

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie mécanique

Implantation d'imagerie temps réel par ondes guidées pour écran tactile

Mémoire de maîtrise
Spécialité : génie mécanique

Louis-Philippe BRAULT

Jury : Patrice MASSON
Nicolas QUAEGBEUR
François MICHAUD
Nicolas BEAUDET

RÉSUMÉ

Les techniques d'imagerie développées pour la surveillance embarquée des structures ont maintenant des applications dans d'autres domaines. Par exemple, le domaine de l'écran tactile est en pleine expansion et de nouvelles technologies commencent à apparaître pour des applications spécifiques. Au niveau médical, des surfaces tactiles pouvant fournir des données sur la répartition du poids et la posture seraient une avancée pour le diagnostic des patients et la recherche. L'écran tactile est une technologie utilisée dans un nombre croissant d'appareils. Les écrans tactiles capacitifs et résistifs dominent le marché, mais ils sont connus pour être difficiles à fabriquer, facilement cassables et coûteux pour les grandes dimensions. Par conséquent, de nouvelles technologies sont encore explorées pour les écrans tactiles de grandes tailles et robustes. Les technologies candidates comprennent des approches basées sur les ondes. Parmi eux, des ondes guidées sont de plus en plus utilisées dans la surveillance des structures (SHM) pour de nombreuses applications liées à la caractérisation des propriétés des matériaux. Les techniques d'imagerie utilisées en SHM telles que *Embedded Ultrasonic Structural Radar* (EUSR) et Excitelet sont fiables, mais elles ont souvent besoin d'être couplées avec du traitement d'image pour donner de bons résultats. Dans le domaine du NDT (essais non destructifs), les ondes guidées permettent d'analyser les structures sans les détériorer. Dans ces applications, les algorithmes d'imagerie doivent pouvoir fonctionner en temps réel. Pour l'écran tactile, une technique d'imagerie de la pression en temps réel doit être développée afin d'être efficace et performante. Il faut obtenir la position et l'amplitude de la pression appliquée en un ou plusieurs points sur une surface. C'est ici que les algorithmes et l'expertise par rapport aux ondes guidées seront mises de l'avant tout en pensant à l'optimisation des calculs afin d'obtenir une image en temps réel. Pour la méthodologie, différents algorithmes d'imagerie sont utilisés pour obtenir des images de déformation d'un matériau et leurs performances sont comparées en termes de temps de calcul et de précision. Ensuite, plusieurs techniques de traitement d'images ont été implantées pour comparer le temps de calcul en regard de la précision dans les images. Pour l'écran tactile, un prototype est conçu avec un programme optimisé et les algorithmes offrant les meilleures performances pour un temps de calcul réduit. Pour la sélection des composantes électroniques, ce sont la vitesse d'exécution et la définition d'image voulues qui permettent d'établir le nombre d'opérations par seconde nécessaire.

Mots-clés : Écran tactile, Temps réel, Ondes guidées, SHM, Piézoélectrique, Traitement d'images

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	1
2	ONDES GUIDÉES APPLIQUÉES AUX ÉCRANS TACTILES	5
2.1	Techniques d'imagerie par ondes guidées	5
2.1.1	Ondes guidées	7
2.1.2	<i>Embedded Ultrasonic Structural Radar (EUSR)</i>	7
2.1.3	Excitelet	8
2.1.4	Retournement temporel	9
2.1.5	<i>Damage Index</i>	10
2.2	Traitement d'images	12
2.2.1	Filtrage	12
2.2.2	Intelligence artificielle	14
2.3	Applications	16
2.3.1	Écrans tactiles	16
2.4	Électronique haute vitesse	21
2.4.1	Microcontrôleur	22
2.4.2	Microprocesseur	22
2.4.3	FPGA	23
2.5	Temps réel	23
2.6	Sommaire	24
3	CONCEPTION ET VALIDATION	25
3.1	Cahier des charges	25
3.2	Approche des ondes guidées pour les écrans tactiles	26
3.3	Algorithme	29
3.4	Configuration et procédure expérimentale	29
3.5	Résultats expérimentaux	31
3.6	Influence des paramètres d'acquisition	32
3.7	Sommaire	33
4	IMPLANTATION SUR UN SYSTÈME COMPACT TEMPS RÉEL	35
4.1	Conception du prototype et choix des composantes	36
4.2	Résultats expérimentaux avec le système compact en temps réel	39
5	CONCLUSION	45
6	ANNEXE 1 : Figures	47
7	ANNEXE 2 : Codes	51
	LISTE DES RÉFÉRENCES	53

