



HAL
open science

Procédé Tactile à Diffraction Ultrasonore

Yuan Liu, Nazih Mechbal

► **To cite this version:**

Yuan Liu, Nazih Mechbal. Procédé Tactile à Diffraction Ultrasonore. Mécanique des structures [physics.class-ph]. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2010. Français. NNT : 2010ENAM0049 . tel-00691531

HAL Id: tel-00691531

<https://theses.hal.science/tel-00691531v1>

Submitted on 26 Apr 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

École doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur

Doctorat ParisTech

THÈSE

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité " Automatique et Traitement du Signal "

présentée et soutenue publiquement par

Yuan LIU

le 15 Décembre 2010

Procédé Tactile à Diffraction Ultrasonore

Directeur de thèse : **Michel VERGÉ**

Co-encadrement de la thèse : **Jean-Pierre NIKOLOVSKI, Nazih MECHBAL**

Jury

Mme. Danièle FOURNIER, Professeur émérite, INSP - LPEM, UPMC
M. Stéphane HOLÉ, Maître de conférences, HDR, LPEM, UPMC
M. Jacques LEWINER, Professeur, LEG, ESPCI ParisTech
M. Ros Kiri ING, Maître de conférences, Université Denis Diderot
M. Joel Kent, Dr Ingénieur, Tyco Electronics
M. Moustapha HAFEZ, Dr., Ingénieur chercheur, CEA LIST
M. Michel VERGÉ, Professeur, PIMM, Arts et Métiers ParisTech
M. Nazih MECHBAL, Maître de conférences, PIMM, Arts et Métiers ParisTech
M. Jean-Pierre NIKOLOVSKI, Dr., Ingénieur chercheur, CEA LIST

Rapporteur
Rapporteur
Président
Invité
Invité
Invité
Examineur
Examineur
Examineur

T
H
È
S
E

Remerciements

Le travail rapporté dans ce mémoire a été effectué dans le cadre d'un co-financement BDI (Bourses de Docteur Ingénieur) entre le Centre National de la Recherche Scientifique, Laboratoire des Procédés et Ingénierie en Mécanique et Matériaux, et le Commissariat à l'Energie Atomique, Laboratoire d'Interfaces sensorielles et ambiantes. J'exprime ma gratitude aux ingénieurs chercheurs du CEA qui ont œuvré pour que cette thèse ait lieu et qui ont contribué à son bon déroulement. Je les remercie pour leur confiance et leur soutien.

J'adresse à mon directeur de thèse, Monsieur Michel Vergé, Professeur aux Arts et Métiers ParisTech et à mon co-directeur, Monsieur Nazih Mechbal, Maître de conférences aux Arts et Métiers ParisTech, mes sincères remerciements pour leur aide, leur patience et leurs encouragements. Je les remercie pour les qualités scientifiques et pédagogiques de leur encadrement et pour leur disponibilité. Je souhaite qu'ils reçoivent à travers ces lignes toutes les marques de ma reconnaissance.

J'exprime ma gratitude à Madame Danièle Fournier, Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie et à Monsieur Stéphane Holé, Maître de conférence à l'Université Pierre et Marie Curie d'avoir accepté de rapporter sur cette thèse. Je les remercie pour l'intérêt qu'ils ont accordé à cette thèse.

Je remercie Monsieur Jacques Lewiner, Professeur et Directeur scientifique honoraire de l'École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de la ville de Paris, Directeur du Laboratoire d'Electricité Générale, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury. Je le remercie pour l'intérêt qu'il a porté à ces travaux. Je remercie également Monsieur Ros Kiri Ing, Maître de conférences à l'Université Denis Diderot, et Monsieur Joel Kent, Ingénieur chercheur à Elo TouchSystems, pour avoir accepté de participer à ce jury de thèse.

Mes remerciements sont adressés à Monsieur Jean-Pierre Nikolovski, Docteur et Ingénieur Chercheur au Commissariat à l'énergie atomique, pour m'avoir accompagné pendant toutes les années de thèse à travers son encadrement, sa densité humaine et ses qualités scientifiques. Je remercie également Monsieur Moustapha Hafez, pour m'avoir engagé dans son laboratoire, je le remercie pour ses qualités humaines et sa disponibilité.

Ce travail n'aurait également pas pu se faire sans la volonté et l'efficacité des ingénieurs et chercheurs du LISA et du PIMM. Je les remercie pour leurs nombreux conseils et remarques judicieuses.

Quand aux membres de ma famille et mes amies je leur dis merci pour leur soutien ainsi que leurs encouragements sans faille et sans relâche durant mes années d'études.

TABLE DES MATIERES

Introduction	1
La technologie résistive	3
Technologie capacitive	4
Technologie à infrarouge	4
Technologie à jauges de contrainte	5
L'imagerie optique.....	5
Technologie acoustique	6
Chapitre 1. Ondes de Lamb.....	13
1.1. Définitions des paramètres.....	14
1.2. Propagation des ondes de Lamb	16
1.2.1. Equations du champ, équation du mouvement.....	16
1.2.2. Equations d' Helmholtz	18
1.2.3. Relation de dispersion ou équation de Rayleigh-Lamb	21
1.3. Caractérisation de la propagation dans les plaques minces	27
1.3.1. Mode symétrique S_0 ($\alpha=0$)	28
1.3.2. Mode antisymétrique A_0 ($\alpha=\pi/2$).....	31
1.4. Conclusion	40
Chapitre 2. Réponse en fréquence de l'interface.....	43
2.1. Introduction.....	44
2.1.1. Réponse en fréquence d'un système.....	44
2.1.2. Système de transduction et de propagation des ondes.....	44
2.2. Réponse en fréquence du système avec une plaque à bords libres	47
2.2.1. Spectre du système avec une plaque carrée.....	47
2.2.2. Fonction de transfert pour une plaque rectangulaire	51
2.3. Réponse du système avec différentes conditions aux limites	52
2.3.1. Fonction de transfert d'une plaque à bords fixes.....	53

2.3.2.	Réponse d'une plaque rigidement tenue en ses quatre coins.....	54
2.3.3.	Réponse d'une plaque partiellement pincée en ses quatre coins	57
2.3.3.1	Réponse en fréquence avec un seul émetteur	57
2.3.3.2	Réponse en fréquence avec deux émetteurs simultanés	59
2.4.	Analyse des effets non linéaires.....	62
2.4.1.	Influence de la tension d'excitation.....	62
2.4.2.	Influence de la température	63
2.4.3.	Influence du toucher	67
2.5.	Conclusion	69
 Chapitre 3. Procédé tactile à diffraction ultrasonore		71
3.1.	Description du procédé tactile.....	75
3.1.1.	Principales étapes du procédé FDPA.....	75
3.1.2.	Dispositif	76
3.2.	Principe de fonctionnement	78
3.2.1.	Etape d'apprentissage des positions.....	78
3.2.2.	Etape de surveillance	78
3.2.3.	Mesure du signal.....	80
3.2.4.	Algorithme de localisation.....	82
3.3.	Performances et Optimisations	84
3.3.1.	Performances de la localisation selon le mode d'apprentissage	84
3.3.1.1	Performances de localisation pour une surface tactile calibrée avec un doigt humain	85
3.3.1.2	Performances de localisation pour une surface tactile calibrée avec un doigt artificiel en silicone	86
3.3.2.	Méthode de fiabilisation par la double validation	87
3.3.2.1	Application à une surface calibrée avec un doigt humain	90
3.3.2.2	Application à une surface calibrée avec un doigt en silicone	91
3.3.3.	Méthode de fiabilisation basée sur la similarité en série temporelle.....	92
3.3.3.1	Performances de localisation par vecteur étendu.....	92
3.3.3.2	Critère sur la similarité dans une série temporelle.....	93

3.4.	Sélection des fréquences d'excitation et phénomène d'illumination.....	94
3.4.1.	Figure de Diffraction Perturbée en Amplitude (FDPA)	95
3.4.2.	Rapport de contraste pour une FDPA.....	97
3.4.3.	Découpage de la surface en zones de perturbations.	99
3.4.4.	Phénomène d'illumination.....	101
3.5.	Conclusion	103

Chapitre 4. Applications associées au procédé tactile 105

4.1.	Localisation des touchers multiples simultanés.....	106
4.1.1.	Procédé tactile au cas de deux touchers.....	106
4.1.2.	Performances de détection en cas de touchers multiples.....	108
4.1.3.	Gestuelle tactile et langage « multi-toucher »	110
4.2.	Coque tactile : une approche de peau sensitive	112
4.2.1.	Prototype en coque tactile.....	112
4.2.2.	Mise en place du procédé tactile.....	113
4.2.3.	Performances de la détection tactile	115
4.2.3.1	Localisation du toucher surfacique	115
4.2.3.2	Localisation du toucher ponctuel	117
4.2.3.3	Reconnaissance de la nature du toucher	118
4.2.4.	Conclusions et perspectives.....	120
4.3.	Application du procédé tactile sur un écran à cristaux liquides.....	122
4.4.	Conclusion	124

Conclusion Générale 125

Références 127

Annexe 1. Simulations des ondes de Lamb.....	i
A1.1. Vitesse de phase	i
A1.2. Vitesse de groupe	ii
A1.3. Longueur d'onde.....	iii

A1.4. Rapport entre deux composantes du déplacement..... iv

Annexe 2. Interprétation de la dynamique des touchersv

A2.1. Extrait du dépôt d'une demande de brevet v

A2.2. Extrait des figures de la demande de brevet..... viii

Table des illustrations

Figure 1.1 : Définition du plan sagittal.	14
Figure 1.2 : Vue de la plaque dans le plan sagittal.	20
Figure 1.3 : Propagation de l'onde avec $\alpha=0$, mode symétrique.....	22
Figure 1.4 : Propagation de l'onde avec $\alpha=\pi/2$, mode antisymétrique.....	23
Figure 1.5 : Evaluation du produit $k \cdot h$ entre 20 kHz et 250 kHz, pour des plaques de cuivre de différentes épaisseurs.	27
Figure 1.6 : Evaluation de la vitesse de phase de la propagation de l'onde en mode S_0 dans une plaque de cuivre d'une demi-épaisseur 175 μm , et pour une fréquence comprises entre 20 kHz et 250 kHz.	29
Figure 1.7 : Vitesses de phase en fonction des fréquences entre 20 kHz et 250 kHz, pour les plaques de cuivre de demi-épaisseurs (h) 50 μm , 175 μm et 250 μm	32
Figure 1.9 : Vitesses de groupe en fonction des fréquences entre 20 kHz et 250 kHz, pour les plaques de cuivre de demi-épaisseurs (h) 50 μm , 175 μm et 250 μm	34
Figure 1.10 : Longueur d'onde dans une plaque de cuivre en fonction de la fréquence, entre 20 kHz et 250 kHz, pour le mode A_0	36
Figure 1.11 : Interaction doigt-plaque par effet non linéaire consistant en un blocage partiel de la vibration par le doigt. A) Ventre de vibration libre. B) Cas d'interaction doigt-plaque : Pose ou glissement du doigt et blocage partiel du ventre de vibrations.	37
Figure 1.12 : Rapport entre les composantes de déplacement normale U_2 (+/-h) et tangentielle U_1 (+/-h), pour le mode A_0 de Lamb dans une plaque de cuivre.	39
Figure 2.1 : Schéma du système de transduction et de propagation des ondes de Lamb.	45
Figure 2.2 : Circuit électronique du système.	46
Figure 2.3 : Schéma de la plaque maintenue par des ressorts et des mousses.	48
Figure 2.4 : Emplacements des transducteurs PZT positionnés sur les axes de symétrie de la plaque.	48

Figure 2.5 : Fonction de transfert d'une plaque carrée : L'émetteur et le récepteur sont sur des côtés opposés. Ici, l'émetteur est en A, le récepteur en C, selon le montage de la figure 2.3.	49
Figure 2.6 : Fonction de transfert d'une plaque carrée. Emetteur et récepteur sont sur des côtés adjacents. L'émetteur est en A, le récepteur en B selon la figure 2.3.	50
Figure 2.7 : Emplacements des transducteurs PZT, positionnés en dehors des axes de symétrie de la plaque.	51
Figure 2.8 : Fonction de transfert d'une plaque rectangulaire pour un émetteur et un récepteur positionnés sur des côtés opposés. Ici l'émetteur est D , le récepteur est B	51
Figure 2.9 : Conception d'un châssis en ABS d'intégration d'une plaque à bords fixes.	53
Figure 2.10 : Emplacements des transducteurs PZT : positionnés en dehors des axes de symétrie de la plaque.	53
Figure 2.11 : Fonction de transfert d'une plaque rigidement maintenue sur son pourtour: Emetteur et récepteur sont sur des côtés opposés. L'émetteur est ici en D, le récepteur en B.	54
Figure 2.12 : Châssis de maintien d'une plaque rectangulaire en ses quatre coins.	55
Figure 2.13 : Emplacements des transducteurs PZT positionnés en dehors des axes de symétrie de la plaque.	55
Figure 2.14 : Fonction de transfert d'une plaque en cuivre maintenue en ses quatre coins. L'émetteur et le récepteur sont sur des côtés opposés. L'émetteur est en D, le récepteur en B.	56
Figure 2.15 : Fonction de transfert du système pour une plaque en cuivre : émetteur D, récepteur C.	56
Figure 2.16 : Schéma d'un châssis d'intégration à entretoises de pincement.	57
Figure 2.17 : Plaque acoustique maintenue par pincement aux quatre coins.	57
Figure 2.18 : Emplacements des transducteurs PZT : positionnés en dehors des axes de symétrie de la plaque.	58
Figure 2.19 : Réponse spectrale d'une plaque de cuivre pincée en ses 4 coins, faiblement amortie: émetteur D, récepteur B.	58
Figure 2.20 : Circuit électronique du système.	59

Figure 2.21 : Spectre du système avec une plaque en cuivre: émetteurs D+A, récepteur B.	61
Figure 2.22 : Spectre du système avec une plaque en cuivre: émetteurs D+A, récepteur C.	61
Figure 2.23 : Réponse spectrale d'une plaque en cuivre en fonction de la tension d'excitation.	62
Figure 2.24 : Schéma de la plaque acoustique intégrée dans un châssis. Un module Peltier est utilisé pour modifier la température de la plaque, mesurée à l'aide d'un thermomètre à sonde de contact.	64
Figure 2.25 : Effet de la température sur le spectre de raies. Réponse spectrale de la plaque correspondant à la figure 2.6 à 25,8 °C et 28,4 °C.	65
Figure 2.26 : Décalage en fréquence (en Hz) et en valeur absolue, des modes de résonance (en kHz) à 25,8°C pour une augmentation de température de 2,6 °C.	66
Figure 2.27 : Spectre du système pour une plaque rectangulaire: émetteur D, récepteur B. La courbe en pointillés est le spectre du système perturbé par un doigt en silicone avec une surface de contact circulaire de diamètre 10 mm, posé au centre de la plaque.	67
Figure 2.28 : Spectre du système avec une plaque rectangulaire: émetteur D, récepteur B. Zoom aux basses fréquences et aux fréquences hautes.	68
Figure 3.1 : Organigramme du procédé tactile : (a) l'étape d'étalonnage ; (b) l'étape de localisation.	75
Figure 3.2 : Schéma du dispositif : un système de transduction et propagation d'ondes.	77
Figure 3.3 : Positions des transducteurs PZT : émetteurs E et récepteurs R	77
Figure 3.4 : Discrétisation d'une surface tactile en une matrice de points de référence.	78
Figure 3.5 : Signal d'excitation répété en continu.	80
Figure 3.6 : Signaux captés par le transducteur de réception R1.	81
Figure 3.7 : Module (en V ² /Hz) de la transformée de Fourier rapide (FFT) d'un exemple de signaux captés par le récepteur R1.	82

Figure 3.8 : Distances normalisées entre un vecteur mesuré et une matrice de vecteurs de référence, pour les récepteurs R1 et R2.	84
Figure 3.9 : Doigt artificiel en silicone en contact avec la plaque.	85
Figure 3.10 : Résultats de 10000 mesures consécutives à partir du récepteur R1. Le niveau de gris illustre le nombre de fois où un élément est identifié. La plaque est calibrée avec un doigt humain.	85
Figure 3.11 : Résultats de 10000 mesures consécutives basées sur le récepteur R2. ..	86
Figure 3.12 : Performances d'une surface tactile calibrée avec un doigt artificiel en silicone. (a) Position réelle du toucher ; (b) Résultats de 10000 localisations consécutives, le niveau de gris illustre le nombre de fois où un élément est identifié.	87
Figure 3.13 : Organigramme du procédé tactile avec la méthode de fiabilisation par la double validation: (a) l'étape d'étalonnage ; (b) l'étape de localisation, et de la validation de la position localisée.	89
Figure 3.14 Résultats de 10000 mesures consécutives avec double validation pour un toucher en position (x_5, y_5) . (Le niveau de gris illustre le nombre de fois où un élément est identifié).	90
Figure 3.15 : Résultats de 1000 localisations consécutives d'un toucher en x_{20}, y_{18} en utilisant les vecteurs étendus x_{20}, y_{18}	93
Figure 3.16 : Organigramme de l'étape de localisation d'un toucher sur la surface tactile avec le critère de similarité dans une série temporelle.	94
Figure 3.17 : Schéma du procédé tactile.	95
Figure 3.18 : Organigramme pour obtenir une FDPA, pour une fréquence donnée.	96
Figure 3.19 : FDPA obtenues avec le récepteur R1 à 60 kHz (non résonant) et à 79,62 kHz (résonant),	97
Figure 3.20 : Organigramme du procédé de partition floue de la surface en régions de perturbation équivalente.	99
Figure 3.21 : Découpage de la surface tactile en un nombre limité de zones de perturbations équivalentes à partir de quatre FDPA. Le recoupement de ces différentes zones permet ensuite de localiser un toucher. L'intérêt du procédé est d'accélérer le procédé de localisation en affectant un numéro de perturbation à un toucher.	100

Figure 3.22 : Plaque tactile à deux émetteurs et deux récepteurs à figure d'illumination complexes. Cette plaque est caractérisée par un contour avec des irrégularités de rayons de courbure comprises entre 0,1 mm et 10 mm.	103
Figure 4.1 : Organigramme du procédé tactile dans le cas de deux touchers simultanés : (a) l'étape d'étalonnage ; (b) l'étape de localisation.	107
Figure 4.2 : Résultats de la localisation des deux touchers simultanés, par (a) R1 et (b) R2.....	109
Figure 4.3 : La distance entre les vecteurs de référence. Une ligne sombre indique un point de contact commun pour les configurations des touchers multiples.	109
Figure 4.4 : Un exemple d'exploitation dynamique de deux touchers.	111
Figure 4.5 : Un robot humanoïde entièrement couvert par des coques en plastique et un prototype de coque tactile comme approximation d'une peau sensitive.	112
Figure 4.6 : Positions des transducteurs piézoélectriques sur la coque tactile, la coque est pliée de façon à briser la symétrie.	113
Figure 4.7 : Organigramme de l'étape de calibration selon les deux modes du toucher, avec deux matrices A et B enregistrées qui correspondent au : (a) mode surfacique ; (b) mode ponctuel.	114
Figure 4.8 : Résultats de 1000 localisations consécutives, lorsqu'un doigt est placé à la position x_{12}, y_5 . (a) Performance avec le récepteur d'ondes R1 ; (b) avec le récepteur R2 ; (c) performance après un procédé de double-validation ; (d) Image du toucher.....	116
Figure 4.9 : Résultats de 1000 localisations consécutives, lorsqu'un doigt est placé à la position x_9, y_8 . (a) Performance avec le récepteur d'ondes R1 ; (b) avec le récepteur R2 ; (c) performance après un procédé de double-validation ; (d) Image du toucher.....	116
Figure 4.10 : Norme du vecteur étendu de référence selon la position du toucher surfacique.	119
Figure 4.11 : Norme du vecteur étendu de référence selon la position du toucher ponctuel.....	119
Figure 4.12 : Organigramme du procédé de la localisation avec identification de la nature du toucher.....	121
Figure 4.13 : Application du procédé tactile à un écran LCD. La position du toucher apparait clairement sur la figure des distances normalisées par niveau de gris.	122

Figure A1.1 : Vitesses de phase en fonction des fréquences entre 20 kHz et 250 kHz, pour les plaques de verre B270 de demi-épaisseurs (h) 50 μm , 175 μm et 250 μm	i
Figure A1.2 : Vitesses de phase en fonction des fréquences entre 20 kHz et 250 kHz, pour les plaques de verre borosilicate de demi-épaisseurs (h) 50 μm , 175 μm et 250 μm	i
Figure A1.3 : Vitesses de groupe en fonction des fréquences entre 20 kHz et 250 kHz, pour les plaques de verre B270 de demi-épaisseurs (h) 50 μm , 175 μm et 250 μm	ii
Figure A1.4 : Vitesses de groupe en fonction des fréquences entre 20 kHz et 250 kHz, pour les plaques de verre borosilicate de demi-épaisseurs (h) 50 μm , 175 μm et 250 μm	ii
Figure A1.5 : Longueur d'onde en fonction de la fréquence, entre 20 kHz et 250 kHz pour le mode A_0 dans une plaque de verre B270.....	iii
Figure A1.6 : Longueur d'onde en fonction de la fréquence, entre 20 kHz et 250 kHz pour le mode A_0 dans une plaque de verre borosilicate.....	iii
Figure A1.7 : Rapport entre composante de déplacement normale U_2 (+/-h) et composante de déplacement tangentielle U_1 (+/-h), pour une onde de Lamb en mode A_0 dans une plaque de verre B270.....	iv
Figure A1.8 : Rapport entre composante de déplacement normale U_2 (+/-h) et composante de déplacement tangentielle U_1 (+/-h), pour une onde de Lamb en mode A_0 dans une plaque de verre borosilicate.....	iv
Figure A1.1 : Fonctionnement du procédé tactile.....	v
Figure A2.2 : Déformation libre.....	viii
Figure A2.3 : Zoom avant ou arrière.....	ix
Figure A2.4 : Avance rapide.....	ix
Figure A2.5 : Tourne-page.....	x

Introduction

L'évolution technologique induit la généralisation des fonctions d'interface homme-machine, *IHM*, qui permettent à un ou plusieurs utilisateurs de communiquer avec un dispositif chargé de réaliser une action ou fournir une information ([CAR83], [SEA07]). Ces interfaces servent à transmettre un ordre humain vers le dispositif ou à relayer une information du dispositif vers l'humain, au travers des périphériques d'entrée ou des périphériques de sortie.

Les périphériques d'entrée, comme le clavier, la souris, ou le scanner permettent à l'homme de donner des renseignements ou des ordres à la machine. Les périphériques de sortie comme l'écran, des diodes ou l'imprimante permettent à la machine de répondre aux ordres et d'afficher des informations.

Par une interface visuelle (écran, afficheur LED, etc.), l'homme a su trouver les moyens technologiques et les logiciels pour transmettre et synthétiser l'information visuelle, réelle ou imaginaire et pour lui permettre d'interagir avec cette information. Il en est de même pour le son et le son tridimensionnel (enregistreurs microphones, écouteurs, cartes de génération de son de synthèse 3D, etc.). En sus de ces informations visuelles et auditives, les retours haptiques sont perçus comme une source d'informations complémentaires mais parfois nécessaires pour certaines applications ne pouvant tolérer la charge cognitive induite par la multiplicité des informations visuelles.

L'haptique désigne "*la science du toucher et ce qui concerne la sensibilité cutanée*" (*dictionnaire Larousse*). **Le mot haptique** provient du grec *haptein* qui signifie toucher.

Au contraire de la perception cutanée considérée passive et qui résulte de la stimulation d'une partie de la peau, la perception haptique est considérée comme étant un sens *actif* [BEN04]. Sa mise en œuvre est issue d'une interaction physique ou contact avec l'environnement par des mouvements actifs d'exploration. Le fonctionnement perceptif haptique est étroitement associé à la fonction motrice chez l'être humain et présente des caractéristiques particulières. Celui-ci est par exemple

différent de la vision ou de l'audition où le prélèvement d'information ne modifie pas physiquement son support. La perception haptique met en jeu un phénomène complexe et encore mal compris, d'échange de paramètres de natures physiques diverses entre l'homme et les objets de son environnement [HAF05][NIK07a].

La modalité haptique comporte à la fois la kinesthésie et le tactile. Les frontières, si bien physiologiques que psychophysiques, ne sont d'ailleurs pas très clairement établies. Il s'agit de **kinesthésie** ou proprioception [GOS05] quand l'information obtenue est issue des stimulations durant une contrainte sur le mouvement ou quand une force externe est appliquée. Alors qu'il s'agit de **tactile** [BEN02][BEN03] quand l'information est le résultat des stimulations issues d'un contact fin, précis ou léger de la peau avec diverses matières.

En réalité virtuelle, une interface tactile doit être en mesure d'exciter tous ou un des différents capteurs biologiques de la peau comme le récepteur pour la perception d'une touche. Ils sont **nocicepteurs**, **thermorécepteurs** et **mécanorécepteurs** [PER79]. Chaque capteur biologique possède sa propre fonction de perception.

Au début du XIXe siècle, Pacini (1840) découvrait des corpuscules sous le derme. En 1852, les chercheurs Meissner et Wagner, mettent en évidence l'existence de corpuscules du tact dans le derme. Puis furent découverts les corpuscules de Ruffini, les terminaisons libres et les corpuscules de Krause et Golgi-Mazzoni (1860). La plupart des capteurs biologiques prenant en compte la perception des différentes modalités d'excitation tactile sont intégrés à la *peau*. Ces différents travaux et ceux qui suivirent allaient dans le sens d'une différenciation du toucher : tact fin, douleur et température. Il faut attendre ensuite la fin du XIX siècle et les travaux de Blix, Max Von Frey et Goldscheider (1894-1896) pour que ces différentes sensations soient clairement explorées et que soient réalisées des corrélations entre les récepteurs, leur localisation et une sensation (de tact, de chaud, de froid et de douleur).

Au début de la micro-électronique, les moyens de communication avec les systèmes informatiques étaient restreints au clavier alphanumérique. Puis, d'autres moyens tels que la souris et le stylet sont apparus. Plus récemment, des écrans tactiles ont été développés et commercialisés. Ce sont des interfaces, qui exploitent la perception tactile pour transmettre l'information entre l'homme et la machine.

Généralement, une interface tactile est une interface qui permet de détecter la position et/ou la nature du toucher. Les souris, les claviers, les boutons, les interrupteurs, les déclencheurs sont tous des interfaces tactiles. Dans ce travail, nous nous intéressons uniquement à la détection de la position (et la surface) du toucher sur les plaques et les coques tactiles, plus particulièrement les dalles tactiles.

Différentes techniques permettent de réaliser des dalles tactiles. Ils en existent plusieurs qui sont commercialisées avec succès et mettent en œuvre notamment des procédés optiques (infrarouge), résistifs, capacitifs ou encore acoustiques. Le coût des écrans plats diminuant régulièrement avec l'augmentation des volumes de production, il en va de même pour la fonction tactile (doigt ou stylet). Lorsque la taille de l'écran dépasse 20 pouces, les techniques par ondes surfaciques nécessitant de graver le substrat ainsi que les procédés capacitifs ou résistifs nécessitant un traitement de surface présentent des coûts élevés, tandis que les procédés optiques présentent une intégration difficile et engendrent un facteur de forme peu apprécié par les concepteurs. Nous donnons dans ce qui suit une présentation des principales technologies actuellement utilisées dans l'industrie :

La technologie résistive

Parmi les cinq types de détection tactile, la technologie résistive [MOR00] est la technologie la plus économique et la plus utilisée actuellement. Les systèmes résistifs analogiques sont constitués d'une plaque de verre dont la surface est conductrice. Celle-ci est recouverte par un film plastique dont la "sous face" est conductrice.

Ces 2 couches sont tenues distantes par de microscopiques cales d'espacement; de plus, une couche additionnelle est ajoutée en surface pour éviter les égratignures (créées par exemple par les pointes des stylets).

Un courant électrique s'est établi dans les 2 faces conductrices. Lorsque l'utilisateur touche avec la pointe d'un stylet (ou d'un doigt), la pression exercée amorce un contact entre les 2 faces électrofilées. La variation des champs électriques de ces deux faces conductrices permet de déterminer les coordonnées du point de contact. Une fois les coordonnées déterminées, un traitement logiciel est déclenché.

Technologie capacitive

La technologie capacitive de surface [BAX96] consiste en un revêtement conducteur uniforme sur une dalle de verre. Lors de l'utilisation, des électrodes placées sur le bord de la dalle répartissent un courant de faible tension de manière égale sur toute la couche conductrice, créant ainsi un champ électrique uniforme. Lorsqu'un doigt touche la surface, cela a pour effet de modifier la répartition du champ électrique. Le système d'exploitation se charge alors de convertir cette perturbation en coordonnées qui déterminent le point de contact du doigt.

La technologie capacitive projetée consiste en une surface capacitive entre deux plaques de verre. La surface de contact est une plaque de verre qui n'est pas sensible aux rayures. Elle peut être renforcée au besoin avec un verre blindé.

L'avantage majeur des systèmes capacitifs par rapport aux résistifs est l'absence de seuil de force d'interaction, la plus grande robustesse aux rayures et la capacité de transmettre la lumière au travers de la surface et donc une meilleure clarté, tout en assurant un rendement supérieur. En effet, 90% de la lumière peut traverser une surface capacitive alors qu'au maximum 75% de la lumière pourra traverser les systèmes résistifs, d'où une meilleure clarté d'image obtenue par les systèmes capacitifs.

Un exemple d'un écran tactile multi-touchers transparent basé sur un principe de technologie capacitive est développé par Appel Inc. [HOT05]. Il est réalisé par une couche d'électrodes transparentes et une matrice de nœuds de capteurs capacitifs pixelisés. Le procédé permet d'identifier et de discriminer la nature du contact multiple (pouce, paume) par une segmentation de l'image tactile et par une identification du motif pixellisé avec des taches prédéfinies.

Technologie à infrarouge

Un écran tactile à technologie infrarouge prend la forme d'un réseau de capteurs de rayonnement infrarouge, horizontal et vertical. Ces capteurs créent une grille infrarouge invisible qui s'interrompt lors du contact du doigt de l'utilisateur sur l'écran (de façon à éviter les interférences entre détecteurs). Récemment un écran

d'affichage à détection tactile basé sur l'infrarouge a été développé par LG Philips LCD Co LTD [CHU08].

Cet écran d'affichage à détection tactile comporte un substrat supérieur transparent, un substrat inférieur opposé au substrat supérieur et une source de lumière infrarouge (IRS), configurée de façon à éclairer une portion du substrat transparent supérieur. Une couche de conversion de lumière (CONV) est disposée entre le substrat supérieur et inférieur et est configurée de façon à convertir la lumière infrarouge reçue par le substrat transparent supérieur en lumière visible. Un transistor à couches minces de pixel placé sur le substrat inférieur est configuré de façon à activer une électrode de pixel (PXLE), et un transistor à couches minces à détection de lumière (TFTSS) est configuré de façon à détecter la lumière visible fournie par la couche de conversion de lumière (CONV) en vue de localiser un toucher.

Les écrans tactiles à infrarouge sont résistants et de ce fait sont souvent utilisés pour les applications militaires ou dans les environnements pollués.

Technologie à jauges de contrainte

Quatre jauges de contraintes sont installées dans les quatre coins de l'écran et sont utilisées afin de déterminer la déflexion induite par la pression d'un doigt ou d'un stylet sur l'écran. Cette technologie [MIN84] [KEU08] peut également déterminer le déplacement (généralement assez faible) qu'induit la pression sur l'écran.

Cette technologie permet la réalisation des systèmes robustes (blindés). Ainsi, elle est utilisée pour équiper les bornes de réservation de billets d'interfaces tactiles, celles-ci étant fortement exposées au vandalisme.

L'imagerie optique

L'application de l'imagerie pour la technologie tactile est récente. Le principe de ce procédé est de placer deux ou plusieurs capteurs d'image sur les bords (en général sur les coins) de l'écran. Des sources infrarouges sont alors placées dans le champ de la caméra de l'autre côté de l'écran. Une touche apparaît comme une ombre et chaque paire de caméras peut ensuite être triangulée pour localiser le toucher ou même pour mesurer la taille de l'objet qui la touche (voir enveloppe visuelle). Cette technologie est de plus en plus répandue en raison de son évolutivité, sa polyvalence et son prix

abordable. Elle convient pour des interfaces de taille allant jusqu'à 20 pouces [HAN05].

Technologie acoustique

Parmi les procédés robustes, de faible épaisseur, de faible encombrement, et de rapport coût/performance acceptable il y a les procédés mettant en œuvre des ondes acoustiques de surface [ADL85]. Ils sont basés sur une mesure d'absorption d'un train d'ondes à un instant précis, caractéristique de la position du toucher et correspondant à un chemin acoustique et donc un temps de transit précis le long d'une ligne de coordonnée x et une colonne de coordonnée y de la dalle. Pour cela, un réseau de réflecteurs est gravé à la surface du verre, sur au moins 2 bords de la dalle et avec une orientation de 45° . Ce procédé est caractérisé par une bonne résolution et une bonne sensibilité. Il est commercialisé avec succès pour des écrans de taille courante ne dépassant pas 20 pouces. Les améliorations régulièrement apportées concernent le traitement et la composition du verre, le type de capteur à utiliser pour engendrer les ondes de surface, les méthodes d'émission- réception et de gravure, ainsi que la miniaturisation de l'électronique d'amplification et de traitement. Le point faible de ce procédé reste son utilisation pour des dalles de petite taille, les conditions d'intégration de la dalle ainsi que les erreurs liées à l'accumulation de salissures sur les bords en particulier lorsque la diagonale de la dalle dépasse 20 pouces.

En 1976, au laboratoire d'acousto-électricité du Professeur Dieulesaint, un dispositif fonctionnant à partir des ondes de surface se propageant dans un substrat piézoélectrique est mis au point [DIE76]. Cependant, le coût élevé de la plaque piézoélectrique ne permet pas l'industrialisation du projet.

En 1985, un nouveau dispositif basé sur le temps de transit d'ondes symétriques de volume est réalisé ([CHA85], [DIE87], [ROY92]). La plaque piézoélectrique est remplacée par une simple plaque de verre, sur laquelle on peut éventuellement superposer un écran d'affichage. Le principe de la mesure consiste à engendrer alternativement un paquet d'ondes planes au moyen de transducteurs piézoélectriques collés sur les chants x et y de la plaque. Ces ondes sont ensuite détectées de façon synchrone par un stylet, ce qui permet de déduire la position de celui-ci.

Jean-Pierre Nikolovski a repris ce travail [NIK95] en 1995, en cherchant à améliorer le système déjà réalisé notamment vis-à-vis de la sensibilité de la mesure à l'inclinaison et la rotation du stylet en déplacement. Ainsi, un procédé sans fil de « triangulation » acoustique est développé [NIK00], qui consiste à détecter la position d'un stylet actif au dixième de millimètres près ou d'impacts légers à 1 cm près plutôt qu'un toucher. Ce procédé par triangulation nécessite au moins 3 capteurs et consiste à déterminer la position du stylet ou de l'impact à partir de la mesure d'un temps de transit différentiel de modes symétriques (stylet) ou antisymétriques (impacts) entre différents capteurs disposés à des positions connues. Ce procédé est caractérisé par un temps de réponse court, inférieur à la milliseconde, mais nécessite une amplification et un traitement du signal sophistiqué pour mesurer précisément le temps d'arrivée de la tête d'un paquet d'ondes. Il requiert également une plaque homogène et isotrope. Il est déterministe, la position est déduite directement d'une formule mathématique, et requiert peu de précautions quant aux conditions d'intégration. Il nécessite également que l'impact soit effectué avec un objet relativement dur tel que l'ongle. Ce procédé reste coûteux pour les petits écrans comparativement aux différentes technologies disponibles pour des écrans dont la diagonale est inférieure ou égale à 20 pouces. En revanche, il s'étalonne aisément et s'applique avec succès sur des plaques dépassant le mètre carré de superficie.

Un système similaire [PAR02][PAR05] avec une précision de l'ordre du pouce a été développé un peu plus tard au Massachusetts Institute of Technology, dans le laboratoire Media Lab, au début du 21^{ème} siècle. Ce système nommé " Windows Tapper Technology" soit en français "la technologie de frappe aux fenêtres ". Il utilise quatre capteurs piézoélectriques (fournis par Panasonic) placés à proximité des angles d'une plaque (surface tactile) pour enregistrer le front d'onde engendré dans la structure acoustique provenant de la frappe. Un processeur du signal numérique extrait les caractéristiques pertinentes de ces signaux, tels que les amplitudes, les composantes de fréquence et les temps différentiels. Ces caractéristiques sont utilisées pour estimer la position de la frappe et permettent de fournir des paramètres auxiliaires avec une précision approximative. Comme ce système ne nécessite que du matériel simple, il n'a donc pas besoin d'une adaptation particulière de la vitre, et permet l'utilisation d'une grande variété de capteurs destinés à être montés sur la surface intérieure. Par conséquent, son déploiement est assez facile sur des fenêtres

ordinaires. Ceci ouvre de nombreuses applications sur de grandes vitrines interactives, avec du contenu dynamique contrôlée tactilement directement sur la fenêtre d'affichage.

Dans le même temps, un autre procédé millimétrique de localisation d'impacts par apprentissage et corrélation a été développé au Laboratoire Ondes et Acoustique (LOA) de l'ESPCI ParisTech [ING05a][ING05b]. Ce procédé par corrélation croisée est adapté à des dalles de tailles et de formes quelconques éventuellement non isotropes et/ou non homogènes. Il nécessite au minimum 1 capteur et de préférence 3 pour les dispositifs commercialisés. Le procédé s'adapte aussi sur des objets volumineux. Il offre un prix compétitif par rapport aux autres technologies disponibles. Il requiert toutefois une étape critique d'apprentissage et consiste à déterminer la position par corrélation croisée du signal de mesure avec une bibliothèque de signaux de référence dits signatures acoustiques. Lorsque la surface de l'objet est rugueuse, le frottement du doigt sur la surface permet de rafraichir régulièrement la position et suivre le chemin parcouru.

L'université américaine Carnegie Mellon a collaboré en 2010 avec Microsoft sur une variante de ce procédé, un procédé dit "Skinput" [HAR10]. Le système extrait les signaux caractéristiques de la propagation des ondes acoustiques dans différentes couches de la peau d'un utilisateur, et les compare pour déduire la position d'une frappe dans les zones prédéfinies.

Ces derniers procédés sont des procédés « passifs »¹ d'un point de vue électronique, donc ils nécessitent d'injecter une énergie acoustique pour réaliser la mesure de position. Ils ne réagissent pas à un simple toucher, ce qui rend plus difficile l'implémentation de la fonction « glisser » du pointeur souris car cela implique que la dalle puisse accepter un certain frottement à sa surface pour qu'un signal acoustique puisse continuellement être engendré et détecté pendant le frottement. Enfin, le procédé par corrélation croisée des signatures d'impacts [ING05a] peut être perturbé par des variations de température ainsi que par des variations des conditions de couplage entre la dalle et son support parfois dues au simple fait de la gravité lorsque la plaque est épaisse et qu'elle est en mouvement.

¹ La définition d'un procédé « passif » ou « actif » est choisie selon la pratique de l'industrie : un procédé est « active » si l'électronique injecte activement l'énergie acoustique dans le dispositif. C'est le contraire de la définition selon l'aspect physique du toucher : un procédé est « actif » si c'est le doigt en contact génère des ondes acoustiques.

Par la suite, en 2006, J.P. Nikolovski a travaillé en collaboration avec Ros K. Ing et Mathias Fink du LOA d'ESPCI sur un nouveau procédé passif basé sur l'absorption des ondes de Lamb qui se propagent dans une plaque [NIK07c], [ING08]. Ce procédé fonctionne de la manière suivante : lorsqu'un objet mince de dimensions finies, entre en résonance selon un mode de flexion, il apparaît des nœuds et des ventres de vibration à différentes fréquences, caractéristiques des dimensions, de la géométrie de la plaque ainsi que de l'emplacement des transducteurs. Le système utilise 2 ou 3 transducteurs, un pour engendrer les modes, et les autres pour détecter les signaux de résonance de la plaque les plus sélectifs, et les plus stables en termes de figures de résonance. Un toucher engendre une perturbation en module et en phase du signal détecté. Les figures de résonance variant d'un mode propre à un autre, un même toucher sera caractérisé par des perturbations relatives, différentes d'une fréquence propre à une autre. A partir des N premiers modes de résonance les plus sélectifs et les plus distincts, distribués sur un large spectre, le procédé définit le vecteur d'absorption $A_k(x, y)$ en un point (x, y) donné de la plaque. Ce vecteur est caractéristique de la surface du toucher et des perturbations survenues aux N fréquences retenues. En corrélant (en module et en phase) périodiquement le vecteur d'absorption engendré par un toucher en un endroit (x, y) de la plaque à une matrice $A_{kref}(x_i, y_j)$ de vecteurs d'absorption caractérisant la plaque et préalablement mémorisés, il est possible de reconnaître la position, la durée et l'étendue d'un toucher sur la plaque.

Ce procédé d'absorption concerne un nouveau dispositif acoustique de pointage présentant un nombre réduit de capteurs, ainsi qu'une électronique simplifiée de traitement. Il est de type tactile et peut être appliqué à tout objet résonnant. Ce procédé semble le plus compétitif du point de vue de la précision, de la richesse d'interactions et du coût de fabrication par rapport aux procédés précédents.

Cependant, plusieurs problèmes ne sont pas résolus par ce procédé basé sur l'absorption des ondes, notamment le fait qu'il est sélectif en fréquence et critique sur la stabilité des fréquences de résonance. Par ailleurs, les problèmes de reconnaissance, et d'interprétation d'un toucher multiple ne sont pas abordés.

Pour répondre à ces problèmes, nous avons développé un nouveau procédé basé non pas sur l'amortissement de modes résonnants mais sur la diffraction perturbée des ondes en régime transitoire ou stationnaire.

Cette thèse n'a pas pour objectif de développer une nouvelle théorie de la propagation des ondes. L'objectif est de développer un nouveau procédé tactile afin de l'industrialiser. Nous résumons dans ce qui suit les principales étapes de ce travail de thèse :

Nous avons commencé par étudier le phénomène de la propagation des ondes de Lamb dans une plaque mince, afin de prévoir quelle pouvait être la nature de l'interaction, les déplacements mécaniques, les longueurs d'ondes mises en jeu et en conséquence, le mode le plus adapté pour la conception d'une interface tactile.

Les résultats de cette étude nous ont montré que les vibrations peuvent atteindre un régime quasi-stationnaire en quelques millisecondes de propagation des ondes de Lamb, dans une plaque de dimension finies (75 mm × 100 mm) et d'épaisseur faible (450 μm). Il s'agit d'un temps de réponse convenable pour une interface tactile. Les longueurs d'ondes dans cette plaque entre 20 kHz et 250 kHz sont relativement petites par rapport à la dimension caractéristique d'un toucher avec un doigt. L'interaction entre le doigt et la plaque est importante et dépend du diagramme de rayonnement ou de diffraction des ondes sources permettant de localiser la position du doigt.

Après avoir caractérisé des plaques acoustiques expérimentalement, notamment la réponse spectrale en fonction des conditions d'intégration mécanique d'une plaque à bords libres, fixes, ou pincés en ses coins, nous avons envisagé plusieurs modifications du procédé d'absorption [NIK07c], la première étant d'utiliser le signal de diffraction des ondes de Lamb comme la source d'information à la place de l'amortissement des figures de résonance : il est alors possible de détecter la position d'un doigt et d'un stylet avec le même procédé. Cette modification ouvre la perspective de réaliser un système moins difficile à réaliser à temps de réponse plus court avec des ondes non résonnantes.

Une autre modification concerne enfin l'algorithme du traitement du signal, que nous avons réalisée pour produire une interface tactile à touchers multiples.

Le mémoire qui suit est constitué de quatre chapitres :

Le **chapitre 1** traite de la théorie des modes de propagation des ondes de Lamb dans une plaque mince. Nous caractériserons par les courbes de dispersion théoriques ainsi que par des simulations, les déplacements des ondes de Lamb du premier mode antisymétrique A_0 . Nous étudierons les comportements de la propagation des ondes dans une plaque mince.

Le **chapitre 2** explore la fonction de transfert d'une plaque mince en fonction des conditions de fixations des bords, libres, fixes, ou partiellement libres.

Le **chapitre 3** est consacré au développement d'un procédé tactile à base de la diffraction des ondes de Lamb, avec une plaque de cuivre. Un nouveau procédé acoustique est développé. Nous pouvons déduire la position d'un toucher simple ou multiple à partir du signal capté, que nous comparons à un ensemble de signaux de référence. Ces signaux de référence correspondent respectivement à des touchers simples ou multiples en des zones prédéterminées de la surface tactile.

Le **chapitre 4** illustre les applications du procédé développé sur des exemples typiques, plus particulièrement sur une coque tactile et puis sur une plaque à touchers multiples. Selon le procédé, il est également révélé un procédé d'exploitation multi-touchers, basé sur un langage et une sémiotique tactile tirant partie de la cadence de mesure et de la cinématique du chemin tactile simple ou multiple parcouru sur la surface tactile.

Nous présentons en conclusion les résultats issus de cette thèse. Ces résultats ont conduit à un dépôt de brevet et à cinq publications.

Chapitre 1. Ondes de Lamb

Différents types d'ondes acoustiques sont susceptibles de se propager dans une plaque isotrope. Elles sont décrites par les équations de dispersion de Rayleigh-Lamb. Une onde de Lamb est une onde acoustique volumique qui se propage dans une plaque dont les deux surfaces sont libres, contrairement aux ondes de Rayleigh qui ne se propagent qu'en surface et affectent une faible épaisseur. Ce chapitre résume une étude théorique de la propagation des ondes de Lamb et des simulations avec Matlab.

Chapitre 1. Ondes de Lamb	13
1.1. Définitions des paramètres.....	14
1.2. Propagation des ondes de Lamb	16
1.3. Caractérisation de la propagation dans les plaques minces.....	27
1.4. Conclusion	40

Les ondes élastiques se propageant dans un objet solide sont caractérisées par leurs composantes de déplacement mécanique. Le mouvement des particules de matière est contenu dans le plan sagittal, défini par la direction de propagation et la normale à la surface [BED94], comme illustré à la figure 1.1. La plaque acoustique est supposée isotrope, c'est-à-dire que ses propriétés physiques sont les mêmes dans toutes les directions de l'espace. Elle a une épaisseur $2h$. L'origine des coordonnées est située dans le plan médian de la plaque, au centre de symétrie (aussi appelé centre de gravité pour une plaque isotrope).

1.1. Définitions des paramètres

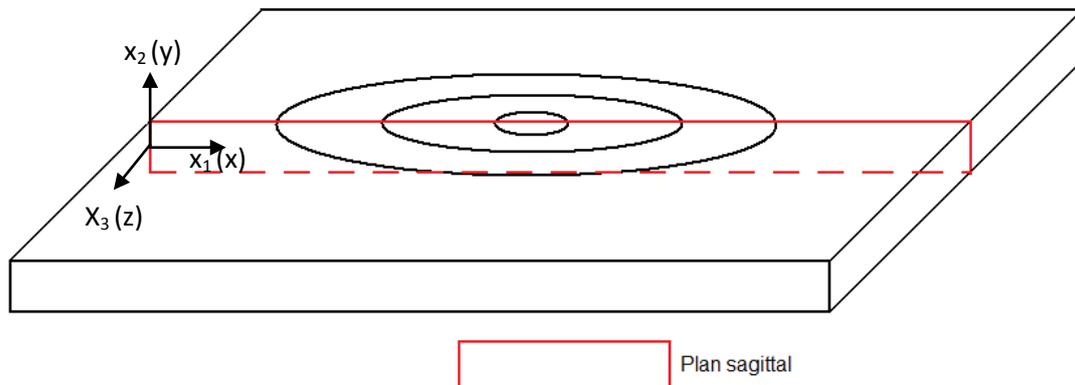


Figure 1.1 : Définition du plan sagittal.

Nous allons caractériser ces modes de propagation pour les matériaux suivants : le verre B270, le verre borosilicaté et le cuivre. L'intérêt du verre est évident en tant qu'interface transparente naturelle pour les écrans d'affichage. L'intérêt du cuivre provient de ce qu'il est aisé de l'usiner mécaniquement et chimiquement. Nous pourrons ainsi tester différents montages mécaniques.

Les paramètres mécaniques nécessaires à l'étude de la propagation des ondes acoustiques dans une plaque sont définis ci-après dans le tableau 1.1.

Tableau 1.1 Propriétés mécaniques et paramètres de simulation

Notation	Grandeur	Formule	Unité
ρ	Masse volumique	/	kg.m^{-3}
E	Module d'Young	/	Pa
σ	Coefficient de Poisson	/	/
Λ	Premier Coefficient de Lamé (coefficient de viscosité)	$\frac{E \cdot \sigma}{(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}$	Pa
μ	Seconde coefficient de Lamé (coefficient de viscosité)	$\frac{E}{2(1 + \sigma)}$	Pa
\vec{u}	Déplacement particulaire	/	m
Δ	Opérateur laplacien	$\frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2}$	/

S_{ij}	Tenseur de déformations	$\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$	/
S	Trace du tenseur des déformations	$S_{11} + S_{22} + S_{33} = \frac{\partial u_j}{\partial x_j}$	/
δ_{ij}	Symbole de Kronecker	$\delta_{ij} = 1$ si $i = j$; $\delta_{ij} = 0$ si $i \neq j$.	/
T_{ij}	Tenseur des contraintes	$\Lambda \cdot S \cdot \delta_{ij} + 2\mu \cdot S_{ij}$	Pa
$\vec{\psi}$	Potentiel vecteur	/	m ²
ϕ	Potentiel scalaire	/	m ²
\vec{u}_T	Vecteur rotationnel	$rot(\vec{\psi})$	m
\vec{u}_L	Vecteur irrotationnel	$grad(\phi)$	m
V_T	Vitesse transversale	$\sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$	m.s ⁻¹
V_L	Vitesse longitudinale	$\sqrt{\frac{\Lambda + 2\mu}{\rho}}$	m.s ⁻¹
h	Demi-épaisseur de la plaque	/	m
f	Fréquence d'onde	/	Hz
ω	Pulsation d'onde	$2\pi f$	rad.s ⁻¹
λ	Longueur d'onde	/	m
k	Nombre d'onde	$\frac{2\pi}{\lambda}$	m ⁻¹
k_L	/	$\frac{\omega}{V_L}$	m ⁻¹
k_T	/	$\frac{\omega}{V_T}$	m ⁻¹
p^2	/	$k_L^2 - k^2$	m ⁻²
q^2	/	$k_T^2 - k^2$	m ⁻²
$V\varphi$	Vitesse de phase	$V\varphi = \frac{\omega}{k} = \lambda \cdot f$	m.s ⁻¹
V_G	Vitesse de groupe	$V_G = \frac{\partial \omega}{\partial k}$	m.s ⁻¹

1.2. Propagation des ondes de Lamb

1.2.1. Equations du champ, équation du mouvement

Les ondes acoustiques se propageant dans une plaque isotrope sont connues sous le nom des ondes de Lamb, du nom du physicien qui, avec Lord Rayleigh, fut le premier à établir mathématiquement leurs équations de dispersion en 1917 [LAM17].

L'étude de la propagation d'une onde dans un solide consiste à établir le champ des déplacements particuliers en tout point. Comme dans les précédentes études [NIK95][ROY92][ROY96][ROY01], nous partons pour cela de l'équation de la relation fondamentale de la dynamique :

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} \quad (1.1)$$

Les composantes du tenseur des contraintes sont liées aux valeurs du tenseur des déformations par la loi de Hooke :

$$T_{ij} = \Lambda \cdot S \cdot \delta_{ij} + 2\mu \cdot S_{ij} \quad (1.2)$$

où Λ et μ sont les coefficients de Lamé ou les coefficients de viscosité. Ils caractérisent un solide isotrope et peuvent s'exprimer en fonction du Module d'Young E du matériau, et de σ , son coefficient de Poisson.

