.4e-9;  
h2=2.3e9;  
v2=3462;  
ZP2=2.65e7;  
ZF2=2.2882e7;  
fr2=100e3;  
Kr2=3.2;  
N2=1.5;  
fi=70e3;  
fs=100e3;  
ni=200;  
E=2;  
R=1;
```

```
X=1;
ZD=400;
ZA1=400;
Z2=400;
ZM=400;
ik=7;
i=7;
id=2;
ia=2;
ve=3005;
%**COUCHE 8***
Zao(2)=3.183e7;
aa(2)=3.15e-3;
va(2)=3480;
Kra(2)=2;
Nap(2)=1.5;
%**COUCHE 9***
Zao(1)=3e6;
aa(1)=45e-6;
va(1)=2500;
Kra(1)=20;
Nap(1)=1.5;
%**COUCHE 11**
Zo(1)=3e6;
a(1)=12e-6;
v(1)=2500;
Kr(1)=20;
Np(1)=1.5;
%**COUCHE 12**
Zo(2)=3.0e7;
a(2)=6.02e-3;
v(2)=3480;
Kr(2)=2;
Np(2)=1.5;
%**COUCHE 13**
```


Zo(3)=1.5e6;
a(3)=12.820655e-3;
v(3)=1483.60;
Kr(3)=.1;
Np(3)=1.5;
%**COUCHE 14**
Zo(4)=1.5e6;
a(4)=8.5471e-3;
v(4)=1483.60;
Kr(4)=.1;
Np(4)=1.5;
%**COUCHE 15**
Zo(5)=1.5e6;
a(5)=12.82065e-3;
v(5)=1483.60;
Kr(5)=.1;
Np(5)=1.5;
%**COUCHE 16**
Zo(6)=3.0e7;
a(6)=5.99e-3;
v(6)=3480;
Kr(6)=2;
Np(6)=1.5;
%**COUCHE 17**
Zo(7)=3e6;
a(7)=12e-6;
v(7)=2500;
Kr(7)=20;
Np(7)=1.5;
%**COUCHE 19**
Zo2(1)=3e6;
aa2(1)=45e-6;
vv2(1)=2500;
KKr2(1)=20;
Nd(1)=1.5;

```
%**COUCHE 20**  
Zo2(2)=3.183e7;  
aa2(2)=3.12e-3;  
vv2(2)=3480;  
KKr2(2)=2;  
Nd(2)=1.5;  
T=input('VOUS VOULEZ FAIRE LA SIMULATION OU QUITTER (1/0)=')  
if T==1,  
    juinmem  
end  
if T==0,  
    Q=input('VOUS VOULEZ SORTIR DU PROGRAMME OU NON(1/0)=')  
end  
if Q==0,  
    octres  
end  
if Q==1,  
    break  
end
```

```
%*****  
%PROGRAMME DES DONNÉES POUR LES PARAMÈTRES PIÉZOÉLECTRIQUES *  
%* POUR LE CALCUL DU TRANSDUCTEUR T14. MAI 1993. F.G. RÉSON14E.m *  
%*****  
clear  
hold off  
%*****DONNÉES PIÉZO 1*****  
ap=8.135e-3;  
A=8.96e-3;  
Co=7.46e-9;  
h=2.29e9;  
vv=3800;  
Z1o=2.906e7;  
fr=100E3;  
Krr=3.2;  
Nn=1.5;  
Vs=1;  
%*****DONNÉES PIÉZO 2*****  
ZP2=2.913e7;  
v2=3805;  
Kr2=3.2;  
fr2=100e3;  
N2=1.5;  
ap2=8.13e-3;  
h2=2.3e9;  
Co2=7.4e-9;  
A2=8.96e-3;  
fi=60e3;  
fs=100e3;  
ni=200;  
E=2;  
R=0;
```

```
X=0;
ZD=400;
ZA1=400;
Z2=400;
ZM=400;
ik=6;
i=3;
id=4;
ia=4;
ve=3005.24;
%**COUCHE 6***
Zao(4)=3.184e7;
aa(4)=3.175e-3;
va(4)=3480;
Kra(4)=2;
Nap(4)=1.5;
%**COUCHE 7***
Zao(3)=3e6;
aa(3)=0.012e-3;
va(3)=2500;
Kra(3)=20;
Nap(3)=1.5;
%**COUCHE 8***
Zao(2)=3.184e7;
aa(2)=75e-6;
va(2)=3480;
Kra(2)=2;
Nap(2)=1.5;
%**COUCHE 9***
Zao(1)=3e6;
aa(1)=0.012e-3;
va(1)=2500;
```

Kra(1)=20;
Nap(1)=1.5;
%**COUCHE 11**
Zo(1)=3e6;
a(1)=0.012e-3;
v(1)=2500;
Kr(1)=20;
Np(1)=1.5;
%**COUCHE 12**
Zo(2)=4.203e7;
a(2)=1.3e-3;
v(2)=5000;
Kr(2)=1.0;
Np(2)=1.5;
%**COUCHE 13**
Zo(3)=3e6;
a(3)=0.012e-3;
v(3)=2500;
Kr(3)=20;
Np(3)=1.5;
%**COUCHE 15**
Zo2(1)=3e6;
aa2(1)=0.012e-3;
vv2(1)=2500;
KKr2(1)=20;
Nd(1)=1.5;
%**COUCHE 16**
Zo2(2)=3.184e7;
aa2(2)=75e-6;
vv2(2)=3480;
KKr2(2)=2;
Nd(2)=1.5;