LISTE DES FIGURES

1.1	Montage pour imagerie par réflexion [Quaegebeur <i>et al.</i> , 2013]	2
1.2	Résultats d'imagerie avec l'algorithme Excitelet développé par le Groupe d'acoustique de l'Université de Sherbrooke	2
2.1	Ondes de Lamb symétriques et asymétriques [Ing et Fink, 1998]	7
2.2	Exemple de détection et principe EUSR avec les ondes de l'émetteur et du récepteur [Quaegebeur <i>et al.</i> , 2011]	8
2.3	Imagerie avec EUSR et Excitelet [Quaegebeur <i>et al.</i> , 2011]	9
2.4	(a) Signaux aux 32 récepteurs B après excitation, (b) Signaux en A après revirement temporel [Ing et Fink, 1998]	10
2.5	Processus du retournement temporel [Ing et Fink, 1998]	11
2.6	Principe du <i>Damage Index</i> [Lallart <i>et al.</i> , 2012]	11
2.7	Comparaison de l'effet d'un filtre médian et d'un filtre de Wiener	13
2.8	Transformée en ondelettes (a) Signal original, (b) Signal après DWT (c) Signal après CWT [Yu et Giurgiutiu, 2008]	15
2.9	Effet du filtre en réseau de neurones [Rohani et Manry, 1992]	16
2.10	Fonctionnement écran capacitif	17
2.11	Vue en coupe d'un écran tactile de Adler [Kent <i>et al.</i> , 2007]	18
2.12	Amplificateur de charge modifié [Reis <i>et al.</i> , 2010]	19
2.13	Imagerie avec corrélation théorique des réflexions dues au défaut du mode A0 et S0 [Quaegebeur <i>et al.</i> , 2013]	20
2.14	Vue en coupe d'un écran avec la technologie <i>in-cell</i> [Hotelling <i>et al.</i> , 2012] .	21
3.1	Réflexions d'ondes dans une plaque	27
3.2	Schémas de l'algorithme de corrélation a) Partie I : Algorithme pour obtenir la base de données de chaque pixel ; b) Partie II Imagerie par corrélation .	28
3.3	Configuration du système d'acquisition des données	30
3.4	Photographie du prototype avec le banc d'essai (1 : axe Z, 2 : axe X, 3 : l'axe Y, 4 : PZT)	30
3.5	Vitesse de phase pour une plaque de verre de 0,5 mm d'épaisseur	31
3.6	Résultats de l'imagerie à l'aide de la configuration optimale pour 88 g (A), 335 g (B) et 678 g (C) masses avec l'algorithme de corrélation	32
3.7	Résultat d'imagerie avec deux masses différentes, 335 g à (10,11) et à 678 g (34,21)	33
3.8	Comparaison des résultats en utilisant des conditions optimales (A) et les conditions dégradées (B) en temps réel	34
4.1	Photographie du premier prototype compact	37
4.2	Schéma-bloc des composantes du prototype compact	38
4.3	Vue du haut du circuit imprimé pour le prototype final compact échelle en pouces	39
4.4	Vue du bas du circuit imprimé pour le prototype embarqué échelle en pouces	40

4.5	Prototype final compact temps réel	41
4.6	Onde typique mesurée par un récepteur et acquise en utilisant le système compact en temps réel	42
4.7	Imagerie EUSR en utilisant le mode A0 avec le système compact en temps réel	43
4.8	Image de corrélation expérimentale avec une masse de 246 g à (3,3)	43
6.1	Schéma électrique du prototype final partie 1	48
6.2	Schéma électrique du prototype final partie 2	49
7.1	Code C pour créer le signal à générer par le piézoélectrique	51
7.2	Code C pour générer les matrices EUSR	51
7.3	Code C permettant la corrélation du signal reçu avec les signaux de références	52