S , est la trace du tenseur des déformations et exprime la dilatation volumique :

$$S = S_{11} + S_{22} + S_{33} = \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = \text{div}(\vec{u}) \quad (1.3)$$

Le tenseur des déformations S_{ij} est lui-même une fonction du champ des déplacements [KAN81] :

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (1.4)$$

En injectant les équations (1.4) et (1.3) dans équation (1.2), nous obtenons :

$$T_{ij} = \Lambda \cdot S \cdot \delta_{ij} + 2\mu \cdot S_{ij} = \Lambda \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (1.5)$$

En effet les coefficients Λ et μ sont sortis des dérivations ce qui suppose qu'ils soient uniformes. Puis injectant (1.5) dans l'équation (1.1), nous obtenons :

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} &= \frac{\partial}{\partial x_j} T_{ij} = \Lambda \frac{\partial S \cdot \delta_{ij}}{\partial x_j} + 2\mu \frac{\partial S_{ij}}{\partial x_j} \\ &= \Lambda \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \end{aligned} \quad (1.6)$$

Ou encore :

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right] (\Lambda + \mu) + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \quad (1.7)$$

Que nous pouvons réécrire en utilisant les opérateurs vectoriels sous la forme suivante :

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x_i} [\text{div}(\vec{u})] (\Lambda + \mu) + \mu \Delta(u_i) \quad (1.8)$$

Ce qui donne sous forme vectorielle :

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = \text{grad} \left[\text{div}(\vec{u}) \right] (\Lambda + \mu) + \mu \Delta(\vec{u}) \quad (1.9)$$

Sachant que le matériau est isotrope et que les coefficients Λ et μ sont uniformes et peuvent permuter avec l'opérateur gradient. D'où l'équation de mouvement :

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = (\Lambda + \mu) \text{grad}(\text{div}(\vec{u})) + \mu \cdot \Delta(\vec{u}) \quad (1.10)$$

Il s'agit de l'équation qui régit le champ de déplacement dans un solide. L'expression de \vec{u} se révèle cependant compliquée puisque les trois composantes du déplacement \vec{u} sont couplées. Sachant que l'on s'intéresse uniquement à la propagation des ondes, on peut utiliser la décomposition d' Helmholtz.

1.2.2. Equations d' Helmholtz

Les déplacements sont décomposés en une somme de deux vecteurs orthogonaux \vec{u}_L et \vec{u}_T dérivant respectivement d'un potentiel scalaire et d'un potentiel vecteur tels que :

$$\vec{u} = \vec{u}_L + \vec{u}_T = \text{grad}(\phi) + \text{rot}(\vec{\psi}) \quad (1.11)$$

En coordonnées cartésiennes, ce potentiel s'écrit :

$$\begin{cases} u_1 = \frac{\partial \phi}{\partial x_1} + \frac{\partial \psi_3}{\partial x_2} - \frac{\partial \psi_2}{\partial x_3} \\ u_2 = \frac{\partial \phi}{\partial x_2} + \frac{\partial \psi_1}{\partial x_3} - \frac{\partial \psi_3}{\partial x_1} \\ u_3 = \frac{\partial \phi}{\partial x_3} + \frac{\partial \psi_2}{\partial x_1} - \frac{\partial \psi_1}{\partial x_2} \end{cases} \quad (1.12)$$

\vec{u}_L et \vec{u}_T doivent vérifier indépendamment l'équation (1.10), on obtient ainsi deux équations distinctes :

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\vec{u}_L) = (\Lambda + \mu) \cdot \text{grad}(\text{div}(\vec{u}_L)) + \mu \cdot \Delta(\vec{u}_L) \\ \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\vec{u}_T) = (\Lambda + \mu) \cdot \text{grad}(\text{div}(\vec{u}_T)) + \mu \cdot \Delta(\vec{u}_T) \end{cases} \quad (1.13)$$

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\text{grad}(\phi)) = (\Lambda + \mu) \cdot \text{grad}(\text{div}(\text{grad}(\phi))) + \mu \cdot \Delta(\text{grad}(\phi)) \\ \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\text{rot}(\vec{\psi})) = (\Lambda + \mu) \cdot \text{grad}(\text{div}(\text{rot}(\vec{\psi}))) + \mu \cdot \Delta(\text{rot}(\vec{\psi})) \end{cases} \quad (1.14)$$

Or,

$$\forall \vec{\sigma}, \begin{cases} \text{div}(\text{rot}(\vec{\sigma})) = 0 \\ \text{div}(\text{grad}(\vec{\sigma})) = \Delta(\vec{\sigma}) \end{cases} \quad (1.15)$$

Nous aboutissons donc à :

$$\begin{cases} \rho \cdot \text{grad}\left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2}\right) = (\Lambda + \mu) \cdot \text{grad}(\Delta(\phi)) + \mu \cdot \text{grad}(\Delta(\phi)) \\ \rho \cdot \text{rot}\left(\frac{\partial^2 \vec{\psi}}{\partial t^2}\right) = \mu \cdot \text{rot}(\Delta(\vec{\psi})) \end{cases} \quad (1.16)$$

Après simplification de l'équation (1.16), nous obtenons une équation scalaire pour ϕ et une équation vectorielle pour $\vec{\psi}$. Ces équations représentent les équations typiques de la propagation des ondes :

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} &= \frac{\Lambda + 2\mu}{\rho} \Delta(\phi) \\ \frac{\partial^2 \vec{\psi}}{\partial t^2} &= \frac{\mu}{\rho} \Delta(\vec{\psi}) \end{aligned} \quad (1.17)$$

Nous avons ainsi deux équations indépendantes à partir de l'équation de mouvement (1.10). Nous définirons ensuite la vitesse longitudinale V_L et la vitesse transversale V_T . Elles correspondent à la vitesse du son dans le solide [ROY01] pour deux ondes de natures différentes : longitudinale et transversale.

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} &= V_L^2 \Delta(\phi) \\ \frac{\partial^2 \vec{\psi}}{\partial t^2} &= V_T^2 \Delta(\vec{\psi}) \end{aligned} \quad (1.18)$$

D'où

$$\begin{aligned} V_L &= \sqrt{\frac{\Lambda + 2\mu}{\rho}} \\ V_T &= \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \end{aligned} \quad (1.19)$$

On va donc désormais chercher à résoudre le couple d'équations (1.18) afin de trouver les expressions de ϕ et de $\vec{\psi}$. On se place dans le plan sagittal (plan défini par la normale à la surface et contenant la direction de propagation), avec une propagation selon x_1 . Nous supposons qu'il n'y a pas de déplacement selon x_3 (voir figure 1.2), autrement dit pas des ondes de Love. Par conséquent, l'étude se ramène à un cas 2D.

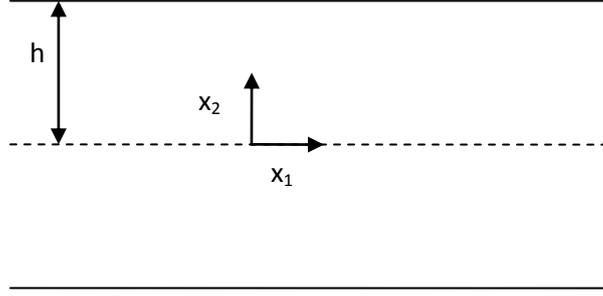


Figure 1.2 : Vue de la plaque dans le plan sagittal.

On peut donc simplifier l'expression du champ de déplacement.

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} u_1(x_1, x_2, t) \\ u_2(x_1, x_2, t) \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{cases} \frac{\partial \phi}{\partial x_1} + \frac{\partial \vec{\psi}}{\partial x_2} \\ \frac{\partial \phi}{\partial x_2} - \frac{\partial \vec{\psi}}{\partial x_1} \\ 0 \end{cases} \quad (1.20)$$

Puisque $u_3=0$, la relation (1.12) implique que $\phi = f(x_1, x_2, t)$, $\psi_1 = \psi_2 = \text{constante} = 0$ et $\psi_3 = g(x_1, x_2, t) = \psi$. On propose alors de représenter ϕ et ψ sous la forme harmonique suivante avec $k = 2\pi / \lambda$, le nombre d'onde et ω la pulsation.

$$\begin{aligned} \phi &= \phi_0(x_2) \exp(i(-\omega \cdot t + k \cdot x_1)) \\ \psi &= \psi_0(x_2) \exp(i(-\omega \cdot t + k \cdot x_1)) \end{aligned} \quad (1.21)$$

Comme dans la bibliographie [NIK95][ROY92][ROY96][ROY01], nous avons ainsi supposé que ϕ et ψ_3 peuvent se décomposer en une partie fonction du temps et une partie fonction de x_2 .

On remplace alors l'expression (1.21) dans l'expression obtenue en (1.18) et on pose :

$$\begin{aligned} k_L &= \frac{\omega}{V_L} \\ k_T &= \frac{\omega}{V_T} \end{aligned} \quad (1.22)$$

On obtient alors l'équation d'Helmholtz (1.23) :

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \phi_0(x_2) \exp(i(-\omega \cdot t + k \cdot x_1))}{\partial t^2} - V_L^2 \cdot \Delta(\phi) = 0 \\ \frac{\partial^2 \psi_0(x_2) \exp(i(-\omega \cdot t + k \cdot x_1))}{\partial t^2} - V_T^2 \cdot \Delta(\psi) = 0 \end{cases} \quad (1.23)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} -\omega^2 \phi - V_L^2 \Delta(\phi) = 0 \\ -\omega^2 \psi - V_T^2 \Delta(\psi) = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Delta(\phi) + k_L^2 \cdot \phi = 0 \\ \Delta(\psi) + k_T^2 \cdot \psi = 0 \end{cases}$$

Si l'on développe le laplacien de ϕ et ψ connaissant (1.22), on aboutit à l'équation (1.24).

$$\begin{cases} \Delta(\phi) = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_2^2} = -k^2 \phi + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_2^2} \\ \Delta(\psi) = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_2^2} = -k^2 \psi + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_2^2} \end{cases} \quad (1.24)$$

En combinant (1.22) et (1.24) on obtient donc

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_2^2} + (k_L^2 - k^2) \phi = 0 \\ \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_2^2} + (k_T^2 - k^2) \psi = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \frac{\partial^2 \phi_0}{\partial x_2^2} + (k_L^2 - k^2) \phi_0 = 0 \\ \frac{\partial^2 \psi_0}{\partial x_2^2} + (k_T^2 - k^2) \psi_0 = 0 \end{cases} \quad (1.25)$$

Nous avons maintenant deux équations du second ordre, ne portant que sur des variables d'espace.

1.2.3. Relation de dispersion ou équation de Rayleigh-Lamb

Pour satisfaire aux conditions $T_{22} = T_{12} = 0$ sur les deux plans libres $x_2 = \pm h$ (contraintes normales nulles sur les deux faces externes) et qui sont explicitées plus bas, les solutions des équations de propagation doivent être de parités différentes.

D'où :

$$\begin{aligned} \phi_0 &= A \cdot \cos\left(\sqrt{k_L^2 - k^2} x_2 + \alpha\right) = A \cdot \cos(p \cdot x_2 + \alpha) \\ \psi_0 &= B \cdot \sin\left(\sqrt{k_T^2 - k^2} x_2 + \alpha\right) = B \cdot \sin(q \cdot x_2 + \alpha) \end{aligned} \quad (1.26)$$

$$\text{Avec } \begin{cases} p^2 = k_L^2 - k^2 \\ q^2 = k_T^2 - k^2 \end{cases} \text{ et } \alpha=0 \text{ ou } \pi/2$$

On remarque que p^2 et q^2 peuvent être négatifs, on a alors :

$$\phi_0 = A \cdot \cos\left(i\sqrt{-p^2}x_2 + \alpha\right) = A \left[\cos(\alpha) \cdot \cosh\left(\sqrt{-p^2}x_2\right) - i \sin(\alpha) \cdot \sinh\left(\sqrt{-p^2}x_2\right) \right] \quad (1.27)$$

$$\psi_0 = B \cdot \sin\left(i\sqrt{-q^2}x_2 + \alpha\right) = B \left[\sin(\alpha) \cdot \cosh\left(\sqrt{-q^2}x_2\right) + i \cos(\alpha) \cdot \sinh\left(\sqrt{-q^2}x_2\right) \right]$$

Nous avons donc l'expression du déplacement particulière en tout point de la plaque :

$$\begin{aligned} \tilde{u}_1 &= \tilde{u}_{L1} + \tilde{u}_{T1} = \frac{\partial \phi}{\partial x_1} + \frac{\partial \psi}{\partial x_2} \\ &= \left[-ik \cdot A \cdot \cos(p \cdot x_2 + \alpha) + q \cdot B \cdot \cos(q \cdot x_2 + \alpha) \right] \exp(i(k \cdot x_1 - \omega \cdot t)) \end{aligned} \quad (1.28)$$

$$\begin{aligned} \tilde{u}_2 &= \tilde{u}_{L2} + \tilde{u}_{T2} = \frac{\partial \phi}{\partial x_2} - \frac{\partial \psi}{\partial x_1} \\ &= \left[-p \cdot A \cdot \sin(p \cdot x_2 + \alpha) + ik \cdot B \cdot \sin(q \cdot x_2 + \alpha) \right] \exp(i(k \cdot x_1 - \omega \cdot t)) \end{aligned}$$

Où le déplacement u d'un point représente la partie réelle de \tilde{u} .

On peut vérifier la parité des déplacements selon le signe de α .

- Si $\alpha = 0$, alors $\begin{cases} u_2(-x_2) = -u_2(x_2) \\ u_1(-x_2) = u_1(x_2) \end{cases}$

L'onde est alors symétrique par rapport au plan moyen, illustré par la figure 1.3.

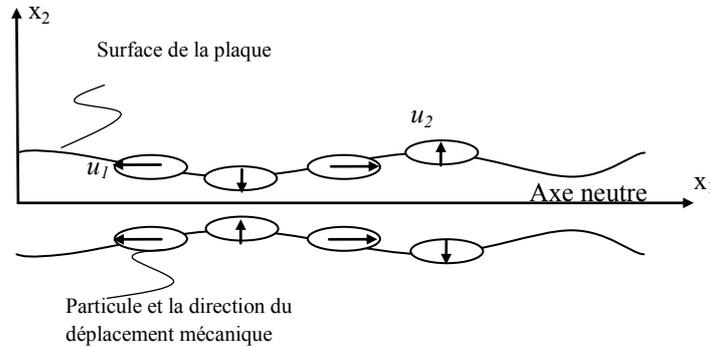


Figure 1.3 : Propagation de l'onde avec $\alpha=0$, mode symétrique

Ici, u_2 est le déplacement mécanique normal, u_1 est le déplacement mécanique transversal. Ce mode de propagation est caractérisé par une composante de u_2 symétrique par rapport au plan médian de la plaque.

- Si $\alpha = \frac{\pi}{2}$ alors $\begin{cases} u_2(-x_2) = u_2(x_2) \\ u_1(-x_2) = -u_1(x_2) \end{cases}$

L'onde est alors antisymétrique, les déplacements des particules sont présentés à la figure 1.4. La composante de déplacement normale est antisymétrique par rapport au plan médian de la plaque.

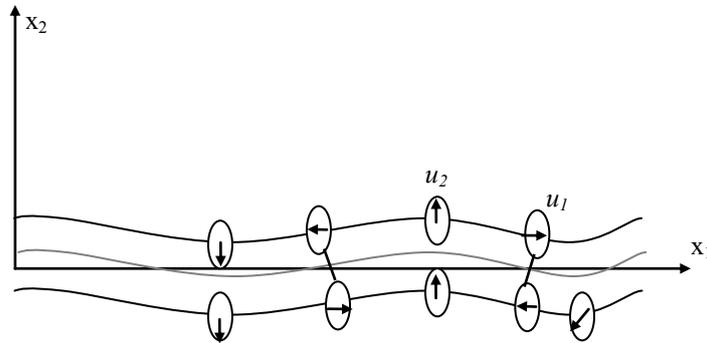


Figure 1.4 : Propagation de l'onde avec $\alpha=\pi/2$, mode antisymétrique

Après avoir établi l'expression du champ de déplacement dans le solide, nous devons établir les équations de dispersion de l'onde, à partir desquelles nous pouvons déduire les vitesses de propagation et les longueurs de l'onde.

L'équation de dispersion est donnée en tenant compte les conditions aux limites de la plaque. Après développement de l'équation (1.5) en injectant (1.4), on obtient :

$$T_{12} = \Lambda \cdot S \cdot \delta_{12} + 2\mu \cdot S_{12} = 2\mu \cdot S_{12} = \mu \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) \quad (1.29)$$

Selon les équations (1.20) , (1.21), et (1.25), nous avons :

$$\begin{aligned}
 T_{12} &= \mu \left[\frac{\partial^2 \phi}{\partial x_2 \partial x_1} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_1 \partial x_2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_1^2} \right] \\
 &= \mu \left[-i \cdot k \frac{\partial \phi}{\partial x_2} + (k^2 - k_T^2) \psi_0 - i \cdot k \frac{\partial \phi}{\partial x_2} + k^2 \psi_0 \right] \\
 &= \mu \left[(2k^2 - k_T^2) \cdot \psi_0 - 2i \cdot k \frac{\partial \phi}{\partial x_2} \right]
 \end{aligned} \tag{1.30}$$

Les parois de la plaque sont libres, on a donc: $T_{12}(x_2 = h) = 0$, nous aboutissons à :

$$\mu \left[(2k^2 - k_T^2) \cdot B \cdot \sin(q \cdot h + \alpha) + 2i \cdot k \cdot p \cdot A \cdot \sin(p \cdot h + \alpha) \right] \cdot \exp(i(k \cdot x_1 - \omega \cdot t)) = 0 \tag{1.31}$$

Egalement pour les conditions aux limites $T_{22}(x_2 = h) = 0$, après un calcul, nous avons :

$$\mu \left[(2k^2 - k_T^2) \cdot A \cdot \cos(p \cdot h + \alpha) + 2i \cdot k \cdot q \cdot B \cdot \cos(q \cdot h + \alpha) \right] \cdot \exp(i(k \cdot x_1 - \omega \cdot t)) = 0 \tag{1.32}$$

Les deux équations (1.31), (1.32) peuvent s'écrire sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} 2i \cdot k \cdot q \cdot \sin(p \cdot h + \alpha) & (2k^2 - k_T^2) \sin(q \cdot h + \alpha) \\ (2k^2 - k_T^2) \cos(p \cdot h + \alpha) & 2i \cdot k \cdot q \cdot \cos(q \cdot h + \alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{1.33}$$

Une solution non triviale existe uniquement si le déterminant de cette matrice est nul, soit :

$$\begin{aligned}
 &4k^2 p \cdot q \sin(p \cdot h + \alpha) \cos(q \cdot h + \alpha) \\
 &+ \left(2k^2 - k_T^2 \right)^2 \cos(p \cdot h + \alpha) \sin(q \cdot h + \alpha) = 0
 \end{aligned} \tag{1.34}$$

Où

$$\begin{aligned}
 p &= \sqrt{k_L^2 - k^2} = \sqrt{\frac{\omega^2}{V_L^2} - \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2} \\
 q &= \sqrt{k_T^2 - k^2} = \sqrt{\frac{\omega^2}{V_T^2} - \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2}
 \end{aligned} \tag{1.35}$$

On a donc une équation dite équation de dispersion reliant implicitement la longueur d'onde λ à la pulsation ω . On rappelle que la vitesse de propagation ou vitesse de phase s'écrit :

$$c = V_\varphi = \lambda \cdot f = \frac{\omega}{k} \quad (1.36)$$

Deux ondes de fréquences différentes auront donc une vitesse de propagation différente, c'est-à-dire qu'il y a une dispersion au cours de la propagation de l'onde.

En réutilisant les expressions de p et q , l'équation de dispersion peut être réécrite de la façon suivante :

$$\frac{\omega^4}{V_T^4} = 4k^2 q^2 \left(1 - \frac{p \tan(p \cdot h + \alpha)}{q \tan(q \cdot h + \alpha)} \right) \quad (1.37)$$

On remarque que cette équation en contient en réalité deux selon la valeur de α . Une onde symétrique ($\alpha=0$) et une onde antisymétrique ($\alpha=\pi/2$) de mêmes fréquences mais de vitesses de propagation différentes. Cette équation est la relation de dispersion des ondes de Lamb ou l'équation de Rayleigh-Lamb.

Pour un mode symétrique ou antisymétrique à une fréquence donnée, il peut y avoir plusieurs longueurs d'onde λ vérifiant l'équation de dispersion. Chaque longueur de l'onde solution de l'équation (1.37) définit ainsi un mode de propagation, la plus faible étant celle du mode d'ordre 0.

Lorsque l'équation de dispersion est vérifiée, les équations de conditions aux limites $T_{12}(x_2 = h) = 0$ et $T_{22}(x_2 = h) = 0$ sont alors équivalentes et les deux constantes A et B sont liées par la relation suivante :

$$A = - \frac{2i \cdot k \cdot q \cdot \cos(q \cdot h + \alpha)}{(2k^2 - k_T^2) \cdot \cos(p \cdot h + \alpha)} B \quad (1.38)$$

On peut alors exprimer les déplacements à une constante B près.

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{u}_1 = q \cdot B \left[\cos(q \cdot x_2 + \alpha) - \frac{2k^2}{(k^2 - q^2)} \frac{\cos(q \cdot h + \alpha)}{\cos(p \cdot h + \alpha)} \cos(p \cdot z + \alpha) \right] \exp(i(k \cdot x_1 - \omega t)) \\ \tilde{u}_2 = ik \cdot B \left[\sin(q \cdot x_2 + \alpha) - \frac{2pq}{(k^2 - q^2)} \frac{\cos(q \cdot h + \alpha)}{\cos(p \cdot h + \alpha)} \sin(p \cdot z + \alpha) \right] \exp(i(k \cdot x_1 - \omega t)) \end{array} \right\} \quad (1.39)$$

D'après les articles [NIK95][HUD09], lorsque le produit $k \cdot h$ tend vers 0, c'est-à-dire lorsque λ devient grand devant l'épaisseur, seuls les modes d'ordre 0 existent. Les modes d'ordres supérieurs n'existent que pour des fréquences plus élevées.

Dans cette étude, nous nous intéressons aux fréquences ultrasonores comprises entre 20 kHz et 250 kHz. Ces limites se justifient par des contraintes acoustiques et de performance électronique. Ainsi, pour des raisons de confort évidentes, nous avons cherché à être au-delà du domaine de perception de l'oreille humaine (compris entre 20 Hz et 20 kHz). Par ailleurs, en se limitant à des fréquences inférieures à 250 kHz nous évitons les difficultés inhérentes à la réalisation d'une électronique compacte consommant peu d'énergie et permettant d'exciter aisément les transducteurs piézoélectriques, matériaux à forte permittivité diélectrique.

A partir des simulations réalisées avec Matlab appliquées à une plaque de cuivre et illustrées à figure 1.5, pour une demi-épaisseur h inférieure à 250 μm , le produit $k \cdot h$ que nous avons retenu est très inférieur à 1 sur toute la plage de fréquences d'intérêt. Nous montrons ainsi que seuls un mode symétrique et un mode antisymétrique sont susceptibles de se propager dans ce domaine de fréquence.

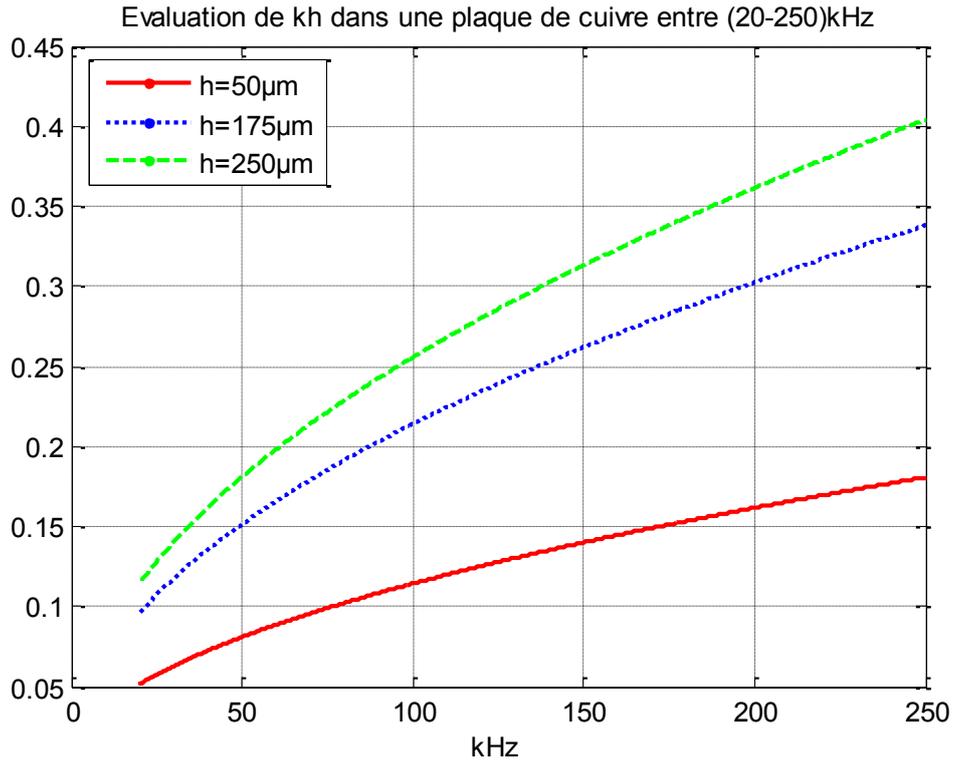


Figure 1.5 : Evaluation du produit $k \cdot h$ entre 20 kHz et 250 kHz, pour des plaques de cuivre de différentes épaisseurs.

1.3. Caractérisation de la propagation dans les plaques minces

Les différents paramètres caractérisant les ondes acoustiques qui nous intéressent sont la vitesse de phase V_φ , la vitesse de groupe V_G , la longueur de l'onde λ et le rapport entre les composants normales et transversales du déplacement mécanique.

La vitesse de phase V_φ est la vitesse à laquelle une phase particulière de l'onde se propage dans l'espace. Si l'on observe un point particulier de l'onde, par exemple un passage à zéro à l'intérieur d'un paquet d'ondes, nous aurons l'impression que ce point se déplace dans l'espace à la vitesse de phase.

La vitesse de groupe V_G est définie comme la dérivée de la pulsation par rapport au nombre d'onde associé à cette pulsation. De façon plus imagée, lorsqu'un paquet d'ondes présente une enveloppe qui se déforme peu au cours de sa propagation, la vitesse que semble avoir l'enveloppe est égale à la vitesse de groupe.

La longueur d'onde λ est la distance séparant deux crêtes successives d'une onde périodique.

A la surface de l'objet, le rapport entre la composante normale et transversale du déplacement mécanique, illustre la répartition d'énergie des ondes. Nous allons caractériser ces modes de propagation pour les matériaux suivants : le verre B270, le verre borosilicaté et le cuivre. Le tableau 1.2 illustre les valeurs numériques de ces matériaux.

Tableau 1.2 Paramètres mécaniques pour la simulation numérique.

Paramètres	Verre B270	Verre Borosilicate	Cuivre	Dimension
σ Coeff. Poisson)	0.219	0.2	0.343	Sans
ρ (Masse volumique)	2550	2200	8930	kg/m ³
E (Mod. Young)	71.5	63	137	10 ⁹ N/m ²
V_L (Vit. Longi.)	5653	5615	4889	m/s
V_T (Vit. Trans.)	2997	3075	1937	m/s

1.3.1. Mode symétrique S_0 ($\alpha=0$)

- Vitesse de phase et vitesse de plaque

Pour le premier mode symétrique de la propagation des ondes de Lamb, l'équation de dispersion (1.37) s'écrit ainsi :

$$\frac{\omega^4}{V_T^4} = 4k^2 q^2 \left(1 - \frac{p \tan(p \cdot h)}{q \tan(q \cdot h)} \right) \quad (1.40)$$

Avec les paramètres physiques du cuivre, nous pouvons donc simuler avec Mathematica et Matlab cette vitesse de phase. Les résultats sont illustrés à la figure 1.6.

Dans ce domaine de fréquences, la vitesse de propagation des ondes symétriques en mode 0 est quasi-constante. Il y aura très peu de dispersion de ces ondes. En effet, lorsque k tend vers 0, nous pouvons simplifier l'équation (1.40) :

$$\frac{\omega^4}{V_T^4} = 4k^2 q^2 \left(1 - \frac{p^2}{q^2} \right) = 4k^2 \omega^2 \left(\frac{1}{V_T^2} - \frac{1}{V_L^2} \right) \quad (1.41)$$

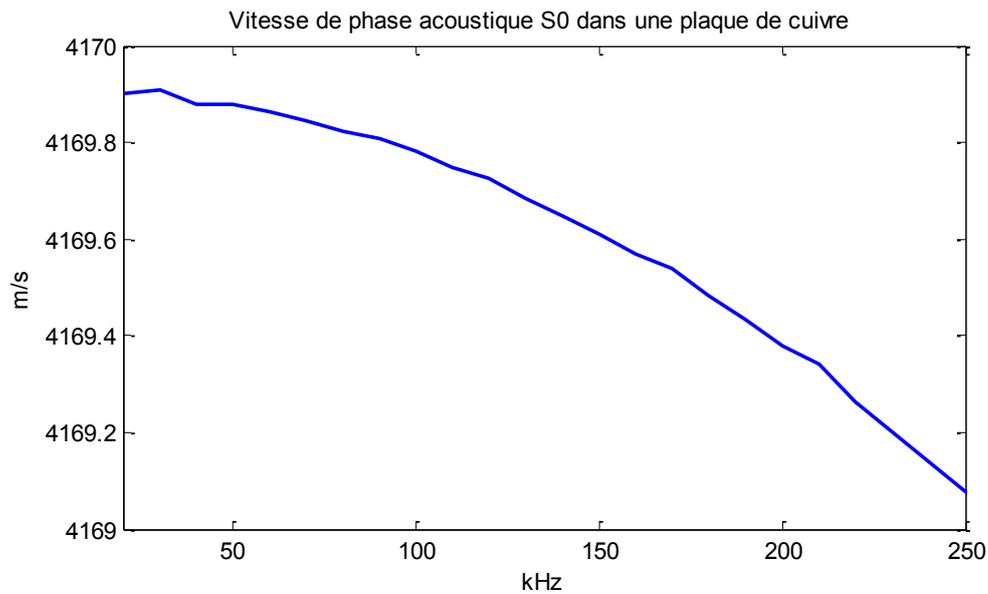


Figure 1.6 : Evaluation de la vitesse de phase de la propagation de l'onde en mode S_0 dans une plaque de cuivre d'une demi-épaisseur $175 \mu\text{m}$, et pour une fréquence comprises entre 20 kHz et 250 kHz.

La vitesse de phase V_ϕ tend vers une limite finie appelée vitesse de plaque [ROY01] ainsi définie :

$$V_p = 2V_T \sqrt{1 - \frac{V_T^2}{V_L^2}} = V_T \sqrt{2} \sqrt{1 + \frac{\sigma}{1-\sigma}} = V_L \sqrt{1 - \frac{\sigma^2}{(1-\sigma)^2}} \quad (1.42)$$

Cette vitesse ne dépend que du matériau, elle est toujours comprise entre $\sqrt{2}V_T$ et V_L . Les vitesses de plaque de ces matériaux sont calculées et présentées dans le tableau 1.3.

Tableau 1.3 Vitesse de plaque selon les matériaux

Paramètres	Verre B270	Verre Borosilicate	Cuivre	Dimension
V_p (Vit. Plaque)	5426	5436	4170	m/s

Aux fréquences de travail envisagées, par exemple 50 kHz, une onde de Lamb en mode S_0 possède une longueur d'onde $\lambda = V_\phi / f$ de 83.4 mm, grande devant la dimension caractéristique du doigt qui n'est que de 10 à 15 mm.

- Déplacement mécanique

Rappelons que le déplacement mécanique en tout point d'une plaque est caractérisé par l'équation (1.39). Tenant compte des fréquences et des épaisseurs qui nous intéressent, nous pouvons simplifier cette équation lorsque $p \cdot h \rightarrow 0$ et $q \cdot h \rightarrow 0$. Pour un mode de Lamb symétrique S_0 ($\alpha=0$), une onde se déplaçant selon x_1 présente un vecteur déplacement mécanique \vec{U} , dont les composantes dans le plan x_1 et x_2 s'expriment sous la forme :

$$\begin{aligned} U_1 &= q \cdot B \left[1 - \frac{2k^2}{(k^2 - q^2)} \right] \\ U_2 &= i \cdot k \cdot B \left[q \cdot x_2 + \frac{2p \cdot q}{(k^2 - q^2)} p \cdot x_2 \right] = i \cdot q \cdot B \left[1 - \frac{2p^2}{k^2 - q^2} \right] k \cdot x_2 \end{aligned} \quad (1.43)$$

Où, B est une constante faisant simplement référence à l'amplitude de l'onde. On peut également exprimer en module, le rapport des deux composantes de déplacements mécaniques à la surface de la plaque en $x_2 = h$:

$$\left| \frac{U_2}{U_1} \right| (h) = \frac{\sigma}{1 - \sigma} k \cdot h \quad (1.44)$$

L'onde en mode S_0 est pratiquement longitudinale lorsque $k \cdot h$ tend vers 0.

Application Numérique pour une plaque de cuivre d'épaisseur 0,5 mm :

$h = 0,25$ mm, $\sigma = 0,343$, $f = 250$ kHz.

$V_\varphi = 4170$ m/s.

$$\left| \frac{U_2}{U_1} \right| (h) = \frac{\sigma}{1 - \sigma} k \cdot h = 0.049$$

Pour détecter sélectivement une onde en mode S_0 , qui est quasi longitudinale, il faudrait mettre des capteurs sur le chant de la plaque, perpendiculairement à la direction de propagation. C'est difficile quand l'épaisseur est faible. Dans la pratique, nous cherchons à placer les transducteurs à la surface de la plaque ce qui implique que ce dernier soit sensible à un cisaillement de sa face pour détecter efficacement le mode symétrique.

1.3.2. Mode antisymétrique A_0 ($\alpha=\pi/2$)

a) Relation de dispersion, lorsque $k \rightarrow 0$ et $k \cdot h \ll 1$.

La relation de dispersion entre la pulsation ω et le vecteur de l'onde \vec{k} d'un mode de Lamb antisymétrique A_0 s'écrit ainsi :

$$\frac{\omega^4}{V_T^4} = 4k^2 q^2 \left(1 - \frac{1 + \frac{q^2 h^2}{3}}{1 + \frac{p^2 h^2}{3}} \right) \quad (1.45)$$

Lorsque les produits $p \cdot h$ et $q \cdot h$ deviennent petits devant 1, cette équation se simplifie:

$$\omega \approx 2 \frac{V_T}{\sqrt{3}} \sqrt{1 - \frac{V_T^2}{V_L^2}} k \cdot h = \frac{V_p}{\sqrt{3}} h \cdot k^2 \quad (1.46)$$

b) Vitesse de phase

La vitesse de phase s'exprime en fonction de la pulsation ω et du nombre d'onde k , dans le cas où $k \cdot h \ll 1$, par :

$$V_\phi = \frac{\omega}{k} = \frac{V_p}{\sqrt{3}} kh \quad (1.47)$$

La figure 1.7 montre la simulation avec Matlab des vitesses de phase pour le mode A_0 dans des plaques en cuivre d'épaisseurs différentes. Les simulations pour les plaques en verre B270 et en verre borosilicate sont présentées en Annexe I. Par exemple, pour une plaque de cuivre de dimensions $75 \times 75 \times 0,5$ mm, une onde peut parcourir en 10 ms au moins 50 fois la longueur de la plaque à une vitesse de phase de 370 m/s correspondant à une fréquence de travail de 50 kHz. La longueur n'est alors que de 7.4 mm, c'est-à-dire inférieure à la dimension caractéristique du doigt. On peut s'attendre alors à ce qu'un toucher de la plaque engendre une perturbation bien plus conséquente qu'avec le mode S_0 , et d'autant plus conséquente que la vibration pour A_0 est essentiellement hors plan.

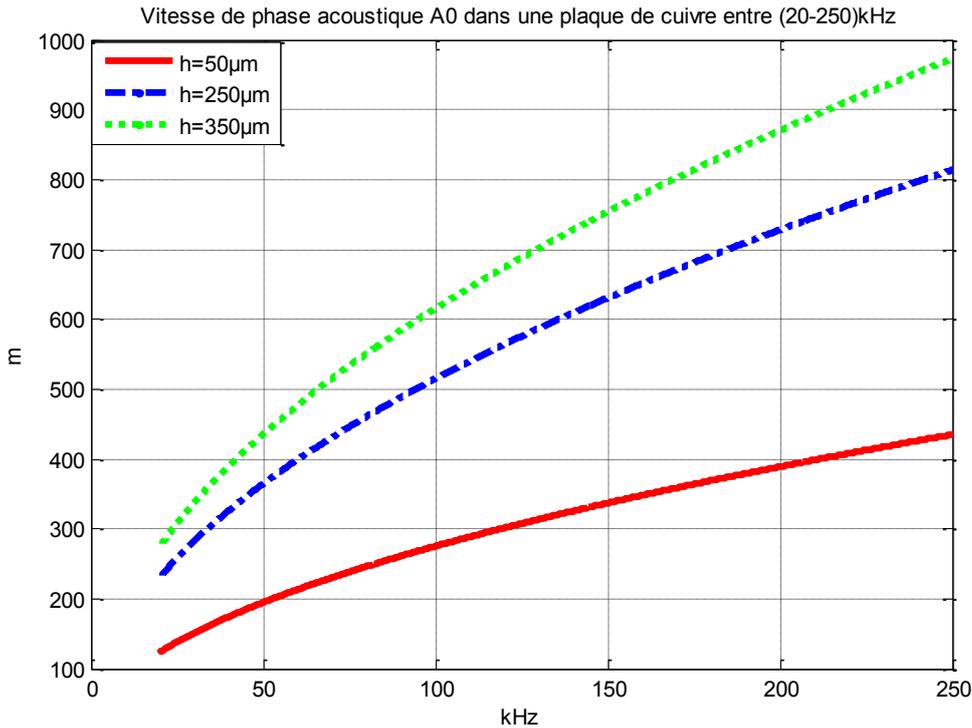
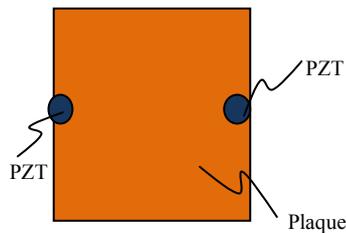


Figure 1.7 : Vitesses de phase en fonction des fréquences entre 20 kHz et 250 kHz, pour les plaques de cuivre de demi-épaisseurs (h) 50 μm , 175 μm et 250 μm .

En un court laps de temps, cette onde peut se réfléchir un grand nombre de fois sur les bords de la plaque et avoir les caractéristiques d'un régime quasi permanent. Selon les fréquences de travail, les interférences entre les ondes directes et réfléchies engendrent des figures de vibration qui peuvent correspondre à des résonances ou pas. Lorsqu'il y a résonance et on peut observer les ventres et les nœuds de vibration.

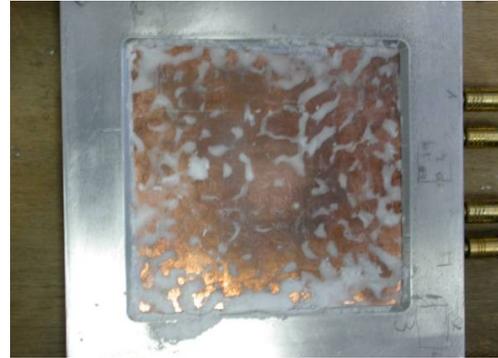
La figure 1.8 illustre la mise en évidence d'une figure de résonance avec de la farine de verre constituée de micro billes creuses de verre, de diamètre 12 μm , saupoudrée sur une plaque en cuivre d'épaisseur 350 μm . Cette plaque est couplée à deux transducteurs piézoélectriques de diamètre 10 mm et d'épaisseur 0,5 mm. L'excitation consiste en une impulsion avec porteuse de 1500 cycles à la fréquence de 109,12 kHz. Les nœuds de vibration sur la plaque sont visiblement indiqués par les zones d'accumulation des microbilles. Les positions des ventres et des nœuds sont stables, sinon les microbilles ne resteraient pas aux positions fixes. Cette figure de résonance a été obtenue avec une durée d'excitation de 1500 cycles \times 1/109,12 kHz soit 13,7 ms. D'après la simulation de la figure 1.7, les ondes engendrées par les transducteurs PZT à 109,12 kHz ont parcouru, à la vitesse de phase, au moins 70 fois la longueur de la plaque en créant de nombreuses ondes réfléchies.



L'excitation consiste en une impulsion avec porteuse de 1500 cycles à la fréquence de 109,12 kHz. Amplitude 10 V. La cadence de répétition est de 16 ms.



(A)



(B)

Figure 1.8 : Mise en évidence d'une figure de résonance avec de la farine de verre constituée de microbilles creuses de verre de diamètre 12 μm saupoudrée sur une plaque de cuivre d'épaisseur 350 μm . A) Avant mise en résonance. B) Accumulation des microbilles dans les nœuds de vibration.

Nous nous intéressons aux applications tactiles, dans lesquelles le temps de réponse est un critère important pour l'interaction homme-machine. Dans les interfaces comme les écrans tactiles, les détections des positions des touchers sont couplées avec un retour visuel. Grace aux courbes de vitesses de phase simulées, nous pouvons conclure que le mode A_0 peut être utilisé pour établir un régime quasi permanent en une dizaine de ms. Ce temps est satisfaisant pour réaliser une interface tactile. L'exploitation du mode A_0 dans une interface tactile est donc réaliste et avec un temps de réponse convenable, même dans le cas où la fréquence de travail est associée à une mise en résonance et nécessite d'attendre un régime stationnaire.

c) Vitesse de groupe

Pour une onde antisymétrique se propageant dans une plaque isotrope de demi-épaisseur h , la vitesse de groupe s'exprime en fonction de la pulsation de l'onde ω et du nombre de l'onde k , dans le cas où $k \cdot h \ll 1$, par :

$$V_G = \frac{\partial \omega}{\partial k} = \frac{2}{\sqrt{3}} V_p \cdot h \cdot k \quad (1.48)$$

La figure 1.9 montre par simulation numérique des vitesses de groupe pour le mode A_0 dans des plaques de cuivre d'épaisseurs différentes. Les simulations pour les plaques en verre B270 et en verre borosilicate sont présentées en Annexe 1.

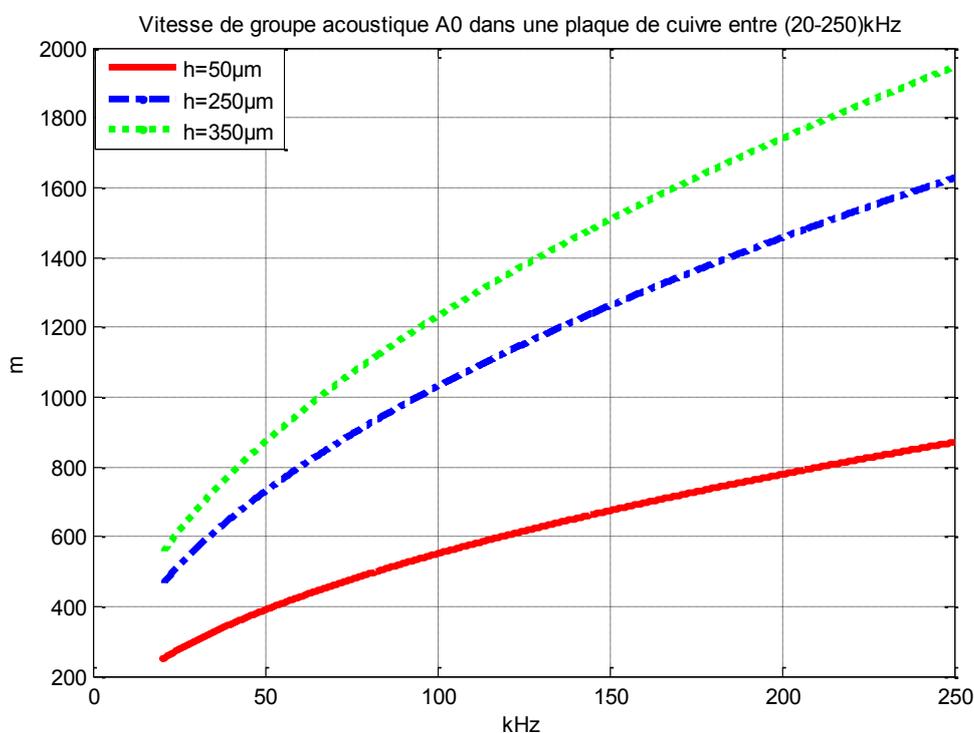


Figure 1.9 : Vitesses de groupe en fonction des fréquences entre 20 kHz et 250 kHz, pour les plaques de cuivre de demi-épaisseurs (h) 50 µm, 175 µm et 250 µm.

La vitesse de groupe caractérise la vitesse des paquets d'ondes. Dans notre cas, avec un produit $k \cdot h$ petit et une fréquence comprise entre 20 kHz et 250 kHz, cette vitesse vaut toujours deux fois la vitesse de phase et reste inférieure à 1000 m/s. Dans certaines applications tactiles [DIE89][NIK00], les chercheurs exploitent une chiquenaude ou un impact bref sur une surface tactile comme moyen d'interaction.

Cette interaction engendre un mode de Lamb A_0 se propageant à la vitesse de groupe vers différents récepteurs aptes à déterminer un temps d'arrivée. La coordonnée de l'impact est déduite du temps de transit différentiel entre les différents récepteurs. Dans ce type d'interface, la résolution temporelle est critique, de l'ordre de la microseconde pour obtenir une résolution de l'ordre du mm.

Dans le cas où l'on cherche à localiser un toucher à partir d'une interaction statique ou quasi-statique avec un mode de Lamb, (un doigt au repos sur une surface tactile) il

apparaît un premier bénéfice qui serait de ne pas avoir à élaborer une électronique de détection rapide.

Prenons maintenant comme exemple une plaque de cuivre de dimension $75 \times 75 \times 0,5$ mm, couplée à des transducteurs PZT disposés aux bords de la plaque. Selon la simulation de la figure 1.9, compte tenu des fréquences et des épaisseurs qui nous intéressent, une onde engendrée par un transducteur peut arriver à un autre transducteur en moins de $75 \mu\text{s}$, alors que la fenêtre d'excitation peut valoir 100 fois ce temps. La synchronisation et le positionnement de la fenêtre de réception par rapport à la fenêtre d'émission est donc réalisable, par simple verrouillage numérique sur un passage à zéro du signal reçu, sans avoir à connaître, le moment exact de l'émission et donc sans devoir câbler le signal de synchronisation.

d) Longueur de l'onde λ

Pour une onde antisymétrique se propageant dans une plaque isotrope de demi-épaisseur h , la longueur d'onde s'exprime en fonction de la pulsation ω et du nombre de l'onde k , dans le cas où $k \cdot h \ll 1$, par :

$$\lambda = \frac{V_\varphi}{f} = \sqrt{\frac{2\pi}{\sqrt{3}}} V_p \frac{h}{f} \quad (1.49)$$

La figure 1.10 montre par simulation numérique des longueurs d'ondes du mode A_0 dans des plaques de cuivre d'épaisseurs variables.

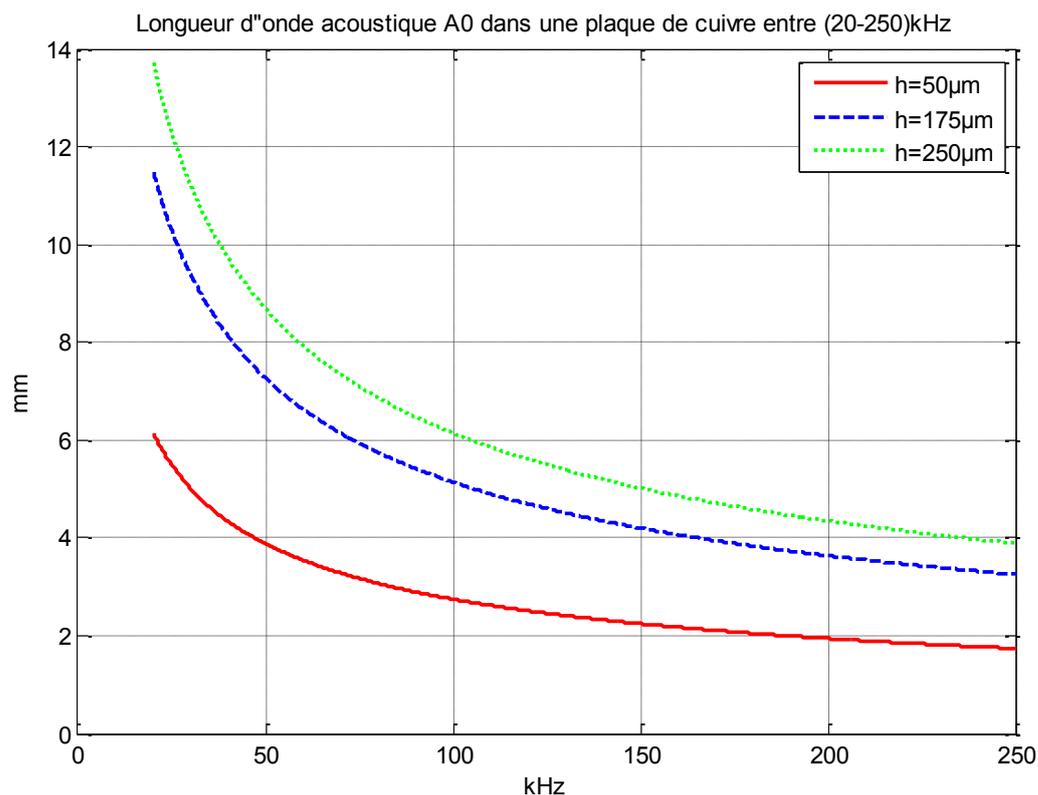


Figure 1.10 : Longueur d'onde dans une plaque de cuivre en fonction de la fréquence, entre 20 kHz et 250 kHz, pour le mode A_0 .

Nous pouvons constater que la longueur d'onde est comprise entre 1,8 mm et 14 mm. Les simulations (voir Annexe 1) pour le verre B270 et pour le verre borosilicate indiquent une longueur d'onde comprise entre 2 et 16 mm.

La demi-longueur d'onde est aussi la distance entre deux ventres ou deux nœuds dans une figure de résonance (voir figure 1.8). Un doigt qui touche une surface tactile peut couvrir une ou plusieurs longueurs d'onde. En supposant que l'interaction entre un doigt et une plaque soit assimilable à un blocage / absorption partielle par le doigt des ventres de vibrations sur la plaque, comme illustré à la figure 1.11, cette interaction peut s'apparenter à un phénomène de diffraction / amortissement des ondes de Lamb dans la région du toucher.

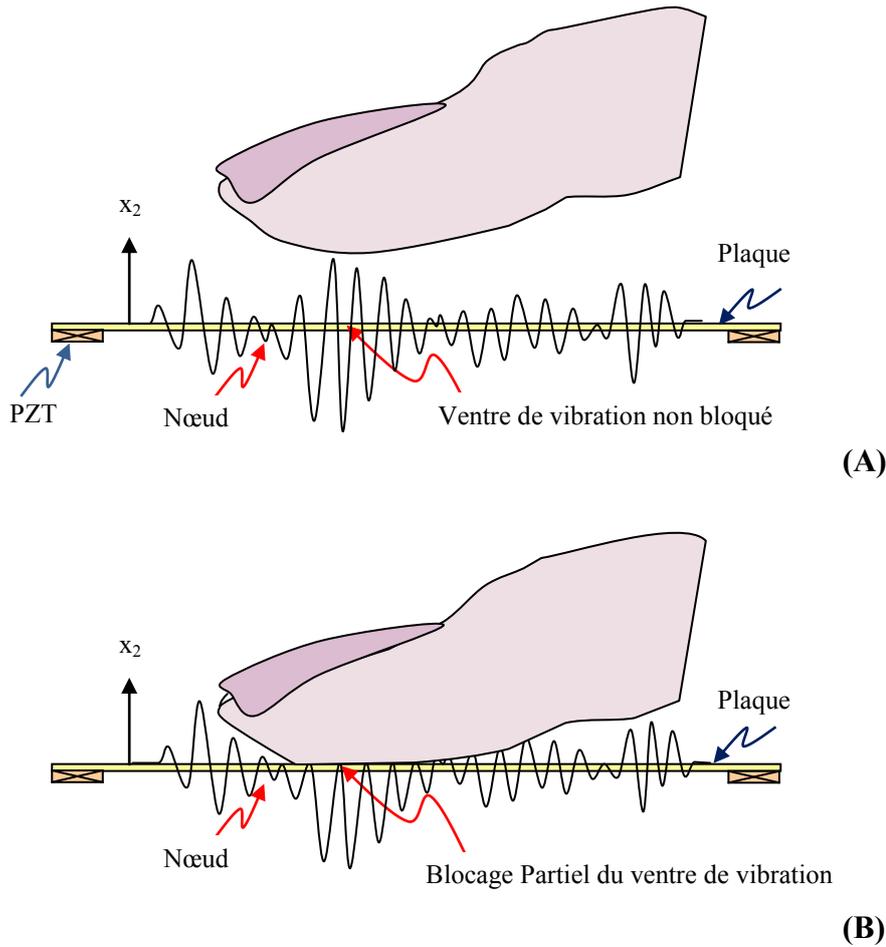


Figure 1.11 : Interaction doigt-plaque par effet non linéaire consistant en un blocage partiel de la vibration par le doigt. A) Ventre de vibration libre. B) Cas d'interaction doigt-plaque : Pose ou glissement du doigt et blocage partiel du ventre de vibrations.