LISTE DES TABLEAUX

3.1	Cahier des charges pour le prototype d'écran tactile	26
4.1	Nombre d'opérations et mémoire pour les résolutions typiques	36
4.2	Comparaison des paramètres actuels et de leur valeur désirée pour un futur prototype	42

LISTE DES ACRONYMES

Acronyme	Définition
CNA	<i>Convertisseur numérique-analogique</i>
CWT	<i>Continuous Wavelet Transform</i>
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
DWT	<i>Discrete Wavelet Transform</i>
EUSR	<i>Embedded-Ultrasonics Structural Radar</i>
FPGA	<i>Field-Programmable Gate Array</i>
MIPS	<i>Million Instructions Per Second</i>
NDT	<i>Non-Destructive Testing</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PZT	<i>Titano-Zirconate de Plomb</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
SAW	<i>Surface Acoustic Wave</i>
SHM	<i>Structural Health Monitoring</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver Transmitter</i>

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Les écrans tactiles font désormais partie de notre vie pour la simplicité et la commodité de l'interface humain-machine. Les technologies les plus populaires utilisent les variations des propriétés électriques (résistance, capacité et inductance). Ces types d'écrans tactiles sont basés sur une détection en maillage complexe où une pression est appliquée [Downs, 2005]. Certaines difficultés liées à ces technologies sont la fabrication coûteuse et complexe en salle blanche, le grand nombre de canaux nécessaires, la résolution limitée par la densité d'électrodes en treillis et la faible résolution sur la mesure de pression appliquée. Les écrans tactiles peuvent être utilisés pour la cartographie de force dans le domaine biomédical. L'utilisation de matrices d'électrodes est largement utilisée pour mesurer la répartition du poids d'un être vivant sur ses membres. Plusieurs nouvelles méthodes moins coûteuses peuvent être développées comme l'utilisation d'éléments piézoélectriques qui semble être une avenue intéressante. De plus, contrairement à un écran tactile typique, ce genre de technologie ne nécessite pas un écran transparent. Actuellement, avec les technologies actuelles, il est possible d'obtenir des résultats statiques avec un niveau de résolution qui dépend de la densité de maillage des électrodes. Le principal défi relié au domaine des ondes acoustiques est la complexité des algorithmes permettant de faire l'imagerie d'une surface. Obtenir une image en temps réel nécessite une acquisition des données rapide et un traitement optimisé. Une alternative proposée est d'utiliser des ondes acoustiques [Quaegebeur *et al.*, 2013] [Adler et Desmares, 1987] pour numériser un écran en utilisant des techniques inspirées du *Structural Health Monitoring* (SHM). Ce type d'écran tactile peut être utilisé principalement pour les écrans industriels de grandes dimensions et dans le domaine biomédical.

Les ondes acoustiques peuvent être utilisées pour caractériser un matériau en observant les modifications apportées aux ondes injectées dans celui-ci. Un exemple de montage et de résultats est donné aux figures 1.1 et 1.2 pour le fonctionnement de l'imagerie par ondes guidées. L'émetteur E émet une onde qui est réfléchiée par un contact. Avec la vitesse de propagation de l'onde, la mesure du temps de vol des ondes mesurées par les récepteurs R1 et R2 permettent de déterminer la position de ce contact. Des algorithmes sont utilisés pour obtenir une image des réflecteurs dans le matériau. Des applications se développent

à partir de cette technologie dont la détection de pression en surface d'une plaque et les essais non destructifs qui permettent l'inspection de structures. Ces nouvelles applications exigent cependant l'implantation des algorithmes d'imagerie en temps réel.

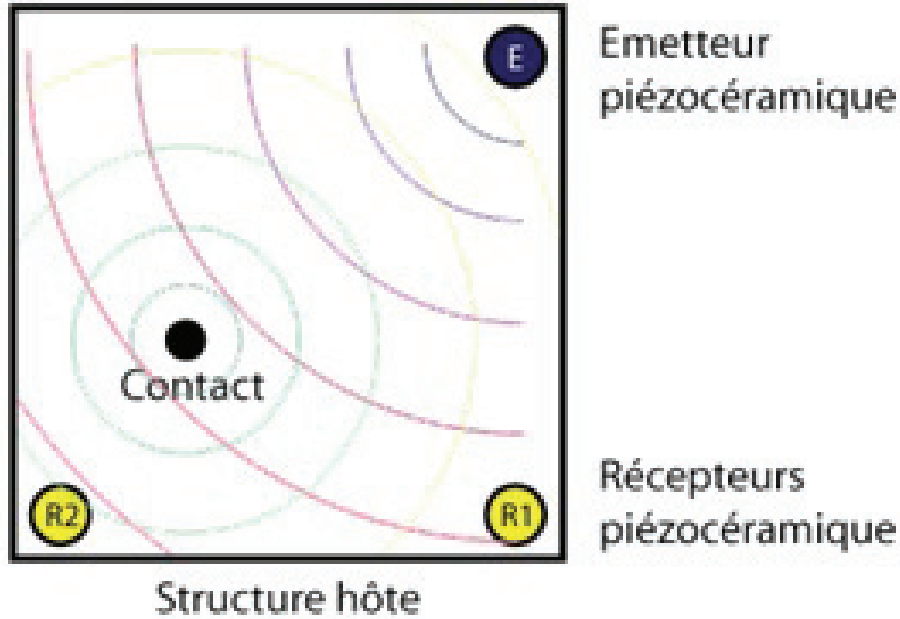


Figure 1.1 Montage pour imagerie par réflexion [Quaegebeur *et al.*, 2013]

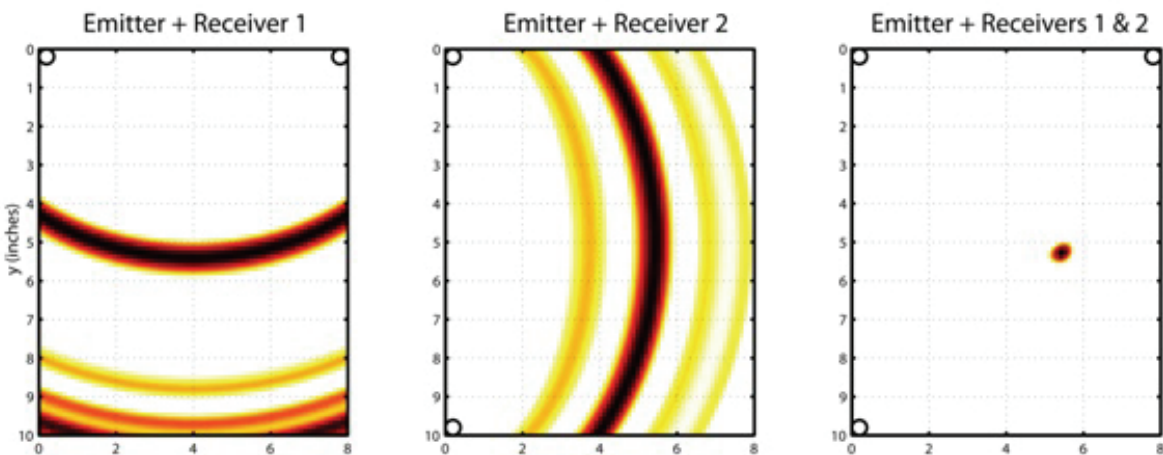


Figure 1.2 Résultats d'imagerie avec l'algorithme Excitelet développé par le Groupe d'acoustique de l'Université de Sherbrooke

De ce fait, la problématique abordée dans ce mémoire est de traiter des images en temps réel avec un nombre de pixels et un taux de rafraîchissement adéquats. Une étude est d'abord réalisée avec un système commercial pour prouver le fonctionnement de l'algorithme et les requis du système voulu. Par la suite, un système compact est conçu et testé

comme preuve de concept. Les informations sur les spécifications (fréquence, mémoire, gain, transmission et traitement des données) pour atteindre un produit viable et fonctionnel sont déduites à partir de ce prototype. Ce mémoire présente également la mise en œuvre pratique des techniques qui ont été développées et expérimentées en utilisant différents paramètres tels que le mode, le nombre de réflecteur, la taille des pixels et le nombre de moyennes. Plusieurs configurations ont été utilisées avec des transducteurs piézoélectrique pour trouver les meilleures performances.