Dans le cas où la demi-longueur d'onde est petite devant la dimension caractéristique du doigt, ce qui est toujours le cas pour le mode A_0 et pour les plaques envisagées, un doigt au contact de la plaque couvre plusieurs ventres. L'interaction entre le doigt et la plaque est donc importante, et peut fournir des informations de diffractions ou d'amortissement de mode permettant de localiser la position du doigt. Par contre, si la demi-longueur d'onde était plus élevée, et grande devant la dimension caractéristique du doigt, il serait possible que le doigt tombe sur un nœud de vibration et perturbe peu l'onde acoustique, ce qui ne permettrait pas de déceler le toucher.

Pour résoudre ce problème, on envisage d'utiliser plusieurs ondes de Lamb à différentes fréquences, associées à des figures de résonances différentes. Lorsque les positions des nœuds et des ventres sont différentes, un doigt posé sur une plaque à une position peut rencontrer un nœud d'une onde à une fréquence donnée, mais aussi les

ventres correspondant aux autres fréquences. S'il existe une zone où il n'y a que des nœuds de vibrations dans un dispositif, cette zone est considérée comme une zone morte pour les ondes qui se propagent dans ce dispositif. C'est une zone où les ondes ont de la difficulté à se propager, par exemple le coin d'une plaque. Ceci est particulièrement vrai au début de l'émission d'une onde. Nous pourrions donc envisager de placer des points de fixation dans ces zones, s'ils ont très peu d'impact sur la propagation des ondes dans la plaque.

e) Déplacement mécanique

Rappelons que le déplacement mécanique en tout point d'une plaque est caractérisé par l'équation (1.39). Pour un mode de Lamb antisymétrique A_0 ($\alpha=\pi/2$), avec $p \cdot h \rightarrow 0$ et $q \cdot h \rightarrow 0$, une onde plane se déplaçant selon x_1 présente un vecteur déplacement mécanique \vec{U} , dont les composantes dans le plan x_1 et x_2 s'expriment sous la forme :

$$\left\{ \begin{array}{l} U_1 = q \cdot B \left[-q \cdot x_2 - \frac{2k^2}{(k^2 - q^2)} \frac{q \cdot h}{p \cdot h} p \cdot x_2 \right] = \frac{k^2 + q^2}{k^2 - q^2} q^2 \cdot B \cdot x_2 \\ U_2 = i \cdot k \cdot B \left[1 + \frac{2p \cdot q}{(k^2 - q^2)} \frac{q \cdot h}{p \cdot h} \right] = i \cdot k \frac{k^2 + q^2}{k^2 - q^2} B \end{array} \right\} \quad (1.50)$$

Où, B est une constante faisant simplement référence à l'amplitude de l'onde. On peut également exprimer en module, le rapport des deux composantes des déplacements mécaniques à la surface de la plaque en $x_2 = h$:

$$\left| \frac{U_2}{U_1} \right| (h) = \frac{k}{q^2 h} = \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{V_\varphi}{V_T} \right)^2 \right]} \frac{1}{k \cdot h} \quad (1.51)$$

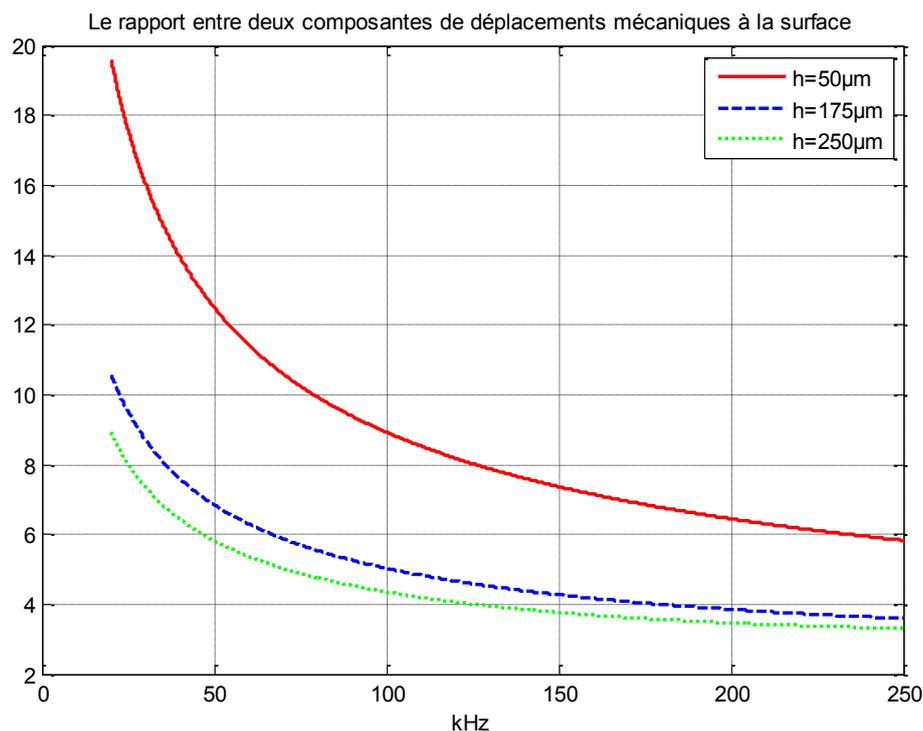


Figure 1.12 : Rapport entre les composantes de déplacement normale U_2 (+/-h) et tangentielle U_1 (+/-h), pour le mode A_0 de Lamb dans une plaque de cuivre.

La figure 1.12 montre la simulation numérique du rapport entre la composante de déplacement mécanique normale U_2 (h) et la composante de déplacement mécanique tangentielle U_1 (h) à la surface d'une plaque en cuivre. Les simulations pour les plaques en verre B270 et en verre borosilicate sont présentées en Annexe 1. Ce rapport permet de caractériser le vecteur déplacement mécanique.

On constate ainsi qu'à 100 kHz, pour une plaque de cuivre d'épaisseur 100 µm, la composante de déplacement normale est 8,9 fois plus grande que la composante de déplacement tangentielle. Ce ratio augmente encore si l'on s'intéresse à des déplacements à l'intérieur de la plaque. En revanche, ce ratio chute si la fréquence et l'épaisseur de la plaque augmentent simultanément. Ainsi, pour une épaisseur de 350 µm, il n'est plus que de 3,6 à 250 kHz. Le tableau 1.4 récapitule ces résultats :

Tableau 1.4 Rapports des composants de déplacements mécaniques

U_2/ U_1 (+/- h)	Verre B270	Verre Borosilicate	Cuivre
f = 100 kHz, 2h = 100 µm	10,4	10,1	8,9
f = 250 kHz, 2h = 350 µm	3,8	3,7	3,6

Pour désigner la plaque, nous utiliserons en fonction du contexte, les termes de tambour, plaque ou cavité. Le terme tambour fera référence au cas où le déplacement mécanique se résume à la seule composante de déplacement normale U_2 , tandis que le terme plaque désignera le cas général de propagation des ondes dans un milieu volumique. Le terme cavité sera utilisé dans le cas où l'on veut porter l'accent sur les conditions et le nombre de réflexions des ondes dans la détermination des modes stationnaires.

1.4. Conclusion

L'étude théorique de la propagation des ondes montre que deux modes (symétrique et antisymétrique) de Lamb présentent des caractéristiques très différentes. Dans une plaque de cuivre d'épaisseur faible et une fréquence comprise entre 20 kHz et 250 kHz, seuls les deux premiers modes S_0 et A_0 existent. Une onde en mode S_0 est peu dispersive, se propage à 4170 m/s avec une longueur d'onde de 83 mm à 50 kHz. Ce mode est difficile à détecter si l'épaisseur est faible ce qui est notre cas. Un mode A_0 , est associé à une onde très dispersive qui se propage à une vitesse de phase comprise entre 100 m/s et 1000 m/s. Ce mode présente une longueur d'onde compatible avec la dimension caractéristique du doigt pour envisager une interaction efficace que ce soit sur un mode purement propagatif avec perturbation d'un phénomène de diffraction, par blocage de la surface, ou purement stationnaire avec amortissement de figures de résonance par absorption.

Par ailleurs la composante normale du vecteur déplacement mécanique est au moins 2,6 fois plus importante que la composante tangentielle, pour le mode A_0 de Lamb. L'énergie des ondes est donc concentrée sur les déplacements normaux. En revanche pour le mode S_0 , c'est pratiquement une onde longitudinale. Dans notre cas, les capteurs acoustiques placés en surface de plaque subissent des flexions et délivrent des signaux qui sont essentiellement ceux du mode A_0 .

Le toucher d'une plaque mince peut ainsi être associé à une perturbation dépendante de la façon dont l'onde se propage dans la plaque et voit son énergie se répartir à sa surface. Cette perturbation existe en régime propagatif transitoire direct, ainsi qu'en régime permanent résonant ou pas. Dans le cas de perturbation de figures de résonance, les longueurs d'ondes exploitées sont plus petites que la dimension

caractéristique du doigt ce qui permet de supposer des conditions de mesure optimales. Dans le cas de perturbation d'ondes de propagation en régime impulsionnel, on peut s'attendre à un phénomène de diffraction des ondes de Lamb, perturbé par le toucher. Nous examinerons ces deux situations extrêmes pour réaliser un objet tactile.

Chapitre 2. Réponse en fréquence de l'interface

Les simulations au chapitre 1 nous fournissent certaines propriétés inhérentes à la propagation des ondes de Lamb dans une plaque, par exemple les vitesses de propagation et les rapports entre les composantes du déplacement. Mais elles ne nous permettent pas d'évaluer l'influence de certains paramètres, telles que les conditions aux limites, la température, la géométrie de la plaque, sur la propagation des ondes et par conséquent des indications sur les règles de conception de notre procédé tactile. Nous avons ainsi mené en parallèle avec le développement d'un modèle éléments finis une campagne d'essais afin d'évaluer quantitativement l'influence de ces paramètres et aussi de former une base de données pour le recalage du modèle. Ce chapitre résume les mesures expérimentales des réponses en fréquence d'un système de transduction et de propagation d'ondes. Le système se compose des transducteurs acoustiques et d'une plaque où les ondes se propagent. Ces résultats nous donnent des règles de conception pour une interface tactile.

Chapitre 2. Réponse en fréquence de l'interface.....	43
2.1. Introduction	44
2.2. Réponse en fréquence du système avec une plaque à bords libres	47
2.3. Réponse du système avec différentes conditions aux limites	52
2.4. Analyse des effets non linéaires.....	62
2.5. Conclusion.....	69

2.1. Introduction

2.1.1. Réponse en fréquence d'un système

La réponse en fréquence d'un système (mécanique ou électrique) est la mesure de sa réponse à un signal d'excitation de fréquence variable et d'amplitude constante [SIM07]. Pour un système de transduction et de propagation d'ondes, qui se compose d'une plaque mince de dimensions finies et couplée à des transducteurs émetteurs/récepteurs, d'une source électrique (pour mettre la plaque en vibration) et un système de mesure, cette réponse en fréquence dépend des dimensions, des conditions aux limites et de l'emplacement des transducteurs émetteur et récepteur. Dans ce travail, nous utilisons 2 à 4 transducteurs, un ou deux pour émettre les signaux, les autres pour mesurer les réponses.

Généralement, une réponse en fréquence est caractérisée par l'amplitude et la phase de la réponse du système en fonction de la fréquence. Typiquement en automatique [VER03], les réponses sont illustrées par un diagramme de Bode ou par un diagramme de Nyquist. En pratique, les mesures des réponses seront illustrées par des spectres d'amplitude. Pour les raisons explicitées dans le chapitre 1, nous nous intéressons ici aux seules fréquences ultrasonores comprises entre 20 kHz et 250 kHz.

2.1.2. Système de transduction et de propagation des ondes

La figure 2.1 illustre le schéma de principe de notre système de transduction et de propagation des ondes. Il se compose d'un générateur de signaux arbitraires AFG 3012 de chez Tektronix, d'une carte d'acquisition ADC 212/50 de chez Pico Technology et d'une plaque couplée avec des transducteurs piézoélectriques placés sur les bords. Un châssis est fabriqué pour maintenir cette plaque, des câbles coaxiaux sont utilisés pour coupler les transducteurs au générateur de fonctions et à la carte d'acquisition.

Le système se compose de deux parties : la partie transduction des ondes par les transducteurs émetteurs/récepteurs et la partie propagation des ondes dans la plaque.

La transduction des ondes mécaniques est réalisée au moyen de céramiques piézoélectriques. Ces transducteurs couplés avec la plaque peuvent être utilisés soit en capteur (effet direct) soit en actionneurs (effet inverse).

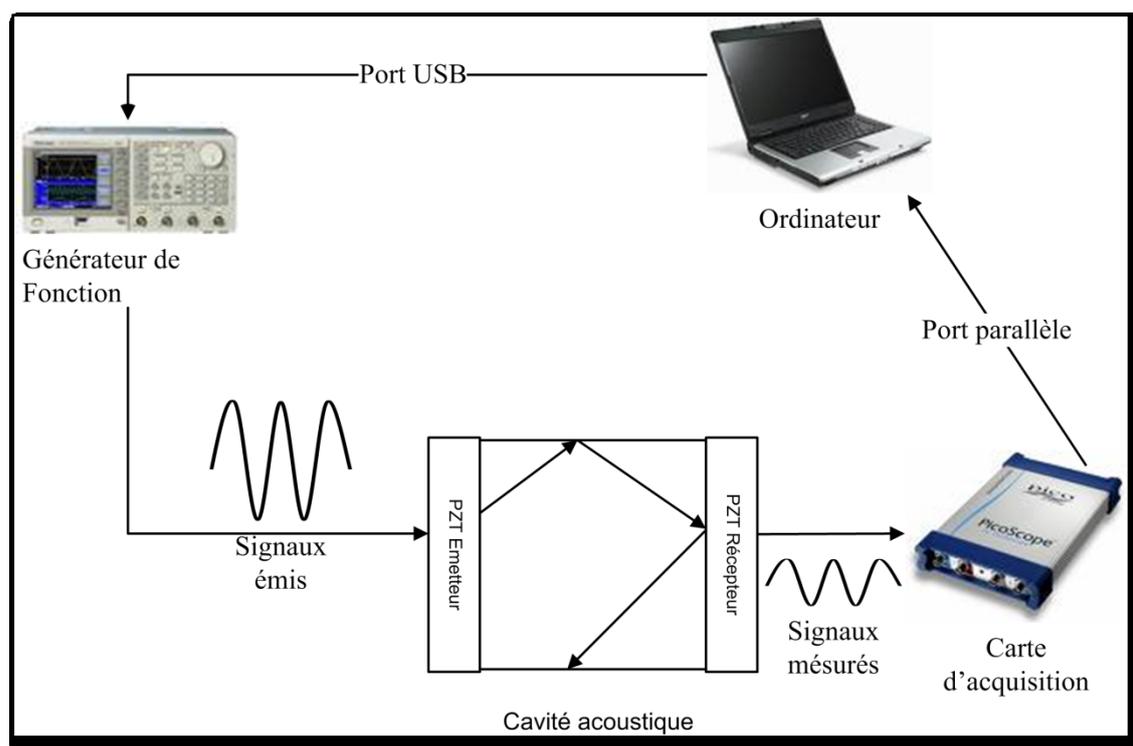


Figure 2.1 : Schéma du système de transduction et de propagation des ondes de Lamb.

L'effet *piézo-électrique direct* est le phénomène de polarisation électrique induite par l'application d'une contrainte à certains matériaux. Cette polarisation est proportionnelle à la contrainte et change de signe avec elle. Ce phénomène est réversible : une polarisation électrique résultant de l'application d'un champ électrique entraînera une déformation du même matériau. On parle alors d'effet *piézo-électrique inverse*.

L'origine de la piézo-électricité, mise en évidence par Louis Becquerel et expliqué par les frères Curie en 1880, est liée à la structure cristalline du matériau : le phénomène ne s'observe que dans certains solides non-conducteurs ou semi-conducteur possédant une anisotropie cristalline caractéristique. Très peu de solides sont naturellement piézo-électriques, le quartz étant le plus connu. Les céramiques piézo-électriques de synthèse apparaissent dans les années quarante. Parmi ces matériaux de synthèse, les Titano Zirconates de Plomb (*PZT*) sont les plus répandus.

Les ondes élastiques dans un transducteur PZT se répartissent en trois ondes : une onde quasi-longitudinale (onde de compression) et deux ondes quasi-transverses (onde de cisaillement) [DIE74]. Or, selon l'étude du chapitre 1, seules les ondes du premier mode antisymétrique de plaque ou ondes de flexion nous intéressent. Il faut

donc que le transducteur PZT soit conçu pour pouvoir engendrer et détecter efficacement ce type de mode.

En principe, les propriétés électriques et élastiques étant couplées dans un transducteur piézoélectrique, il est nécessaire de résoudre les équations de l'élasticité et les équations des ondes électromagnétiques [YAN06]. Nous nous intéressons aux ondes de fréquences inférieures à 100 kHz, très loin des ordres de grandeurs des ondes électromagnétiques. Donc nous négligeons le rôle du champ magnétique.

Un transducteur PZT peut être caractérisé en mesurant l'impédance en fonction de la fréquence [IRE61]. Concernant la bande de fréquences appliquée dans ce travail de thèse, les transducteurs possèdent une impédance élevée essentiellement due à leur capacité intrinsèque de 23 pF/mm² pour un demi-millimètre d'épaisseur. Elle se calcule aisément à partir de la permittivité diélectrique de la céramique utilisée, $\epsilon_r = 1300$ pour le PZ26 et 1800 pour le PZ27.

La figure 2.2 illustre le schéma du circuit électronique du système. Ici, V_s est la tension réelle envoyée par le générateur de fonctions, V_m est mesurée par la carte d'acquisition. Z_s et Z_m sont les impédances du générateur et de la carte d'acquisition.

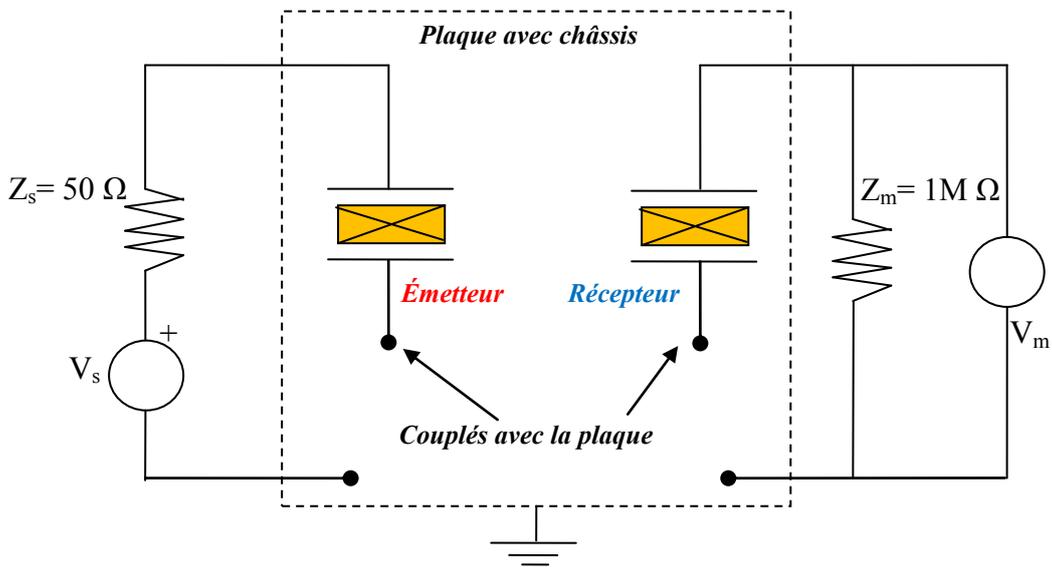


Figure 2.2 : Circuit électronique du système.

La propagation des ondes dans la plaque et son influence sur la réponse du système sont inconnues. Nous considérons que la propagation des ondes dans le solide est une boîte noire qui possède une impédance variable.

Ainsi, en balayant les fréquences comprises entre 20kHz - 250kHz, avec un signal d'émission V_s d'amplitude constante, nous relevons l'amplitude du signal de sortie ce qui nous permet d'obtenir la fonction de transfert de notre plaque.

Le banc de test fonctionne ainsi :

- L'ordinateur donne une consigne au générateur de fonctions : la forme d'onde sinusoïdale, la fréquence et l'amplitude ;
- Le générateur de fonctions applique le signal électrique au transducteur émetteur ce qui engendre des modes de Lamb dans la plaque, dont le mode A_0 ;
- Après un temps d'attente du régime stationnaire prenant en compte les réflexions sur les bords de la plaque, au moins 100 fois le temps de traversée de la plaque par un mode antisymétrique A_0 , typiquement une dizaine de milli-secondes, la carte d'acquisition mesure l'amplitude du signal électrique. La valeur mesurée est transmise à l'ordinateur.

Plusieurs formes de plaque ont été conçues et leur fonction de transfert relevée afin d'analyser l'influence des différents paramètres sur la réponse en fréquence.

2.2. Réponse en fréquence du système avec une plaque à bords libres

2.2.1. Spectre du système avec une plaque carrée

Le premier système se compose d'une plaque carrée de dimension 75×75 mm, couplée à des transducteurs PZT en forme de disque. La plaque en cuivre d'épaisseur $350 \mu\text{m}$ est supportée par des cales en mousse, comme illustré à la figure 2.3. Cette plaque est considérée comme étant à bords libres, parce qu'il n'y a pas de fixation sur les bords sauf dans les petites zones réalisant le contact électrique entre le support métallique en Duralumin et la plaque. Les transducteurs piézoélectriques sont placés sur la face intérieure de la plaque. Ils sont positionnés sur les axes de symétrie de cette plaque (cf. figure 2.4).

Les transducteurs sont des disques PZT de diamètre = 10 mm, d'épaisseur = 0,5 mm, type Pz27 de chez FERROPERM, capacité intrinsèque de 2.5 nF).

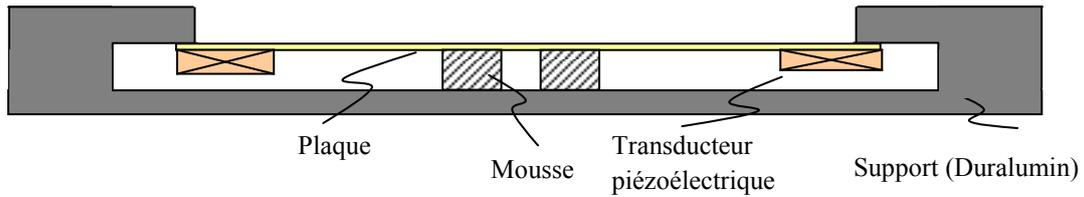


Figure 2.3 : Schéma de la plaque maintenue par des ressorts et des mousses.

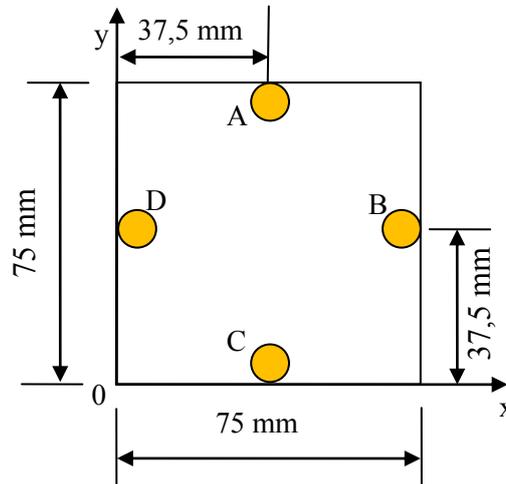


Figure 2.4 : Emplacements des transducteurs PZT positionnés sur les axes de symétrie de la plaque.

La réponse en fréquence du système est donnée en amplitude pour un spectre compris entre 20 kHz et 80 kHz. Le transducteur A (voir la figure 2.4) engendre dans la plaque un signal sinusoïdal d'amplitude 1V et de fréquence balayée avec un pas d'intervalle 5 Hz. Pour chaque fréquence d'émission, nous mesurons avec la carte d'acquisition l'amplitude d'un signal de 1024 points captés par l'un des récepteurs et échantillonné à 2 MHz, soit 10 à 40 périodes du signal. Le signal mesuré est quantifié sur 12 bits.

Les figures 2.5 et 2.6 montrent les spectres de la plaque obtenus avec les deux récepteurs B et C. Nous observons que les positions et les amplitudes des fréquences de résonance dans les deux figures sont différentes, c'est-à-dire que la réponse en fréquence varie selon l'emplacement du récepteur.

A la figure 2.5, 32 modes de résonances sont identifiés par un petit cercle rouge ; Pour être identifiables, ces résonances doivent avoir un pic d'amplitude supérieur à 0.05 V. Physiquement, un pic de résonance signifie qu'une forte vibration apparaît dans la plaque à la position du récepteur, mais également en de nombreux autres endroits de la plaque sachant que les résonances sont d'ordre élevé, c'est-à-dire correspondent à une longueur d'onde petite devant les dimensions de la plaque.

Dans la plage de fréquence étudiée, les pics de résonance identifiés diffèrent selon l'emplacement du capteur. En effet, du point de vue mécanique, tous les modes sont présents sur la structure, mais, ils sont vus à travers la réponse piézoélectrique des céramiques PZT qui dépend de leur taille respective, leur emplacement sur un nœud ou un ventre de vibration. Les récepteurs n'ont donc pas la même sensibilité aux mêmes modes.

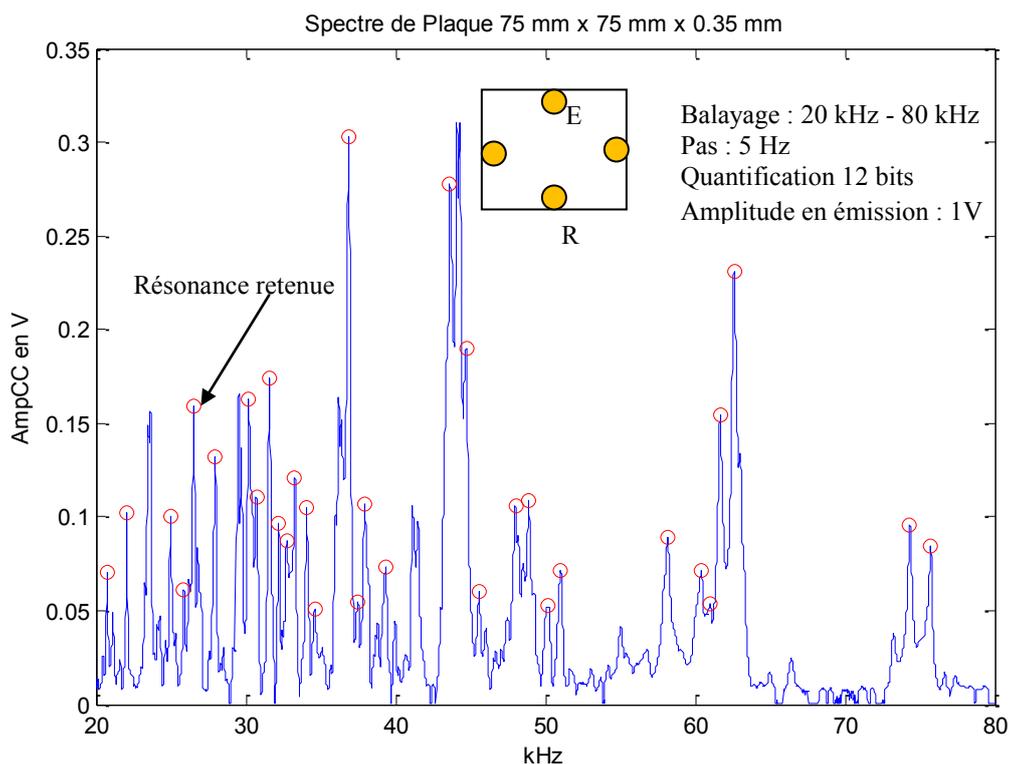


Figure 2.5 : Fonction de transfert d'une plaque carrée : L'émetteur et le récepteur sont sur des côtés opposés. Ici, l'émetteur est en A, le récepteur en C, selon le montage de la figure 2.3.

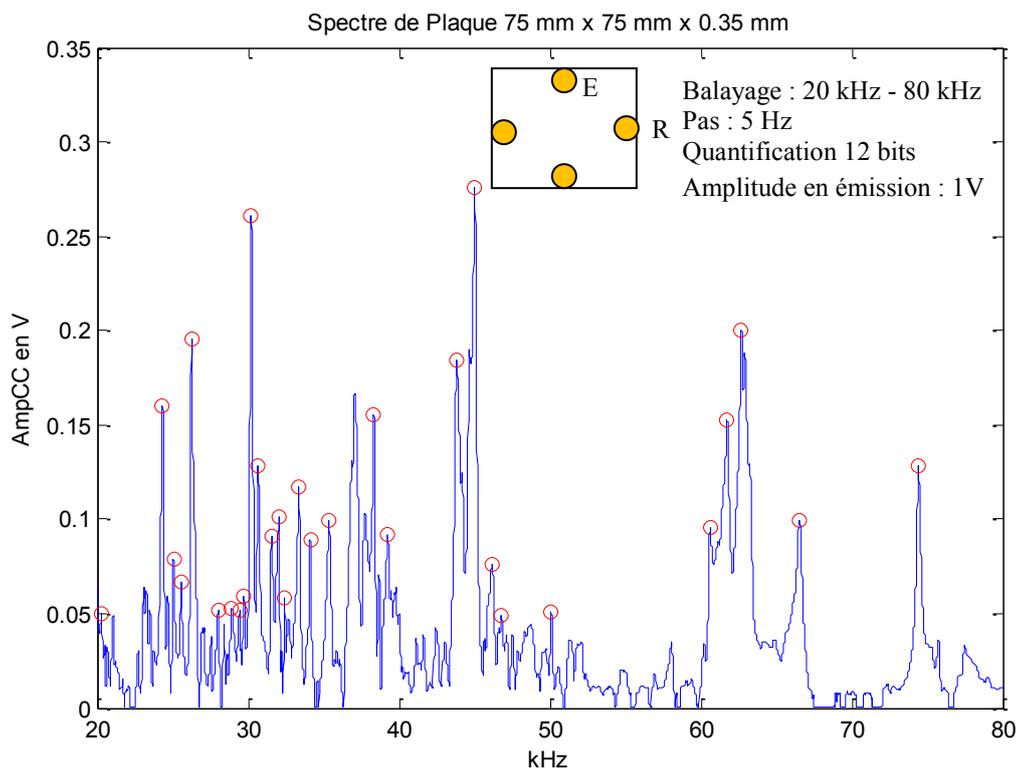


Figure 2.6 : Fonction de transfert d'une plaque carrée. Emetteur et récepteur sont sur des côtés adjacents. L'émetteur est en A, le récepteur en B selon la figure 2.3.

Nous appelons *coefficient de qualité* le rapport entre une fréquence de résonance et sa largeur à 70% ($1/\sqrt{2}$) de la hauteur de la tension. Ce coefficient indique l'intensité du mode de résonance concerné ou le rapport entre l'énergie stockée et l'énergie injectée par période du signal. Le calcul donne un coefficient de qualité de 115 pour la fréquence 36,88 kHz et un coefficient 156 pour 74,35 kHz, pour la figure 2.5.

Nous remarquons que le coefficient de qualité est plus important pour un mode de résonance d'une fréquence plus élevée. Nous observons également que le spectre est plus riche aux fréquences basses qu'aux fréquences hautes.

La raison est que la composante normale du déplacement mécanique est absorbée partiellement par les mousses et le châssis, avec une impédance acoustique inconnue. Selon les simulations réalisées avec Matlab au chapitre 1, lorsque la fréquence augmente, le rapport entre la composante normale et la composante tangentielle du déplacement mécanique diminue ; ceci signifie que la composante normale est plus importante en basse fréquence. Par conséquent, *les conditions du montage ont plus d'influence sur le spectre aux fréquences basses qu'aux fréquences hautes.*

2.2.2. Fonction de transfert pour une plaque rectangulaire

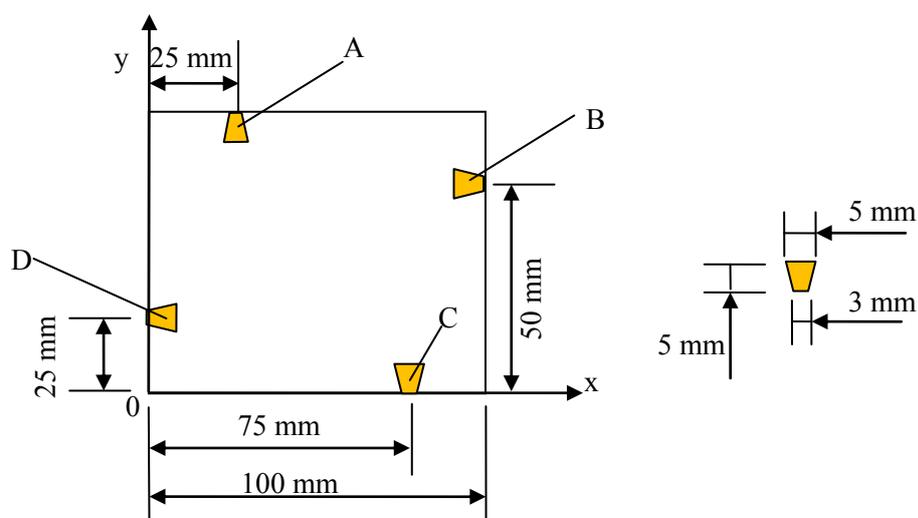


Figure 2.7 : Emplacements des transducteurs PZT, positionnés en dehors des axes de symétrie de la plaque.

Le deuxième objet à caractériser est une plaque rectangulaire de dimension $75 \times 100 \text{ mm}^2$, couplée avec des transducteurs de forme trapézoïdale. Les transducteurs sont usinés pour être légèrement différents entre eux. Cette plaque en cuivre d'épaisseur $350 \mu\text{m}$ est maintenue par des mousses, comme à la figure 2.3. Les emplacements des transducteurs (impédance 0.6 nF) sont illustrés à la figure 2.7, ils sont positionnés en dehors des axes de symétrie.

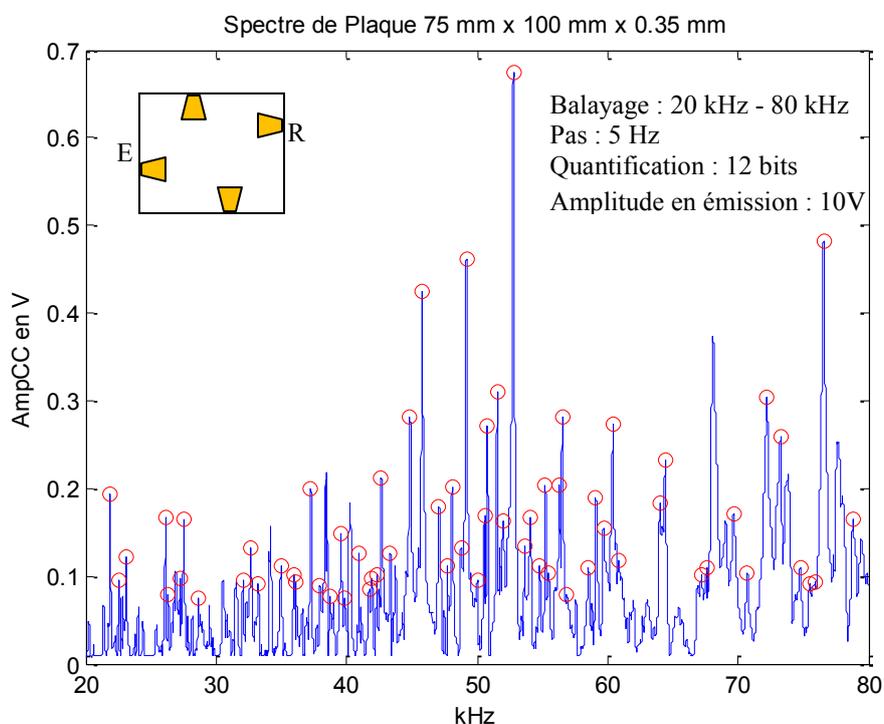


Figure 2.8 : Fonction de transfert d'une plaque rectangulaire pour un émetteur et un récepteur positionnés sur des côtés opposés. Ici l'émetteur est **D**, le récepteur est **B**.

La réponse en fréquence de ce dispositif est illustrée à la figure 2.8. Le transducteur **D** (numéroté selon la position, voir la figure 2.7) engendre un signal sinusoïdal d'amplitude 10 V et de fréquence comprise entre 20 kHz et 80 kHz par balayage au pas de 5 Hz.

En brisant la symétrie de la plaque, nous obtenons d'avantage de modes de résonances avec des amplitudes moins importantes : pour une amplitude d'émission de 10 V, l'amplitude maximale pic à pic pour la résonance la plus importante est inférieure à 0.7 V. Nous observons également que le coefficient de qualité est 222,6 à la fréquence 39,175 kHz et 207 à la fréquence 66,545 kHz. Le spectre du système avec cette plaque rectangulaire est plus riche que celui avec la plaque carrée. Plus le système présente un degré de symétrie élevé, moins les modes de résonances sont nombreux, et plus fortes sont les amplitudes de résonance.

On peut tirer de ces résultats l'un des critères de conception déterminant pour la conception d'une plaque tactile à base d'ondes de Lamb qui est de réduire la symétrie du montage (transducteurs-plaque) pour d'une part réduire l'intensité des pics de résonance et uniformiser la distribution d'énergie, d'autre part augmenter la variété des figures de résonance et le nombre de fréquences de travail possible.

2.3. Réponse du système avec différentes conditions aux limites

Dans le travail présenté par [LIU08], nous avons conclu que pour une plaque en cuivre d'épaisseur submillimétrique, les conditions de montage, les contraintes mécaniques et les conditions aux bords ont une influence importante sur la réponse en fréquence. Nous proposons ici plusieurs montages avec des conditions aux bords qui soient fixes pour minimiser l'influence des conditions d'encastrement sur la réponse du système.

2.3.1. Fonction de transfert d'une plaque à bords fixes

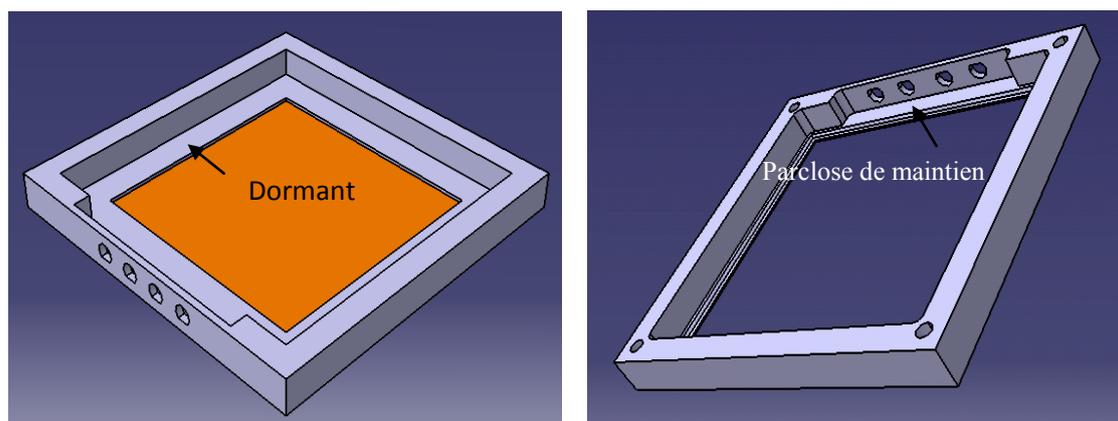


Figure 2.9 : Conception d'un châssis en ABS d'intégration d'une plaque à bords fixes.

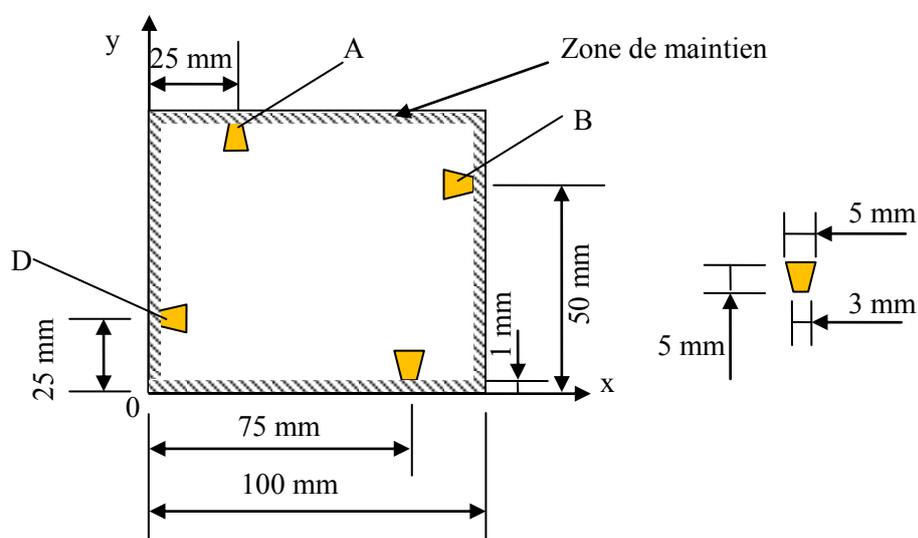


Figure 2.10 : Emplacements des transducteurs PZT : positionnés en dehors des axes de symétrie de la plaque.

Une plaque maintenue rigidement sur son pourtour est intégrée dans un châssis présenté à la figure 2.9 avec dormant et parcose réalisés en ABS par impression 3D. La plaque, décrite à la figure 2.10, est rectangulaire de dimensions $75 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 350 \text{ }\mu\text{m}$, couplée avec des transducteurs trapézoïdaux. La plaque est insérée dans le châssis en polymère ABS. La surface de la zone de maintien est 346 mm^2 , soit 4,6% de la surface de plaque.

La figure 2.11 montre la réponse en fréquence du système avec la plaque rigidement maintenue sur son pourtour. Le transducteur **D** engendre un signal sinusoïdal d'amplitude 10 V et de fréquence comprise entre 20 kHz et 80 kHz, par balayage avec un pas de 5 Hz. Nous observons l'amplitude du signal capté par le récepteur **B** et échantillonné à 2 MHz.

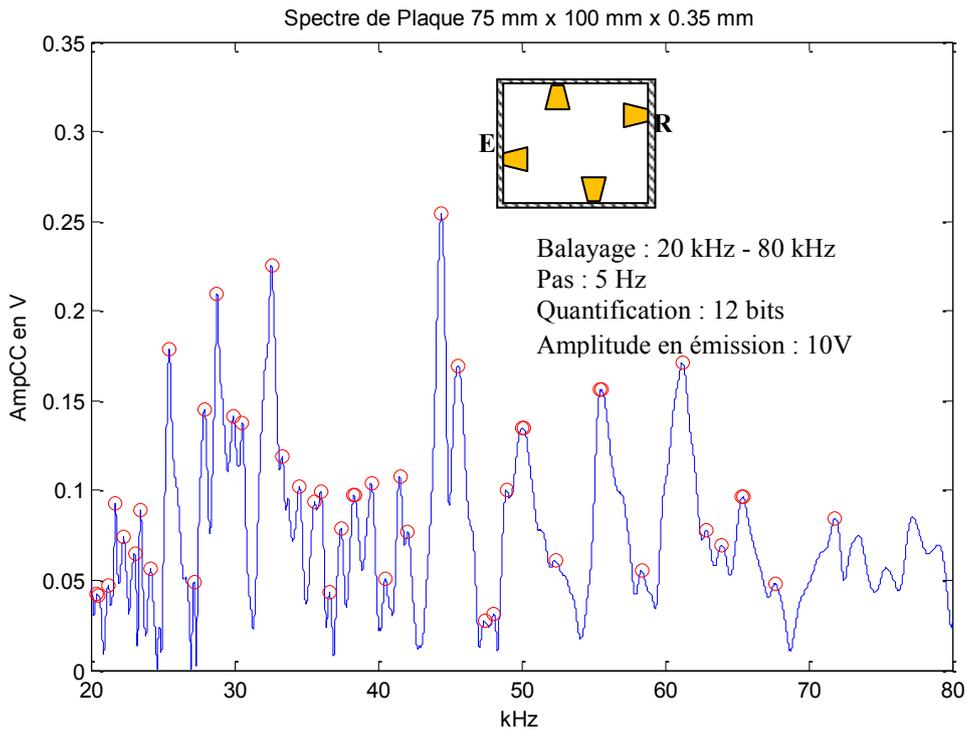


Figure 2.11 : Fonction de transfert d'une plaque rigidement maintenue sur son pourtour: Emetteur et récepteur sont sur des côtés opposés. L'émetteur est ici en D, le récepteur en B.

Selon la figure 2.11, le signal de sortie est très atténué par rapport à la tension d'excitation. Avec une amplitude d'émission de 10V, les amplitudes des résonances sont inférieures à 0,3 V. Par rapport à une plaque libre, les pics sont plus évasés. Les fréquences hautes sont également plus atténuées que les fréquences basses. On observe en conséquence des pics plus fins aux fréquences basses qu'aux fréquences hautes. Ceci est dû à la difficulté de maintenir des conditions aux limites fixes (rigides).

Par rapport à la réponse d'une plaque à bords libres, illustrée à la figure 2.8, la fonction de transfert d'une plaque à bords fixes montre un fort amortissement, plus particulièrement aux fréquences hautes, ce qui n'est pas souhaitable pour localiser un toucher avec une bonne résolution; par conséquent, cette conception n'est pas retenue.

2.3.2. Réponse d'une plaque rigidement tenue en ses quatre coins

Pour minimiser l'amortissement du châssis, nous avons proposé une deuxième solution où la plaque est pincée et rigidement tenue en ses quatre coins. Les dimensions de la plaque et le montage des transducteurs sont présentés à la figure 2.13.

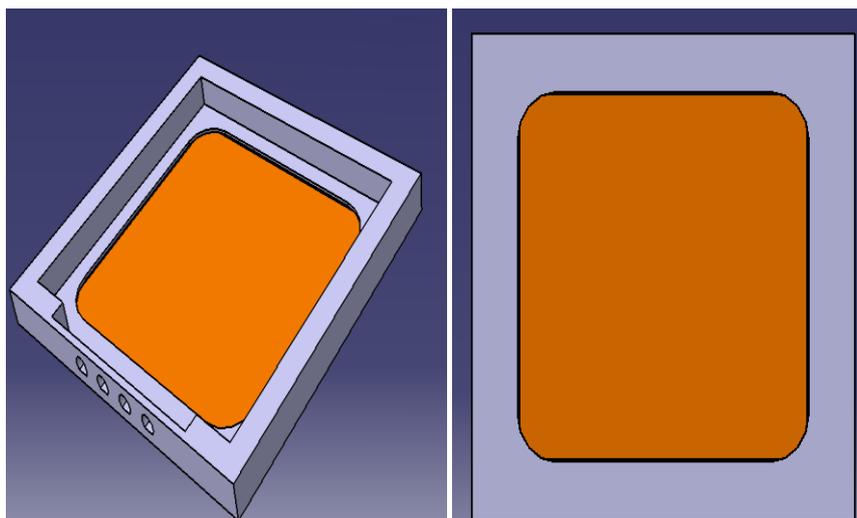


Figure 2.12 : Châssis de maintien d'une plaque rectangulaire en ses quatre coins.

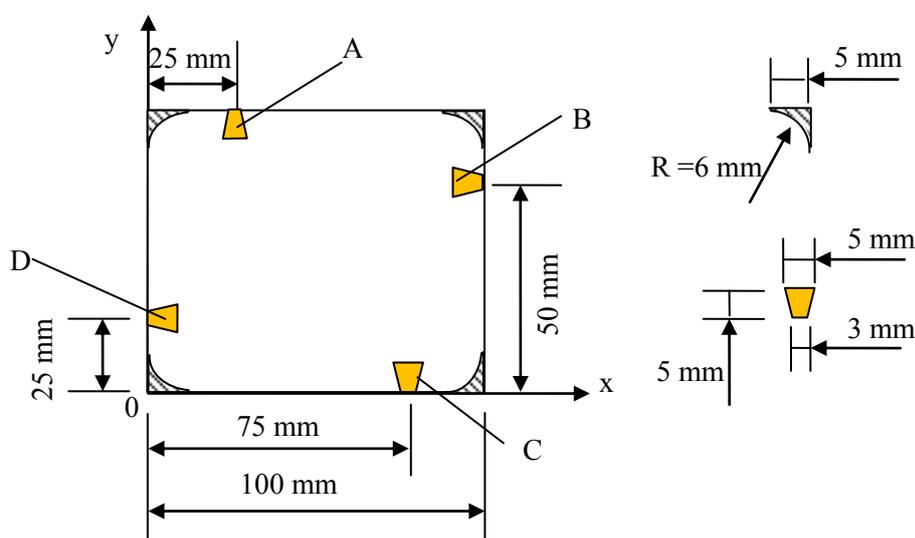


Figure 2.13 : Emplacements des transducteurs PZT positionnés en dehors des axes de symétrie de la plaque.

La réponse en fréquence du système est fournie à la figure 2.14 ; nous obtenons des modes de résonance plus sélectifs, avec un facteur de qualité de 222,5 à la fréquence de 76,31 kHz. Les modes de résonances sont distribués sur toute la plage de fréquence. Par rapport la solution précédente, le signal capté est moins atténué.

La figure 2.15 présente la réponse de la plaque obtenue avec un récepteur positionné en C. Les deux figures 2.14 et 2.15 traduisent des fonctions de transfert différentes entre les deux récepteurs. Des récepteurs placés en des emplacements différents constituent ainsi autant de filtres multifréquences différents. *Cette différence de sensibilité peut être mise à profit pour mettre en relief un grand nombre de figures distinctes de résonance à la surface de l'objet afin de créer un système de localisation de toucher (voir chapitre 3).*

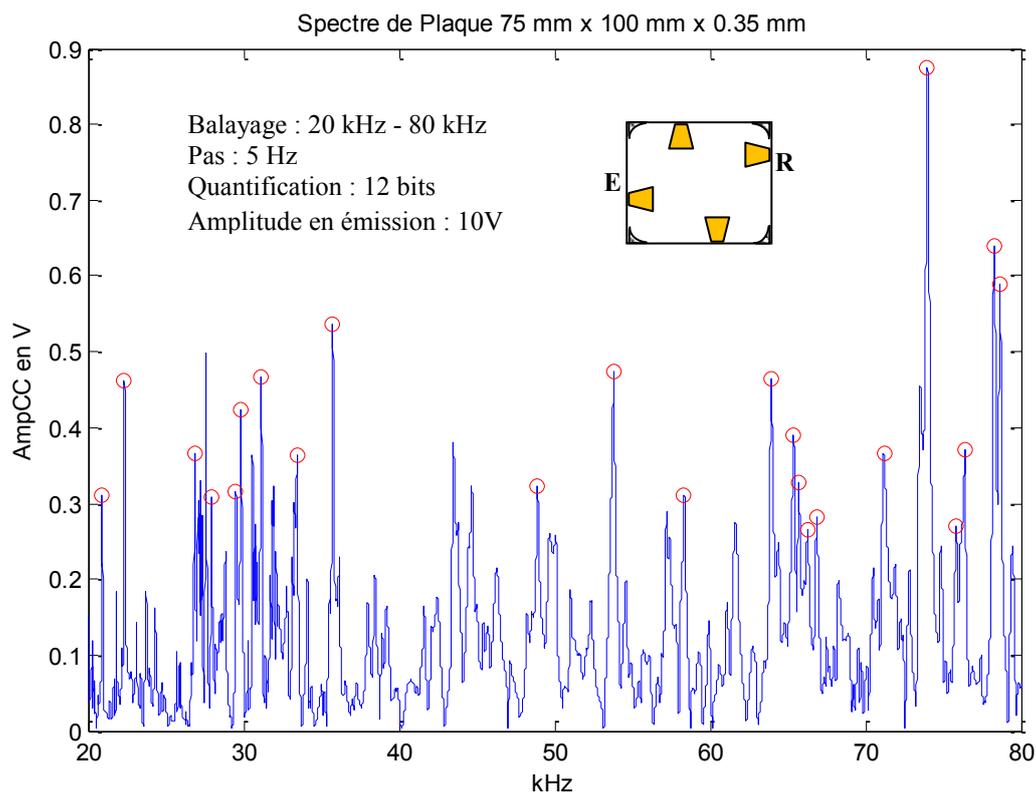


Figure 2.14 : Fonction de transfert d'une plaque en cuivre maintenue en ses quatre coins. L'émetteur et le récepteur sont sur des côtés opposés. L'émetteur est en D, le récepteur en B.

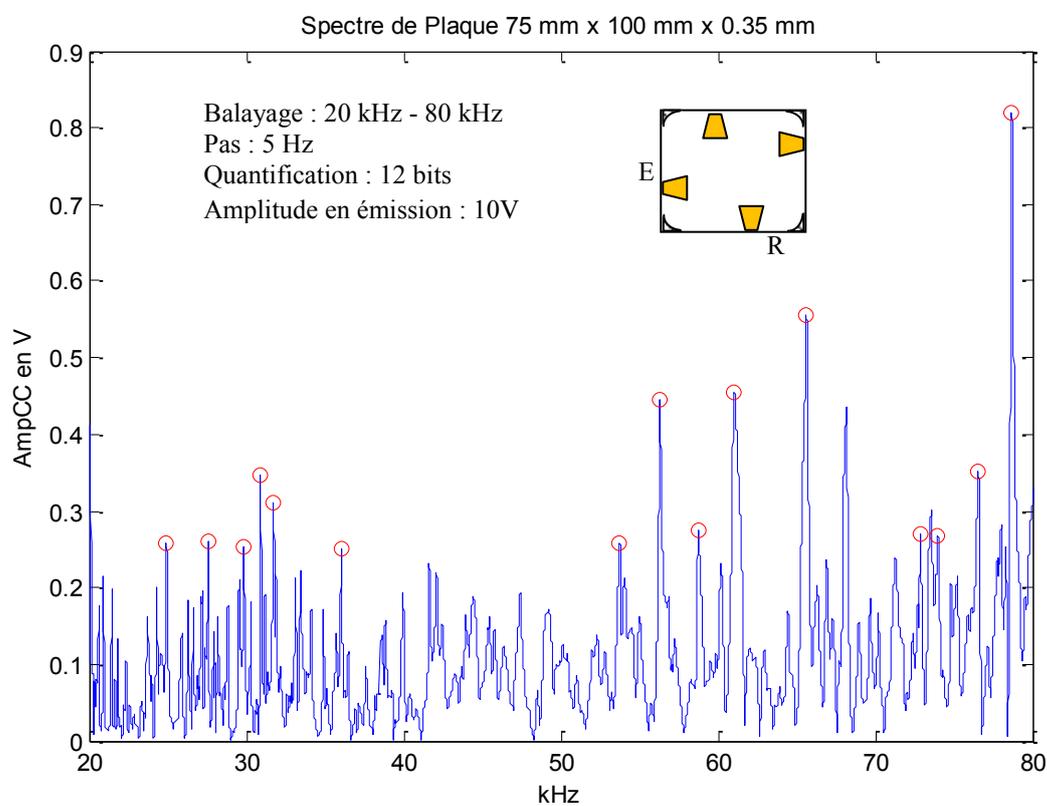


Figure 2.15 : Fonction de transfert du système pour une plaque en cuivre : émetteur D, récepteur C.

2.3.3. Réponse d'une plaque partiellement pincée en ses quatre coins

2.3.3.1 Réponse en fréquence avec un seul émetteur

Une autre solution d'intégration mécanique intéressante est illustrée à la figure 2.16. Le châssis qui maintient la plaque est fabriqué par impression 3D avec un polymère ABS. Ce châssis se compose de deux parties : la partie inférieure est une plaque à fond plat avec quatre entretoises triangulaires de fixation pour maintenir la plaque par pincement, tandis que la partie supérieure est une plaque évidée sur sa partie centrale permettant l'accès à la plaque tactile. Les deux parties sont assemblées par vis de serrage, qui permettent de régler la pression de pincement sur les zones de maintien de la plaque. Une photo d'un tel dispositif est montrée à la figure 2.17.

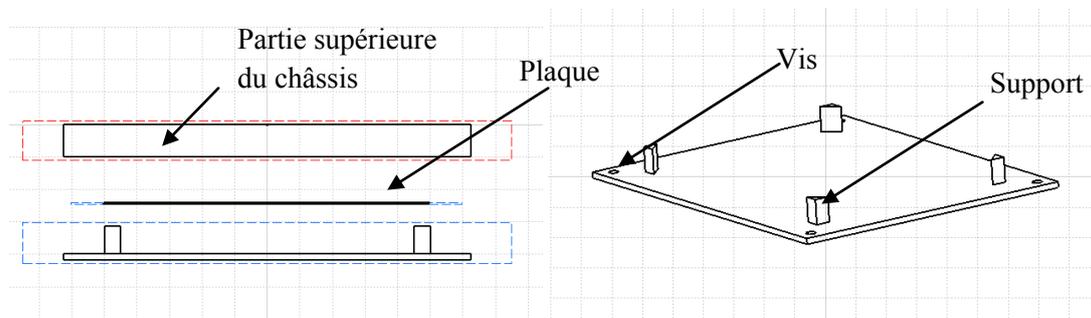


Figure 2.16 : Schéma d'un châssis d'intégration à entretoises de pincement.

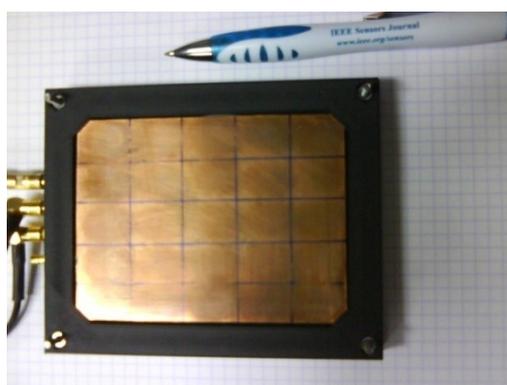


Figure 2.17 : Plaque acoustique maintenue par pincement aux quatre coins.

Les emplacements des transducteurs (impédance 0.6 nF) sont illustrés à la figure 2.18, ils sont positionnés en dehors des axes de symétrie. La surface totale des zones de pincement est de 50 mm^2 , soit 0,67% de la surface de plaque.

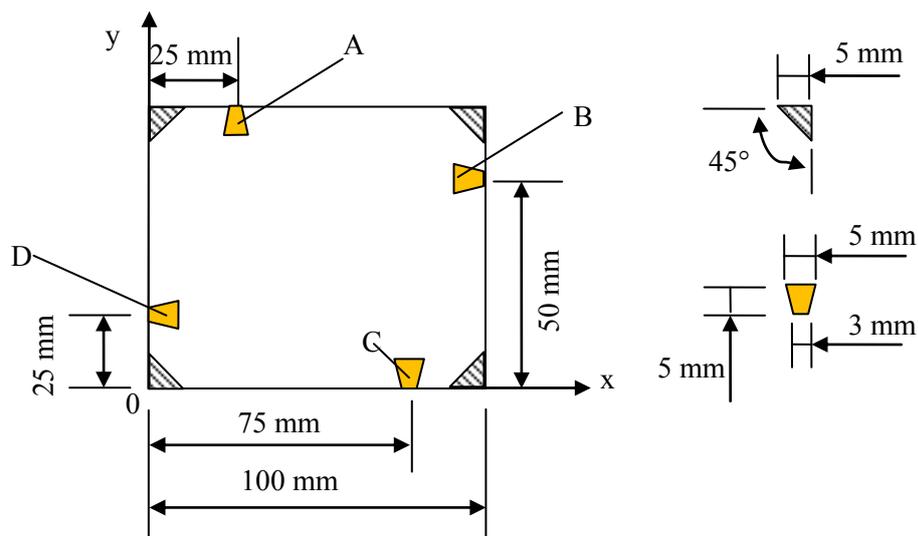


Figure 2.18 : Emplacements des transducteurs PZT : positionnés en dehors des axes de symétrie de la plaque.

Ce montage conduit à des modes de résonances bien distribués et peu amortis sur toute la bande de fréquence comprise entre 20 kHz et 80 kHz, comme illustré à la figure 2.19. On note que l'amplitude de la résonance maximale atteint 0,76 Vcc.

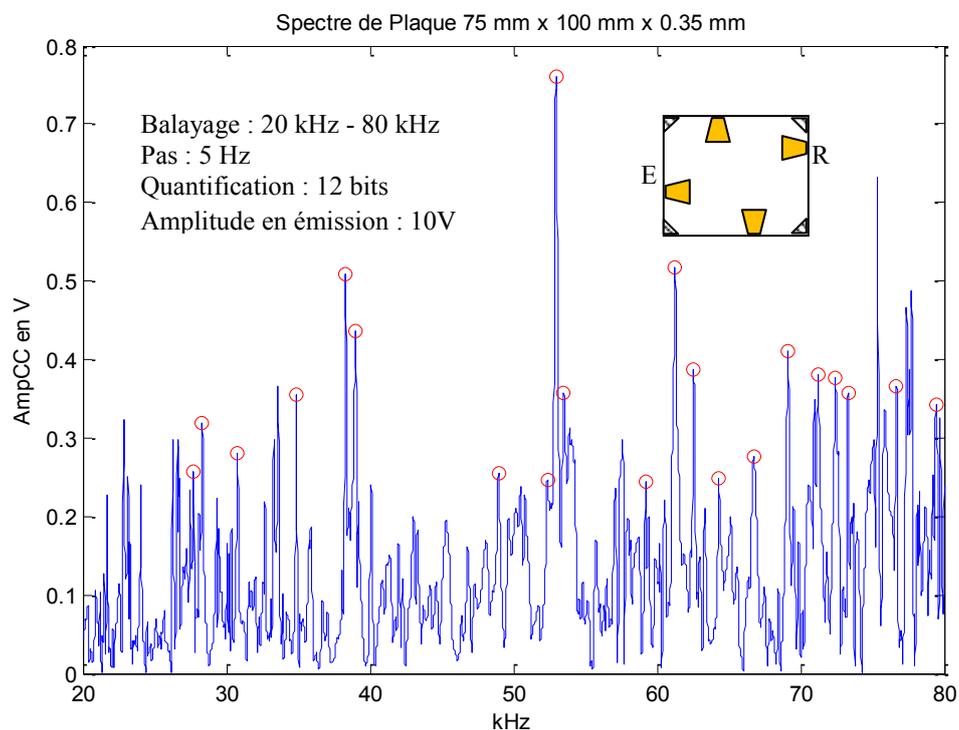


Figure 2.19 : Réponse spectrale d'une plaque de cuivre pincée en ses 4 coins, faiblement amortie: émetteur D, récepteur B.

2.3.3.2 Réponse en fréquence avec deux émetteurs simultanés

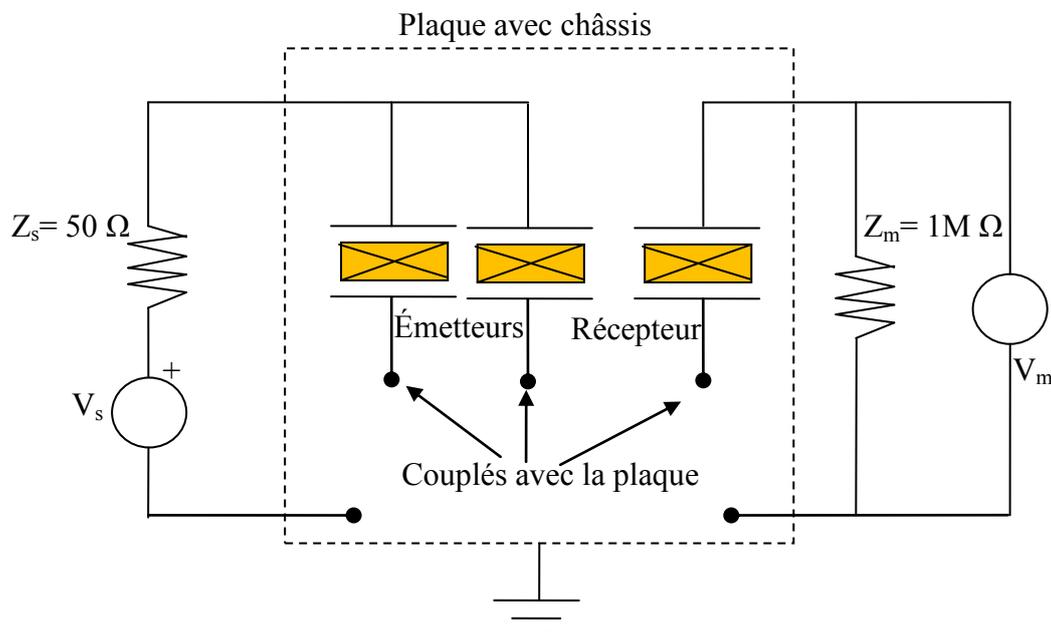


Figure 2.20 : Circuit électronique du système.

Dans ce paragraphe, nous allons exciter la plaque rectangulaire avec deux émetteurs, le circuit électronique du système est illustré à la figure 2.20. Nous supposons que l'énergie acoustique sera mieux distribuée dans la plaque en ajoutant un deuxième émetteur, et que, par conséquent, les récepteurs produiront des spectres plus riches associés à un rayonnement acoustique plus complexe. Le théorème des superpositions s'applique. La réponse du système est la somme des deux réponses (avec les deux récepteurs respectivement) mais la somme des modules du spectre n'est pas égale au module de la somme des spectres.

Les figures 2.21 et 2.22 représentent les réponses en fréquence du système avec deux émetteurs. Deux récepteurs sont utilisés en **B** et **C** (voir la figure 2.18). Les transducteurs **D** et **A** engendrent dans la plaque un signal sinusoïdal d'amplitude 10 V et de fréquences comprises entre 20 kHz et 80 kHz par balayage avec un pas de 5 Hz. Nous observons les amplitudes des signaux captés par le récepteur **B** ou **C** et échantillonnés à 2 MHz. Ces réponses sont différentes de celles que nous avons obtenues auparavant avec un seul émetteur (voir la figure 2.19). Nous avons davantage de modes de résonances. Néanmoins, si l'on suppose que la propagation

des ondes élastiques dans un solide constitue un système est linéaire, la figure 2.21 doit contenir une partie des informations de la figure 2.19.

Mais, les déphasages liés aux retards de propagation ont leur importance : même si E1 et E2 sont identiques, les signaux de sortie produits par E1 et E2 n'ont pratiquement aucune chance d'être en phase, de sorte que la fonction de transfert en amplitude de l'excitation somme n'est pas la somme en amplitude des fonctions de transfert individuelle (E1, plaque, R) et (E2, plaque, R).

Nous avons montré précédemment que la réponse en fréquence du système dépendait de l'emplacement des émetteurs et des récepteurs. Si nous considérons que la propagation des ondes est équivalente à une ligne à retard et donc une impédance complexe dans le système, alors cette impédance varie selon l'emplacement du transducteur piézoélectrique.

Dans ce cas, si E1 et E2 sont identiques, et si nous sommes en régime élastique, nous pouvons enfin dire que la fonction de transfert complexe somme est la somme des fonctions de transfert complexe individuelles. On voit bien que ça n'est pas vrai si l'on se restreint à un raisonnement sur l'amplitude. C'est encore moins vrai si l'interaction du doigt avec la plaque engendre un amortissement des ondes acoustiques proportionnel à la composante de vitesse de vibration hors plan. Cela montre une non linéarité qu'il faudrait prendre en compte pour la réalisation d'interface tactile.

Cette caractéristique pourra servir à améliorer la localisation d'un toucher sans avoir à augmenter le nombre de transducteurs ou complexifier le montage.

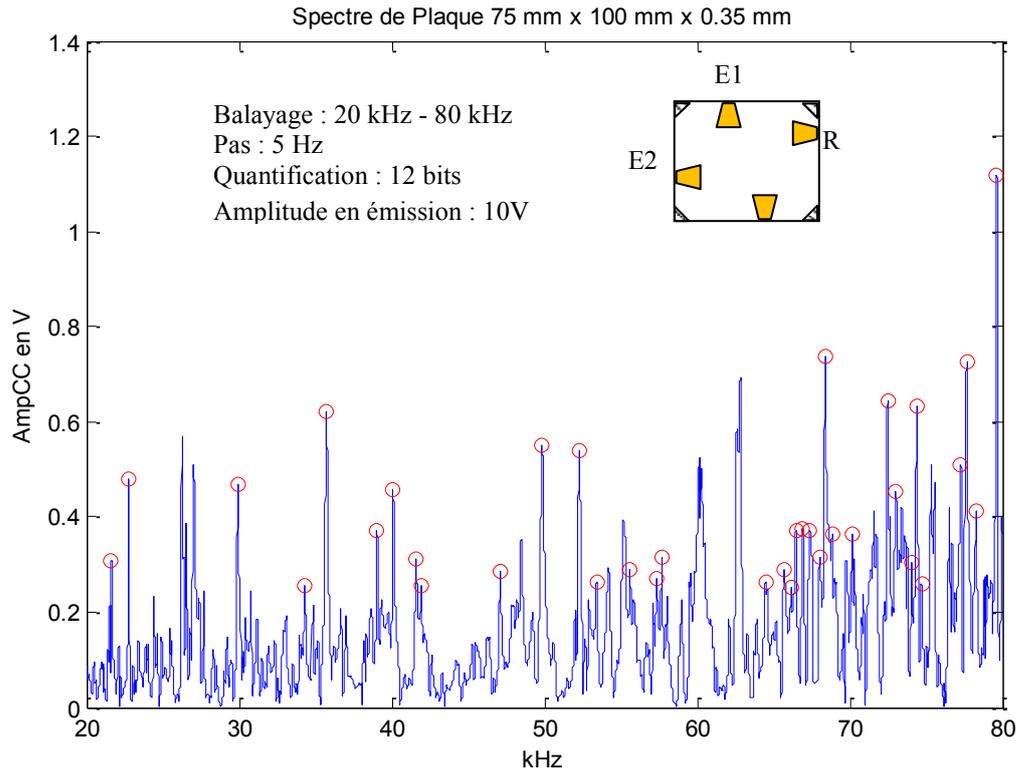


Figure 2.21 : Spectre du système avec une plaque en cuivre: émetteurs D+A, récepteur B.

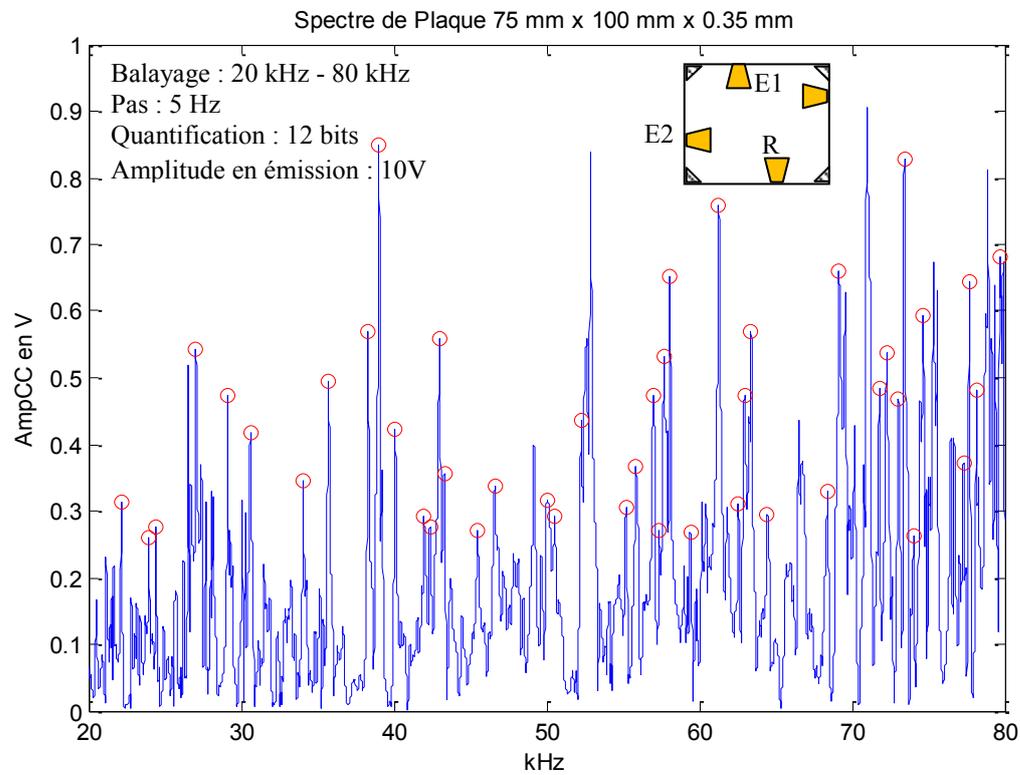


Figure 2.22 : Spectre du système avec une plaque en cuivre: émetteurs D+A, récepteur C.

2.4. Analyse des paramètres

2.4.1. Influence de la tension d'excitation

Nous allons analyser l'influence de la tension d'excitation (VE) sur la réponse en fréquence du système. Lorsque la tension appliquée sur l'émetteur est plus élevée, l'amplitude de vibration de la plaque devient plus grande, par conséquent le signal capté par le récepteur est plus important. Ceci est un phénomène linéaire.

Pour vérifier cette linéarité, nous avons réalisé deux mesures de la réponse du système avec la plaque carrée à bords libres avec différentes tensions d'excitation. Les conditions aux bords et l'emplacement de transducteurs ont été présentés aux figures 2.3 et 2.4. Un amplificateur Elbatech est utilisé pour appliquer la tension à l'émetteur. La figure 2.23 montre que les réponses en fréquence sont différentes selon la tension appliquée. Les gains entre les amplitudes des signaux captés et la tension appliquée (1 V ou 20 V) sont illustrés. Nous observons que les deux spectres obtenus sont globalement similaires. Cependant on constate une dispersion des gains en basse fréquence.

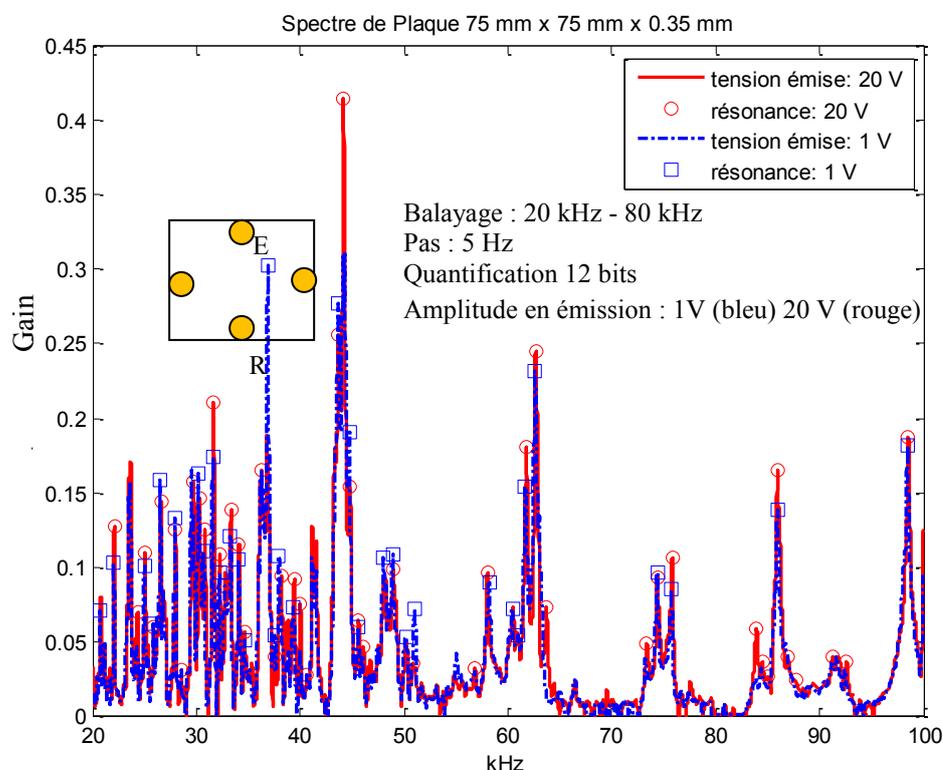


Figure 2.23 : Réponse spectrale d'une plaque en cuivre en fonction de la tension d'excitation.

Le tableau 2.1 illustre quelques modes de résonance typiques lorsque la tension d'émission vaut 1 V ou 20 V.

Tableau 2.1 Etude de la linéarité du système en fonction de la tension d'émission (VE)

VE : 1V		VE : 20V		Gain
Fréq. de Rés.	Amplitude	Fréq. de Rés.	Amplitude	
22,06 kHz	0,1025 V	22,09 kHz	2,5444 V	24,82
26,53 kHz	0,1588 V	26,58 kHz	2,8830 V	18,15
43,63 kHz	0,2772 V	43,65 kHz	5,1129 V	18,44
74,35 kHz	0,0959 V	74,37 kHz	1,8454 V	19,24

Nous observons que globalement la fonction de transfert du système reste inchangée si l'on modifie la VE. L'incertitude peut être due à une fluctuation de l'impédance de sortie du générateur ou à un effet non linéaire lié à l'amortissement des ondes acoustiques. Par exemple, pour une fréquence de résonance de 22,06 kHz avec une VE à 1 V, l'amplitude du signal capté est de 0,1025 V ; la résonance correspondante avec une VE multipliée par 20 devient 22,09 kHz. Nous observons alors que pour cette résonance, l'amplitude du signal capté est 23,83 fois plus grande, ce qui ne va pas dans le sens d'un amortissement mais d'une fluctuation de l'impédance de sortie du générateur.

En résumé, si on multiplie la VE par 20, on observe que le gain n'est pas exactement 20 et que certaines fréquences de résonances sont légèrement décalées. S'il faut détecter de faibles perturbations liées à une interaction tactile, il serait nécessaire de connaître les effets non linéaires, qu'ils soient électriques ou acoustiques. Puisque c'est difficile de connaître ces effets, il faut que les perturbations liées au toucher soient relativement importants.

2.4.2. Influence de la température

Les propriétés mécaniques d'un solide (module d'Young, masse volumique) varient en fonction de la température. Dans un matériau métallique on observe un ramollissement du matériau i.e. une diminution de la rigidité et des constantes élastiques et une dilatation thermique, le premier phénomène ayant un effet prépondérant, ce qui se traduit par une diminution de la vitesse de propagation des ondes acoustiques et une diminution des fréquences de résonance avec l'augmentation

de la température. Récemment, [NIK07] a proposé un dispositif exploitant cette propriété pour caractériser l'échange thermique entre une pointe conique ou parabolique et une surface. Dans ce procédé, on mesure le temps de transit aller-retour, environ 50 μ s, d'une onde acoustique de flexion se propageant à l'intérieur d'une pointe métallique chauffée, jusqu'à son extrémité en contact avec une surface à température ambiante. La variation du temps de transit de l'ordre de quelque ns/ $^{\circ}$ C traduit l'échange de chaleur au voisinage de cette extrémité. Ce procédé confirme que la vitesse de propagation est modifiée lorsque la température du milieu de propagation change. L'épaisseur de l'objet a son influence. Dans une pointe conique le coefficient de température est compris entre $10^{-5}/^{\circ}$ C et $10^{-4}/^{\circ}$ C. Pour un coefficient de température de $5.10^{-5}/^{\circ}$ C, on peut s'attendre à une contraction du spectre de raies de 4 Hz / $^{\circ}$ C à 70 kHz, ce qui peut sembler négligeable ou énorme, selon la perturbation tactile à détecter.

Dans ce travail, le système est considéré comme une impédance électrique, voir la figure 2.2 ou 2.20 ; une variation de température engendre une modification de l'impédance de la plaque et en conséquence une variation de la réponse en fréquence du système. Le montage suivant est réalisé pour caractériser notre système en température : un module Peltier commandé en courant est utilisé pour imposer une température à la plaque comme illustré à la figure 2.24. Une sonde thermique à thermocouple est utilisée pour mesurer la température au contact de la plaque.

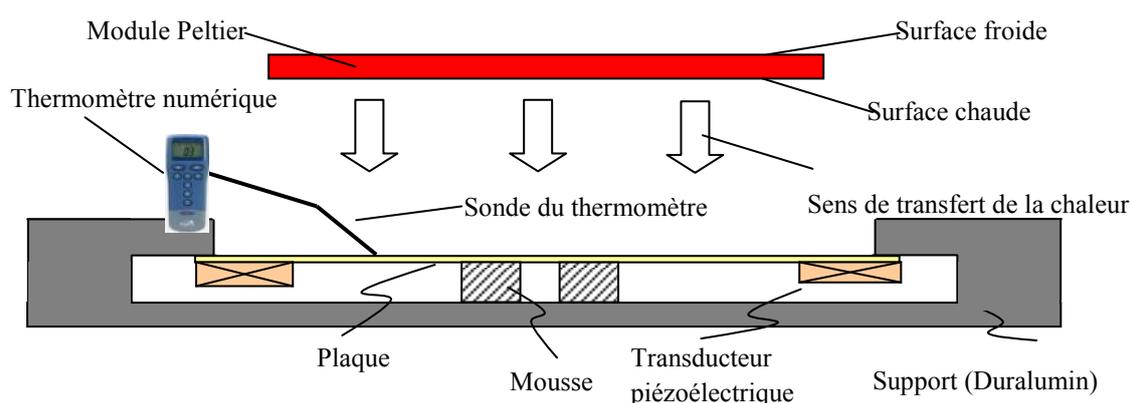


Figure 2.24 : Schéma de la plaque acoustique intégrée dans un châssis. Un module Peltier est utilisé pour modifier la température de la plaque, mesurée à l'aide d'un thermomètre à sonde de contact.

Le module Peltier est un dispositif qui met en œuvre l'effet Peltier : déplacement de chaleur en appliquant un courant électrique [ALL93]. L'effet Peltier se produit dans des matériaux conducteurs en contact de natures différentes. Ce module possède une

surface chaude et une surface froide qui dépend du sens du courant appliqué, Nous avons mis la surface chaude face à la plaque.

La figure 2.25 montre la réponse du système avec deux températures différentes, avec la plaque carrée à bords libres (voir la figure 2.3 et 2.4).

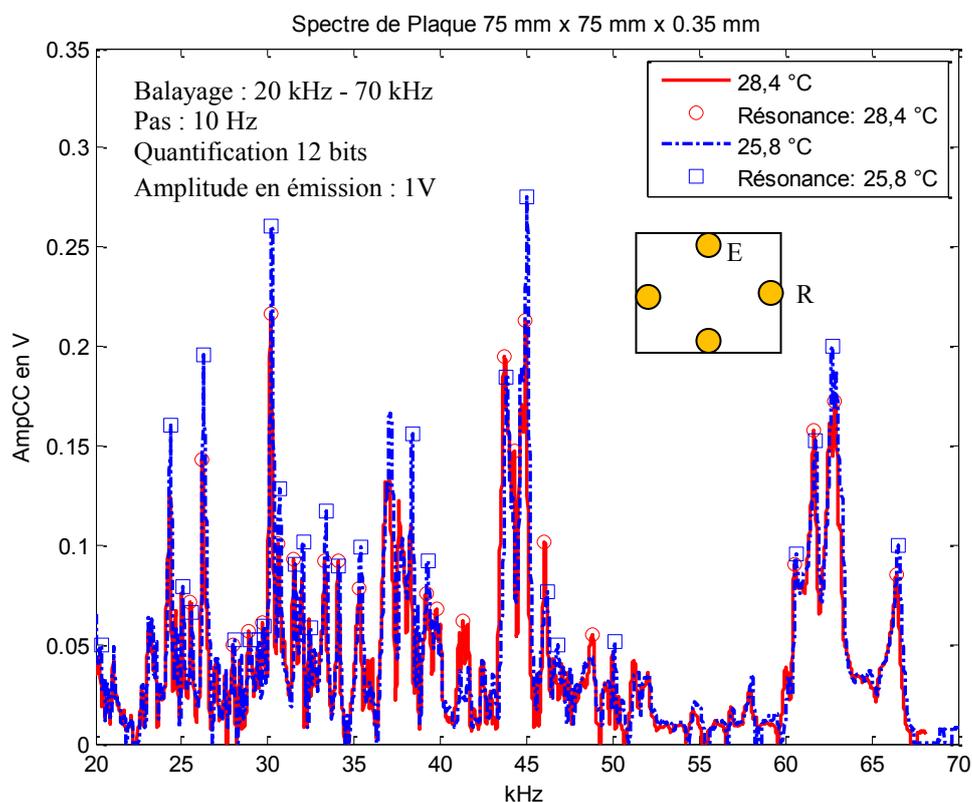


Figure 2.25 : Effet de la température sur le spectre de raies. Réponse spectrale de la plaque correspondant à la figure 2.6 à 25,8 °C et 28,4 °C.

Les mesures ont été réalisées après stabilisation en température. La sonde du thermomètre en contact avec la plaque pouvant affecter la propagation des ondes, celle-ci est retirée avant de commencer la mesure du spectre. Nous observons que lorsque la température augmente, l'amplitude des pics de résonance diminue, plus particulièrement pour les résonances en basses fréquences.

Le tableau 2.2 présente quelques modes de résonance typiques obtenus avec deux températures. Le décalage en fréquence des pics de résonance est plus important avec les fréquences les plus élevées. En revanche, la majorité des pics de résonances sont atténués.

Tableau 2.2 Effet de la température. Mesures quantitatives sur l'amplitude et les fréquences des raies.

Température : 25,8 °C		Température : 28,4 °C		Décalage fréquence	Décalage amplitude
Fréq. de Rés.	Amplitude	Fréq. de Rés.	Amplitude		
26,26 kHz	0,1957 V	26,20 kHz	0,1430 V	-60 Hz	-26,9%
30,22 kHz	0,2606 V	30,16 kHz	0,2163 V	-60 Hz	-17,0%
45,02 kHz	0,2754 V	44,94 kHz	0,2129 V	-80 Hz	-22,7%
66,53 kHz	0,0998 V	66,43 kHz	0,0850 V	-100 Hz	-14,8%

Les décalages en fréquence des modes sont illustrés à la figure 2.26. Nous pouvons observer des variations importantes sur les modes de résonance. Par conséquent, il n'est pas possible d'appliquer le procédé « à absorption » qui utilise seulement les fréquences de résonance, parce que nous ne pouvons pas assurer que les fréquences utilisées restent toujours des fréquences de résonance pendant l'utilisation.

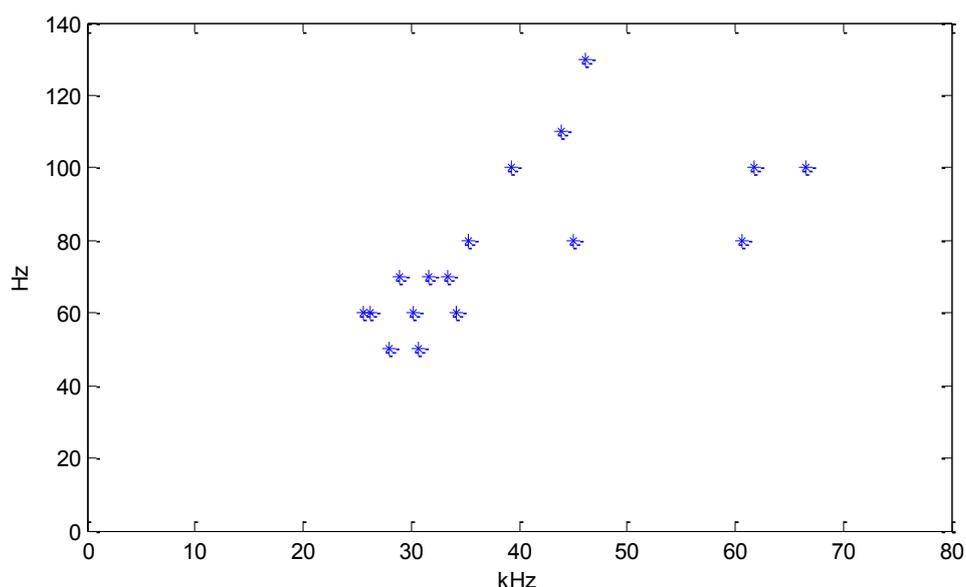


Figure 2.26 : Décalage en fréquence (en Hz) et en valeur absolue, des modes de résonance (en kHz) à 25,8°C pour une augmentation de température de 2,6 °C.

En conclusion, nous avons noté qu'une petite élévation de température de 3 °C peut engendrer une contraction notable des fréquences de résonance.

Ce décalage possible en température doit être pris en compte pour évaluer la robustesse du principe tactile. Une étude expérimentale [RIB07] montre que les influences de la température sur les modes de résonance peuvent être analysées et corrigées.

2.4.3. Influence du toucher

Prenons la plaque rectangulaire à bords libres (voir la figure 2.7), en posant un doigt au centre de la plaque, nous avons mesuré un nouveau spectre de la plaque, comme illustré à la figure 2.27. Dans ce qui suit, nous appelons « toucher » le fait de poser le doigt sur la plaque. Nous avons observé que le contact entre un doigt artificiel réalisé en silicone et une plaque en vibration perturbe fortement le spectre de raies et dans des proportions différentes selon la fréquence considérée.

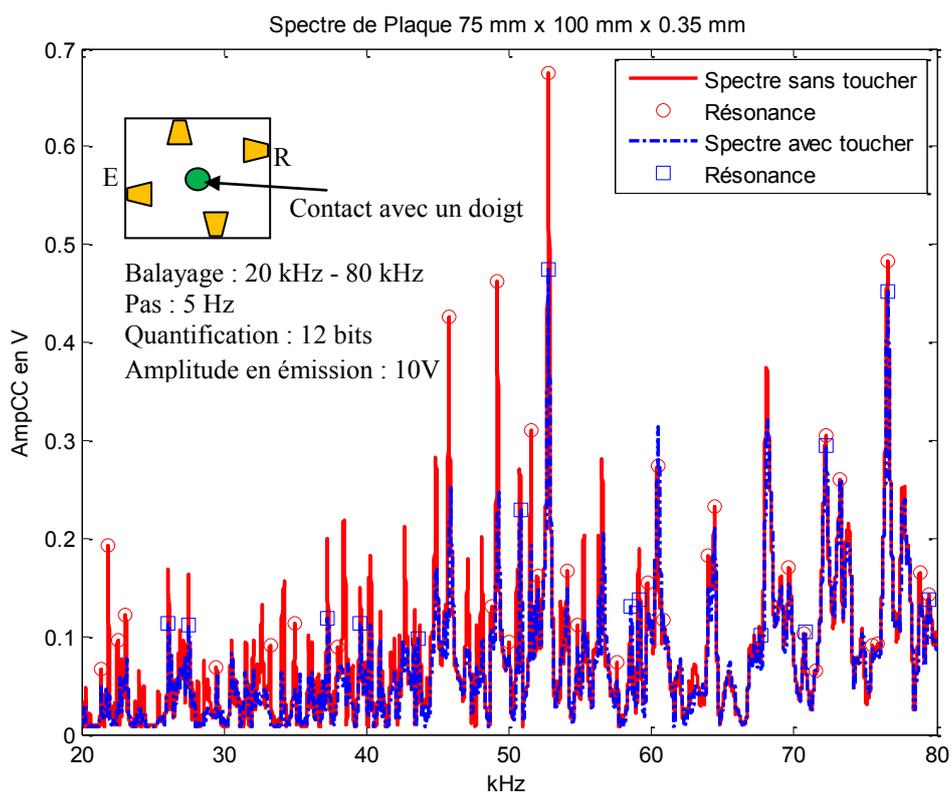


Figure 2.27 : Spectre du système pour une plaque rectangulaire: émetteur D, récepteur B. La courbe en pointillés est le spectre du système perturbé par un doigt en silicone avec une surface de contact circulaire de diamètre 10 mm, posé au centre de la plaque.

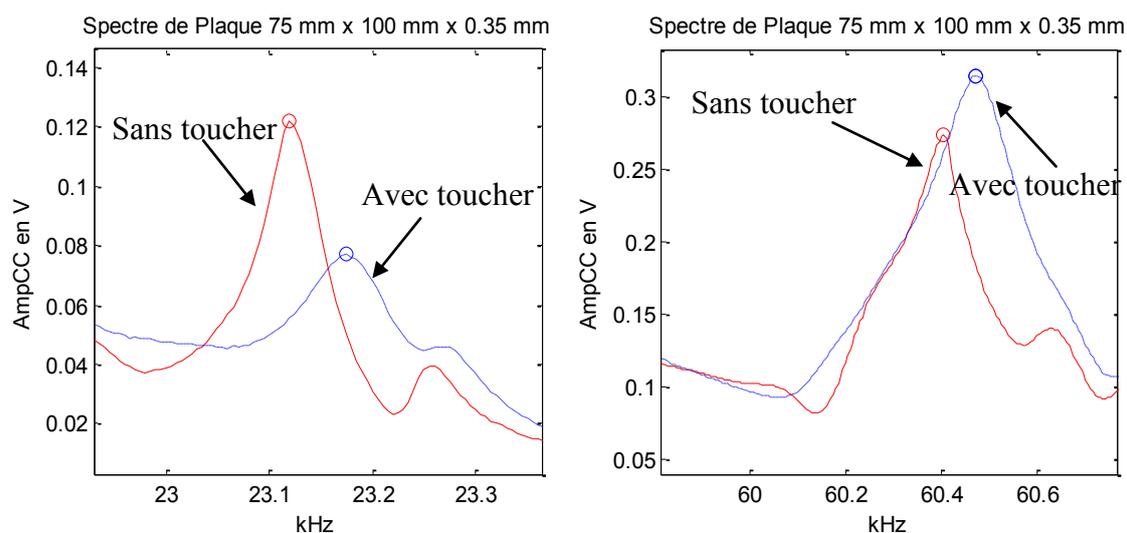


Figure 2.28 : Spectre du système avec une plaque rectangulaire: émetteur D, récepteur B. Zoom aux basses fréquences et aux fréquences hautes.

Comme on peut le constater sur la figure 2.28, sur deux raies particulières, certaines résonances sont plus atténuées que d'autres.

Il apparaît que le changement de la réponse en fréquence du système est lié directement au toucher, à sa nature et sa position. Si la perturbation est essentiellement due à la position, il devient possible, par apprentissage de la perturbation, de localiser la position du toucher et d'élaborer un procédé tactile.

Le tableau 2.3 présente quelques fréquences de résonance du système, perturbées par un toucher avec le doigt. Une première constatation révèle que les amplitudes des résonances sont globalement amorties, car le doigt artificiel est pour l'essentiel un objet mou absorbant ayant une dimension caractéristique grande (10 mm) par rapport à l'épaisseur (0.35 mm) de la plaque. On observe également un décalage en fréquence des pics de résonances. Ce phénomène ne varie pas linéairement avec la position, et il ne semble pas possible de corrélérer un décalage en fréquence et un toucher. Par ailleurs, du fait de la très forte différence d'impédance de charge entre le doigt et l'air, la perturbation de la plaque par le doigt n'implique vraisemblablement pas uniquement un amortissement, mais également un blocage de la surface. Dans ce cas, nous supposons que la perturbation est également et partiellement due à la diffraction des ondes par le toucher. Ceci expliquerait pourquoi, pour certains modes de résonance, les amplitudes sont non pas amorties mais amplifiées par le toucher, comme on peut le constater à la figure 2.28. Enfin, selon la fréquence considérée, la perturbation peut

atteindre 30 à 40% ce qui est considérable et exploitable pour réaliser un nouveau procédé tactile. Le toucher engendre donc une perturbation complexe, combinant amortissement et diffraction des ondes que nous pouvons exploiter dans une méthode d'apprentissage pour réaliser une interface tactile. On remarquera qu'un procédé tactile exploitant l'amortissement sélectif d'une raie de résonance n'a pas les mêmes conséquences qu'un procédé tactile exploitant la diffraction des ondes au contact du doigt. Dans le premier cas, le procédé tactile nécessite de travailler à des fréquences de résonance et peut donc être perturbé en cas de décalage des raies de résonance, alors que dans le second cas, le procédé tactile, ne nécessite pas de travailler à une fréquence de résonance et accepte les régimes transitoires, y compris des régimes transitoires courts où le signal reçu a subi un faible nombre de réflexions sur les bords de la plaque.

Tableau 2.3 Perturbation d'une réponse spectrale par un toucher.

Sans toucher		Toucher $\phi 10$ mm		Décalage fréquence	Décalage amplitude
Fréq. de Rés.	Amplitude	Fréq. de Rés.	Amplitude		
23,12 kHz	0,1217 V	23,175 kHz	0,0771 V	+55 Hz	-36,6%
52,77 kHz	0,6744 V	52,77 kHz	0,4774 V	0 Hz	-29,5%
72,205 kHz	0,3040 V	72,24 kHz	0,2947 V	+35 Hz	-3,1%
60,405 kHz	0,2737 V	60,47 kHz	0,3136 V	-100 Hz	+14,6%

2.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons analysé la réponse d'une interface acoustique, qui se compose d'une plaque propageant des ondes émises et détectées au moyen de transducteurs piézoélectriques. Les mesures de la réponse en fréquence du système avec différentes plaques, et avec différentes conditions d'intégration mécaniques nous permettent d'apprécier qualitativement et quantitativement l'influence de chacun des paramètres sur la réponse spectrale.

Nous avons constaté par ailleurs qu'un toucher sur la plaque modifiait considérablement la réponse spectrale et de façon plus marquée que les perturbations imputables par exemple aux conditions d'intégration. Ce résultat permet d'envisager de localiser le toucher par un procédé d'apprentissage, qui sera présenté au chapitre 3.

Le développement d'un procédé de localisation basé sur une perturbation pose la question de l'existence d'une relation bijective entre une position de toucher et le signal perturbé. Cette relation impose de briser la symétrie des modes de vibration matérialisés à la surface de l'objet. Pour cela, nous avons vu que les transducteurs récepteurs fonctionnaient comme des filtres mettant en relief des conditions particulières de rayonnement et qu'il était possible d'augmenter le nombre de fréquences de travail à partir d'un ou plusieurs transducteurs émetteurs et récepteurs afin de disposer de signaux plus riches ; les conditions de montage et de maintien de la coque sont apparus comme assez critiques sur la finesse des pics, leur amortissement aux fréquences basses et hautes. Un châssis imposant des conditions de maintien limitées et rigides dans les quatre coins a ainsi été conçu afin de conserver une grande variété de pics de résonance. Néanmoins, la question se pose de savoir s'il est préférable de privilégier dans le procédé tactile l'amortissement sélectif des raies de résonance ou le phénomène de diffraction.

Par ailleurs, la sensibilité du système aux variations de température a pu être caractérisée. Une petite augmentation inférieure à 3°C engendre une contraction du spectre visible en fréquence et en amplitude, mais faible devant les perturbations liées à un toucher. En outre selon [RIB07], les influences de la température peuvent être calculées et corrigées.

Dans le chapitre suivant, nous mettrons en œuvre un procédé tactile basé sur la diffraction des ondes. Le dispositif exploite une plaque rectangulaire intégrée dans un châssis et maintenue rigidement en ses quatre coins. Les transducteurs trapézoïdaux sont positionnés en dehors des axes de symétrie de la plaque. Cette structure exploite les critères de conception qui ont pu être dégagés dans ce chapitre.

Chapitre 3. Procédé tactile à diffraction ultrasonore

Ce chapitre présente un procédé tactile basé sur la diffraction des ondes de Lamb. Un prototype d'interface tactile est réalisé sur une plaque en cuivre avec ce procédé ; deux méthodes d'optimisation sont proposées pour améliorer le taux de localisations correctes. Les travaux présentés dans ce chapitre ont fait l'objet d'une demande de brevet et sont publiés dans deux revues internationales.

Chapitre 3. Procédé tactile à diffraction ultrasonore	71
3.1. Description du procédé tactile.....	75
3.2. Principe de fonctionnement	78
3.3. Performances et Optimisations	84
3.4. Sélection de fréquence d'excitation et phénomène d'illumination.....	94
3.5. Conclusion	103

Dans les travaux d'Ing et al. [ING05a][ING05b], un procédé tactile utilisant le retournement temporel est proposé. Ce procédé permet de localiser un impact sur la surface d'un solide. Un système de détection tactile est équipé de plusieurs transducteurs piézoélectriques qui mesurent le signal acoustique provenant d'un impact sur la surface tactile. Ces signaux mesurés sont ensuite comparés avec ceux d'une base de données, afin d'en déduire la position de la source acoustique.

Par rapport aux autres procédés tactiles basés sur l'onde de Rayleigh [ADL85] ou sur le délai de propagation des ondes de Lamb [DIE89][NIK95][NIK00], le procédé par retournement temporel présente l'avantage de transformer la majorité des objets solides en interfaces tactiles, sans besoin de connaître les propriétés acoustiques de ces derniers. Sur le long terme, les agressions de surface, telles entailles ou éclats doivent être très limitées et les propriétés hydro élastiques et thermo élastiques du matériau doivent être connues pour évaluer la stabilité de l'ensemble d'apprentissage. En outre, ce procédé est essentiellement développé pour la détection d'un impact ou d'un frottement sur une surface rugueuse ; il ne peut pas détecter les touches statiques car ils n'engendrent pas de propagation acoustique. Par conséquent, l'interaction homme-machine est limitée dans ce procédé à une interaction dynamique.

Pour certains modes d'interaction comme par exemple les modes dits « multi-touch » ou « touches multiples », il est nécessaire d'identifier les positions de deux ou plusieurs touches; ce qui est compliqué pour un procédé de détection d'impact, parce qu'il faut créer des impacts multiples au même instant. En revanche le « tracking multitouch » est possible sur une surface rugueuse. En conséquence, un procédé de détection du toucher statique est nécessaire. Un procédé basé sur l'absorption des ondes de Lamb a été proposé [NIK07c] pour répondre à ces besoins.

Ce procédé par apprentissage est basé sur la perturbation de plusieurs modes de vibrations prédéfinis. Il comprend une phase d'apprentissage des perturbations associées à des touches en des endroits prédéterminés de l'objet et une phase de surveillance au cours de laquelle on cherche à reconnaître un toucher. Durant la phase de surveillance, l'émission dans un solide de signaux acoustiques par les transducteurs piézoélectriques émetteurs, est associée à une surveillance en continu d'un éventuel signal de perturbation mesuré par un ou deux transducteurs récepteurs piézoélectriques lorsqu'il y a un toucher sur la surface tactile. Ce signal de perturbation, en général un amortissement, est ensuite corrélé à l'ensemble de signaux de référence pour identifier la position du toucher. Les maxima des fonctions de corrélation croisée entre le signal mesuré et les signaux de référence sont calculés afin de connaître quel signal de référence est le plus corrélé avec le signal mesuré.

Ce procédé est un procédé dit « actif » car il est associé à un dispositif d'émission d'ondes dans l'objet, ce qui le distingue du procédé d'apprentissage de signatures

d'impacts qui lui est dit « passif ». En outre, ce procédé actif nécessite la mise en résonance de la surface tactile, en particulier il utilise les figures de résonance de modes de flexion. Ces résonances ne sont pas utilisées comme un simple moyen d'améliorer le rapport signal sur bruit mais comme moyen permettant de matérialiser à la surface de l'objet des figures de vibrations à différentes longueurs d'ondes de Lamb.

Les figures de résonance de modes de flexion ont la caractéristique d'être plus fortement perturbées que les figures de résonance de modes à vibrations dans le plan de l'objet tels les modes de Lamb symétriques de sorte que l'amortissement engendré par un doigt mis en contact avec l'objet, même épais, varie de façon mesurable d'un mode propre à l'autre et d'une position de contact à l'autre. Il est ainsi possible de localiser un toucher par une méthode d'apprentissage, dès qu'un nombre suffisant de figures de résonance est matérialisé à la surface de l'objet. En outre, ce procédé s'appuie sur la diversité des figures de résonances, en particulier sur le fait que des modes de longueur d'onde élevée sont associés à des modes de faible longueur d'onde. Cette association permet de lever toute ambiguïté sur la position d'un toucher.

En effet, les modes de vibration à longueur d'onde courte permettent d'atteindre une bonne résolution, mais ne garantissent pas l'unicité de la solution, tandis que les modes à plus grande longueur d'onde garantissent l'unicité mais ne fournissent pas la résolution millimétrique ou submillimétrique recherchée. Enfin, pour améliorer la sélectivité des touchers, le procédé s'appuie sur des modes de résonance caractérisés par des figures à faible degré de symétrie. Ceci est obtenu en disposant par exemple les capteurs en dehors des axes de symétrie de l'objet à « tactiliser ». Ce procédé propose également une solution permettant de déterminer à partir de l'enregistrement préalable de matrices de signaux de référence pour différentes dimensions caractéristiques de la surface de contact, la surface couverte par le doigt en contact avec l'objet.

Plusieurs problèmes ne sont pas résolus dans ce procédé basé sur l'amortissement des ondes de Lamb, notamment les problèmes d'intégration mécanique, de reconnaissance, de localisation et d'interprétation d'un toucher multiple. En effet, l'analyse bibliographique indique que l'amortissement n'est pas forcément une fonction linéaire de la surface couvrante (sauf à choisir un sous espace de modes de

résonances) et dans l'hypothèse il le serait, il n'est pas toujours possible de localiser plusieurs touchers.

En effet, pour qu'un amortissement soit une fonction linéaire de la surface en contact, il suffit que l'énergie moyenne soit uniformément distribuée à la surface de l'objet. Mais dans ce cas, il n'y a plus de résonance donc plus de nœuds ni de ventres de vibration. Rien ne permet plus alors de discriminer la position d'un toucher, sauf le temps de transit.

Une des faiblesses du procédé tactile par absorption réside dans la forte sélectivité des figures de résonance et dans la nécessité de disposer d'une bonne résolution fréquentielle pour mesurer l'amplitude au pic de résonance, ou au moins de pouvoir réaliser une interpolation pour extrapoler la valeur du pic de résonance avec ou sans contact.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons modifié et développé le procédé tactile par amortissement en l'orientant vers un procédé tactile reposant sur la diffraction d'ondes en régime permanent ou transitoire. Le procédé décrit dans ce travail exploite essentiellement les perturbations en amplitude et est nommé un procédé tactile à « *Figures de Diffraction Perturbées en Amplitude* » ou « FDPA », (en anglais « *Amplitude Disturbed Diffraction Pattern (ADDP)* »).

Ce n'est pas une simple optimisation du procédé par amortissement, puisqu'il fonctionne même sans amortissement. C'est un nouveau procédé basé sur un phénomène physique différent : il utilise la diffraction des ondes de Lamb imposée par un blocage de la surface, le blocage pouvant être quasi ponctuel, tel celui imposé par la pointe d'un stylet.

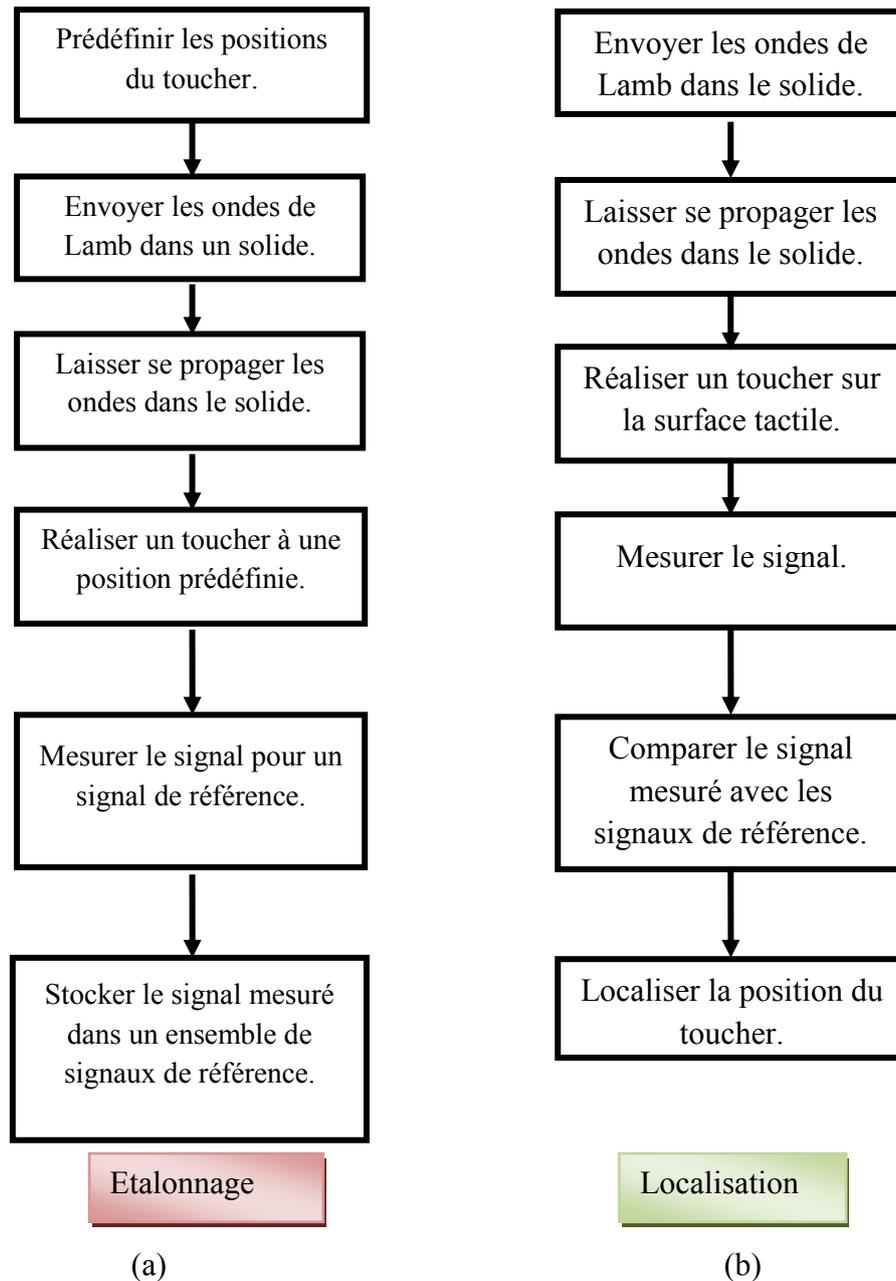
Il concerne les interfaces homme-machine et plus particulièrement les surfaces tactiles planes ou courbes activables par touchers ainsi que l'interprétation dynamique des touchers en langage basé sur une gestuelle tactile (sémiotique tactile), le codage en commandes de contrôle d'objets graphiques ou d'une interface graphique notamment pour le codage en commandes informatiques comparables à des raccourcis clavier. Il est ainsi relatif aux procédés pour localiser un toucher simple ou des touchers multiples simultanés (multi-touchers) sur une surface et aux dispositifs pour leurs mises en œuvre. Ces performances ont été testées, en réalisant des expériences sur une

plaque en cuivre, sur une plaque en verre, sur une coque en cuivre et sur un écran LCD. Différents résultats expérimentaux sont illustrés au chapitre suivant.

3.1. Description du procédé tactile

3.1.1. Principales étapes du procédé FDPA

Nous pouvons résumer ce procédé par l'organigramme de la figure 3.1.



On rappelle qu'un toucher signifie qu'un doigt ou un stylet est en contact avec la surface tactile. Le présent procédé FDPA est basé sur l'émission et l'analyse d'ondes acoustiques (ondes de Lamb). Il comprend ainsi deux étapes principales :

- (a) une étape de *surveillance* ou d'excitation au cours de laquelle on fait propager dans un objet (surface tactile) à partir d'au moins un émetteur des ondes de Lamb et on capte les ondes par au moins un récepteur des ondes.
- (b) une étape de *localisation* au cours de laquelle on localise la position d'un toucher ou les positions des touchers multiples simultanés en analysant les signaux captés.

L'analyse du signal capté consiste en une recherche du vecteur le plus proche parmi au moins un ensemble de vecteur de référence, ce vecteur étant créé à partir du signal capté. Il s'ensuit d'une part qu'une connaissance du phénomène de diffraction des ondes sur l'objet support est nécessaire, d'autre part que la connaissance de la perturbation des ondes par le toucher est également nécessaire pour être identifiable. Ainsi, avant l'utilisation du dispositif tactile, nous avons besoin de réaliser une étape d'apprentissage et d'étalonnage pour avoir une matrice de signaux de référence.

3.1.2. Dispositif

Comme nous l'avons montré dans les chapitres précédent, il faut veiller à utiliser des objets (cuivre, verre, ...) présentant des épaisseurs faibles devant la dimension caractéristique de la zone touchée, typiquement entre 10 et 100 fois plus faible. La surface peut être une plaque plane ou courbe, dont au moins l'une des faces est libre, maintenue par un nombre limité de points de fixation. Il faut aussi disposer les récepteurs en dehors des axes de symétrie de l'objet et/ou, ils doivent avoir une forme qui combinée à celle de la surface à laquelle ils sont couplés, brise la propriété de symétrie de la surface de l'objet.

Nous prenons ainsi comme premier exemple de réalisation, le dispositif tactile illustré à la figure 3.2. C'est un système de transduction et de propagation d'ondes, comme celui présenté dans le chapitre 2. Il se compose d'un générateur de fonctions Tektronix AFG 3012, d'une carte d'acquisition Pico Technology ADC 212/50, d'un ordinateur et d'un objet tactile.

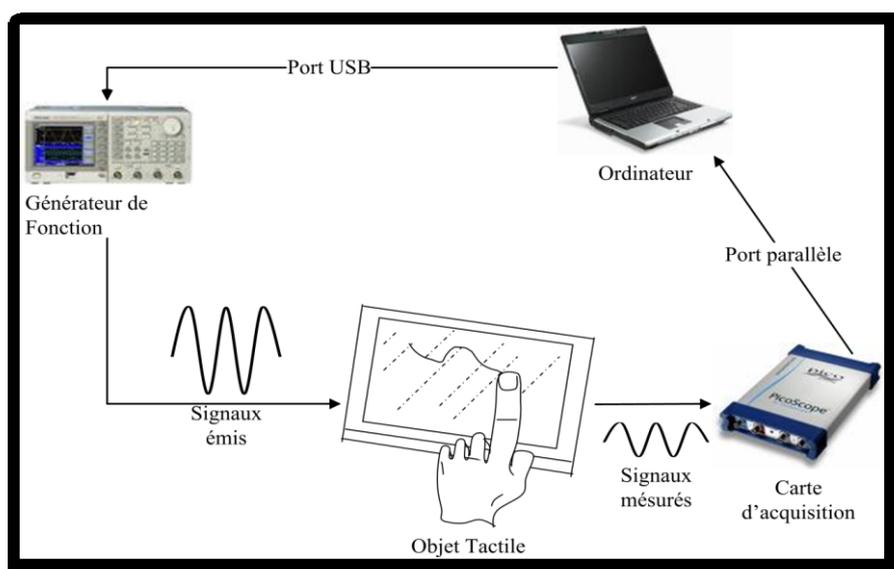


Figure 3.2 : Schéma du dispositif : un système de transduction et propagation d'ondes.

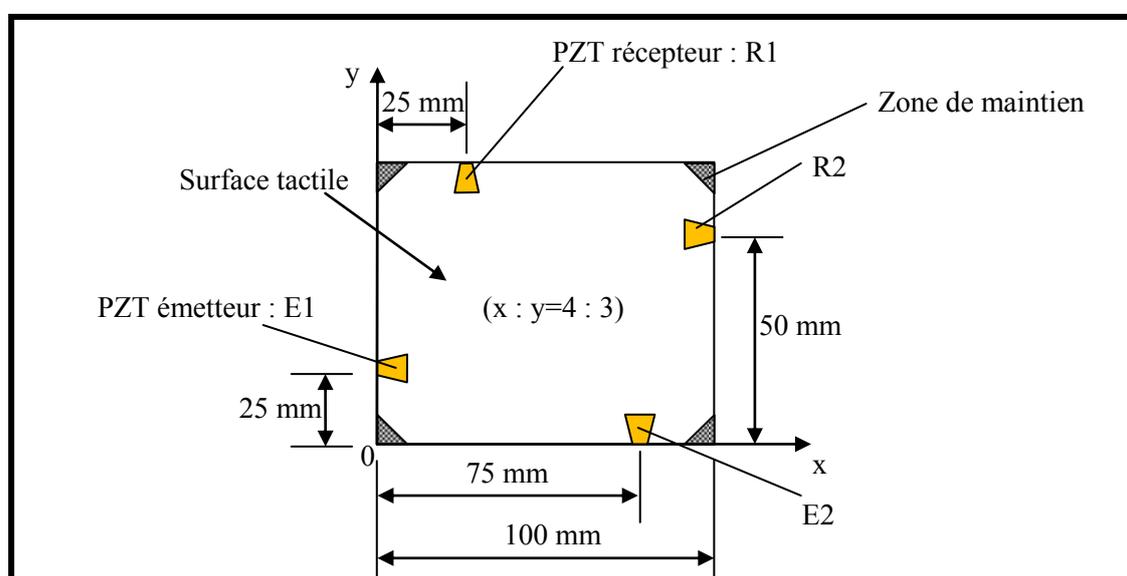


Figure 3.3 : Positions des transducteurs PZT : émetteurs **E** et récepteurs **R**.

L'objet tactile que nous utilisons est une plaque rectangulaire en cuivre de dimensions $75 \times 100 \times 0,35$ mm. Cette plaque est montée dans un châssis réalisé en polymère. Elle est fixée seulement aux quatre coins pour limiter et maîtriser la contrainte mécanique.

Quatre transducteurs piézoélectriques (PZT, épaisseur = 0,5 mm, type Pz27 de chez FERROPERM, surface = 25 mm^2 , capacité d'environ 0,6 nF) sont couplés aux bords de la plaque par une colle conductrice de l'électricité époxy Circuitworks CW2400. Les transducteurs sont placés en bord de plaque comme illustrés à la figure 3.3. Ils sont placés de façon à assurer l'unicité d'une perturbation tactile en évitant que ne se matérialise à la surface de l'objet des figures de vibration présentant des axes de symétrie.

3.2. Principe de fonctionnement

3.2.1. Etape d'apprentissage des positions

L'étalonnage du dispositif consiste à enregistrer les signaux de référence. Ces signaux sont les perturbations associées à des touches en des positions prédéfinies de la surface tactile.

La plaque de cuivre a été calibrée de deux façons différentes :

- ✓ Le premier étalonnage a été réalisé avec un doigt humain. La surface tactile consiste en une grille de 9 x 9 points de référence au pas de $7,5 \times 10$ mm.
- ✓ Le deuxième étalonnage a été réalisé avec un doigt artificiel en silicone selon une grille au pas de $2,5 \times 2$ mm, et 36×32 points de contact. Ce maillage est illustré à la figure 3.4.

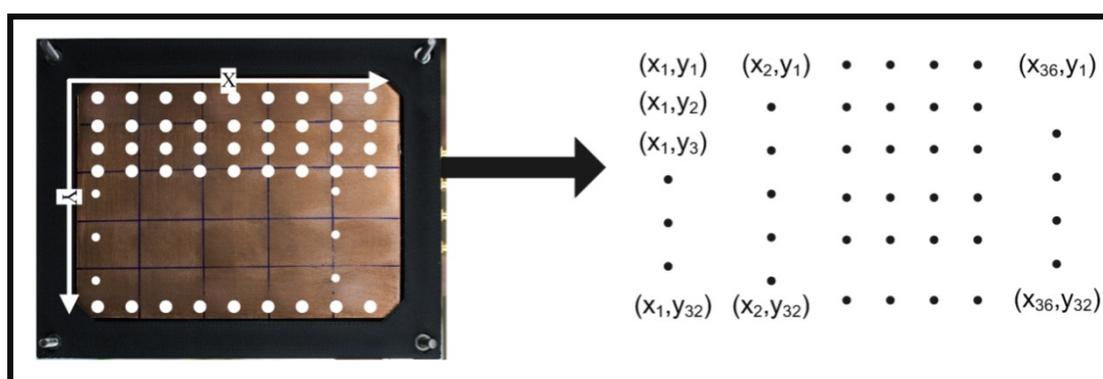


Figure 3.4 : Discretisation d'une surface tactile en une matrice de points de référence.

Les 36×32 points prédéfinis sont rangés dans une matrice, indexée de (x_1, y_1) à (x_{36}, y_{32}) . Les 36×32 signaux de référence sont acquis au cours de l'étape d'étalonnage, et ils sont associés aux 1152 positions de contact prédéfinies.

3.2.2. Etape de surveillance

Au cours de l'étape de surveillance, les émetteurs E1 et E2 engendrent des ondes de Lamb en permanence sur la plaque acoustique. Pour éviter que plusieurs positions de toucher n'engendrent les mêmes signaux de perturbation, les signaux émis comprennent non pas une mais plusieurs fréquences porteuses. Ainsi, les ondes émises sont composées par un nombre Q de fréquences prédéterminées. Après de multiples réflexions sur les bords de la plaque, il apparaît un régime d'ondes

stationnaires sur la plaque, qui sont ensuite captées par les transducteurs de réception R1, R2.

Les Q fréquences prédéterminées sont essentielles à ce procédé. Si ce sont des fréquences propres, alors la surface tactile est mise en résonance selon des figures de résonance. Comme présenté dans l'introduction, le procédé basé sur les figures de résonance présente plusieurs inconvénients, notamment les problèmes de multiplicité de solutions mais aussi d'identification de touchers multiples. Par conséquent, nous préférons exciter la surface tactile en dehors des fréquences de résonance afin de s'affranchir des problèmes liés à la sélectivité et donc à l'instabilité des figures de résonances.

Nous choisissons 40 fréquences réparties dans une plage de fréquences comprises entre 20 kHz et 80 kHz. Les fréquences sélectionnées sont donc :

$$f(i) = 20 + 1.5 \times i \text{ (kHz)}, i = 1 \text{ à } 40 \quad (3.1)$$

Ensuite nous vérifions que ces fréquences ne sont pas les fréquences propres de la plaque. Rappelons qu'un balayage fréquentiel est réalisé au chapitre 2, pour une plaque de la même dimension et avec les mêmes conditions aux limites. Aucune des 40 résonances sélectionnées ne correspond à un mode de résonance.

La fenêtre de réception est fixée à deux fois la longueur de la fenêtre d'émission, c'est-à-dire 4 ms. Le signal d'excitation est ainsi la composition des 40 fréquences et leur émission est effectuée pendant une fenêtre temporelle de durée suffisante pour que des ondes stationnaires apparaissent dans la plaque. Cette émission peut être répétée de manière continue en générant un signal arbitraire, superposition des Q fréquences. Ce signal est programmé sous Matlab, avec une fréquence d'échantillonnage de 16 MHz, voir figure 3.5.

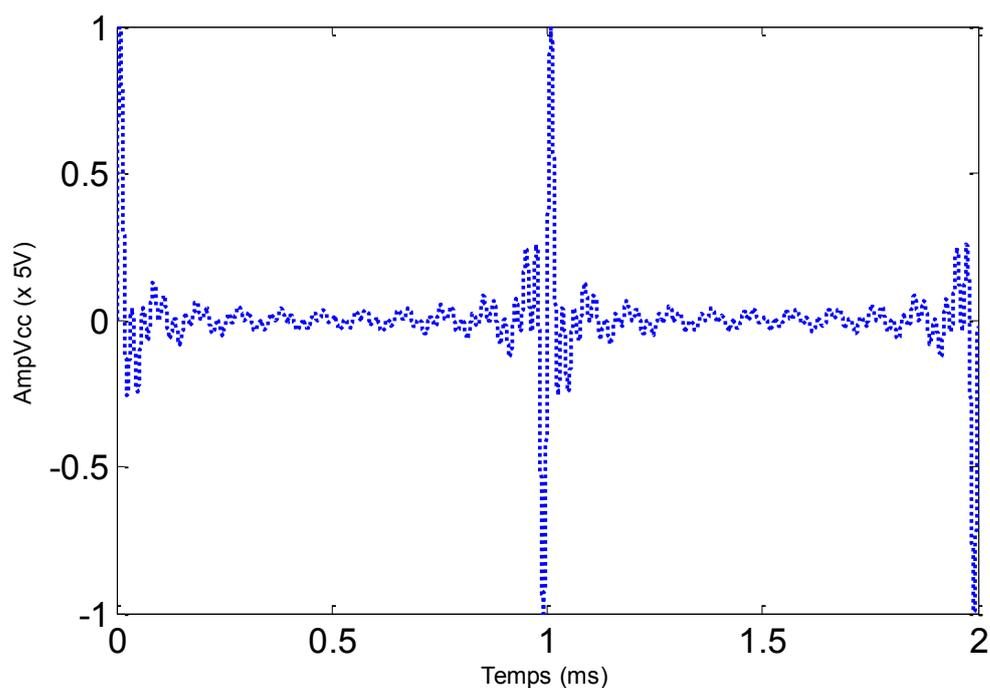


Figure 3.5 : Signal d'excitation répété en continu.

```

%% Programme Matlab : Composition du signal d'excitation
GEN.Freq=16000000;% Fréquence d'échantillonnage du GDF,
GEN.N=16384;% Nombre de points pour la composition
GEN.Amp=10;% L'amplitude du signal d'excitation
x=double(zeros(1,GEN.N));
Nbr_frequence=40;
for i=1:Nbr_frequence
    for j=1:GEN.N;
        x(j)=x(j)+sin(double(2*pi*(20000+60000/Nbr_frequence*i)*(j-1)/GEN.Freq));
    end
end
    
```

3.2.3. Mesure du signal

Au cours de l'étape de localisation, on détermine la position d'un toucher ou les positions des touchers multiples en analysant les signaux captés. En pratique, les deux transducteurs de réception des ondes de Lamb R1 et R2 servent à capter les signaux que l'on compare avec une matrice de signaux de référence. Ces signaux de référence sont ceux obtenus par R1 et R2 pour des positions connues de touchers.

La fenêtre temporelle de réception peut débuter après la fenêtre temporelle d'émission de façon à permettre l'établissement d'ondes stationnaires ou dès le début de la fenêtre temporelle d'émission de façon à saisir le processus d'illumination acoustique de l'objet qui se manifeste au cours des réflexions successives sur les bords de l'objet. On peut aussi considérer deux autres cas de figures :

- ✓ l'émission est intermittente, ladite fenêtre temporelle de réception peut débuter après la première trame d'émission.
- ✓ la fenêtre temporelle de réception pourrait suivre la fenêtre temporelle d'émission sans la recouvrir : on pourrait éventuellement n'utiliser qu'un seul transducteur E servant à la fois en émission et en réception. Dans ce cas, les transducteurs récepteurs ne s'intéressent pas au processus d'illumination, mais au processus d'extinction acoustique de l'objet.

Pour notre premier prototype, la fenêtre d'acquisition est fixée à 5 ms. La figure 3.6 illustre un exemple de signaux captés par le transducteur R1. L'excitation des ondes et la mesure se déroulent simultanément. La durée de traitement des données est un paramètre à surveiller lorsque l'ensemble d'apprentissage devient conséquent.

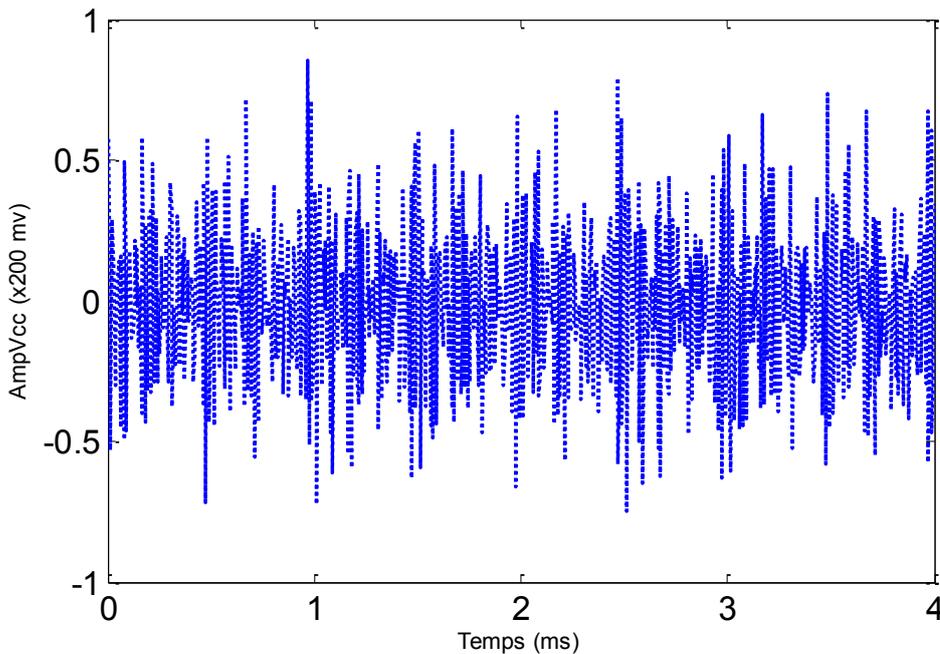


Figure 3.6 : Signaux captés par le transducteur de réception R1.

À partir des signaux captés par les transducteurs de réception R1, R2 et échantillonnés à la fréquence $Fe = 256$ kHz, on extrait les valeurs mesurées sur une fenêtre temporelle de durée $T = N \cdot T_e$, où $N = 1024$ est le nombre de points d'acquisition et T_e la période d'échantillonnage :

$$\vec{p}_m = (A_{1m}, A_{2m}, \dots, A_{Nm}) \quad (3.2)$$

Notons m l'indice du transducteur de réception, dans notre cas $m = 1$ ou 2 . Ce vecteur \vec{p}_m est un spectre en module du signal aux fréquences comprises entre 0 et la fréquence d'échantillonnage de réception $F_e/2$, avec un pas en fréquence de $1/T$. Notons A_j le module du signal à la fréquence f_j , qui est définie par T et $F_e = f_j = j \times \frac{F_e}{N}$, $j = 1$ à N . En pratique, ce vecteur représente la transformée de Fourier rapide du signal mesuré aux bornes du récepteur. Un exemple est illustré à la figure 3.7.

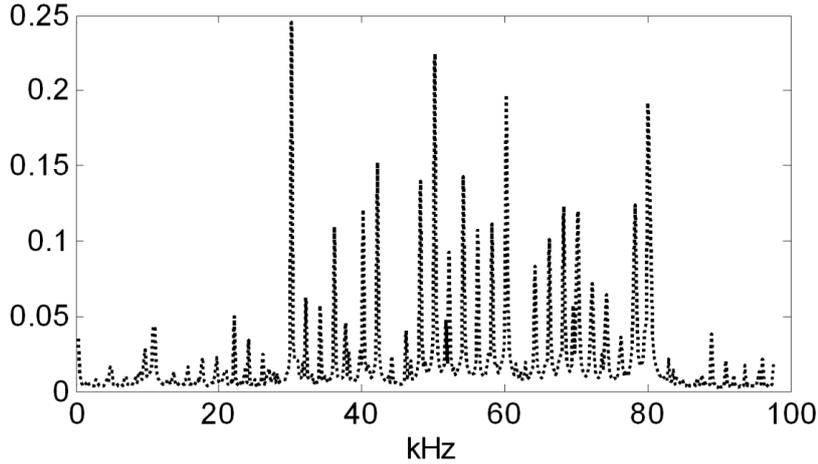


Figure 3.7 : Module (en V^2/Hz) de la transformée de Fourier rapide (FFT) d'un exemple de signaux captés par le récepteur R1.

A chaque itération, le vecteur mesuré est comparé aux éléments de la matrice des vecteurs de référence $\vec{p}_{mref}(x_i, y_j)$. Ces vecteurs de référence sont obtenus lors de l'étape d'étalonnage de la même façon que dans l'étape de localisation, mais avec des positions de toucher prédéfinies. L'équation (3.3) présente un vecteur de référence :

$$\vec{P}_{mref}(x_i, y_j) = (A_{1mref}, A_{2mref}, \dots, A_{Nmref}) \quad (3.3)$$

où A_{jmref} désigne le module de la FFT du signal à la fréquence f_j .

3.2.4. Algorithme de localisation

Au cours de l'étape d'apprentissage, nous avons obtenu un ensemble de signaux de référence, qui peuvent être considérés comme des formes (ou des objets géométriques). Le signal mesuré au cours de l'étape de localisation est considéré comme un objet à reconnaître parmi un ensemble d'objets de référence. Ainsi, la localisation du toucher est réalisée par un procédé de reconnaissance de formes. Il existe dans la littérature plusieurs méthodes de reconnaissance de formes

[RIC01][SCH96]. Par exemple, la reconnaissance de formes peut être effectuée au moyen de divers algorithmes d'apprentissage tels que : réseaux de neurones [LEO03], la méthode Bayésienne [BER94], ou les machines à vecteurs de support [CHR06]. Dans notre cas, nous utilisons la méthode des k plus proches voisins [IND98][ZEZ06], avec $k = 1$. La recherche des k plus proches voisins consiste, étant donné un point P dans un espace S n'appartenant pas nécessairement à l'ensemble A (un ensemble de points dans l'espace S), à déterminer quels sont les k points de A les plus proches de P .

Nous considérerons le signal mesuré comme un point P , les signaux de référence comme un ensemble de points A dans un espace S qui est la surface tactile. La localisation consiste donc en la recherche d'un point dans l'ensemble A le plus proche de P . La distance entre P et un point de l'ensemble A peut être calculée par la distance Euclidienne ou la distance de Manhattan [EUG87].

Dans ce travail, pour réduire le temps de calcul, nous avons choisi la distance de Manhattan pour la localisation. Nous calculons la différence entre un vecteur mesuré et un vecteur de référence selon l'équation (3.4) :

$$d_m \left(\bar{P}_m, \bar{P}_{mref} \right) = \sum_{i=1}^n |A_i - A_{iref}| \quad (3.4)$$

Chaque vecteur de référence correspond à une position prédéfinie de contact sur la surface tactile. Une fois calculés tous les d_m entre le vecteur de mesure et tous les vecteurs de référence, on détermine la position du toucher en sélectionnant celle qui présente le plus petit d_m .

Dans l'hypothèse d'un toucher simple, la position de contact peut être visualisée par une figure de contraste qui présente les distances d_m normalisées entre 0 et 1, et en niveau de gris. Un exemple est illustré à la figure 3.8. Un doigt est posé au centre d'une surface tactile de dimension $64 \times 90 \text{ mm}^2$, qui est pré-calibrée selon une grille de 32×36 points de référence.

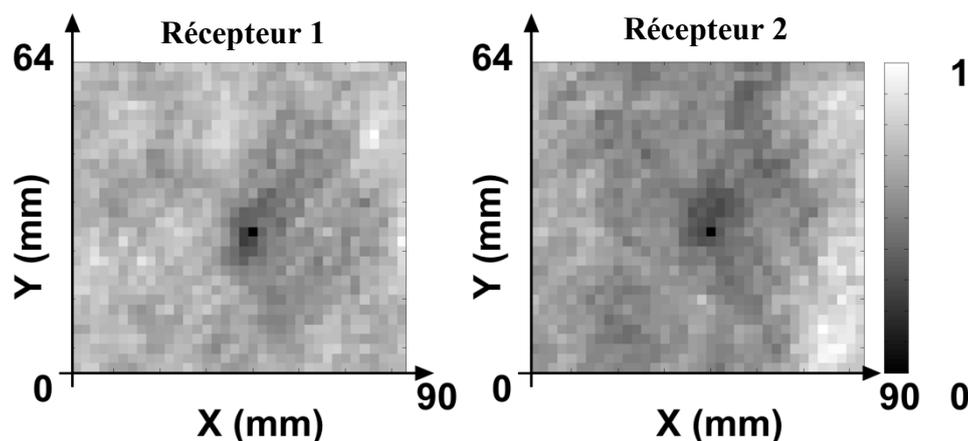


Figure 3.8 : Distances normalisées entre un vecteur mesuré et une matrice de vecteurs de référence, pour les récepteurs R1 et R2.

Les deux figures montrent le niveau de gris correspondant aux distances calculées en utilisant les deux récepteurs. Nous observons que la position du toucher apparaît clairement au centre de la figure ce qui correspond à la position réelle du toucher. Les points voisins présentent des distances faibles, ceci suggère une limite (ici 2 mm) à la résolution spatiale du procédé.

3.3. Performances et Optimisations

3.3.1. Performances de la localisation selon le mode d'apprentissage

Au cours de l'étalonnage, un point de référence est caractérisé lors d'un toucher sur l'objet tactile, à une position prédéfinie. Ce toucher doit être représentatif des touchers ultérieurs attendus lors de l'étape de localisation, c'est-à-dire qu'un contact sur l'objet tactile doit engendrer un signal de perturbation reproductible. Dans le cas où le nombre de points d'apprentissage est faible, l'utilisateur peut procéder manuellement en posant son doigt sur chaque position prédéfinie. Lorsque l'interface tactile a besoin d'une résolution spatiale plus fine, une calibration à l'aide d'un doigt artificiel et une tablette motorisée est nécessaire.

Dans ce travail, un doigt artificiel a été réalisé en silicone, un matériau dont le comportement mécanique (élasticité) est proche du doigt. Au cours de l'étape d'étalonnage, une tablette motorisée de micro positionnement en 3 dimensions (de la société AXMO S.A.) déplace le doigt en silicone à chaque position prédéterminée sur la surface tactile. La figure 3.9 illustre le doigt artificiel en contact avec la plaque pendant l'étape d'apprentissage.

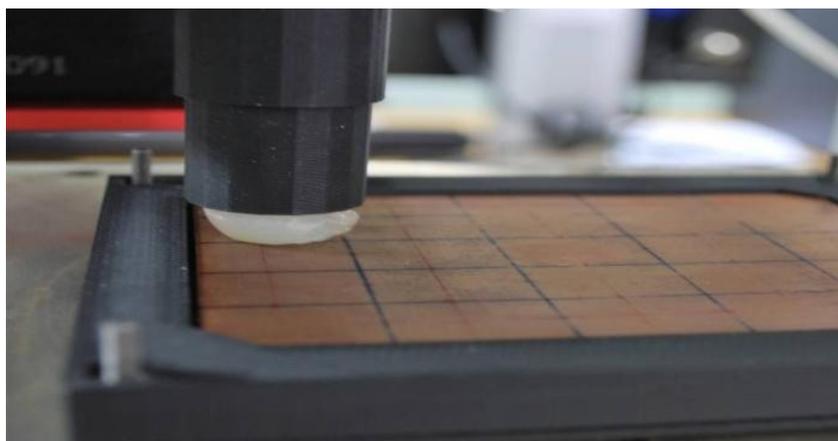


Figure 3.9 : Doigt artificiel en silicone en contact avec la plaque.

Nous avons calibré notre plaque de cuivre de deux façons différentes : l'une avec un doigt humain et l'autre avec un doigt artificiel. La performance de la détection tactile varie selon les conditions d'apprentissage. Nous discuterons d'abord la performance de la plaque calibrée avec un doigt humain et ensuite celle avec un doigt artificiel.

3.3.1.1 Performances de localisation pour une surface tactile calibrée avec un doigt humain

La figure 3.10 illustre les résultats de 10000 localisations consécutives déduites du récepteur R1, alors qu'un doigt est posé sur la surface tactile à la position de référence (x_5, y_5) . Le niveau de gris illustre le nombre de fois où un élément de l'ensemble d'apprentissage est identifié parmi les 10000 localisations. Dans la figure 3.10, la couleur noire du carré au centre correspond à 7592 localisations correctes.

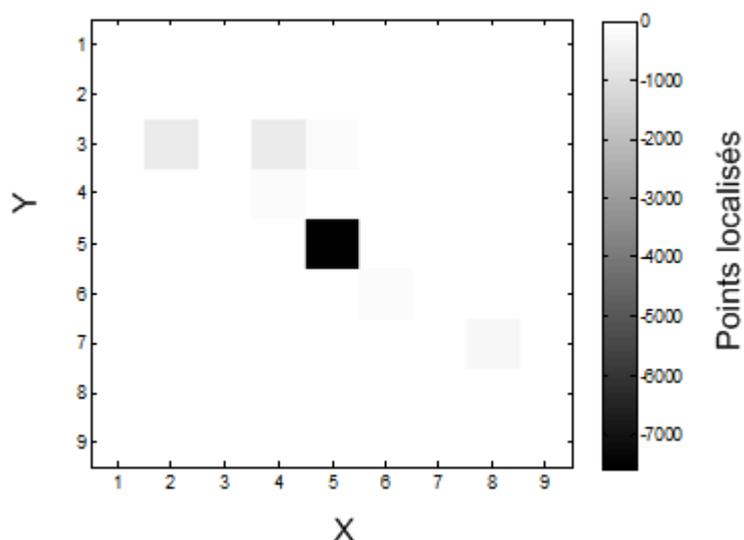


Figure 3.10 : Résultats de 10000 mesures consécutives à partir du récepteur R1. Le niveau de gris illustre le nombre de fois où un élément est identifié. La plaque est calibrée avec un doigt humain.

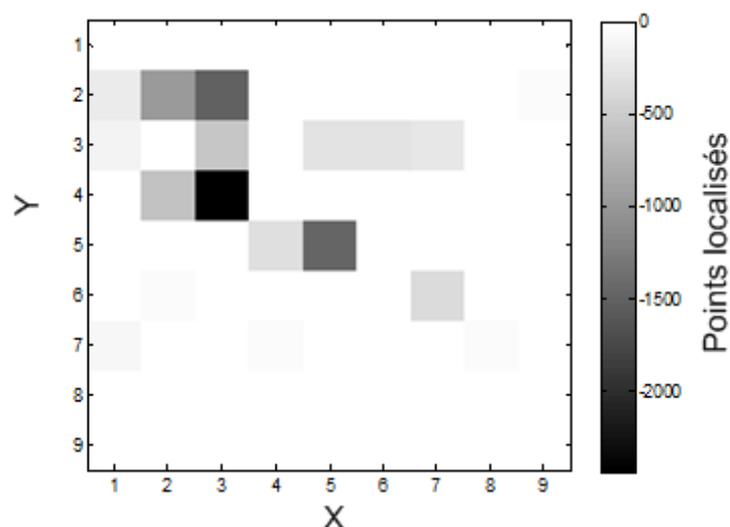


Figure 3.11 : Résultats de 10000 mesures consécutives basées sur le récepteur R2.

Le temps nécessaire à la localisation, y compris le temps de mesure et de traitement du signal varie entre 20 ms et 30 ms, soit une résolution fréquentielle de 30 à 50 Hz. Les deux récepteurs R1 et R2 ne présentent pas le même taux de localisations correctes. Comme illustré à la figure 3.11, pour le récepteur R2, seules 1438 localisations sur 10 000 sont correctes.

Le Taux de Localisations Correctes (TLC) tactile pour chaque récepteur varie aussi en fonction de l'emplacement du toucher. Pour un toucher à la position (x_3, y_7) , les TLC obtenus par les deux récepteurs peuvent respectivement atteindre 78% et 81%.

3.3.1.2 Performances de localisation pour une surface tactile calibrée avec un doigt artificiel en silicone

L'utilisation d'un doigt artificiel en silicone et un micro robot de positionnement assurent une force de contact stable et une surface du toucher inchangée pendant l'étalonnage. En conséquence, le TLC est amélioré par rapport à la surface calibrée avec un doigt humain. Un exemple de cette amélioration est illustré à la figure 3.12. En posant le doigt humain sur l'objet à la position $(x = 50 \text{ mm}, y = 36 \text{ mm})$ de la surface tactile, soit le point de référence (x_{20}, y_{18}) , un test de 10000 mesures consécutives réalisées avec R1 produit un TLC de 94,63%.

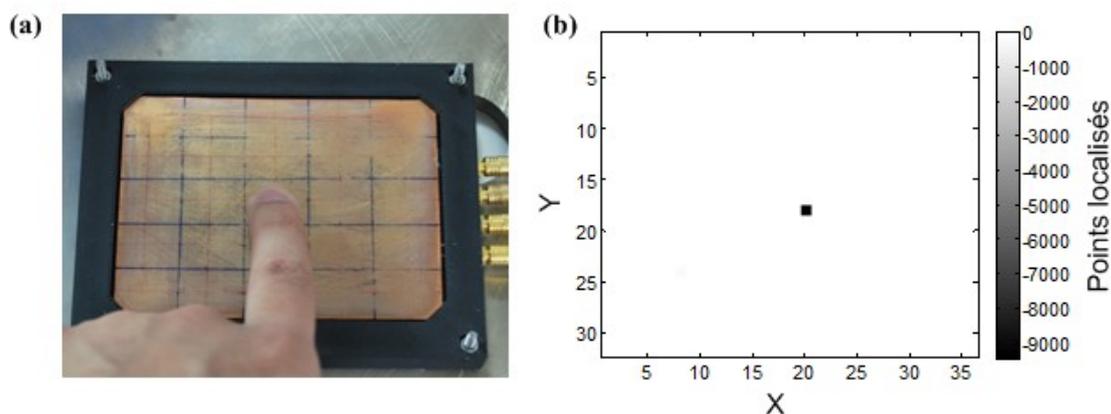


Figure 3.12 : Performances d'une surface tactile calibrée avec un doigt artificiel en silicone. (a) Position réelle du toucher ; (b) Résultats de 10000 localisations consécutives, le niveau de gris illustre le nombre de fois où un élément est identifié.

Le TLC varie selon la position du toucher. Par exemple lorsque un toucher se produit à la position $(x = 67,5 \text{ mm}, y = 16 \text{ mm})$, nous avons avec le récepteur R2, un taux de localisation de 89% (nombre de mesures indiquant le point de référence (x_{27}, y_8)). Les 11% restant correspondent à de fausses localisations. Ils identifient un toucher se situant sur le point voisin (x_{28}, y_8) . En effet, ces différences de sensibilités obtenues par les deux récepteurs sont facilement explicables par le fait que les signaux de diffraction dépendent de l'emplacement des capteurs PZT ainsi que de la position du toucher.

Pour améliorer la fiabilité de la localisation du toucher, deux méthodes statistiques sont étudiées et testées. La première est une méthode exploitant le concept de la double validation, la seconde est une méthode basée sur la similarité de la série temporelle.

3.3.2. Méthode de fiabilisation par la double validation²

Une validation est l'action de rendre ou déclarer valide. Ce mot se retrouve souvent dans l'industrie alimentaire et pharmaceutique, où une validation croisée est nécessaire pour la commercialisation d'un médicament. Ici la validation croisée est définie comme : une approche par laquelle les ensembles de données obtenues à partir de deux ou plusieurs méthodes indépendamment sont évaluées de façon critique [FDA01]. En informatique, lorsqu'une information est transmise par une voie de communication peu fiable, un code correcteur crée la redondance pour accroître la

² Ce travail a été publié dans « Sensors and Actuators A ». Identifiant d'objet numérique (DOI): 10.1016/j.sna.2010.03.020.

fiabilité de transmission [MAR04][DUM07]. La parité par redondance est utilisée aussi pour les disques durs (RAID) [PAT88].

Inspiré de ces deux méthodes, nous avons proposé une méthode de double validation pour augmenter le taux de localisation correcte. Les deux (dans le cas général un nombre m supérieur à 1) récepteurs sont considérés comme deux capteurs indépendants, qui permettent de fournir deux données de la position du toucher. Nous pouvons considérer qu'il y a de la redondance sur la localisation. Avec cette redondance nous pouvons réduire le Taux de Localisation Fausse (TLF).

Selon cette méthode, on localise la position d'un toucher simple par les $m = 2$ transducteurs de réception, respectivement. Une localisation est valide si et seulement si ces deux positions sont identiques.

La figure 3.13 illustre l'organigramme du procédé tactile avec la méthode de double validation. Par rapport à l'organigramme du procédé présenté à la figure 3.1, une opération supplémentaire est introduite : une comparaison entre les positions localisées par les deux récepteurs R1 et R2.

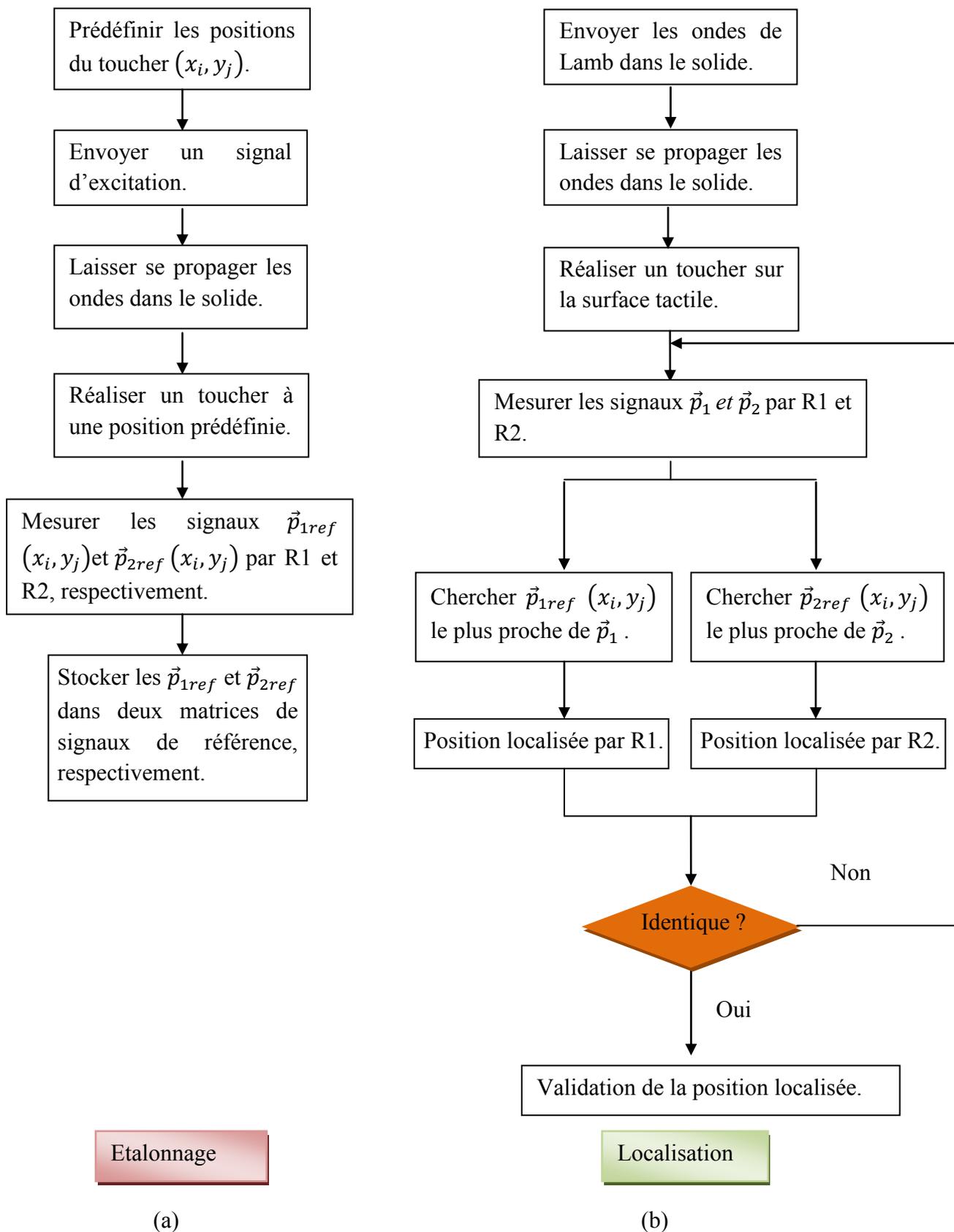


Figure 3.13 : Organigramme du procédé tactile avec la méthode de fiabilisation par la double validation: (a) l'étape d'étalonnage ; (b) l'étape de localisation, et de la validation de la position localisée.

3.3.2.1 Application à une surface calibrée avec un doigt humain

Nous reprenons les expériences présentées dans les figures 3.11 et 3.12. La surface tactile est calibrée avec un doigt humain au cours de l'étape d'étalonnage. Le même doigt est ensuite posé au centre de la surface pour un test de 10000 mesures consécutives. Après l'application de la méthode de double validation, seules 1369 mesures sont retenues : voir la figure 3.14.

Notons qu'il n'y a qu'une seule erreur, soit une fiabilité de 99,93% pour cette surface tactile. De plus, cette erreur correspond à la position (x_5, y_4) , un point voisin de la position correcte.

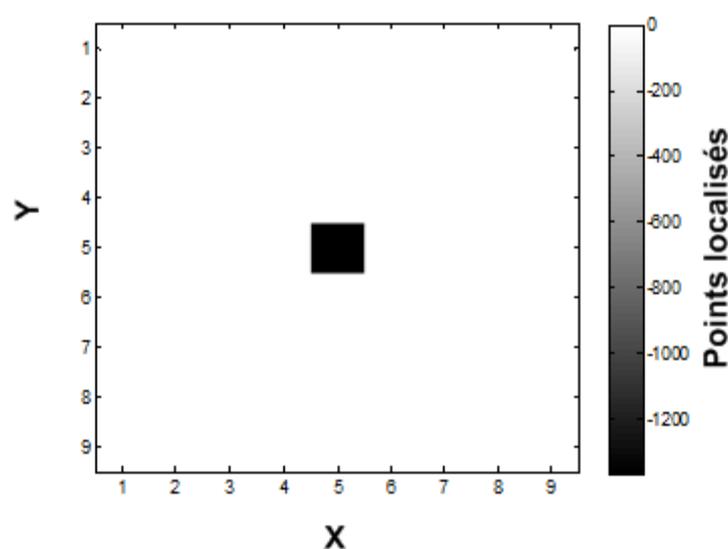


Figure 3.14 Résultats de 10000 mesures consécutives avec double validation pour un toucher en position (x_5, y_5) . (Le niveau de gris illustre le nombre de fois où un élément est identifié).

Un autre test de fiabilité avec un toucher à la position (x_3, y_7) confirme une amélioration du TLC : 7424 localisations sur 10000 localisations consécutives sont retenues avec un TLC de 99,49 %.

Toutefois, la méthode de double validation augmente le temps de réponse du système. Comme il faut en moyenne 7,3 mesures pour valider une localisation à la position (x_5, y_5) , le temps de réponse moyen devient 200 ms. De même, le temps de réponse moyen est de 33 ms pour un toucher à (x_3, y_7) . Ces temps de réponse sont estimés avec le banc de test actuel, où le temps d'acquisition est relativement lourd car la transmission des données utilise le port parallèle. Un tel procédé réalisé in situ avec les algorithmes portés sur microcontrôleur réduirait ce temps de réponse.

3.3.2.2 Application à une surface calibrée avec un doigt en silicone

Nous considérons maintenant la surface tactile calibrée avec le doigt en silicone. Comme le TLC obtenu par chaque récepteur est supérieur à 89%, nous pouvons calculer le TLC du procédé tactile avec la méthode de double validation.

Supposons que les erreurs ne se produisent qu'aux 8 points voisins du point de contact réel, le procédé de localisation a une probabilité de $0,89 \cdot 0,89 = 0,792$ de fournir des résultats corrects avec la méthode de double validation. Une fausse localisation ne se produit que lorsque les résultats des deux récepteurs R1 et R2 indiquent simultanément le même point faux, soit une probabilité inférieure à $0,11 \cdot 0,11 / 8^2 = 0,00018$, soit 2 pour 10000 mesures. Si les signaux de perturbation deviennent plus symétriques, il peut apparaître des erreurs de mesures qui ne concernent pas seulement les points voisins du point correct, mais des points situés dans des zones distantes.

Comme cela a été vu au paragraphe 3.2.1, la méthode de double validation peut assurer un TLC élevé au prix d'une augmentation du temps de réponse du système. Dans le cas d'une surface calibrée avec le doigt artificiel, le temps de réponse de localisation est environ de 25 ms.

Un autre inconvénient de la méthode de double validation est que la fiabilité du système dépend du bon fonctionnement de tous les récepteurs. Considérons par exemple le cas où le TLC du récepteur R1 est inférieur à 20%, même si le deuxième récepteur R2 fonctionne avec 100% de TLC, le système ne peut pas valider plus de 20% de localisations. C'est-à-dire que la performance globale du procédé est celle du maillon faible. Si un seul récepteur est en panne, le procédé tactile ne fonctionne plus.

La méthode de double validation peut être vue comme un « critère de rejet » d'une mesure. Nous proposons alors un autre critère, qui donnerait une « raison d'accepter » une mesure : il est basé sur la similarité d'une série de mesures temporelles.

3.3.3. Méthode de fiabilisation basée sur la similarité en série temporelle³

En économie, pour réaliser des prédictions/prévisions, nous considérons qu'il y a une similarité dans une série temporelle [REG98][PIR04], là où la série temporelle est définie comme une suite de valeurs numériques représentant l'évolution d'une grandeur au cours du temps.

Les mesures successives de localisation du toucher peuvent être considérées comme une série temporelle. Comme la vitesse de localisation est très rapide par rapport à la vitesse du déplacement du toucher, il existe une similarité dans la série des mesures de localisation. Nous pouvons donc comparer une localisation aux précédentes pour valider si elle est correcte ou pas.

3.3.3.1 Performances de localisation par vecteur étendu

Avec la méthode basée sur la similarité dans une série temporelle, nous combinons les signaux fournis par chaque récepteur pour construire un vecteur de perturbation étendu, c'est pourquoi nous pouvons utiliser les m récepteurs en même temps. De ce fait, l'influence d'un récepteur en cas de panne sera réduite par le fonctionnement des autres récepteurs.

Le vecteur étendu \vec{p}_e est décrit par l'équation (3.5), il est composé de l'amplitude de chaque \vec{p}_i , pour i variant de 1 à m :

$$\vec{p}_e = (\vec{p}_1, \vec{p}_2 \cdots \vec{p}_m) = (A_{11}, \cdots A_{N1}, A_{12}, \cdots A_{N2}, \cdots A_{Nm}) \quad (3.5)$$

où p_i est défini par l'équation (3.2). La localisation du contact consiste à rechercher le vecteur de référence étendu qui est le plus proche du vecteur des signaux mesurés. La distance entre deux vecteurs est décrite par leur distance de Manhattan (3.6) :

$$d(\vec{P}_e, \vec{P}_{eref}) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^N |A_{ij} - A_{ijref}| \quad (3.6)$$

La performance de cette méthode sur une surface tactile calibrée avec un doigt en silicone est illustrée à la figure 3.15. Parmi 1000 localisations consécutives d'un contact au centre de la plaque, le système montre un TLC de 69,3% c'est-à-dire que

³ Ce travail a été publié dans « Sensors and Actuators A ». Identifiant d'objet numérique (DOI): 10.1016/j.sna.2010.03.020.

693 localisations indiquent la position réelle du toucher (x_{20}, y_{18}) . 20,6% des localisations se retrouvent à (x_{20}, y_{16}) , 7,4% concernent le point (x_{19}, y_{18}) , 1,3% se rapporte au point (x_{21}, y_{18}) , 0,9% au point (x_{21}, y_{27}) , et les restes 0,5% au point (x_{28}, y_9) . Les trois premières erreurs correspondent aux points voisins du point exact, parce que leur distance est inférieure de 4 mm au point exact.

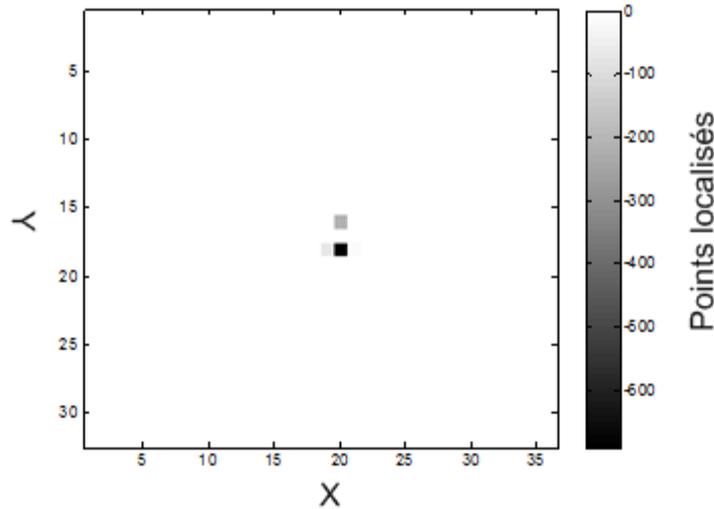


Figure 3.15 : Résultats de 1000 localisations consécutives d'un toucher en (x_{20}, y_{18}) en utilisant les vecteurs étendus (x_{20}, y_{18}) .

3.3.3.2 Critère sur la similarité dans une série temporelle

Pour améliorer le TLC avec la méthode du vecteur étendu, nous ajoutons le critère de la similarité dans la série temporelle. En supposant qu'une période de localisation est très courte (<10 ms) par rapport au mouvement du doigt sur la surface tactile (<0.5 mm par 10ms), nous considérons que les localisations correctes doivent demeurer spatialement proches entre deux périodes d'acquisition, par conséquent une détection tactile est fiable si et seulement si le résultat de la localisation reste dans le même voisinage que celui des résultats précédents.

Selon la même expérience que celle présentée à la figure 3.15, nous regroupons les 1000 localisations consécutives en 200 groupes. Dans chaque groupe, 5 localisations sont comparées avec le critère de similarité, i.e. d'appartenance à un même voisinage géographique. L'étape de localisation est décrite à la figure 3.16. Une localisation validée n'est pas forcément une localisation correcte. Le taux de localisations validées théorique est de $(69.3\%)^5 = 16.0\%$, c'est-à-dire que 16% de localisations sont validées. Cependant, le TLC attendu est de $1 - (1 - 69.3\%)^5 = 99.73\%$, c'est-à-dire que 99,73% de localisations validées sont correctes.

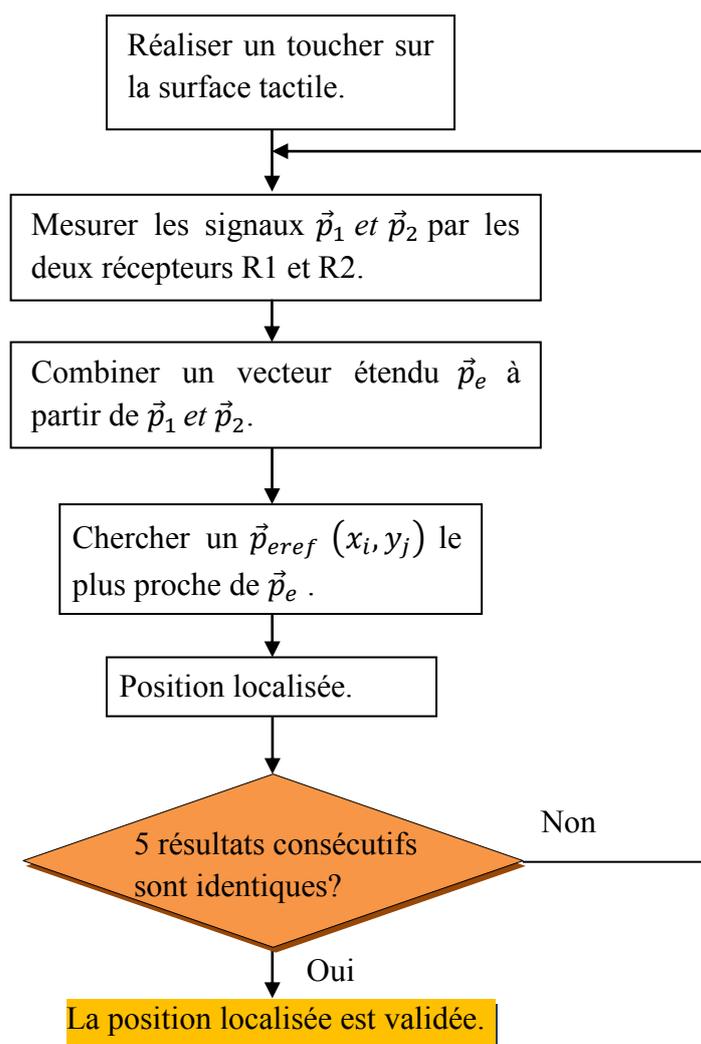


Figure 3.16 : Organigramme de l'étape de localisation d'un toucher sur la surface tactile avec le critère de similarité dans une série temporelle.

Expérimentalement, on obtient que 13,4% de 1000 mesures consécutives sont validées sans erreur de localisation, ce qui est un peu inférieur à l'estimation théorique. Le temps de réponse de localisation est multiplié par 7,5 par rapport au résultat du paragraphe 3.2.1. Cette méthode propose donc un compromis entre la précision et le temps de réponse. Un utilisateur peut choisir, selon les besoins, un nombre adéquat de mesures à comparer pendant l'étape de localisation.

3.4. Sélection des fréquences d'excitation et phénomène d'illumination⁴

Le procédé tactile présenté dans cette thèse est un procédé « actif », qui consiste à exciter acoustiquement un objet par un procédé répétitif d'émission d'ondes de Lamb. Le choix des signaux d'excitations conditionne la fiabilité du procédé. Nous avons ainsi appliqué, dans l'exemple de la plaque en cuivre, des signaux d'excitation

⁴ Ce travail a été publié dans « Applied Physics Letters ». volume 95, 251904 (2009); DOI: 10.1063/1.3276549 .

comprenant 40 fréquences réparties dans une plage de fréquences comprises entre 20 kHz et 100 kHz. En effet, cette répartition avec un intervalle fixe de 2 kHz simplifie le traitement du signal, mais ces fréquences sont sélectionnées plus particulièrement parce qu'elles ne sont ni les fréquences de résonances ni celles d'antirésonances du système. En revanche, l'influence d'une fréquence particulière sur le fonctionnement du procédé n'est pas claire. Nous proposons ici, un procédé de sélection des fréquences d'excitation basé sur le diagramme de rayonnement des ondes acoustiques dans la coque en régime établi, autrement dit sur la figure de diffraction perturbée en amplitude.

Remarque : pour un objet complexe, il n'est pas évident de prévoir les fréquences de résonances. Il est nécessaire de réaliser une vérification a posteriori que le choix des fréquences retenues ne correspond à aucune résonance.

3.4.1. Figure de Diffraction Perturbée en Amplitude (FDPA)

Le schéma du dispositif tactile présenté à la figure 3.1 peut être schématisé à la figure 3.17, pour une plaque en cuivre calibrée en 36×32 points avec un doigt en silicone.

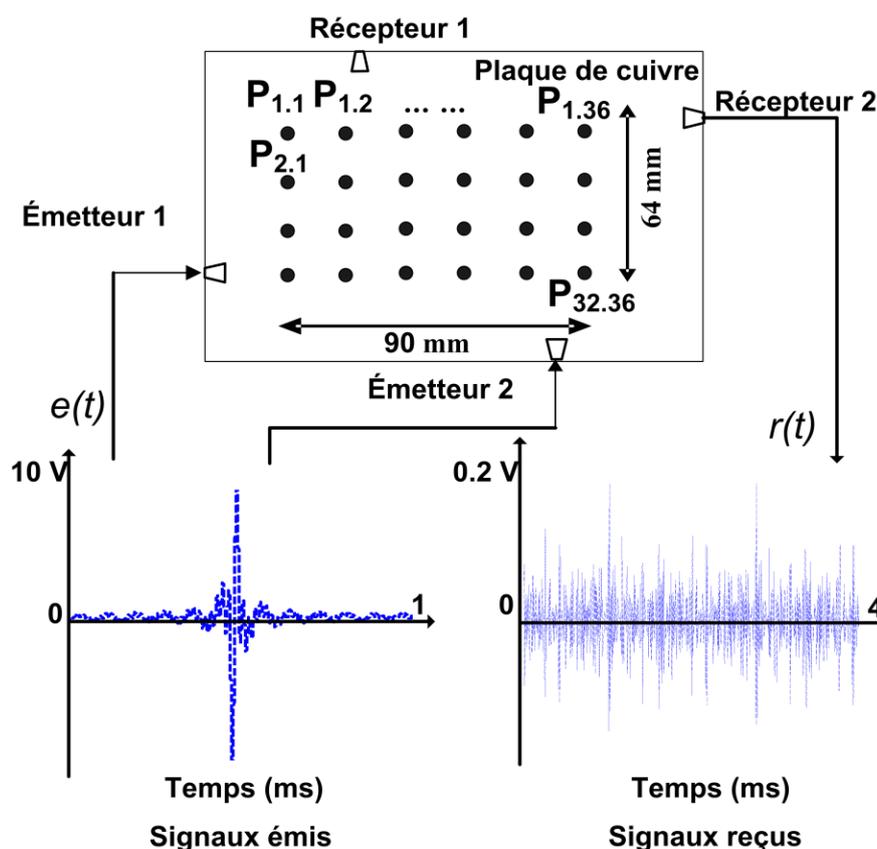


Figure 3.17 : Schéma du procédé tactile.

Analytiquement, le signal reçu $r(t)$ peut être exprimé en fonction du signal émis $e(t)$, de la géométrie de la plaque G , de la température T , de la position de contact P et de la surface de contact S à une pression donnée, par l'équation (3.7) :

$$r(t) = F(e(t), G, T, P, S) \quad (3.7)$$

La transformée de Fourier du signal reçu en chaque point de référence $P_{i,j}(x_i, y_j)$ peut être décrite par l'équation (3.8):

$$R_{i,j}(f) = F(E(f), G, T, P_{i,j}, S) \quad (3.8)$$

Au cours de l'étape d'étalonnage, la même force de contact stable a été appliquée à l'aide du doigt artificiel. Nous considérons donc que la variation de S est négligeable. Par ailleurs, en supposant qu'il n'y a pas de déformation géométrique de la plaque, G est également considéré comme constant, ainsi que la température T sur une période courte. $E(f)$ est invariant aussi parce que les signaux $e(t)$ sont émis en permanence. Par conséquent, les signaux reçus dépendent uniquement de la position de contact P et les fréquences du signal d'excitation:

$$R_{i,j}(f) = F(P_{i,j}, f) \quad (3.9)$$

Une étape supplémentaire est nécessaire dans le procédé tactile, décrite à la figure 3.18.

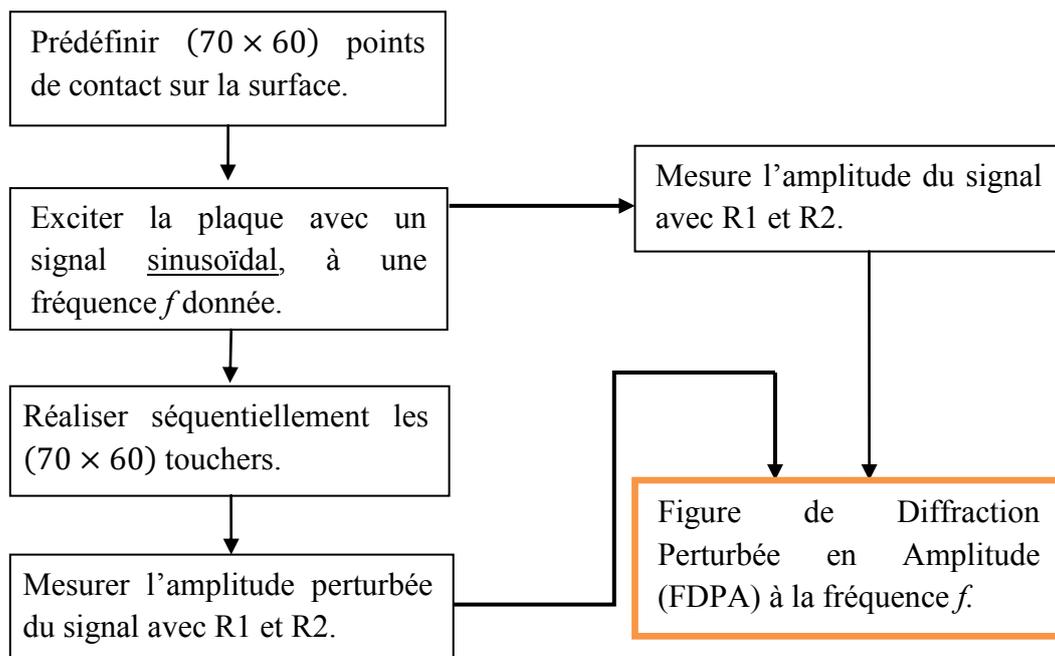


Figure 3.18 : Organigramme pour obtenir une FDPA, pour une fréquence donnée.

Au cours de cette étape, la plaque est excitée par un signal sinusoïdal à une fréquence f donnée, un étalonnage est réalisé avec 70×60 touchers appliqués séquentiellement à la surface avec un intervalle de 1 mm. Les signaux mesurés sont comparés au signal obtenu sans contact. L'échantillonnage spatial étant dense, nous obtenons ainsi une figure de perturbation de la surface à une fréquence donnée. En supposant que la perturbation créée par le contact dépend de l'impédance du doigt, mais qui est constante et de l'amplitude du vecteur de vitesse (amortissement visqueux) de vibration, on constate que la figure de perturbation est représentative du diagramme de rayonnement ou plus précisément d'une Figure de Diffraction Perturbée en Amplitude (FDPA). Le phénomène peut être mesuré en régime transitoire ou permanent et faire intervenir peu ou beaucoup de réflexions sur les bords de la plaque.

La figure 3.19 montre les FDPA obtenues avec le récepteur R1 pour deux fréquences différentes, l'une à 60 kHz (non-résonnant), l'autre à 79,620 kHz (résonnant). On constate que les figures de perturbations révèlent le diagramme de rayonnement et les nœuds et ventres de vibration lorsque la fréquence correspond à une résonance.

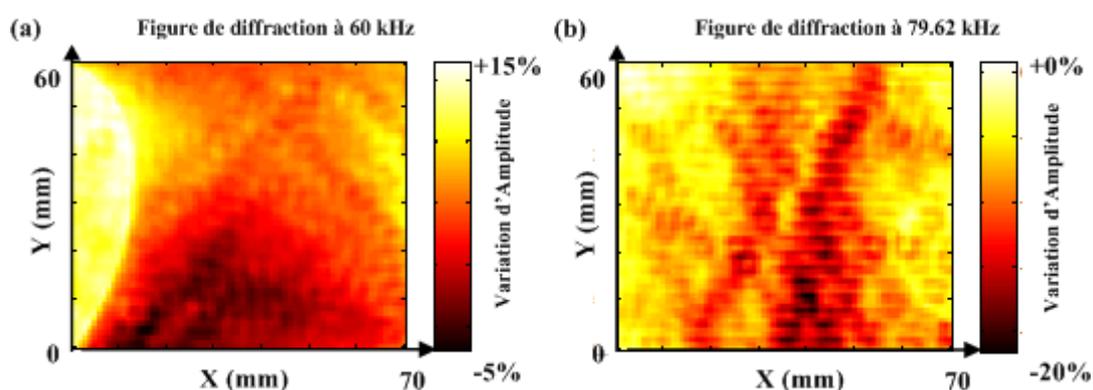


Figure 3.19 : FDPA obtenues : a) avec le récepteur R1 à 60 kHz (non résonant) et b) à 79,62 kHz (résonant),

3.4.2. Rapport de contraste pour une FDPA

Dans le contexte du traitement d'image, le contraste moyen est un caractère distinctif de la répartition lumineuse d'une image ou entre deux points d'une image [TRA85]. Le contraste d'une image peut être défini comme le rapport entre la différence de luminance et la luminance moyenne. D'autres définitions du contraste comme celui de Weber [ROV94], de Michelson [MIC27], ou de RMS [KUK93] sont développés dans la bibliographie. Une FDPA est une figure, dont les valeurs d'amplitude varient selon

les pixels (positions du toucher). L'amplitude de perturbation peut être associée par analogie à la luminance d'un pixel. Ainsi, nous pouvons définir un rapport de contraste pour une FDPA.

Nous définissons d'abord le rapport de contraste, entre un point et ses huit points voisins quand ils existent, par l'équation (3.10) :

$$d_{i,j}(f) = \sum_{m=i-1}^{i+1} \sum_{n=j-1}^{j+1} |R_{m,n}(f) - R_{i,j}(f)| / (8R_{i,j}(f)) \quad (3.10)$$

Pour chaque FDPA, nous définissons une valeur moyenne de ce rapport de contraste :

$$C(f) = \sum_{i=2}^{69} \sum_{j=2}^{59} d_{i,j}(f) / (58 \cdot 68) \quad (3.11)$$

Cette valeur $C(f)$ présente le contraste pour une FDPA. Pour les deux "images" de la figure 3.19 à 60 kHz et à 79,62 kHz, les valeurs de contrastes sont 0,0134 et 0,0247, respectivement. Cela indique qu'une FDPA est spatialement plus contrastée à une fréquence de résonance.

Une FDPA très contrastée ne convient pas pour le procédé tactile pour plusieurs raisons. Tout d'abord, les FDPA à des fréquences de résonance dépendent beaucoup des conditions aux limites de l'objet et évoluent aussi avec les variations de température ambiante. Il serait alors difficile d'assurer la fiabilité du procédé, car même si les variations de fréquences de résonance due aux variations de température peuvent être calculées et compensées [RIB07], cela n'est pas le cas des variations de conditions aux limites qui ne peuvent être ni prédites ni éliminées.

De plus, aux fréquences de résonance, les FDPA sont spatialement redondantes. Comme montré à la figure 3.19(b), de nombreuses zones exhibent la même amplitude de perturbation. En conséquence, plus il y a de solutions possibles à une fréquence donnée, plus il faut multiplier les fréquences pour lever l'ambiguïté et plus il est difficile d'identifier clairement la position de contact.

Une $C(f)$ trop petite n'est pas adaptée pour le procédé tactile non plus, parce que cela signifie une FDPA invariante, autrement dit une illumination uniforme de l'objet. Si

un toucher en n'importe quelle position fournit une $C(f)$ constante, il devient impossible de distinguer une position de contact d'une autre.

En conséquence, une $C(f)$ de valeur intermédiaire est un critère de validation d'une fréquence de travail. Nous proposons une valeur seuil maximum de 0,02 et une valeur seuil minimum de 0,01. Ces 2 seuils ont été testés et validés dans nos expériences avec une plaque de cuivre puis avec un écran LCD (affichage à cristaux liquides).

3.4.3. Découpage de la surface en zones de perturbations.

Puisque les FDPA sont choisies de façon à ce que le rayonnement varie spatialement lentement et différemment d'une fréquence sélectionnée à l'autre, des régions aux contours flous, désignant des perturbations similaires, peuvent être définies pour associer un numéro de perturbation à un toucher. La figure 3.20 illustre un tel procédé de localisation du contact.

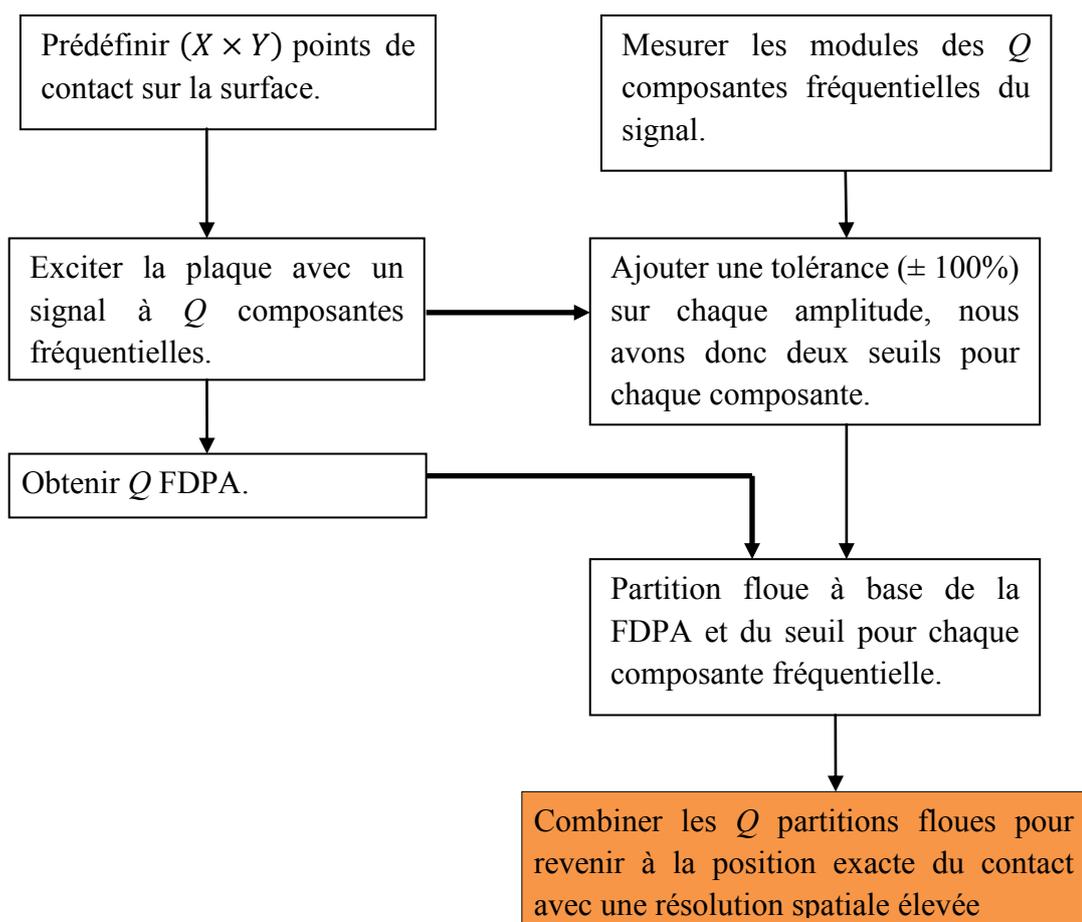


Figure 3.20 : Organigramme du procédé de partition floue de la surface en régions de perturbation équivalente.

C'est un procédé permettant de simplifier les étapes de traitement en découpant la plaque en zones de perturbations identiques.

Exemple : Appliquons au cas de la plaque en cuivre le procédé de partition de la plaque en régions de perturbations équivalentes, pour quatre composantes fréquentielles : 30 kHz, 40 kHz, 50 kHz et 120 kHz. Nous obtenons quatre FDPA illustrées à la figure 3.21.

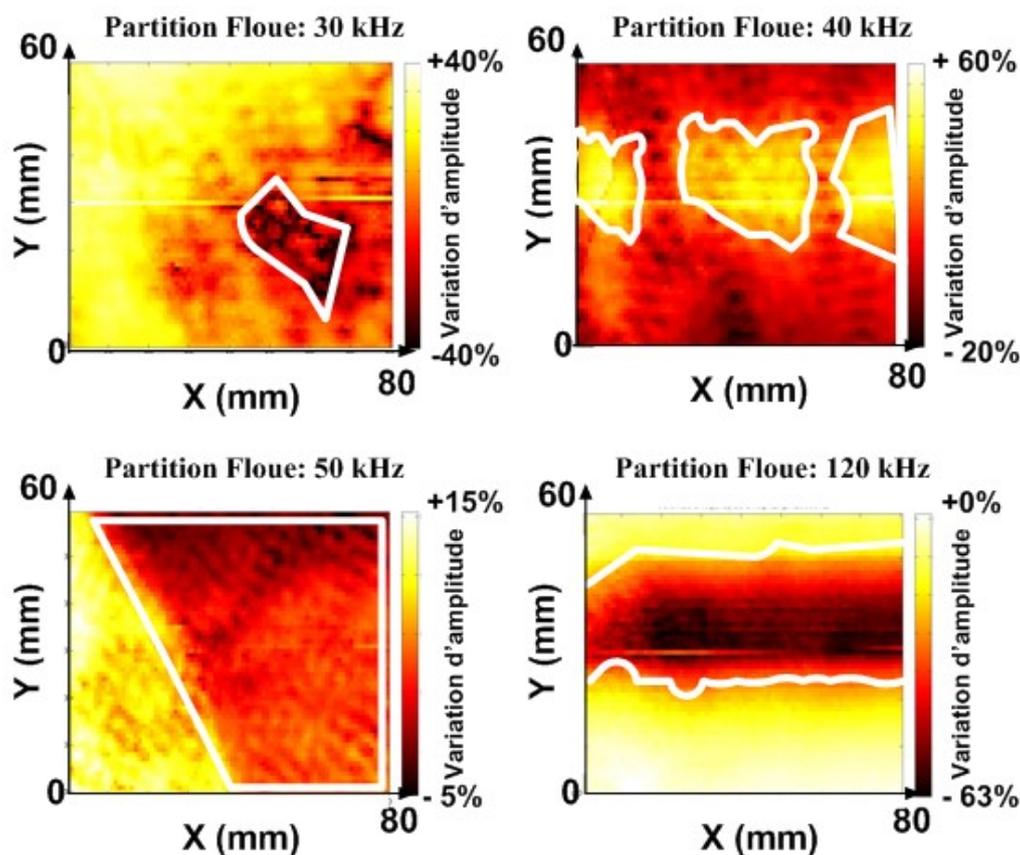


Figure 3.21 : Découpage de la surface tactile en un nombre limité de zones de perturbations équivalentes à partir de quatre FDPA. Le recouplement de ces différentes zones permet ensuite de localiser un toucher. L'intérêt du procédé est d'accélérer le procédé de localisation en affectant un numéro de perturbation à un toucher.

Le découpage de la surface en zones de perturbations identiques revient à passer de 12 bits de quantifications de la perturbation à seulement un ou 2 bits. Chaque vecteur de perturbation peut aisément prendre la valeur d'un nombre (par exemple une perturbation sur 2 bits pour chaque fréquence) et être plus rapidement identifié. Au cours de l'étape de localisation, si nous observons une variation d'amplitude de +30% sur la composante fréquentielle à 40 kHz, nous pouvons en déduire que le contact se

produit dans un des trois zones indiquées sur la figure 3.21 en haut à droite. En effet, ces zones correspondent à tous les points de l'ensemble d'apprentissage qui ont entre +0% et +60% de variation d'amplitude du signal en présence d'un toucher.

S'il y a une erreur de mesure du signal par les récepteurs, en raison par exemple d'une variation de température ou de conditions aux limites, il suffit que l'erreur ne dépasse pas un seuil de tolérance, pour que le point localisé reste dans les zones de perturbation équivalente. Ainsi, le découpage des perturbations en zones équivalentes apporte une certaine flexibilité sur la stabilité des signaux de perturbation.

Nous pouvons combiner les quatre partitions floues pour revenir à la position exacte du contact avec une résolution spatiale élevée. Ce procédé ne dépend pas de l'influence de l'environnement sur l'amplitude du signal. Cette influence est un phénomène à étudier pour la durée de service du procédé tactile à diffraction. En effet, nous observons qu'après l'utilisation du système tactile pendant 3 à 4 mois, la performance de la localisation s'est dégradée. Cela peut être lié aux déformations permanentes de l'objet tactile en raison des nombreux touchers réalisés. En effet, comme indiqué dans l'équation (3.8), le signal reçu varie si la géométrie de l'objet tactile change.

Le procédé de partition ou de numérisation de la surface tactile en zones de perturbations identiques peut simplifier et accélérer le procédé d'identification. Il devrait faire l'objet d'une étude complémentaire.

3.4.4. Phénomène d'illumination

Ce qui est nouveau dans le présent procédé tactile à figure de diffraction, c'est que nous décidons délibérément d'exciter la surface tactile en dehors des fréquences de résonance afin de s'affranchir des problèmes liés à l'instabilité des figures de résonance. Pour conserver un signal d'amortissement mesurable, on choisit délibérément des objets de très faibles épaisseurs, que ce soient des plaques ou des coques, homogène ou non-homogène. En outre, pour compenser le fait qu'il n'y a plus aucune figure de résonance matérialisée à la surface de l'objet susceptible d'aider à repérer un toucher sur la plaque, (ici la métaphore consiste à dire que la présence de réseau « montagneux » permet plus facilement de se localiser que d'être en « plaine

au beau milieu d'une forêt ») le présent procédé suggère de remplacer les figures de résonance, par des **figures d'illumination**.

Autrement dit, le procédé présenté dans cette étude, propose de créer des motifs qui dépendent non pas de modes de résonance très sélectifs, mais de la façon dont les ondes se propagent dans la plaque. Par exemple, si l'on considère les transducteurs émetteurs comme des points sources et l'objet comme une cavité qui se remplit de l'énergie émise, il vient une notion d'écoulement. En régime transitoire, le remplissage de la cavité ne se fait pas partout de la même façon. Après un certain nombre de réflexions sur les bords, certaines zones de l'objet auront été plus exposées que d'autres. Dans le cas du présent procédé, on peut dire que l'émission des ondes dans l'objet depuis un point source, engendre une répartition de l'énergie vibratoire qui dépend de la forme de l'objet, mais aussi de la fréquence d'excitation. En effet, dans un objet solide, et en particulier en propagation guidée, l'énergie vibratoire comprend des composantes longitudinales et transversales dont les proportions changent en fonction de la fréquence. Or les conditions de réflexion et de conversion de modes de vibration aux limites de l'objet dépendent de la nature de la vibration de sorte que les conditions d'illumination de l'objet en régime transitoire et d'accumulation de l'énergie vibratoire au cours des réflexions successives en certaines zones de l'objet vont dépendre de la fréquence d'excitation, et ceci d'autant plus que les contours de l'objet sont irréguliers. Par exemple, dans le cas d'une plaque rectangulaire, les coins de la plaque constituent des zones d'accès difficile faiblement illuminées par les ondes, tandis que les bordures droites constituent des conditions aux limites régulières. En excitant la plaque à différentes fréquences, hors fréquences propres, il apparaît des figures d'illumination qui changent selon les fréquences, ceci d'autant plus que le contour de l'objet présente des irrégularités de forme de 0,1 mm à 10 mm. Ainsi, selon le présent procédé, il est avantageux de découper ou de mouler l'objet selon un contour irrégulier ou de forme complexe. La présence du doigt sur une plaque mince ou une coque revient alors à introduire un obstacle au milieu de la propagation et à changer complètement la façon dont la plaque est illuminée, de sorte que les transducteurs récepteurs peuvent avoir un signal qui varie selon que la présence du doigt favorise ou diminue l'exposition de la zone où se trouvent le ou les récepteurs.

L'objet du présent procédé consiste donc à créer des figures d'illumination à différentes fréquences d'excitation et à enregistrer un ensemble de référence de figures d'illumination perturbées par un contact avec un doigt ou un stylet puis à surveiller et localiser un toucher ou des touchers multiples (« multi-touch ») sur l'un des points préalablement enregistrés.

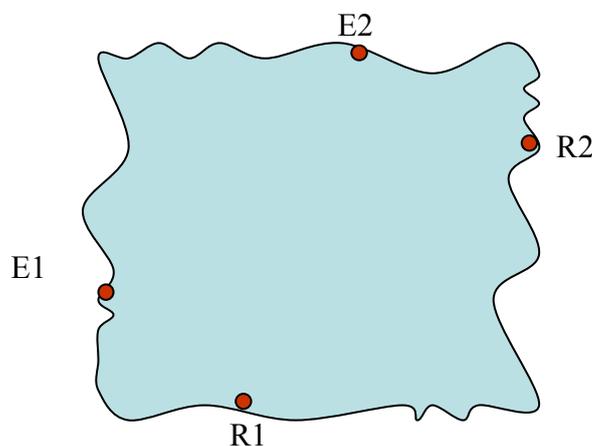


Figure 3.22 : Plaque tactile à deux émetteurs et deux récepteurs à figure d'illumination complexes. Cette plaque est caractérisée par un contour avec des irrégularités de rayons de courbure comprises entre 0,1 mm et 10 mm.

3.5. Conclusion

Nous avons développé un procédé tactile qui permet de transformer une plaque mince ou une coque mince (voir chapitre suivant pour la coque) en interface tactile. Ce procédé est basé sur la propagation perturbée des ondes de Lamb, ou plus précisément, basé sur des figures de diffraction en régime impulsionnel ou permanent perturbées en amplitude (FDPA). Par ce procédé, une surface tactile peut atteindre une résolution spatiale de l'ordre du mm. Deux méthodes basées sur des tests de vraisemblance sont proposées pour obtenir un taux de localisation correcte (TLC) proche de 100%. L'une en multipliant le nombre de récepteurs, l'autre en analysant la proximité des mesures temporelles.

L'avantage d'un tel procédé sur les solutions antérieures est qu'il est moins sélectif en fréquence et moins critique sur la stabilité des fréquences de résonance. Il autorise en outre un choix de fréquences beaucoup plus large. Le procédé tactile par absorption [ING08] permettait de travailler avec une cinquantaine de fréquences propres. Selon le présent procédé, le nombre de fréquences disponibles et de figures d'illumination associées est de plusieurs centaines. Ceci augmente la fiabilité du procédé de

détection. En outre, on ne construit plus une résonance, mais une illumination de sorte que la durée d'excitation et d'acquisition peut être bien plus courte, typiquement de l'ordre de 2 ms ce qui compte tenu des dimensions de l'objet englobe un grand nombre de réflexions sur les bords de l'objet.

On remarque également la faible sensibilité de la figure de diffraction vis-à-vis des conditions de fixation et d'intégration de l'objet tactile dans son châssis. Dans le procédé d'absorption [NIK07c], les chercheurs proposent de fixer la plaque avec des conditions aux limites précises : ils ont proposé de fixer la plaque préférentiellement sur des nœuds de résonance, ce qui est délicat car ces nœuds se déplacent en fonction de la température, du vieillissement, etc.

Dans notre procédé, le fait de recourir à des figures d'illumination, simplifie les conditions de maintien de l'objet. En fait, le châssis support devient un outil pour la définition et la diversité des figures d'illumination, et on pourra avantageusement pincer la plaque en des points fixes, notamment dans des zones correspondant à une faible illumination pour toutes les fréquences (par exemple dans les coins), mais également dans des zones plus exposées à partir du moment où les conditions de maintien sont rigides. Un intérêt du procédé FDPA est de pouvoir fonctionner avec des transducteurs de quelques millimètres carrés, c'est-à-dire peu encombrants et consommant peu.

Nous avons enfin vu, que le procédé tactile à diffraction pouvait être simplifié et accéléré dans les étapes de traitement, en découpant la surface de l'objet, pour chaque fréquence, en zones de perturbations identiques ce qui permet de numériser la surface tactile en pixels de perturbation, chaque pixel correspondant à un nombre.

Chapitre 4. Applications associées au procédé tactile

Le procédé tactile développé au chapitre 3 permet de transformer une plaque ou une coque mince pour réaliser une interface tactile. Ce chapitre présente le développement de nouvelles applications associées à notre interface, comme la localisation des touchers multiples, et l'utilisation d'une surface de type coque tactile. Une coque tactile mince peut servir de revêtement à certains robots leur conférant ainsi la faculté de sentir et localiser des contacts. Une implantation de cette solution technologique est en train d'être réalisée sur un robot humanoïde.

Chapitre 4.	Applications Associées au procédé tactile	105
4.1.	Localisation des touchers multiples simultanés	106
4.2.	Coque tactile : une approche de peau sensitive.....	112
4.3.	Application du procédé tactile sur un écran à cristaux liquides	122
4.4.	Conclusion	124

La majorité des interfaces tactiles actuelles permettent la localisation d'un seul point. Le besoin d'interaction plus ergonomique entre un utilisateur et une machine conduit au développement de système permettant des « touchers multiples », ce qui offre à l'utilisateur la possibilité d'interagir avec plus d'un doigt ou d'effectuer une collaboration simultanée multiutilisateurs.

De nombreux prototypes de laboratoire ou de produits commerciaux de systèmes de détection des touchers multiples ont été développés. Certains d'entre eux utilisent une matrice de capteurs de position [HIL82], une matrice de résistances passives [WES01], ou une matrice d'électrodes capacitives [NIC79][REK02]. Les méthodes avec des caméras vidéos pour la détection tactile [MAT79][MAL04] sont aussi proposées et elles offrent un bon rapport coûts performances. Des interfaces basées sur la diffusion par contact d'un faisceau infrarouge émis dans un film (FTIR) [HAN05] sont aussi étudiées.

Comparées aux autres technologies dans le domaine des capteurs tactiles, les méthodes à ondes disposent de nombreux avantages, car elles ne nécessitent pas de couche supplémentaire et qu'elles peuvent être implantées sur différents matériaux comme par exemple les verres, les composites ou les écrans à cristaux liquides (LCD). Mais ces procédés tactiles basés sur les ondes [NIK00] [ING08] ne proposent pas de détection des touchers multiples.

Nous présentons dans ce chapitre, deux extensions du procédé de détection de toucher simple. La première concerne la détection et la localisation de touchers multiples. Ainsi, le cas de deux touchers simultanés est expérimenté avec des résultats de localisation satisfaisants¹. La deuxième, concerne la réalisation d'une coque tactile mince permettant l'intégration de fonctions tactiles de faible coût sur les coques protectrices de certains équipements, notamment des robots.

4.1. Localisation des touchers multiples simultanés

4.1.1. Procédé tactile au cas de deux touchers

Nous appliquons le procédé tactile de la diffraction au cas deux touchers simultanés appliqués sur la surface tactile. Le système consiste en une étape de surveillance et en une étape de localisation, tout comme le procédé présenté dans le cas d'un toucher simple. Au cours de l'étape de surveillance, nous excitons la plaque avec les signaux émis comme illustrés à la figure 4.3. Au cours de l'étape de localisation, deux récepteurs d'ondes captent les signaux diffractés perturbés par des touchers. Nous pouvons résumer le procédé du cas de deux touchers simultanés par l'organigramme de la figure 4.1, où m désigne le numéro du récepteur, dans notre cas $m = 1$ ou 2 .

¹ Ce travail a été publié dans « Sensors and Actuators A ». Identifiant d'objet numérique (Doi) : 10.1016/j.sna.2010.03.020.

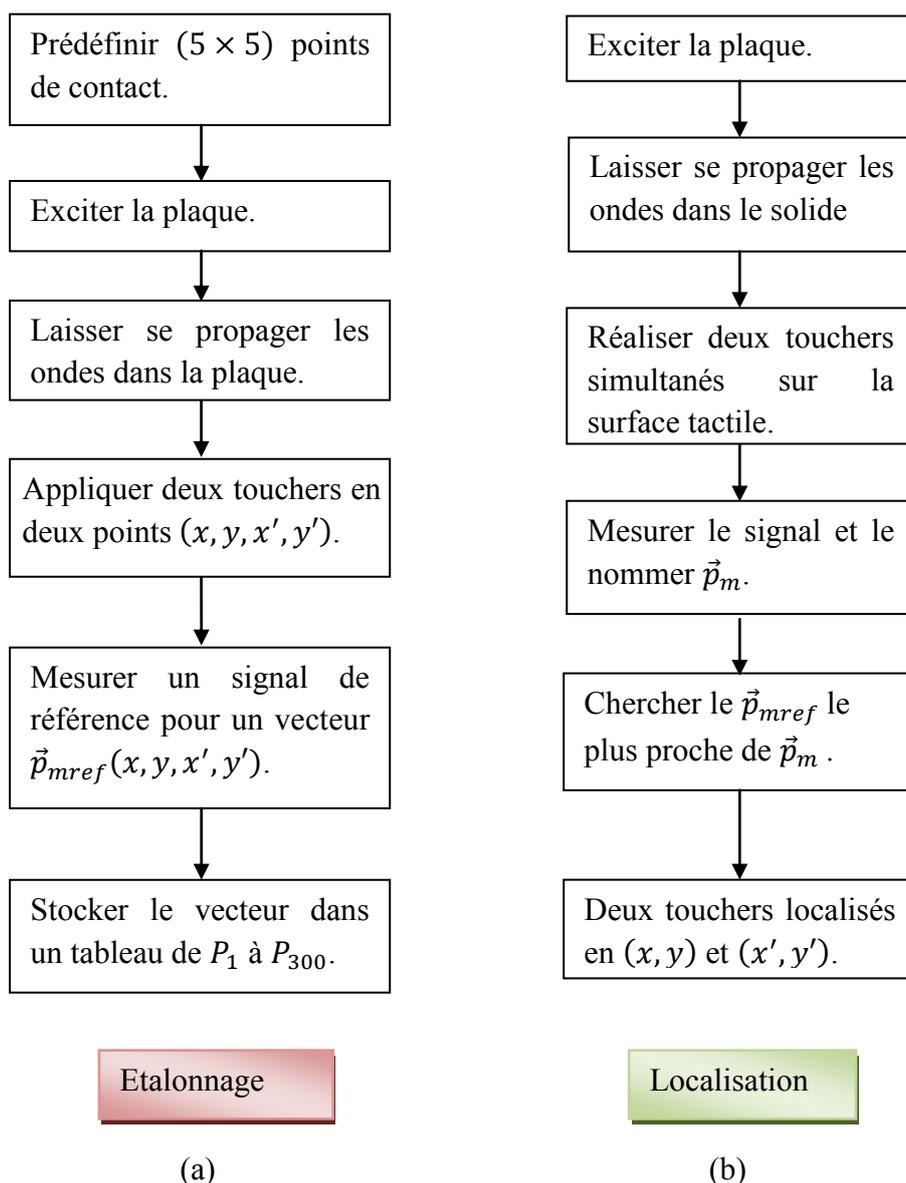


Figure 4.1 : Organigramme du procédé tactile dans le cas de deux touches simultanés : (a) l'étape d'étalonnage ; (b) l'étape de localisation.

Les vecteurs \vec{p}_m et \vec{p}_{mref} sont obtenus à partir de la transformée de Fourier des signaux captés par les récepteurs, par l'équation (3.3) et (3.4) au chapitre 3. La différence entre la localisation des touches multiples et celle du toucher simple, c'est la correspondance entre les signaux mesurés et les positions des touches. Pour la localisation d'un toucher simple, un vecteur de référence $\vec{p}_{mref}(x, y)$ est associé à une position (x, y) prédéterminée du toucher. Mais dans le cas des touches multiples, un vecteur de référence $\vec{p}_{mref}(x, y, x', y')$ est associé à une combinaison des points prédéfinis. En pratique, un vecteur de référence $\vec{p}_{mref}(x, y, x', y')$ signifie un point à

4 composantes (x, y, x', y') , où (x, y) est la position du premier point de contact et (x', y') celle du deuxième point.

Dans le cas de toucher simple, la position localisée peut être visualisée par une figure de contraste de distance entre le vecteur mesuré et la matrice des vecteurs de référence. Ce n'est pas le cas pour la localisation des touchers multiples, lorsque les points de référence ont 4 composantes. Pour simplifier le traitement du signal, vues les contraintes d'implantation et de temps de calcul, nous avons organisé et ordonné tous les vecteurs de référence dans une seule matrice.

4.1.2. Performances de détection en cas de touchers multiples

Prenons par exemple une plaque étalonnée selon une grille de 5×5 points de contact. Nous appelons P_1 la première configuration de points de contact de coordonnées (x_1, y_1, x'_2, y'_2) , où deux doigts sont posés respectivement sur la surface tactile à la position (x_1, y_1) et (x'_2, y'_2) .

Nous considérons que les deux touchers utilisés au cours de l'étape d'étalonnage sont similaires, c'est-à-dire que le point (x_1, y_1, x'_2, y'_2) et le point (x_2, y_2, x'_1, y'_1) correspondent à une seule configuration de touchers multiples. Pour simplifier les calculs, dans notre algorithme, l'ordre de détection des touchers est imposé. Ainsi, le deuxième touché est celui qui a l'indice supérieur.

Au cours de l'étape de la calibration, toutes les combinaisons possibles de deux points de contact simultanés sont successivement considérées, pour recueillir un tableau de vecteurs de référence. Les configurations sont numérotées et indexées. Par exemple pour le $P_2(x_1, y_1, x'_2, y'_3)$, $P_{24}(x_1, y_1, x'_5, y'_5)$.

Le nombre de vecteurs de référence dépend du degré de discrétisation de la surface tactile. Pour une plaque divisée selon une grille de 5×5 points de contact, le nombre de combinaisons possibles des deux touchers est $C_{25}^2 = 300$. Généralisons, avec M points prédéfinis sur la surface et N touchers simultanés, le nombre des combinaisons devient C_M^N . L'exigence augmente comme l'exponentiel du nombre de contacts. Cela peut poser des problèmes sur l'espace mémoire et le temps de calcul.

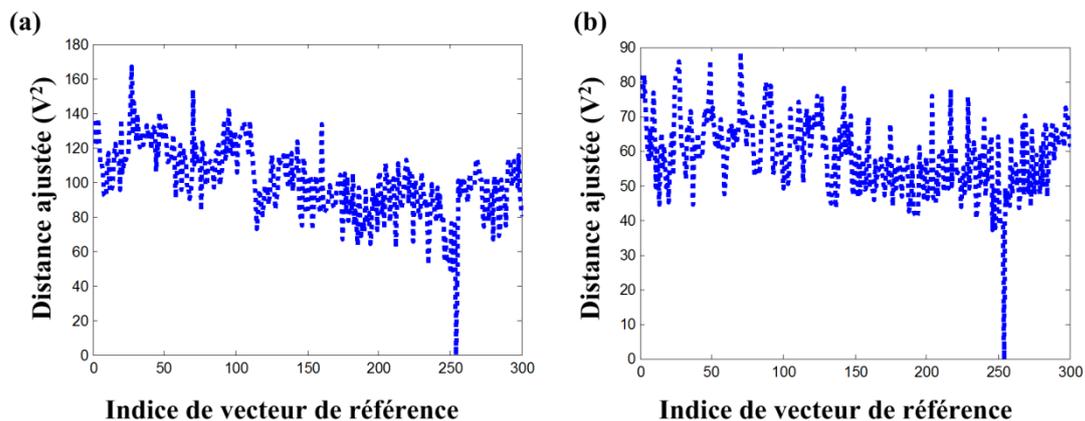


Figure 4.2 : Résultats de la localisation des deux touches simultanés, par (a) R1 et (b) R2.

La figure 4.2 illustre les résultats de la localisation par les deux récepteurs R1 et R2. Dans les deux graphes, le vecteur de référence numéroté 254 possède une distance minimale au signal mesuré au cours de l'étape de localisation. Nous pouvons conclure que la configuration des touches $P_{254}(x_3, y_5, x'_5, y'_4)$ est détectée. Deux doigts sont localisés à la position $(x = 60 \text{ mm}, y = 75 \text{ mm})$ et $(x = 100 \text{ mm}, y = 60 \text{ mm})$ simultanément.

La figure 4.3 montre les distances croisées entre les vecteurs de référence.

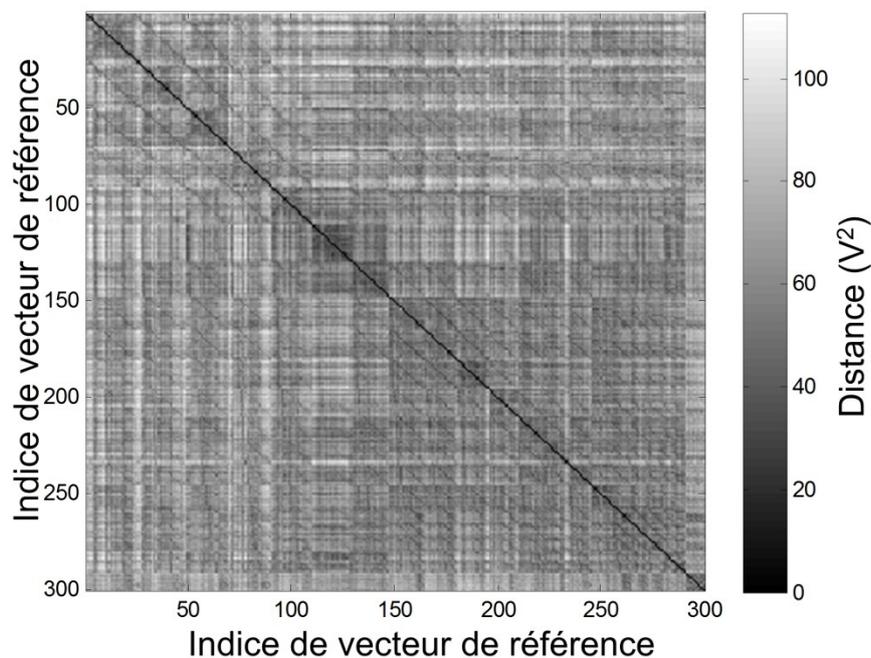


Figure 4.3 : Valeurs de distances croisées entre les vecteurs de référence. Une ligne sombre indique un point de contact commun pour les configurations de touches doubles.

Il ya plusieurs lignes « sombres » sur la figure 4.3, qui ont un niveau de gris élevé. En effet, les vecteurs de référence appartenant à une ligne «sombre» ont un point de contact commun avec l'autre vecteur auquel ils sont comparés. Ce qui montre la corrélation entre les signaux de référence et les positions des touchers [LIU10].

Dans les résultats expérimentaux, la performance de la localisation dans le cas des touchers doubles est similaire à celle obtenues dans le cas d'un toucher simple. Il n'est pas surprenant que moins de mesures soient validées, parce que dans le cas de 2 touchers simultanés, une erreur de localisation d'un des deux points peut invalider la localisation. Ainsi, les procédés d'optimisation génèrent une proportion de refus plus élevée dans le cas de touchers multiples. Cependant, nous avons un taux de localisation correcte de 100% avec la méthode de double-validation, ou avec la méthode basée sur la similarité dans une série temporelle.

4.1.3. Gestuelle tactile et langage « multi-toucher »²

Le procédé tactile présenté ici permet une interaction dynamique entre l'homme et la machine par le « multi-toucher », c'est-à-dire que l'utilisateur peut manipuler les objets virtuels selon la dynamique du ou des touchers. Ce procédé permet aussi la collaboration entre plusieurs utilisateurs. Pour cela, nous devons définir un certain nombre de gestes tactiles.

La durée totale pour la localisation d'un toucher ou de touchers multiples est inférieure à 10 ms. Lorsque l'on projette la position physique du toucher sur un espace virtuel, et que l'on affiche à l'écran de l'ordinateur, la cadence d'affichage sera largement suffisante pour avoir une perception quasi-continue. Rappelons que la cadence au cinéma est de 24 images par seconde, et l'animation sous format FLASH d'Adobe est 12 images par seconde.

La figure 4.4 est un exemple de gestuelle de « toucher double » par localisation des positions de deux touchers en boucle continue. Un scénario de « zoom avant/arrière » est proposé : l'image s'agrandit quand la distance entre les deux touchers augmente.

² Une liste des gestuelles plus détaillée est présentée dans un brevet déposé par CEA et CNRS le 21 juillet 2009. Numéro de dépôt 0955065.

Un autre exemple concerne la rotation ou le mouvement d'un objet dans un espace virtuel. La cinématique associée à des mesures successives de touchers multiples engendre la définition d'un langage tactile interprété identifiant des gestes particuliers. Ils permettent par exemple de dégager un mouvement de translation ou de rotation de l'ensemble des points dans une espace virtuel. Le système de coordonnées est défini par rapport au référentiel du châssis de la surface tactile. Une translation de l'ensemble des points à l'intérieur du châssis donne le scénario d'un déplacement d'ensemble d'un objet graphique à l'intérieur de l'espace de travail (fenêtre Windows, Linux, etc...); la rotation horaire ou antihoraire de l'ensemble de touchers est associée à la rotation de l'objet graphique dans l'espace de travail graphique. Un cas simple est celui où le châssis et l'espace de travail informatique sont en forme de rectangles homothétiques au format 4/3 ou 16/9.

Dans l'annexe 2, une gestuelle tactile et un langage tactile sont proposés.

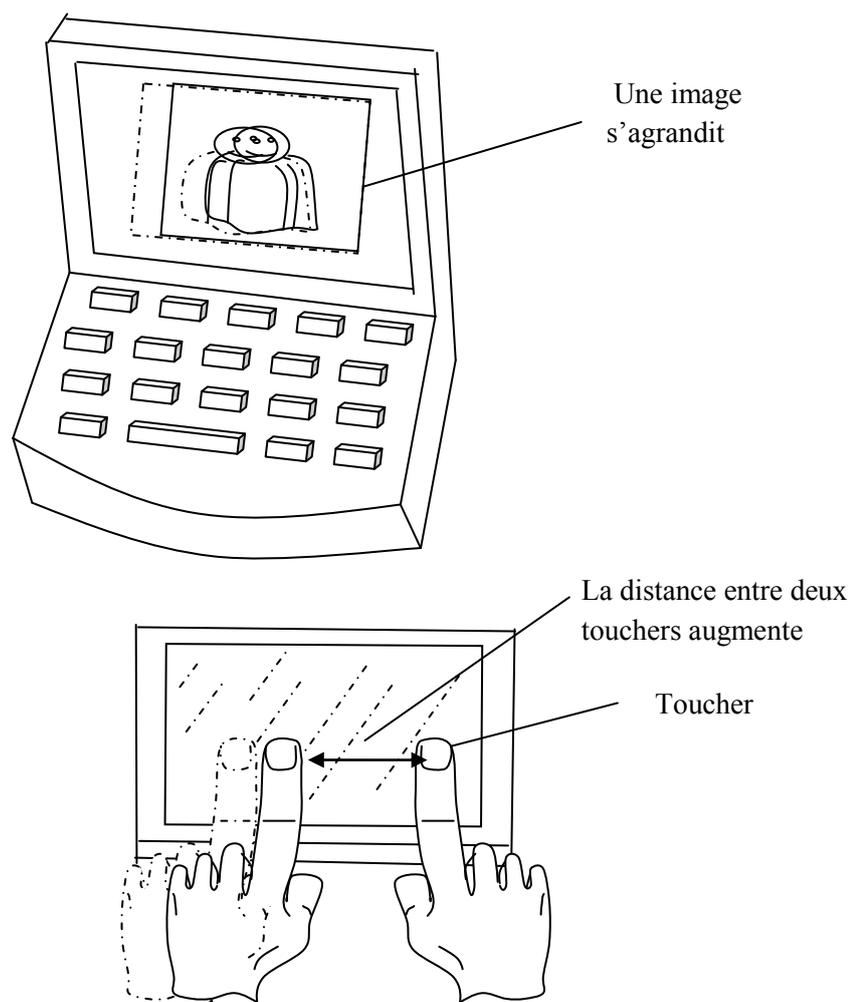


Figure 4.4 : Un exemple d'exploitation dynamique de deux touchers.

4.2. Coque tactile : une approche de peau sensible

La perception la commande de l'ensemble du mouvement du corps [KUN04]. De nombreux travaux antérieurs existent pour la fonctionnalité tactile de base pour les robots [NIC89]. Une recherche récente montre les progrès intéressants réalisés sur le développement d'une peau artificiel sensitive avec une matrice de capteurs tactiles sur surface courbe [OHM06]. Mais la majorité des projets humanoïdes n'ont pas une peau entièrement tactile. La difficulté pour la réalisation d'une peau sensitive vient de ce que le robot est conçu avec des matériaux robustes, faciles à usiner en gardant une rigidité et une dureté suffisantes. Par conséquent, des peaux tactiles réalisées avec des matériaux souples tels que les polymères [LEE08], PVDF [BAR89] ou films électromécaniques (EMFi) [BAR07] ne satisfont pas à ces critères de rigidité et robustesse. Une autre difficulté vient de la forme complexe du robot humanoïde, qui rend également difficile la mise en place d'un réseau de capteurs à haute résolution intégré sur tout le corps du robot.

Un des objectifs de cette thèse est d'expérimenter l'utilisation du procédé tactile à diffraction d'ondes dans différentes applications, notamment pour des fonctions de peau tactile. Ainsi, nous avons montré que notre procédé peut être réalisé sur des objets à base de cuivre [LIU08] [LIU09a] ou de verre [ING08], sans modification de l'objet tactile lui-même. Une extension naturelle est de le tester sur des formes courbes pouvant servir de revêtement à certains robots leur conférant ainsi la faculté de sentir et localiser des contacts. Par exemple comme peau sensitive d'un robot humanoïde. Dans ce qui suit, le procédé tactile est mis en place sur une coque comme approximation d'une peau sensitive.

4.2.1. Prototype en coque tactile

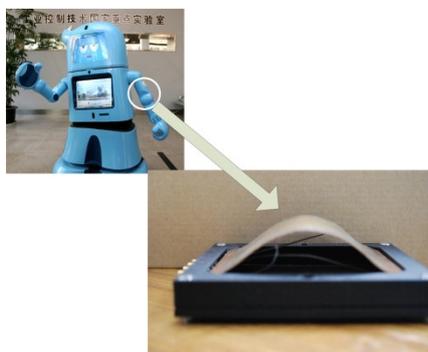


Figure 4.5 : Un robot humanoïde entièrement couvert par des coques en plastique et un prototype de coque tactile comme approximation d'une peau sensitive.

Un prototype réalisé est illustré à la figure 4.5. Nous utilisons le même banc de tests que pour les expériences précédentes sur la plaque de cuivre : le dispositif se compose d'un générateur de signaux arbitraires, d'une carte d'acquisition, d'un ordinateur et d'un objet tactile. L'objet tactile est une coque mince de cuivre d'épaisseur 450 μm . Cette coque présente une dimension à plat de 75 \times 100 mm comme indiquée à la figure 4.22, avec une profondeur de 25 mm.

La coque est équipée sur ces bords de quatre transducteurs piézoélectriques. Ces transducteurs sont collés par de la colle conductrice époxy. E1 et E2 sont des émetteurs d'ondes de Lamb, R1 et R2 sont des récepteurs. Ils sont positionnés en surface de coque de façon à briser la symétrie de la coque. Cette coque est maintenue par un châssis réalisé en polymère.

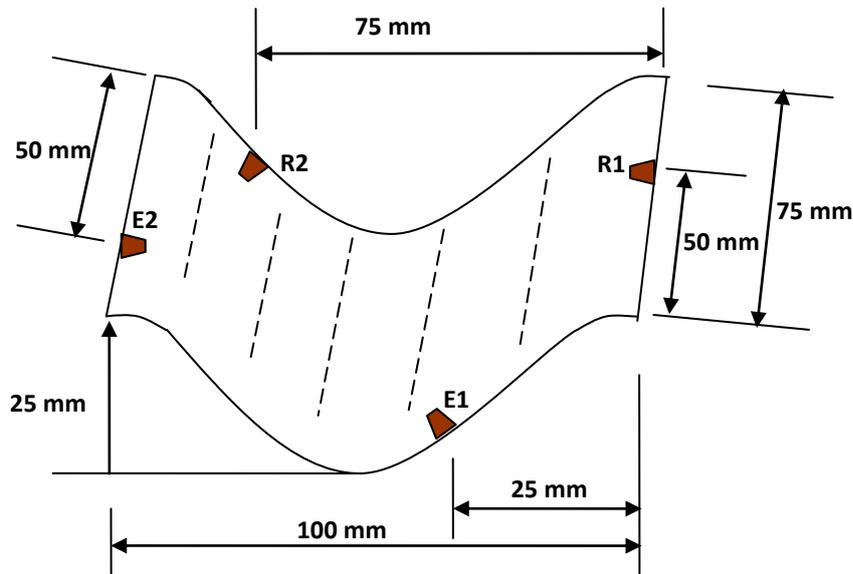


Figure 4.6 : Positions des transducteurs piézoélectriques sur la coque tactile pliée, de façon à briser la symétrie.

4.2.2. Mise en place du procédé tactile

Nous appliquons le procédé FDPA sur la coque en cuivre, avec les mêmes réglages que pour la plaque : un signal d'excitation composé de 40 composantes fréquentielles selon une répartition dans une plage de fréquences comprises entre 20 kHz et 100 kHz ; une cadence de mesure fixée à 4 ms, avec une fréquence d'échantillonnage de 195.31 kHz. Au cours de l'étape de localisation, un vecteur est identifié au sein d'une matrice de vecteurs de référence qui sont acquis dans une étape de calibration. Deux étalonnages sont réalisés sur cette coque, le premier avec un toucher surfacique

(un doigt en contact avec la coque), le deuxième avec un toucher ponctuel (un stylet en contact avec la surface tactile), l'organigramme d'étalonnage est donné à la figure 4.7.

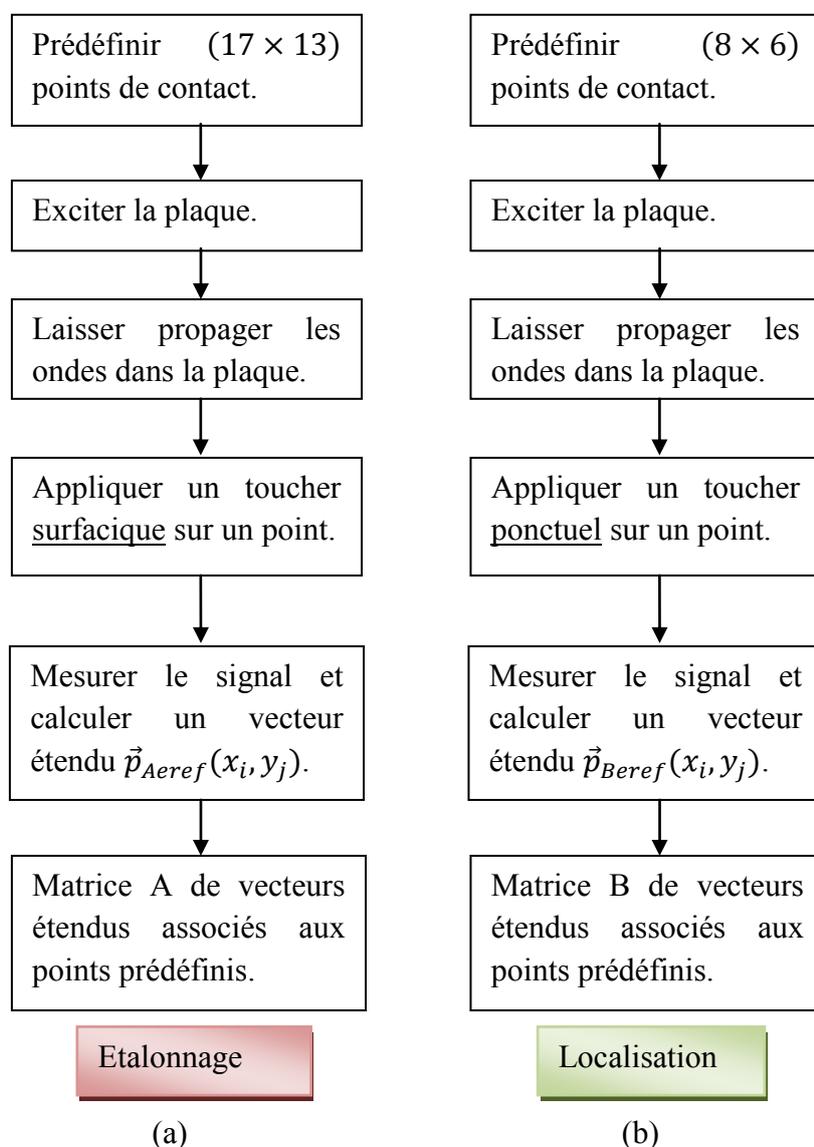


Figure 4.7 : Organigramme de l'étape de calibration selon les deux modes du toucher, avec deux matrices A et B enregistrées qui correspondent au : (a) mode surfacique ; (b) mode ponctuel.

Il est nécessaire une peau sensitive de connaître la surface et la force de contact, c'est une information qui n'est pas nécessaire pour les applications sur dalles ou écrans tactiles. Dans une première approximation de peau sensitive, nous proposons une coque tactile qui permet de connaître deux modes de contact, soit un contact surfacique, soit un contact ponctuel. Si l'identification de ces deux modes de contact est validée sur la coque, nous pouvons ensuite calibrer la coque avec différentes surfaces de contact.

La coque tactile est discrétisée en 8×6 points prédéfinis pour la détection d'un stylet, et en 17×13 points pour la détection du doigt. Comme indiqué à la figure 4.6, les positions de contacts prédéfinies pour le stylet sont les croisements des lignes et des colonnes de repérage tracées sur la coque. La différence de résolution spatiale provient de la difficulté d'étalonnage d'une surface courbe, le robot X,Y,Z de chez AXMO utilisé au chapitre 3 ne pouvant pas déplacer un doigt artificiel sur la coque, nous avons réalisé les étalonnages manuellement. Suite aux expérimentations précédentes (chapitre 3), nous savons que la résolution spatiale peut atteindre 2 mm sur la plaque de cuivre. Les tests sur la coque tactile sont essentiels pour connaître la possibilité d'utiliser ce procédé tactile sur un objet en forme de coque 3D et ensuite localiser les contacts.

4.2.3. Performances de la détection tactile

4.2.3.1 Localisation du toucher surfacique

La figure 4.8 illustre les résultats de la localisation du toucher sur la coque tactile, lorsqu'un doigt est posé au point (x_{12}, y_5) . En utilisant le récepteur d'ondes R1, 87.4% de localisations parmi 1000 détectent la position exacte du toucher, tandis que 70 localisations détectent un point voisin (x_{12}, y_4) , 55 localisations indiquent un toucher au point (x_8, y_5) , et puis une localisation se retrouve à (x_2, y_{12}) . Cela donne un taux de localisation correcte (TLC) à 87.4%. Le TLC à partir du récepteur R2 est de 94.7%, avec 5.3% de localisations détectant un point voisin (x_{12}, y_4) .

Après optimisation de la fiabilité de la localisation par la méthode de double validation, nous obtenons 843 localisations validées, qui indiquent toutes le point de contact correct. Rappelons qu'une localisation validée est une localisation qui correspond aux critères de la méthode de double-validation (les positions localisées par deux récepteurs sont identiques) ; et qu'elle n'est pas forcément une localisation correcte. Nous avons ainsi une coque tactile avec 100% de TLC. Le taux de validation de mesure à 84.3% nécessite un temps de réponse moyen de 30 ms.

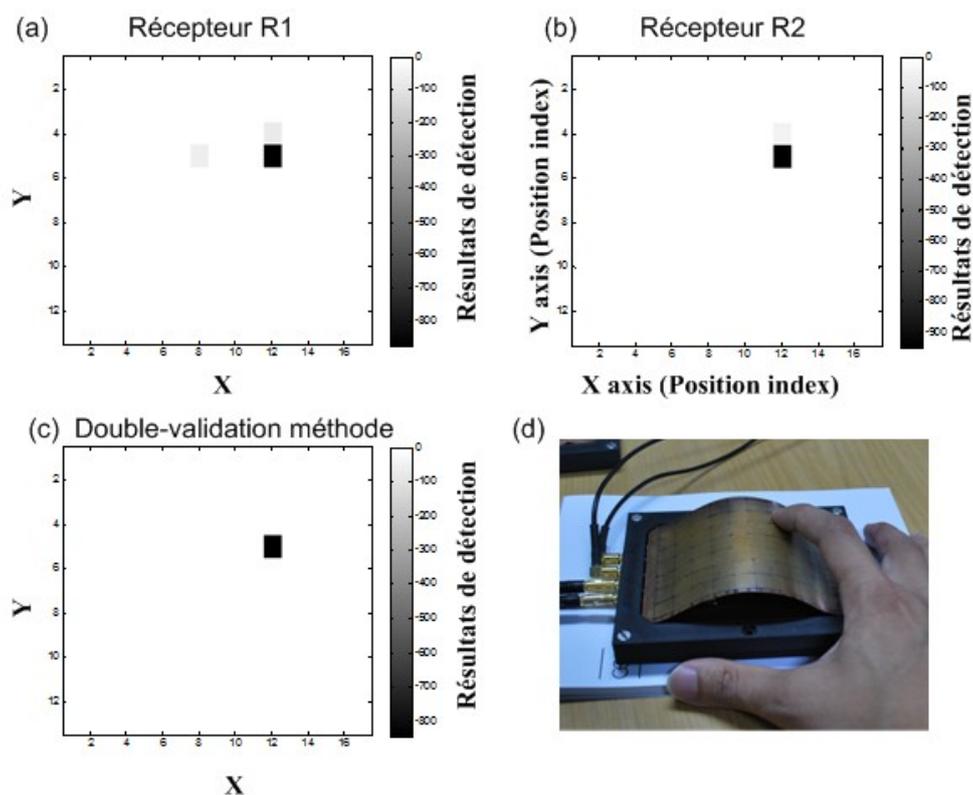


Figure 4.8 : Résultats de 1000 localisations consécutives, lorsqu'un doigt est placé à la position (x_{12}, y_5) . (a) Performance avec le récepteur d'ondes R1 ; (b) avec le récepteur R2 ; (c) performance après un procédé de double-validation ; (d) Image du toucher.

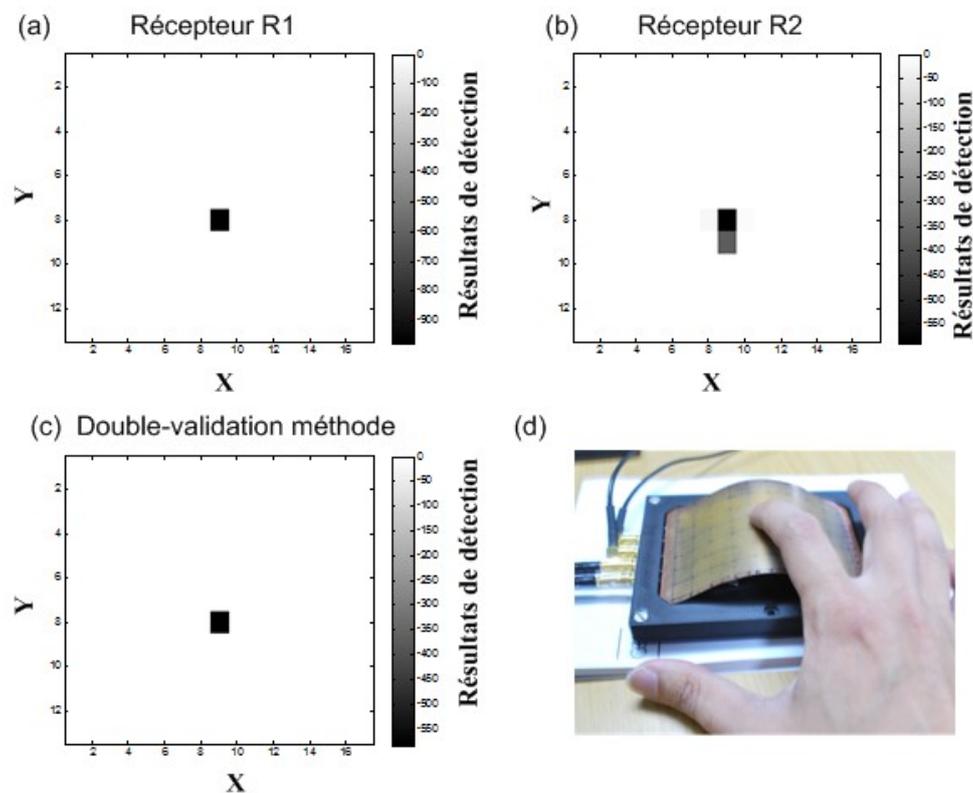


Figure 4.9 : Résultats de 1000 localisations consécutives, lorsqu'un doigt est placé à la position (x_9, y_8) . (a) Performance avec le récepteur d'ondes R1 ; (b) avec le récepteur R2 ; (c) performance après un procédé de double-validation ; (d) Image du toucher.

La coque tactile dispose de différent TLC selon la position du toucher. La figure 4.9 illustre les résultats de détection tactile lorsqu'un doigt est posé sur la surface au point (x_9, y_8) . Parmi 1000 localisations consécutives, 976 localisations par le récepteur R1 trouvent le point (x_9, y_8) , 13 concernent le point (x_9, y_9) , et 11 se rapportent au point (x_{10}, y_9) . Pour le récepteur R2, 588 localisations indiquent la position correcte du toucher en (x_9, y_8) , et les autres indiquent le point voisin (x_9, y_9) . Après l'application de la méthode de double-validation, nous avons 583 localisations correctes avec 9 erreurs au point voisin (x_9, y_9) . Le TLC est ainsi de 98.47% avec 58.3% des localisations validées. Le temps de réponse est multiplié par deux par rapport à celui obtenu avec un seul récepteur.

Nous pouvons utiliser les vecteurs étendus au cours de l'étape de localisation, les vecteurs étendus sont obtenus par une combinaison des vecteurs associés à chacun des deux récepteurs (voir l'équation (3.5) au chapitre 3). Le tableau 4.1 montre quelques résultats typiques utilisant les vecteurs étendus. La performance de localisation de toucher surfacique peut être considérée comme correcte ou acceptable : un TLC élevé et des erreurs constatées correspondant à des points voisins de la position réelle du toucher.

Tableau 4.1. Résultats de 1000 mesures consécutives à différentes positions, mode surfacique.

Position du toucher	Nombre de localisations correctes	Erreurs
(x_5, y_3)	968	32 à (x_5, y_2) .
(x_{13}, y_3)	1000	0
(x_5, y_{10})	1000	0
(x_{13}, y_{11})	999	1 à (x_{12}, y_{11}) .

La méthode d'optimisation basée sur la similarité dans la série temporelle a également été testée sur la coque tactile. Après l'application de la méthode d'optimisation, nous avons observé expérimentalement un TLC de 100%.

4.2.3.2 Localisation du toucher ponctuel

Le tableau 4.2 montre quelques résultats obtenus en appliquant la méthode du vecteur étendu au cours de l'étape de localisation, dans le cas où un contact par stylet est effectué sur la coque tactile. Contrairement aux résultats de la localisation du toucher surfacique où les erreurs correspondent à des points voisins du toucher, les résultats de la localisation présentent des points éloignés de la position réelle du toucher. Par

exemple pour la position (x_3, y_4) , parmi 75 fausses localisations, deux se trouvent en (x_5, y_5) , un point qui n'est pas un point voisin de la position réelle. En effet, comme il s'agit d'un contact ponctuel, le procédé exige une précision élevée entre la position du toucher au cours de l'étalonnage et au cours de la localisation, précision qu'il est difficile d'assurer. Ce résultat est intéressant car il laisse supposer que lorsque la perturbation consiste en un simple blocage de la plaque sans amortissement, il est plus difficile de garantir l'unicité de la solution, simplement par ce que la perturbation est plus faible et moins marquée d'une fréquence à l'autre. La solution pourrait consister à augmenter le nombre de fréquences de travail.

Tableau 4.2. Résultats de 1000 mesures consécutives à différentes positions, mode ponctuel.

Position du toucher	Nombre de localisations correctes	Erreurs
(x_2, y_1)	1000	0
(x_3, y_4)	925	67 à (x_4, y_2) ; 6 à (x_3, y_3) ; 2 à (x_5, y_5) .
(x_7, y_2)	1000	0
(x_8, y_5)	1000	0

La performance de localisation de toucher ponctuel peut être considérée aussi comme correcte : seul 0.2% des localisations trouvent des points non voisins de la position réelle du toucher. Après un procédé d'optimisation en analysant la similarité dans la série temporelle, nous avons obtenu un TLC = 100%.

4.2.3.3 Reconnaissance de la nature du toucher

Dans les études précédentes, la localisation est réalisée avec une connaissance a priori de la nature du toucher, c'est-à-dire que nous connaissons au préalable si le toucher vient d'un doigt ou d'un stylet. Pour combiner les deux modes (surfaccique et ponctuel) sur une même coque tactile, une analyse du signal mesuré est nécessaire pour reconnaître la nature du toucher. Pour cela, il suffit d'avoir un paramètre différenciant les signaux de référence en fonction du type d'interaction. En analysant les résultats expérimentaux, nous avons constaté que la norme euclidienne du vecteur étendu des signaux mesurés fournissait un critère d'identification :

$$M = \left(\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^N |A_{ij}|^2 \right)^{0.5} \quad (4.1)$$

Ici, m est le nombre de récepteurs d'ondes, et N désigne le nombre de points d'acquisition. Sans contact entre le toucher et la coque, cette norme M est $49.29 \text{ V}^2 \pm 2 \%$ observés pour 100 mesures consécutives.

Pour un contact sur la coque avec un doigt, cette norme est comprise entre $35,6 \text{ V}^2$ et $43,7 \text{ V}^2$ (figure 4.10), toujours inférieure à celle obtenue sans contact. Ceci montre que le doigt est un objet absorbant et que les signaux mesurés à partir des deux récepteurs sont atténués. Le contact avec un stylet donne une valeur de M comprise entre 43.1 V et 51.0 V (figure 4.11). Ceci montre que le stylet est un objet non absorbant, et que les signaux fournis par les récepteurs présentent des variations dues uniquement au rayonnement perturbé. On constate dans ce cas, qu'un contact avec le stylet peut engendrer une norme M plus grande que la valeur à vide (sans contact).

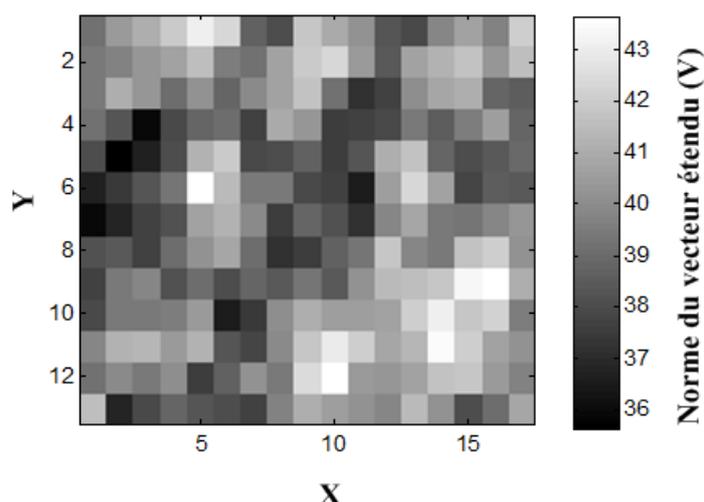


Figure 4.10 : Norme du vecteur étendu de référence selon la position du toucher surfacique.

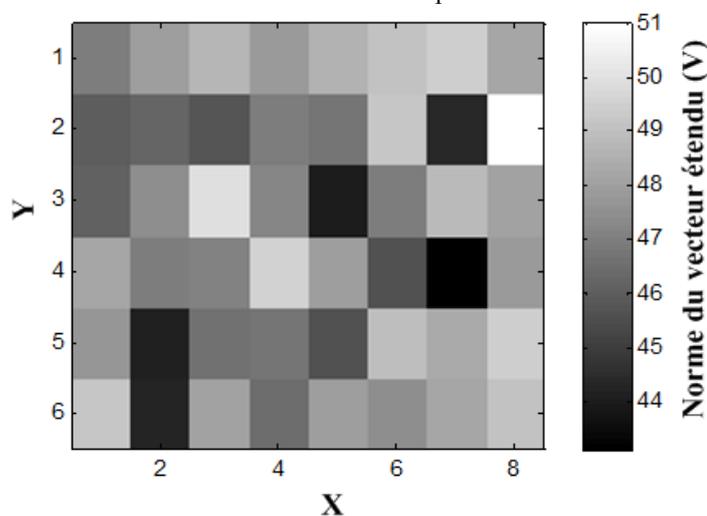


Figure 4.11 : Norme du vecteur étendu de référence selon la position du toucher ponctuel.

Selon les figures 4.10 et 4.11, les normes des vecteurs de référence pour les deux types de contact présentent une différence en valeur, nous pouvons utiliser cette propriété pour mettre en œuvre un procédé d'identification de la nature du contact. Ce procédé est illustré par l'organigramme de la figure 4.12. L'identification se déroule comme suit :

Pendant chaque période de localisation, la norme M du vecteur étendu \vec{p}_e d'ondes de Lamb est calculée. Si la valeur de M est différente de $49.29 \text{ V} \pm 2 \%$, nous considérerons qu'il y a un toucher sur la coque. Dans ce cas là :

- ✓ Si M est inférieure à $43,1 \text{ V}$, nous pouvons considérer qu'il y a un toucher surfacique;
- ✓ Si M est supérieure à $43,7 \text{ V}$, nous pouvons considérer qu'il y a un toucher ponctuel ;
- ✓ Si M se situe entre $43,1 \text{ V}$ et $43,7 \text{ V}$, nous ne pouvons pas reconnaître le mode de contact. Le vecteur de perturbation mesuré est comparé aux deux matrices de référence. Deux positions de toucher sont ensuite identifiées en supposant qu'il y a un toucher par doigt ou par stylet. La position du toucher est celle qui présente une distance minimum par rapport au vecteur mesuré, parmi les deux positions candidates et qui satisfait aux tests de vraisemblance.

4.2.4. Conclusions et perspectives

Nous avons réalisé et testé une coque tactile pour simuler une peau sensitive d'un robot humanoïde. L'identification de touchers surfaciques et de touchers ponctuels est applicable à la même surface tactile. Avec seulement quatre transducteurs piézoélectriques, 2 en tant qu'émetteurs et 2 en tant que récepteurs d'ondes de Lamb, la méthode appliquée à la coque tactile présente un taux élevé de localisations (TLC) correctes.

Dans une prochaine étape, différentes surfaces et forces de contact seront calibrées pour le toucher surfacique. L'identification des surfaces et des forces de contact sera effectuées de la même manière que celle précédemment détaillée pour la distinction. Puisque les quatre transducteurs utilisés ont une capacité de 800 picofarads chacun, le courant électrique nécessaire pour exciter les 2 transducteurs émetteurs est inférieur 1 mA par volt d'excitation crête, réalisé en continue à 100 kHz . Cette faible consommation électrique est un avantage réel pour la mise en œuvre dans un robot.

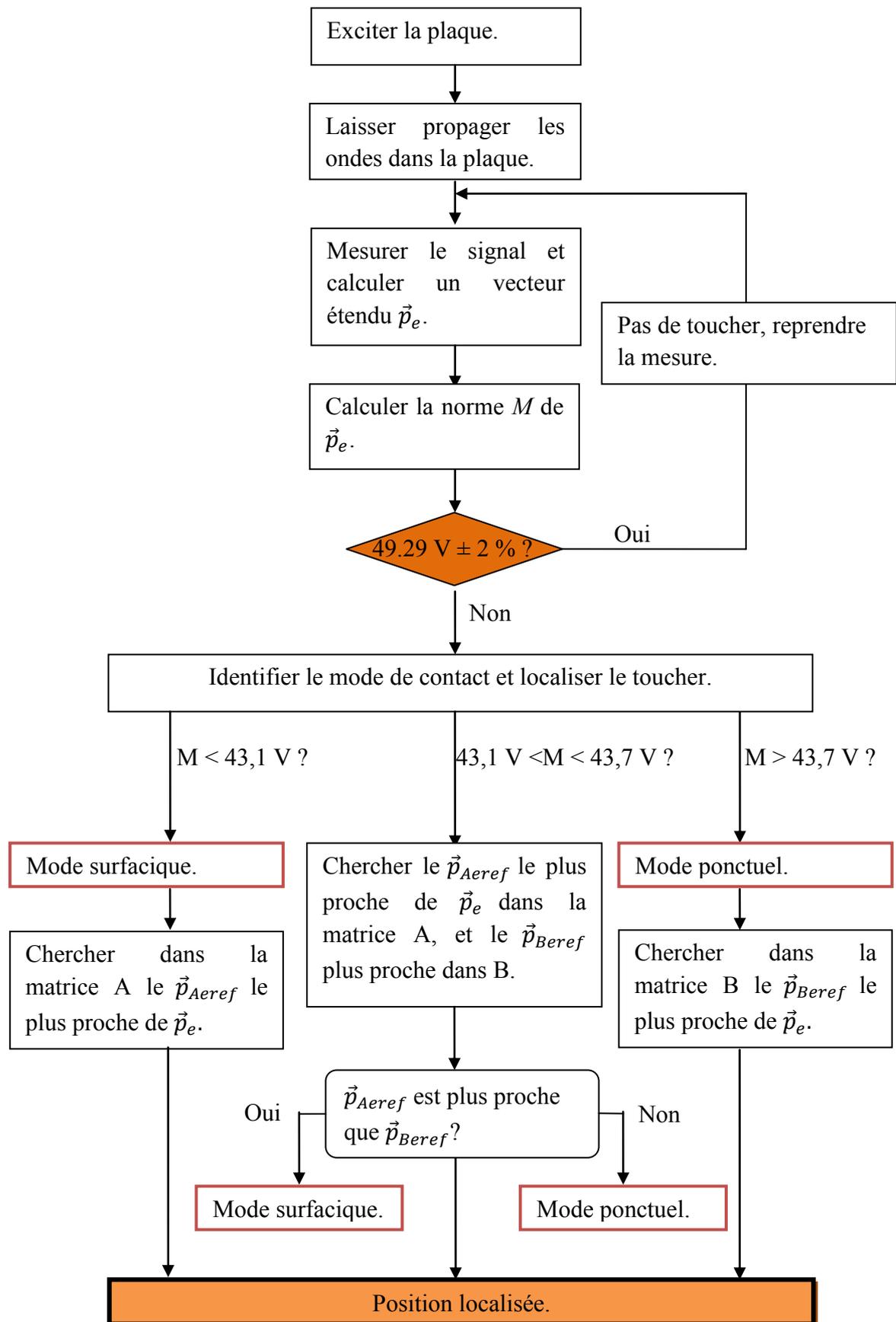


Figure 4.12 : Organigramme du procédé de la localisation avec identification de la nature du toucher.

4.3. Application du procédé tactile sur un écran à cristaux liquides

Dans le chapitre 3, nous avons développé un procédé tactile qui permet de transformer un solide pour réaliser une interface tactile. Ce procédé a été testé sur une plaque et une coque en cuivre isotrope. En revanche, dans certains cas, il peut s'avérer difficile d'appliquer notre procédé tactile sur des matériaux composites, stratifiés ou des solides anisotropes (non homogènes), tel un écran tactile intégré dans un lecteur MP3. Pour le lecteur MP3, l'écran d'affichage est souvent un écran à cristaux liquides (LCD).

Pour afficher une image en couleur, l'écran LCD exploite la polarisation de la lumière via plusieurs filtres polarisants et par la biréfringence de certains cristaux liquides en phase nématique [HEI76]. Nous pouvons considérer qu'un LCD est un solide composite stratifié anisotrope.

Nous présentons ici l'application du procédé tactile sur un afficheur LCD, pour illustrer la flexibilité du procédé tactile à des solides non-homogènes. Le montage réalisé est illustré à la figure 4.13.

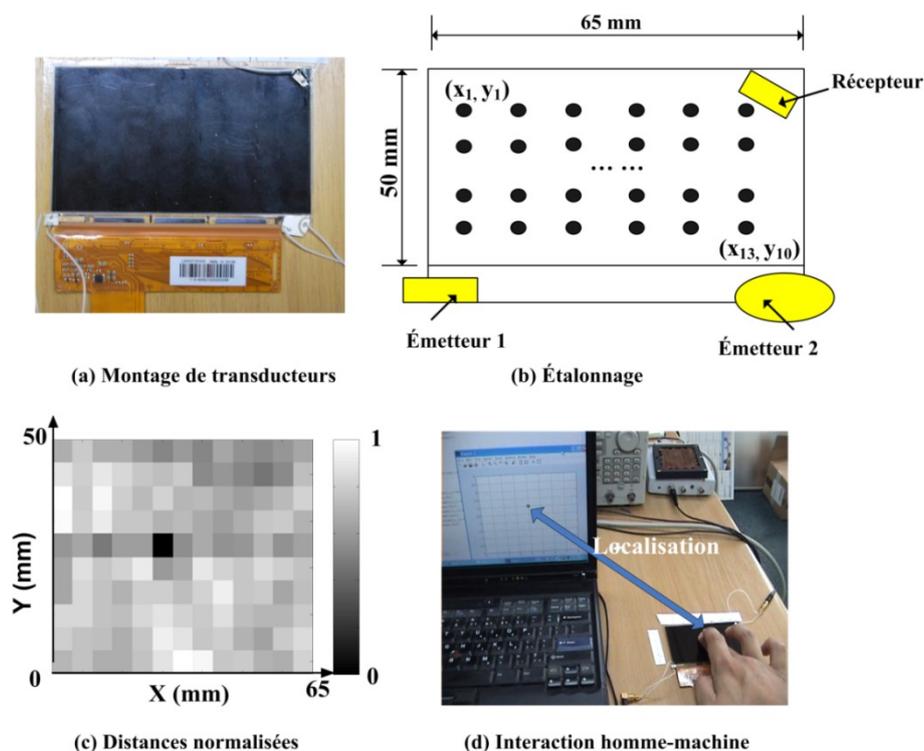


Figure 4.13 : Application du procédé tactile à un écran LCD. La position du toucher apparaît clairement sur la figure des distances normalisées en niveaux de gris.

Cet écran est un produit commercial, au format 16:9 de 10,2 cm (4 pouces), soit de dimensions 65 mm × 50 mm × 1 mm. Trois transducteurs sont montés sur le revêtement supérieur de l'écran, voir figure 4.13.(a), il s'agit de deux émetteurs et un récepteur. En effet, le nombre de transducteurs est limité à trois en raison des contraintes d'intégration imposées. Ainsi, les transducteurs sont placés dans les emplacements disponibles. Les transducteurs sont de formes différentes pour briser la symétrie.

Les ondes sont excitées selon un signal qui est décrit par (4.1). Comme illustrée à la figure 4.13.(b), au cours de l'étape d'étalonnage, 130 points prédéfinis sont séquentiellement calibrés en appliquant un toucher avec un doigt humain. L'écran LCD présente une surface tactile de 65 mm × 50 mm, avec une résolution spatiale de 5 × 5 mm.

Au cours de l'étape de localisation, nous mesurons les signaux acoustiques pour extraire un vecteur \vec{p}_1 à partir de l'équation (4.2). Ce vecteur est ensuite comparé à l'ensemble de 130 vecteurs de référence \vec{p}_{1ref} .

Les distances normalisées entre \vec{p}_1 et les \vec{p}_{1ref} sont illustrées à la figure 4.13.(c). La position du toucher apparaît clairement sur cette figure avec un niveau de gris plus élevé.

Nous n'avons utilisé qu'un seul récepteur, la méthode de la double validation présentée au chapitre 3 n'est donc pas applicable. En pratique, nous utilisons la méthode d'optimisation basée sur la similarité dans une série temporelle : une position localisée est validée si et seulement si elle est identique aux trois précédentes. Nous obtenons un taux de localisation correcte de 100 % dans nos expériences. Le temps de réponse moyen est de 30 ms.

La performance de la localisation est illustrée par une application de démonstration sous Matlab en temps réel des positions touchées (figure 4.13.(d)³) : la position du toucher localisé est affichée en temps réel sur l'écran du PC portable.

³ Une vidéo de démonstration est consultable dans la version en ligne de l'article publié dans « Applied Physics Letters » volume 95, 2009. [LIU09c].

4.4. Conclusion

Dans ce chapitre, le procédé tactile à diffraction est appliqué à plusieurs situations différentes : une plaque tactile qui permet de localiser deux touchers simultanés, une coque de cuivre pour la peau sensitive d'un robot, et un écran à cristaux liquides de matériaux composites. Ces applications nous confirment que ce procédé est facile à implémenter dans différentes situations avec un taux de localisation élevé et un temps de réponse faible.

Avec une précision de localisation de l'ordre du mm, le procédé tactile développé dans cette thèse offre une solution alternative à de nombreuses interfaces tactiles commerciales existantes telles que les écrans des distributeurs de billets, les écrans de téléphone portables. Son faible coût et sa faible consommation présentent également un avantage pour les applications mobiles.

Conclusion Générale

Le travail présenté dans cette thèse est axé sur l'étude d'un procédé tactile exploitant l'amortissement et la diffraction perturbée des ondes de Lamb et sa mise en œuvre. Nous avons réussi à développer un nouveau procédé tactile. Ce procédé concerne les interfaces homme-machines et plus particulièrement les surfaces tactiles planes ou courbes activables par touchers ainsi que l'interprétation dynamique des touchers en langage basé sur une gestuelle tactile (sémiotique tactile).

La solution proposée repose sur les propriétés de propagation des ondes acoustiques (ondes de Lamb) dans les plaques. Une étude approfondie sur la théorie et la simulation de la propagation de ces ondes dans différents matériaux (verre, plastique et métaux) a ainsi été réalisée. Elle a montré que le mode A_0 était le mode le plus facilement perturbé par une interaction tactile en raison des courtes longueurs d'ondes mises en jeu, petites devant la dimension caractéristique du doigt et de la distribution de l'énergie vibratoire essentiellement selon l'axe perpendiculaire à l'interface.

Nous avons développé un banc de tests pour valider ce procédé, plusieurs réalisations sont présentées et discutées dans ce mémoire, les résultats expérimentaux illustrent le bon fonctionnement du dispositif. Cependant, de nombreuses conceptions et expérimentations ne sont pas présentées dans ce mémoire. Elles ont servi pour la conception finale.

Cette étude s'est focalisée sur l'aspect pratique du procédé tactile. Pendant les travaux de cette thèse, nous avons réalisé :

1. Une étude théorique de la propagation des ondes. Cette étude montre que deux modes (symétrique et antisymétrique) de Lamb présentent des caractéristiques très différentes.
2. Une analyse de la réponse d'une interface acoustique, qui se compose d'une plaque propageant des ondes émises par des transducteurs piézoélectriques. Les mesures de la réponse en fréquence du système avec différentes plaques, et selon différentes conditions d'intégration et de fonctionnement, nous

permettent de connaître qualitativement les influences de chaque paramètre sur la réponse fréquentielle.

3. Le développement d'un procédé tactile qui permet de transformer un solide quelconque pour réaliser une interface tactile. Ce procédé est basé sur la diffraction des ondes de Lamb, et plus précisément, basé sur les figures de diffraction perturbées en amplitude (FDPA). Par ce procédé, une surface tactile peut atteindre une résolution spatiale de l'ordre du mm. Deux méthodes sont proposées pour obtenir un taux de localisation correcte proche de 100%.
4. Des applications du procédé tactile à des domaines différents : une plaque tactile qui permet de localiser deux touchers simultanés ; une coque de cuivre comme peau sensitive d'un robot ; et un écran à cristaux liquides, matériau composite stratifié, comme support de propagation. Ces applications nous confirment que ce procédé est facile à mettre en œuvre dans différentes situations avec un taux élevé de localisations correctes et un temps de réponse faible.

Les résultats issus de ce mémoire ont conduit à la réalisation de plusieurs prototypes et ont été appréciés comme un « fait marquant » par le CEA-LIST. Un brevet a été déposé par le CEA et le CNRS au mois de juillet 2009.

Ce travail a été publié dans 1 brevet, 2 revues internationales, et 3 conférences internationales avec actes.

Pour conclure, les travaux présentés dans ce manuscrit ouvrent la voie à une nouvelle approche de mise en œuvre d'une interface tactile à partir de l'amortissement et/ou de la diffraction perturbée des ondes acoustiques. Le travail présenté dans ce mémoire pourrait être prolongé par une étude théorique modélisant le phénomène de diffraction perturbée par un toucher surfacique ou ponctuel avec amortissement, ainsi qu'une étude expérimentale plus approfondie sur les incertitudes de la réponse de l'interface acoustique, et par une amélioration de l'algorithme du traitement des signaux.

En effet, en connaissant plus précisément le régime transitoire de la propagation des ondes de Lamb, nous pouvons placer volontairement les transducteurs piézoélectriques, et les zones de pincement de façon optimale. Des simulations plus élaborées pourraient permettre alors de supprimer l'étape d'apprentissage.

Références

[ADL85] Adler, R., Desmares, P., "An economical touch panel using SAW absorption", Ultrason. Symp. Proc., 289-292, 1985.

[ALL93] Allred, D.D., "Short course on thermoelectrics", International thermoelectric society, 1993.

[BAR89] Barsky, M. F., D. K. Lindner, and R. O. Claus, "Robot Gripper control system using PVDF piezoelectric sensors", IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., vol. UFFC-36, pp. 129–133, Jan. 1989.

[BAR07] Barna, L., M. Koivuluoma, M. Hasu, J. Tuppurainen, A. Varri, "The Use of Electromechanical Film (EMFi) Sensors in Building a Robust Touch-Sensitive Tablet-Like Interface", IEEE Sensors Journal, vol.7, no.1, pp.74-80, Jan. 2007.

[BAX96] Baxter L.K. , "Capacitive Sensors", John Wiley and Sons, 1996.

[BEN02] Benali, Khoudja M., "Thèse sur le rendu tactile : une étude physiologique et un état de l'art technologique sur le rendu tactile", rapport annuel de doctorant du CEA-LIST, 2002.

[BEN03] Benali, Khoudja M., Hafez M., Alexandre J.M., et Kheddar A., "Thermal Feedback for Virtual Reality", International Symposium on Micromechatronics and Human Science, IEEE Conference, Nagoya Japan, October 19-22, pp 153-158, 2003.

[BEN04] Benali, Khoudja M., Hafez M., Alexandre J.M., Kheddar A., "Tactile Interfaces. A State of the Art Survey", Proc. of International Symposium on Robotics, March 23-26, Paris 2004.

[BED94] Bedford A., Drumheller, D. S., "Introduction to Elastic Wave Propagation", John Wiley & Sons, 1994.

[BER94] Bernardo, J., Smith, A.F.M. "Bayesian Theory", John Wiley, New York, 1994.

[CAR83] Card, Stuart K., Thomas P. Moran, Allen Newell, "The Psychology of Human–Computer Interaction", Erlbaum, Hillsdale, 1983.

[CHA85] Chaabi, A., "Capteur de position bidimensionnel à ondes de Lamb", Thèse, Paris VI, 1985.

- [CHR06] Christopher, M. B., "Pattern Recognition And Machine Learning", Springer, 2006.
- [CHU08] Chung I.J., Ahn I.H., Baik, S.H., Bae S.H., "Affichage Ayant Une Fonction de Détection Multi-Tactile et d'Eclairage périphérique infrarouge", Brevet FR2906379 (A1), 2008.
- [DIE74] Dieulesaint, E., Royer D., "Ondes élastiques dans les solides - Application au traitement du signal", Masson et Cie, 1974.
- [DIE76] Dieulesaint, E., Royer, D., Ballegeer, J.C., "S.A.W. co-ordinate sensor", Electron. Lett. Vol.12, pp. 586, DOI:10.1049/el:19760446, 1976.
- [DIE87] Dieulesaint, E., Royer, D., Chaabi, A., Formery, B. "Lamb Wave Graphic Tablet", Electron. Lett. Vol.23, No.19, 1987.
- [DIE89] Dieulesaint, E., Royer D., O. Legras French patent FR8903074. Publication Nb: 2 644 309; 1989.
- [DUM07] Dumas, J.-G., J.-L. Roch, E. Tannier et S. Varrette, "Théorie des codes (Compression, cryptage, correction)", Dunod, 2007.
- [EUG87] Eugene F. Krause, "Taxicab Geometry", Dover, 1987.
- [FDA01] Food and Drug Administration, "Guidance for Industry: Bioanalytical Method Validation", Mai 2001.
- [GOS05] Gosselin, F., "Optimisation des interfaces haptiques: problèmes, méthodes, applications", Congrès français de Mécanique, Troyes, France, August 29- September 02, 2005.
- [HAF05] Hafez, M., Benali, Khoudja M., "Tactile interfaces: technologies, applications and challenges", REM2005, Annecy, France, June 30- July 1, 2005.
- [HAN05] Han, J.Y., "Low-Cost Multi-Touch Sensing through Frustrated Total Internal Reflection", Proceedings of the 18th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, 2005.
- [HAR10] Harrison, C., Tan, D. Morris, D., "Skinput: Appropriating the Body as an Input Surface", Proceedings of the 28th Annual SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Atlanta, Georgia, April 10 - 15, 2010.

[HEI76] Heilmeyer, G.H, "Liquid Crystal Displays: An Experiment in Interdisciplinary Research that Worked", IEEE Transactions on Electron Devices, ED-23: 780., 1976

[HIL82] Hillis, W. D. International Journal of Robotics Research, 1, 2, 33-44 1982.

[HOT05] Hotelling, S., Strickon, J.A., Huppi, B.Q., "Multipoint Touchscreen", Patent WO 2005/114369 A2, 2005, Apple Computer.

[HUD09] Hudin C., Projet de fin d'étude PA-F09087, "Modélisation d'une interface haptique", Arts et Métiers ParisTech Paris, 2009.

[IND98] Indyk, P., Motwani, R., "Approximate Nearest Neighbors: Towards Removing the Curse of Dimensionality", Proceedings of 30th Symposium on Theory of Computing, 1998.

[ING05a] Ing, R. K., N. Quieffin, S. Catheline and M. Fink, "In solid localization of finger impacts using acoustic timereversal process", Applied Physics Letters vol. 87, 204104, pp. 1-3, 2005.

[ING05b] Ing, R. K., N. Quieffin, S. Catheline, M. Fink, "Tangible interactive interface using acoustic time reversal process", J. Acoust. Soc. Am. 117, 2560, 2005.

[ING08] Ing, R. K., D. Cassereau, M. Fink, J.P. Nikolovski, "Tactile Touch Plate with Variable Boundary Conditions", proceeding of Acoustic 08, pp. 4223-4227, 2008.

[IRE61] "IRE Standards on Piezoelectric Crystals", Proceedings of the IRE, p. 1162-1169, 1961.

[KAN81] Kang, F., Zhong-Ci, S., "Mathematical Theory of Elastic Structures", Springer New York, ISBN 0-387-51326-4, 1981.

[KEU08] Keuling, C. "Touchscreens Press Deep Into Consumer Electronics". ECN Magazine, 2008.

[KUK93] Kukkonen H, Rovamo J, Tiippana K, Näsänen R., "Michelson contrast, RMS contrast and energy of various spatial stimuli at threshold ", Vision Research, volume 33 issue 10, pp.1431-1436, 1993.

[KUN04] Kuniyoshi, Y., Y. Ohmura, K. Terada, A. Nagakubo, "Dynamic Roll-and-Rise Motion by an Adult-Size Humanoid Robot", *International Journal of Humanoid Robotics*, 1(3):497-516, 2004.

[LAM17] Lamb, H. "On Waves in an Elastic Plate." *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A* 93, 114–128, 1917.

[LEE08] Lee, H.K., J. , Chung, S.I. Chang, and E. Yoon, "Normal and Shear Force Measurement Using a Flexible Polymer Tactile Sensor With Embedded Multiple Capacitors", *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 17, no. 4, august 2008.

[LEO03] Personnaz, Léon., Isabelle Rivals, "Réseaux de neurones formels pour la modélisation, la commande et la classification", CNRS Editions, 2003.

[LIU08] Liu, Y., J. P. Nikolovski, M. Hafez, N. Mechbal, and M. Vergé "Thin Finite Plate Modeling And Experimentation of Lamb Wave Propagation at Various Boundary Conditions", proceeding of the Eurosensors XXII conference, Dresden, Germany, 2008.

[LIU09a] Liu, Y., J. P. Nikolovski, M. Hafez, N. Mechbal, and M. Vergé , "A Multi-Touch Plate Based on Lamb Wave Absorption", *Proceedings of the Eurosensors XXIII conference*, Lausanne, Switzerland, 2009.

[LIU09b] Liu, Y., J. P. Nikolovski, M. Hafez, N. Mechbal, and M. Vergé , "Acoustic wave approach for multi-touch tactile sensing", *Proceeding of International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science, MHS 2009.* , Nagoya Japan, 2009.

[LIU09c] Liu, Y., J. P. Nikolovski, M. Hafez, N. Mechbal, and M. Vergé, "Tactile objects based on an amplitude disturbed diffraction pattern method", *Applied Physics Letters* (Vol.95, Issue 25), 2009.

[LIU10] Liu, Y., J. P. Nikolovski, M. Hafez, N. Mechbal, and M. Vergé , "An acoustic multi-touch sensing method using amplitude disturbed ultrasonic wave diffraction patterns", *Sensors & Actuators: A. Physical*, DOI: 10.1016/j.sna.2010.03.020, 2010.

[MAT97] Matsushita, N., J. Rekimoto, 10th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. UIST '97, pp.209-210, 1997.

[MAL04] Malik,S., J. Laszlo, "Visual Touchpad: A Two-Handed Gestural Input Device", Proceedings of the 6th International Conference on Multimodal Interfaces (State College, PA, USA, October 13 - 15, 2004.

[MAR04] Martin, B., "Codage, cryptologie et applications", Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR), 2004.

[MIC27] Michelson, A., "Studies in Optics", U. of Chicago Press, 1927.

[MIN84] Minsky,M.R., "Manipulating simulated objects with real-world gestures using a force and position sensitive screen", Computer Graphics, 1984.

[MOR00] Morrison, G., Singh, M., "Passive touch system and method of detecting user input", US Patent 09/610,481, 2000.

[NIC89] Nicholls, H. R. , M. H. Lee, "A survey of robot tactile sensing technology", Int. J. Robotics Research, 8(3):3-30, 1989.

[NIC79] Nicol, K., E. M. C. Hennig, U.S. Patent 4,134,063, 1979.

[NIK95] Nikolovski, J.P., "Décteur à ondes de Lamb de la position d'un stylet", Ph.D. thesis UPMC, 2 feb. 1995.

[NIK00] Nikolovski, J. P., F. Devige, "Plaque acoustique interactive à moyens de traitement du signal perfectionnés". Brevet. FR0008372, 2000.

[NIK07a] Nikolovski, J. P., Roselier, Samuel., Benali, Khoudja M., Hafez, M., Lozada, J., "Innovations sur les interfaces haptiques tactiles et impactiles", Techniques de l'ingénieur. Génie mécanique, 2007.

[NIK07b] Nikolovski, J. P., Bouchigny, S., Hafez, M., Vela Saavedra, E., "Procédé et dispositif de mesure de l'effusivité thermique d'une surface d'étude", Brevet FR20070059603.

[NIK07c] Nikolovski, J. P., Ing, R. K., Fink, M. "Procédé pour localiser un toucher sur une plaque et dispositif pour la mise en œuvre de ce procédé", brevet FR0703651 du 23 mai 2007.

[OHM06] Ohmura,Y., Y. Kuniyoshi, A. Nagakubo, "Conformable and Scalable Tactile Sensor Skin for Curved Surfaces", Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006.

[PAR02] Paradiso, J.A., Leo, C.-K., Checka, N., Hsiao, K., "Passive Acoustic Sensing for Tracking Knocks Atop Large Interactive Displays", Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Sensors, Volume 1, Orlando, Florida, June 11-14, pp. 521-527, 2002.

[PAR05] Paradiso, J.A., Leo, C.-K., "Tracking and Characterizing Knocks Atop Large Interactive Displays", Sensor Review (special issue on vibration and impact sensing), Vol. 25, No. 2, pp. 134-143, 2005.

[PAT88] Patterson, David A., Gibson, Garth, Katz, Randy H. "A Case for Redundant Arrays of Inexpensive Disks (RAID)", University of California Berkley, 1988.

[REG98] Régis, B., Terraza Michel, "Analyse des séries temporelles en économie", Presses Universitaires de France, 1998.

[PIR04] Pirotte, A., "L'économétrie : des origines aux développements récents", CNRS Editions, 2004.

[REK02] Rekimoto, J., "SmartSkin: An Infrastructure for Free-hand Manipulation on Interactive Surfaces", Conference on Human Factors in Computing Systems. CHI '02, pp.113-120, 2002.

[RIB07] Ribay, G., S. Catheline, D. Clorennec, R. K. Ing, N. Quieffin, and M. Fink, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, vol. 54, no. 2, pp. 378-385, 2007.

[RIC01] Richard O. Duda, Peter E. Hart, David G. Stork, "Pattern classification", Wiley-interscience, 2001.

[ROV94] Rovamo, J., Mustonen, J., Näsänen, R., "Modelling contrast sensitivity as a function of retinal illuminance and grating area", Vision Research, Volume 34, Issue 10, pp. 1301-1314, 1994.

[ROY92] Royer, D., Dieulesaint, E., Legras, O., "Capteurs à Ondes Élastiques Guidées", J. Phys. III France 2, 1992.

[ROY96] Royer, D., Dieulesaint, E., "Ondes élastiques dans les solides, Tome 1. Propagation libre et guidée", Masson Paris, 1996, p. 120-121.

[ROY01] Royer D., Dieulesaint, E., "Acoustique : propagation dans un solide ", AF 3 814, Techniques de l'Ingénieur, 2001.

[SCH96] Schuermann, J., "Pattern Classification: A Unified View of Statistical and Neural Approaches", Wiley&Sons, 1996.

[SEA07] Sears, Andrew, Jacko, Julie A. "Handbook for Human Computer Interaction (2nd Edition)", CRC Press, 2007.

[SMI07] Smith, J.O., "Introduction to Digital Filters with Audio Applications", W3K Publishing, <http://books.w3k.org/>, 2007.

[TRA85] Travnikova, N. P., "Efficiency of Visual Search", Mashinostroyeniye, p.4, 1985.

[VER03] Vergé, M., Jaume, D., "Modélisation structurée des systèmes avec les Bond Graphs", Edition Technip, 2003.

[WES01] Westerman, W., Elias, J. G., U.S. Patent 6,323,846, 2001.

[YAN06] Yang J., "A Review of a Few Topics in Piezoelectricity", Applied Mechanics Reviews, vol. 59, pp. 335-345, 2006.

[ZEZ06] Zezula, P., Amato, G., Dohnal, V., Batko, M. "Similarity Search - The Metric Space Approach", Springer, 2006.

Annexe 1. Simulations des ondes de Lamb

A1.1. Vitesse de phase

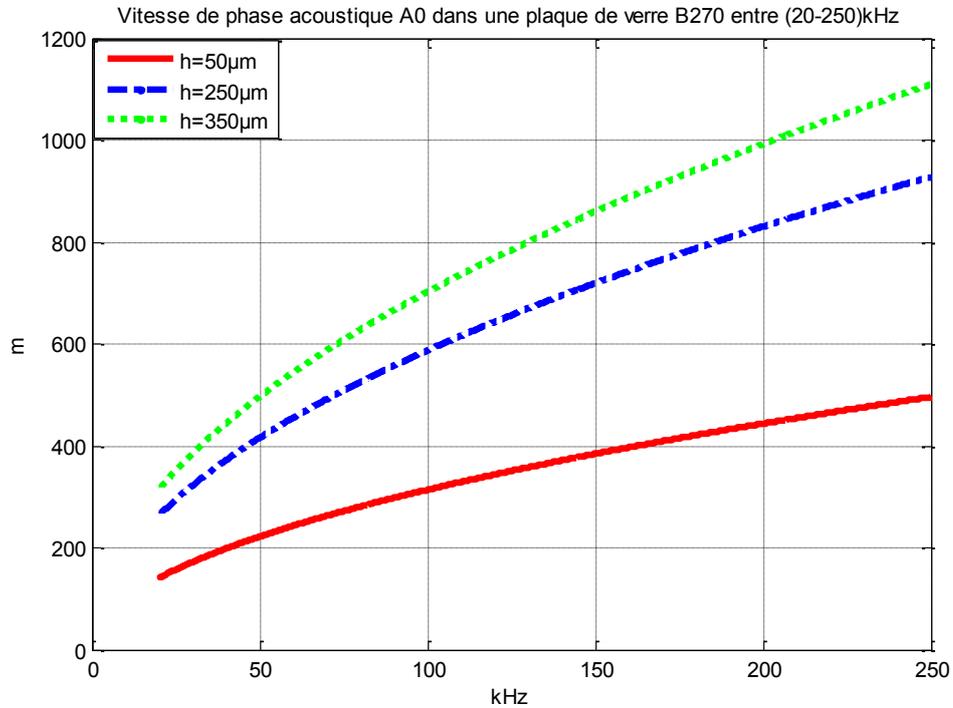


Figure A1.1 : Vitesses de phase en fonction des fréquences entre 20 kHz et 250 kHz, pour les plaques de verre B270 de demi-épaisseurs (h) 50 μm , 175 μm et 250 μm .

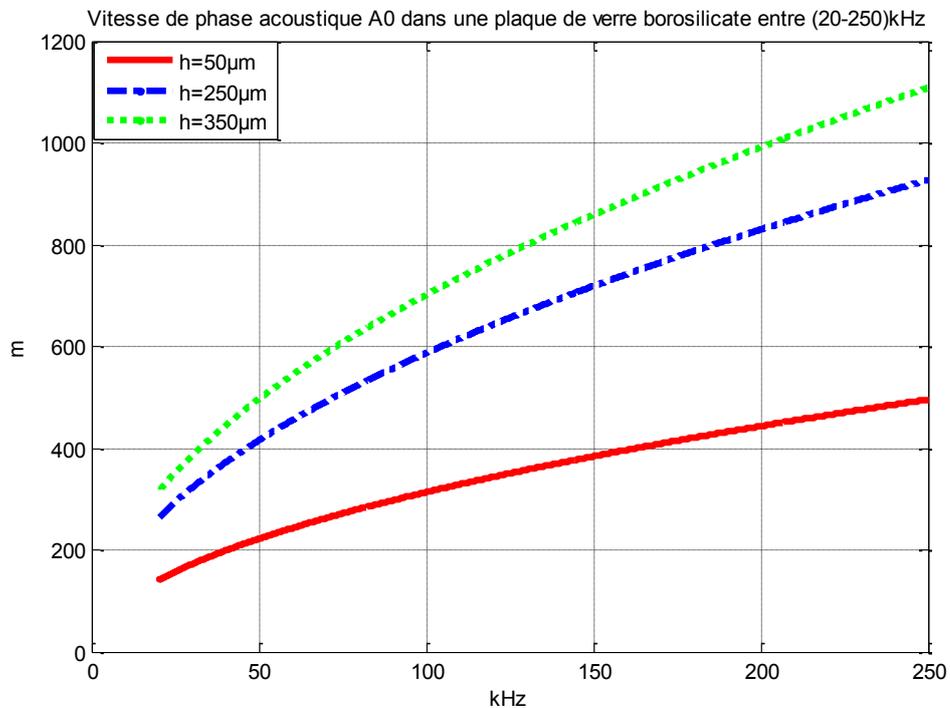


Figure A1.2 : Vitesses de phase en fonction des fréquences entre 20 kHz et 250 kHz, pour les plaques de verre borosilicate de demi-épaisseurs (h) 50 μm , 175 μm et 250 μm .

A1.2. Vitesse de groupe

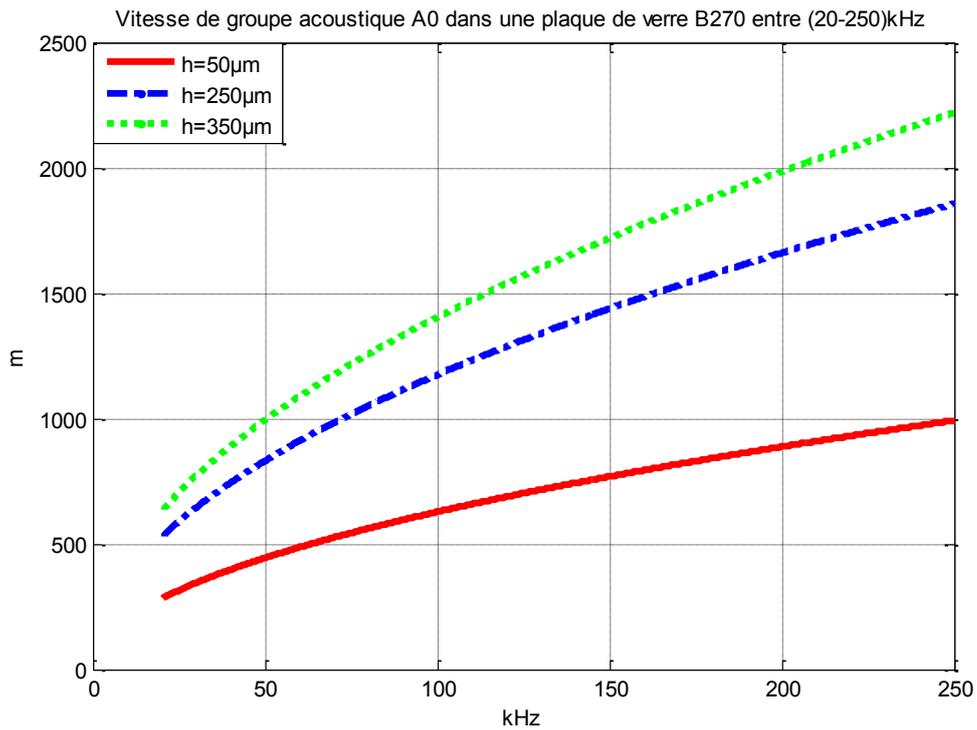


Figure A1.3 : Vitesses de groupe en fonction des fréquences entre 20 kHz et 250 kHz, pour les plaques de verre B270 de demi-épaisseurs (h) 50 μm , 175 μm et 250 μm .

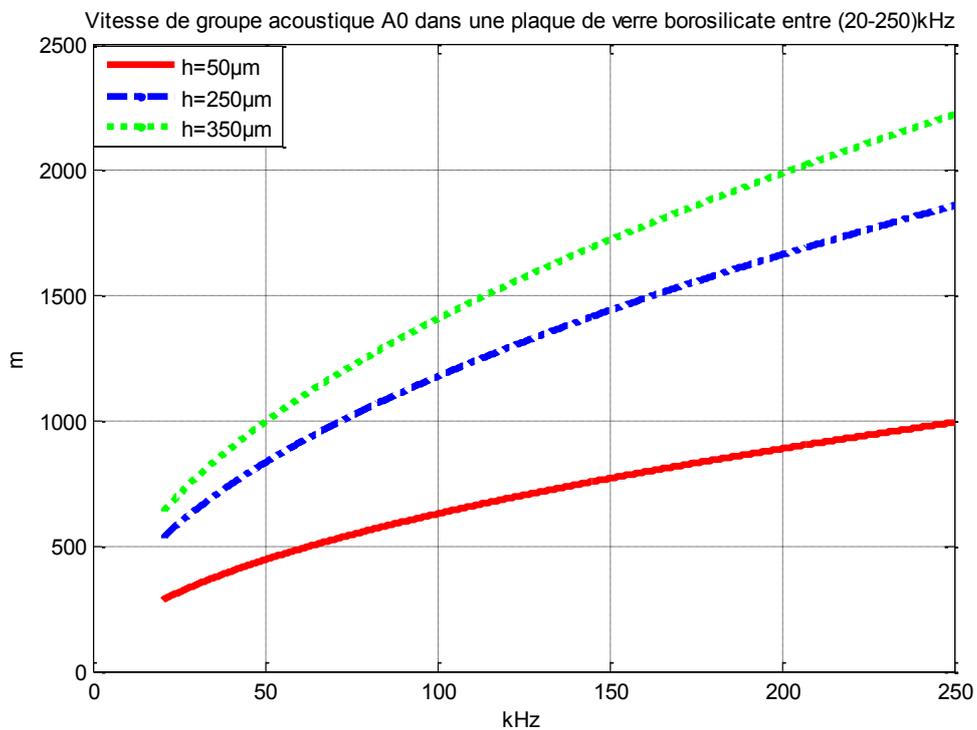


Figure A1.4 : Vitesses de groupe en fonction des fréquences entre 20 kHz et 250 kHz, pour les plaques de verre borosilicate de demi-épaisseurs (h) 50 μm , 175 μm et 250 μm .

A1.3. Longueur d'onde

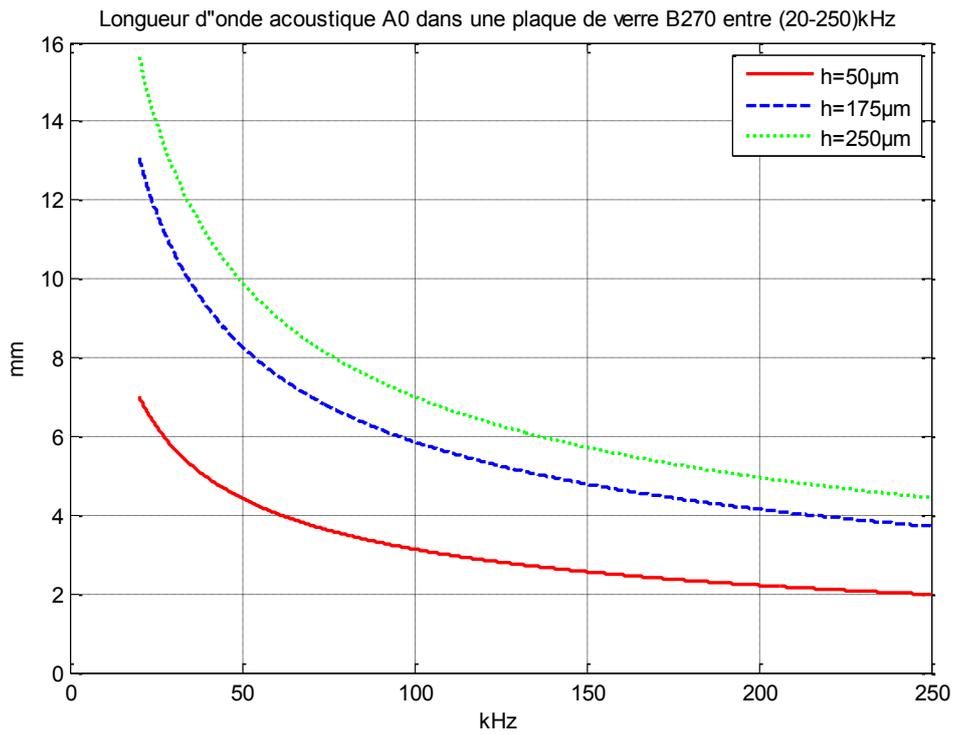


Figure A1.5 : Longueur d'onde en fonction de la fréquence, entre 20 kHz et 250 kHz pour le mode A_0 dans une plaque de verre B270.

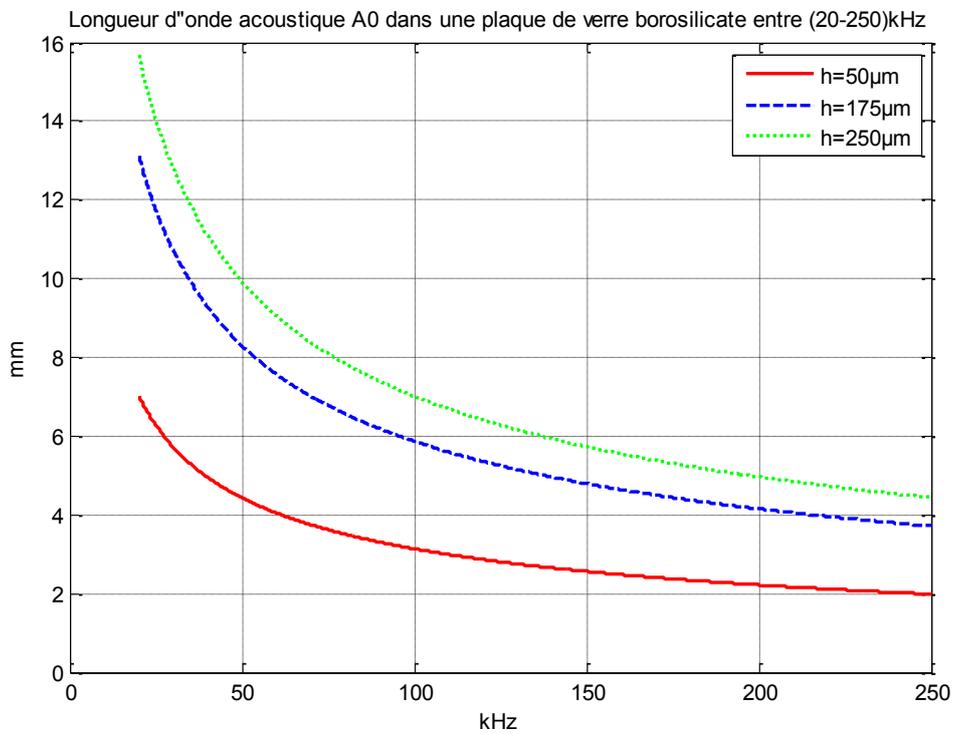


Figure A1.6 : Longueur d'onde en fonction de la fréquence, entre 20 kHz et 250 kHz pour le mode A_0 dans une plaque de verre borosilicate.

A1.4. Rapport entre deux composantes du déplacement

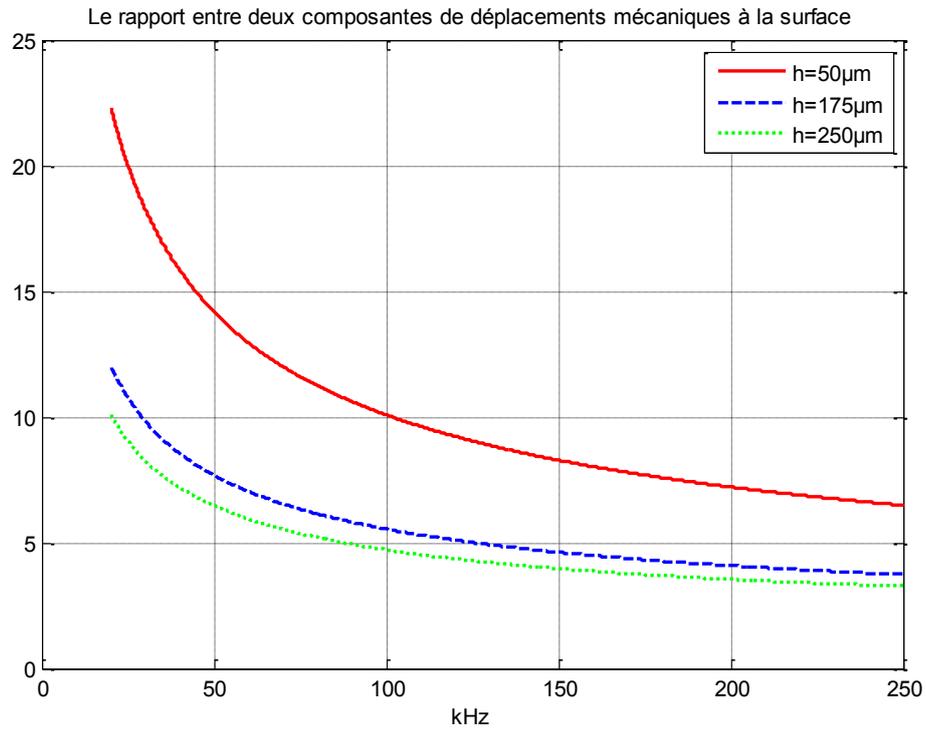


Figure A1.7 : Rapport entre composante de déplacement normale U_2 (+/-h) et composante de déplacement tangentielle U_1 (+/-h), pour une onde de Lamb en mode A_0 dans une plaque de verre B270.

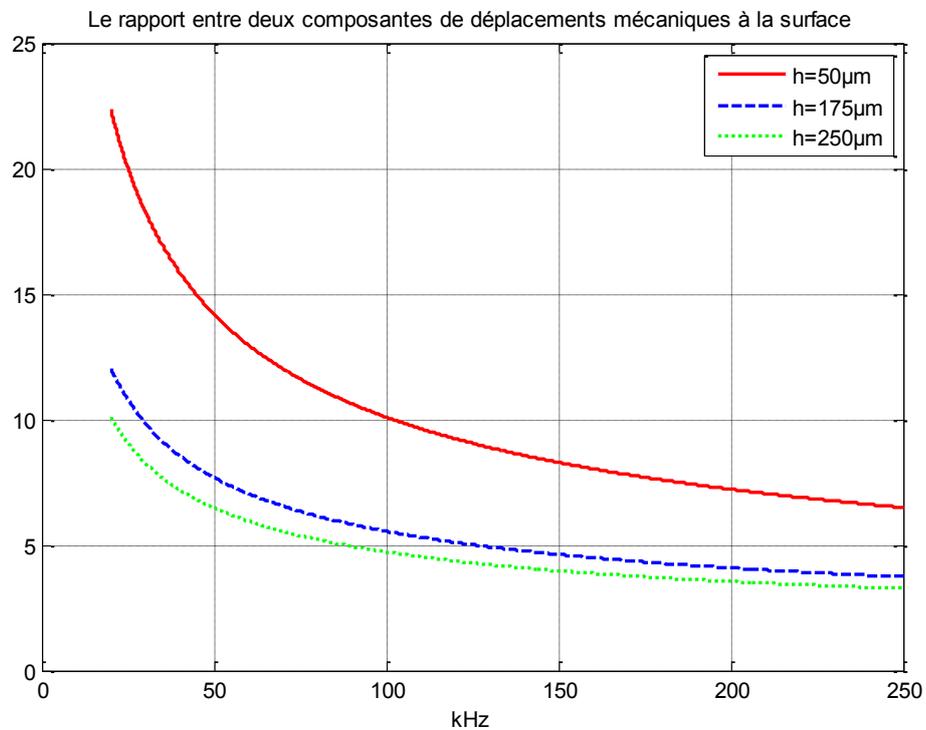


Figure A1.8 : Rapport entre composante de déplacement normale U_2 (+/-h) et composante de déplacement tangentielle U_1 (+/-h), pour une onde de Lamb en mode A_0 dans une plaque de verre borosilicate.

Annexe 2. Interprétation de la dynamique des touchers

A2.1. Extrait du dépôt d'une demande de brevet

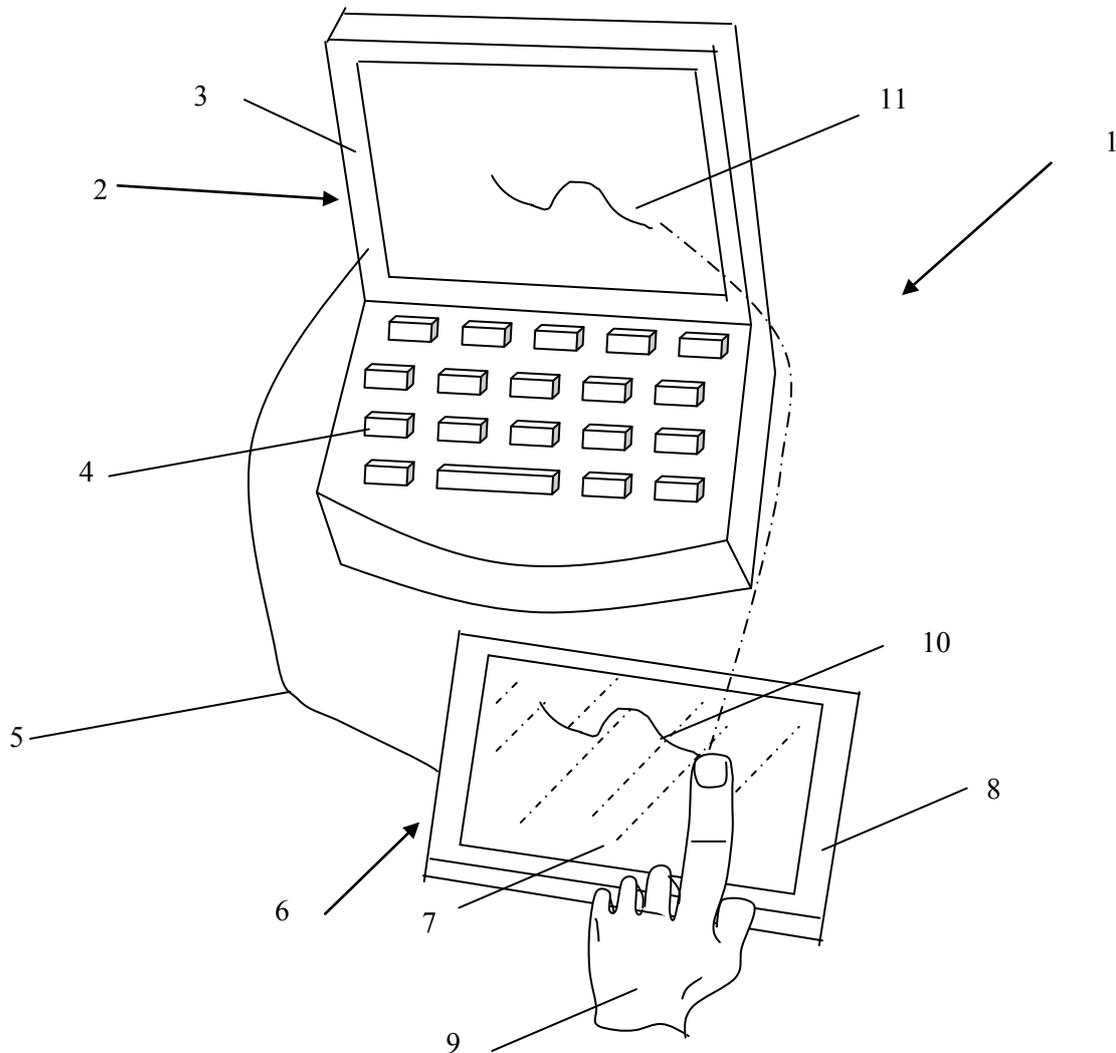


Figure A1.1 : Fonctionnement du procédé tactile.

Au cours de l'étape de localisation, l'ordinateur 2 interpole les positions successives des touchers simples ou multiples pour afficher une trajectoire 11 sur l'écran 3, comme un pointeur. La trajectoire peut être constituée de plusieurs segments, le dernier point d'un segment et le premier point du segment suivant étant caractérisés par une rupture du contact avec la plaque pendant un temps suffisant d'environ 50 ms à 150 ms.

La localisation d'un toucher comprend un ensemble d'étapes dont la durée totale est inférieure à 10 ms et constitue un processus tournant en boucle continue. On peut notamment interpréter les localisations successives réalisées par le microcontrôleur 15 pour créer une interface tactile permettant notamment de :

- échantillonner un toucher mobile,
- calculer la vitesse d'un toucher mobile,
- calculer l'accélération d'un toucher mobile,
- mesurer la norme d'un toucher,
- identifier le début d'un toucher, la fin d'un toucher,
- établir une correspondance entre la norme et la force d'un toucher,
- tracer une courbe cinématique par interpolation de son parcours,
- établir des signatures d'interactions dynamiques avec une surface, relatives à une caresse, une frappe simple clic, double clic que ce soit sur touchers simples ou multiples,
 - en conséquence, pour désigner, déplacer ou pousser des objets graphiques d'une interface graphique d'un système d'exploitation informatique (Windows, Linux, symbian, etc.) (Par exemple un dessin CAO, une photo ou un document) dans un espace de travail informatique (= bureau par exemple l'écran 3 du PC 2), par la position dudit toucher,
 - faire « avancer » ou « retourner » un objet dans une espace virtuel selon le sens de déplacement du toucher,
 - effectuer une « avance rapide » ou « retour rapide » dans une liste d'objets ou une séquence de photos ou vidéo en fonction de l'accélération du mouvement du toucher,
 - effectuer un « double clic », par identification d'une diminution rapide de la norme du vecteur de mesure caractéristique d'une augmentation de la surface de contact et/ou la pression de toucher.

On peut aussi interpréter les localisations successives de multi-touchers par le microcontrôleur 15 pour créer une interface tactile associée à un langage de gestes tactiles permettant notamment de :

- suivre la distance entre les points désignés de la surface tactile au cours d'un toucher multiple et contrôler qu'elle augmente ou diminue selon que l'on veut agrandir (zoom) ou réduire (zoom arrière) l'échelle de visualisation d'un objet graphique de dimensions données,

- suivre des points successifs issus d'un multi-touchers et constater qu'ils ont une cinématique permettant de dégager un mouvement de translation ou de rotation de l'ensemble des points à l'intérieur du référentiel du châssis par rapport auquel est défini le système de coordonnées, la translation de l'ensemble des points à l'intérieur du châssis étant associée à un déplacement d'ensemble d'un objet graphique à l'intérieur de l'espace de travail (fenêtre Windows, Linux, etc...), et la rotation horaire ou antihoraire de l'ensemble de points étant associée à une rotation horaire ou antihoraire de l'objet graphique dans l'espace de travail graphique. Un cas simple est celui où le châssis et l'espace de travail informatique sont en forme de rectangles homothétiques, par exemple aux formats 4/3 ou 16/9,

- suivre des points issus de multi-touchers et, par analyse de leur cinématique, dégager une déformation libre à partir de k poignées de déformation correspondant aux k positions des multi-touchers d'un objet associé à l'intérieur de l'espace de travail.

A2.2. Extrait des figures de la demande de brevet

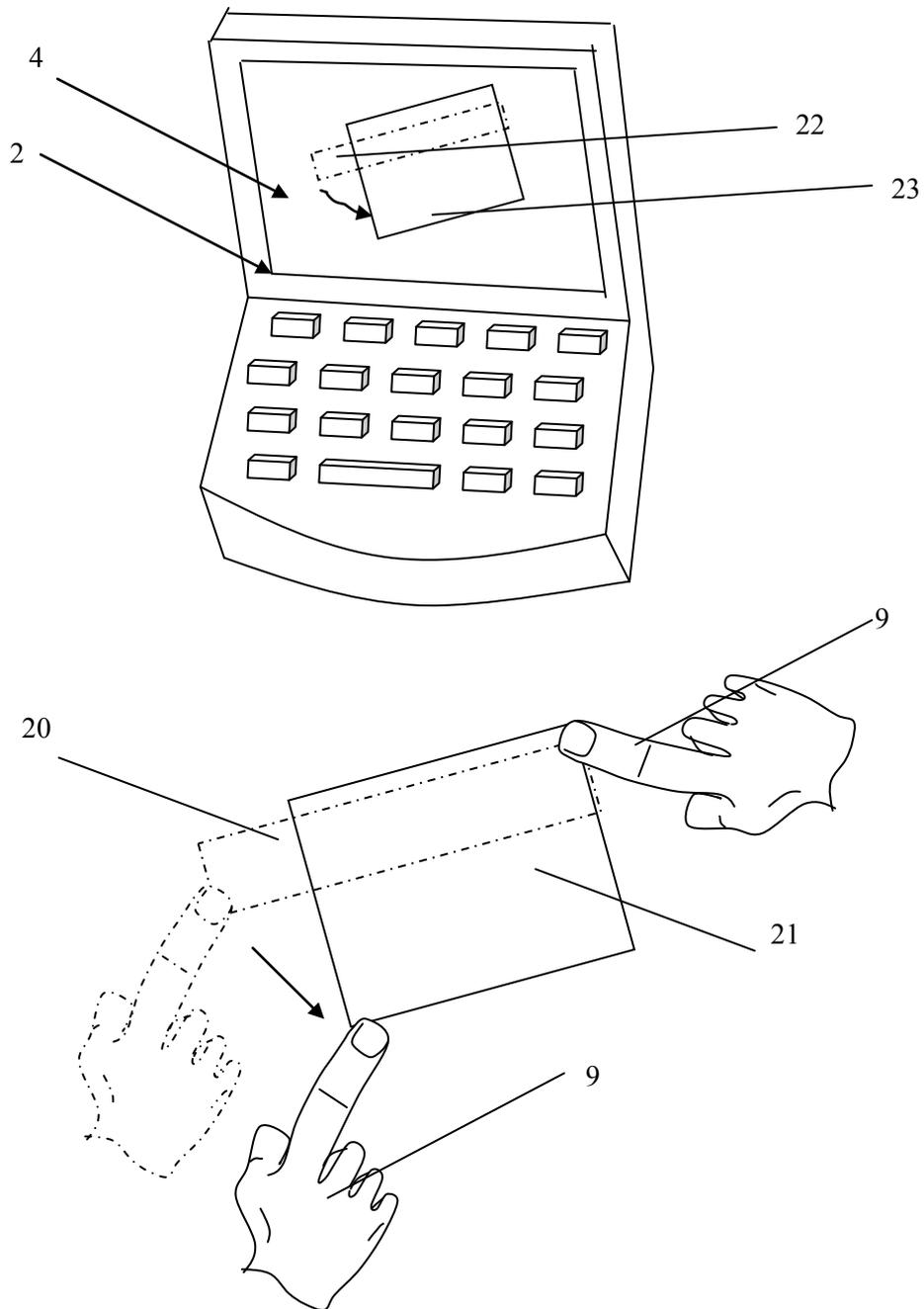


Figure A2.2 : Déformation libre.

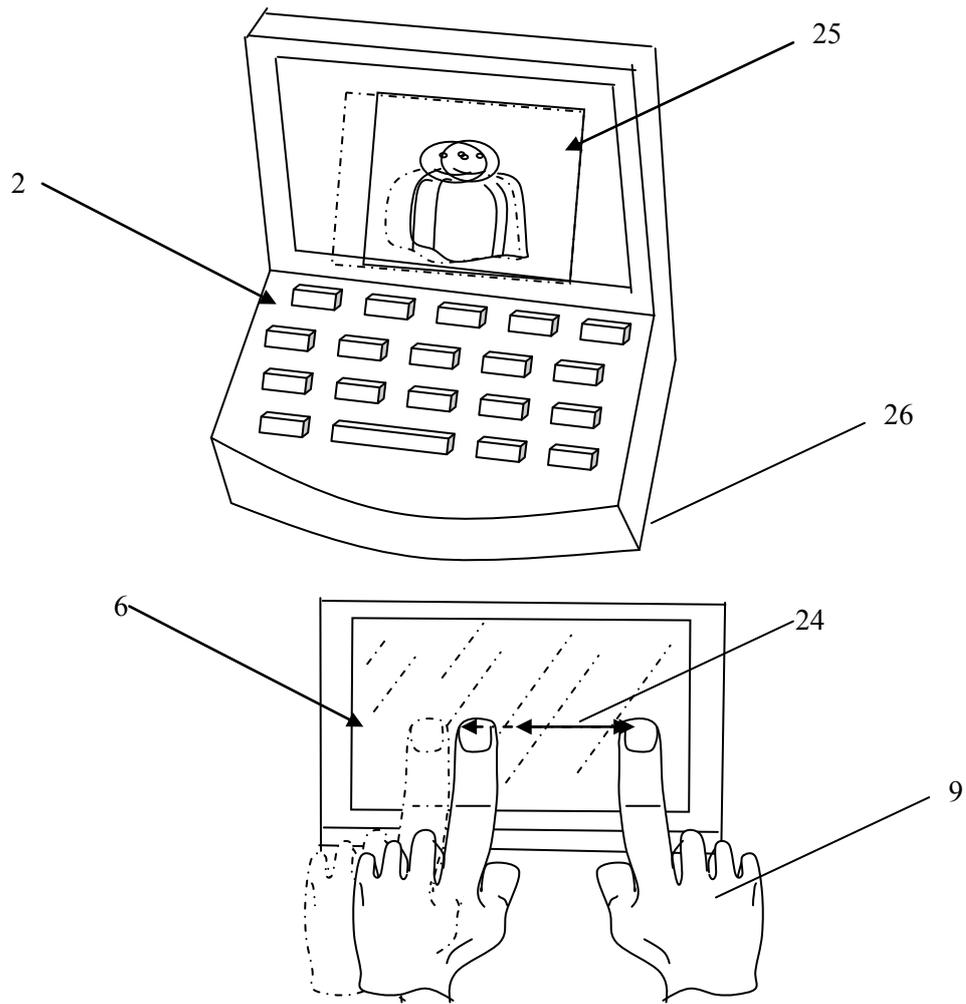


Figure A2.3 : Zoom avant ou arrière.

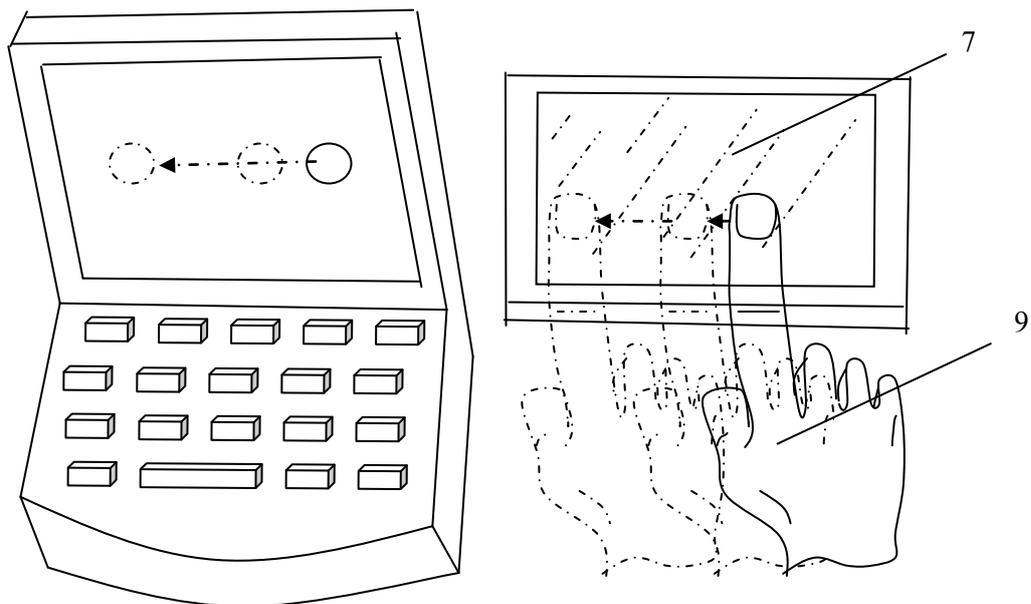


Figure A2.4 : Avance rapide.

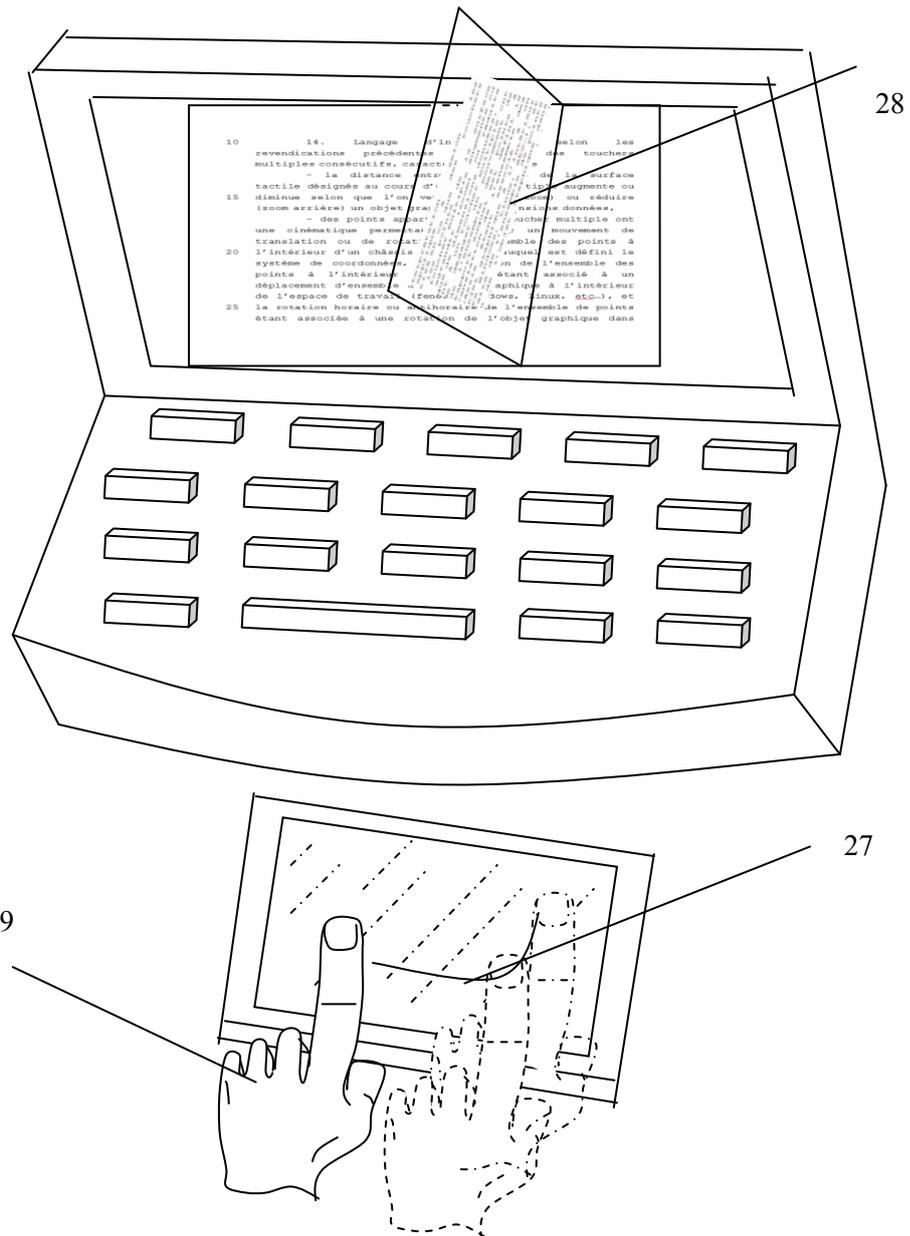


Figure A2.5 : Tourne-page.

PROCEDE TACTILE A DIFFRACTION ULTRASONORE

RESUME : Cette thèse est une contribution au développement d'un procédé tactile acoustique basé sur la perturbation des ondes de Lamb, permettant de détecter un toucher simple ou des touchers multiples sur des objets minces de forme quelconque. Après avoir étudié la propagation des modes de Lamb dans les objets minces par exemple les plaques de cuivre d'épaisseur 450 μm , nous avons observé, que l'énergie des ondes de Lamb antisymétriques était essentiellement due à la composante normale de déplacement et qu'il était aisé de perturber un mode de flexion par un toucher surfacique réalisé avec le doigt ou ponctuel avec la pointe d'un stylo, tandis que dans le cas d'un mode symétrique, l'énergie était essentiellement distribuée sur la composante de déplacement tangentielle et en conséquence plus difficilement perturbée par une interaction tactile. Nous avons en conséquence exploité le toucher sur une plaque mince perturbant le rayonnement d'une onde acoustique dans l'objet et réalisé en pratique une mesure de la perturbation d'un signal de diffraction des ondes de Lamb en un ou deux points récepteurs d'une plaque. Ainsi, une méthode de localisation basée sur la diffraction des ondes a été proposée, pour obtenir une interface tactile compacte, performante et faible coût. Cette méthode nommée méthode de la Figure de Diffraction Perturbée en Amplitude (FDPA) peut rendre une surface tactile avec une résolution spatiale de l'ordre du millimètre et un temps de réponse inférieur à 10 ms. Deux méthodes d'optimisation sont proposées pour obtenir un taux de localisation correcte proche de 100%. Le procédé tactile et les méthodes d'optimisation présentés dans cette thèse ont été testés sur plusieurs types d'objets, réalisés dans des matériaux différents et sous différentes formes géométriques. Ces réalisations ont montré des performances satisfaisantes en termes d'encombrement, de consommation et de fiabilité de localisation pour des touchers simples et multiples.

Mots clés : Onde de Lamb, procédé tactile, localisation du toucher, touchers multiples.

TACTILE PROCESS BASED ON THE ULTRASONIC DIFFRACTION

ABSTRACT: This thesis is a contribution to the development of an acoustic tactile process based on the disturbance of Lamb waves making it possible to detect a simple or multitouch interaction on thin objects of various shapes. After studying the propagation of Lamb modes in thin objects such as a copper plate 450 μm thick, we show that the energy of antisymmetric Lamb modes is essentially related to the normal component of displacement and that it is easy to disturb bending waves either with a stylus based punctual touch or finger based surfacic touch, whereas in the case of a symmetric Lamb mode, energy is essentially due to the tangential mechanical component of displacement, therefore more difficult to disturb with a touch of the finger. Consequently, we have exploited the touch disturbed radiation of an acoustic bending wave and measured the disturbance of diffracted Lamb waves at one or two receiving points of the plate. Thus, a method based on the diffraction of Lamb waves has been proposed for the development of a compact, efficient and low cost tactile interface. This method named **Amplitude Disturbed Diffraction Pattern (ADDP)** method can be used to produce a tactile surface that can achieve a spatial resolution of the order of one millimeter and a response time of 10 ms. Two optimization methods are proposed to obtain near 100% correct localization. The proposed process and optimization methods have been tested on several kinds of objects made with different materials and forms. These realizations have shown satisfying performances in terms of form factor, consumption and reliability of localization of simple or plural contact points.

Keywords : Lamb wave, tactile process, localization of touch, multi-touch.