Pour se rendre à la conception d'un système d'imagerie ultrasonore en temps réel et obtenir les résultats par rapport aux spécifications, les objectifs suivants ont été établis :

- Définir le cahier des charges ;
- Étudier l'approche des ondes guidées ;
- Sélectionner les algorithmes prometteurs ;
- Définir une configuration et une procédure expérimentale ;
- Analyser les résultats et l'influence des paramètres d'acquisition ;
- Définir les exigences pour le temps réel selon l'algorithme sélectionné ;
- Concevoir le prototype et choisir les composantes ;
- Démontrer que les résultats avec le système compact rencontre les exigences.

Premièrement, le chapitre 2 présente une étude approfondie des techniques d'imagerie par ondes guidées, le traitement d'image, les types d'écran tactiles actuels et les composantes électroniques haute vitesse. Par la suite, le chapitre 3 explique les étapes menant à la conception du premier prototype et quels choix ont été faits afin d'obtenir les informations pour la conception finale. La configuration et la procédure expérimentale sont décrites ainsi que les tests effectués. Le chapitre 4 explique le développement du système compact et les résultats de l'imagerie temps réel avec celui-ci.

CHAPITRE 2

ONDES GUIDÉES APPLIQUÉES AUX ÉCRANS TACTILES

Cette section présente une revue de littérature sur les techniques d'imagerie par ondes guidées, le traitement d'images, les écrans tactiles, le NDT et l'électronique de traitement.

Les ondes de Lamb ont la propriété de parcourir de longues distances dans les structures fines et d'interagir avec des réflecteurs [Alleyne et Cawley, 1992]. La fréquence de l'onde et le type de capteur utilisé pour l'injecter dans un matériau donné déterminent les modes et leurs amplitudes. Les deux principaux modes utilisés pour la détection sont A0 (asymétrique) et S0 (symétrique) [Quaegebeur *et al.*, 2011]. Le mode A0 est plus lent et plus dispersif que S0 ce qui peut être utile pour la numérisation de petite surface et obtenir une meilleure résolution.

L'imagerie en temps réel est nécessaire pour les scanners et d'autres applications telles que l'écran tactile utilisant des ondes guidées [Quaegebeur *et al.*, 2013] discuté dans ce document. Pour une solution intégrée, un grand nombre de paramètres de conception sont importants à considérer puisque l'alignement temporel et la qualité de l'onde sont cruciales pour obtenir une localisation précise du point de contact. Une autre considération est la taille et le prix des pièces utilisées si le but est d'en faire un produit commercial.

Plus de détails sur certains de ces aspects sont présentés dans les sections qui suivent.

2.1 Techniques d'imagerie par ondes guidées

À l'aide d'ondes guidées, des techniques d'imagerie existent pour trouver les sources d'échos créés par des réflecteurs dans des matériaux. Un défaut, un bris, une déformation ou une pression peuvent facilement être détectés après analyse et être affichés dans un plan. Dans les méthodes d'émission et de réception d'ondes, il y a principalement les techniques de *pitch and catch* et de *pulse-écho*. Ces techniques utilisent les ondes de Lamb qui voyagent à l'intérieur d'une plaque mince et qui démontrent peu d'atténuation dans les matériaux élastiques.

Beaucoup de techniques d'imagerie en SHM ont été développées récemment pour analyser un matériau et obtenir une image représentant les défauts ou les réflecteurs. Un algorithme d'imagerie utilisant des ondes guidées et le renversement temporel a été créé par Fink pour détecter une position en temps réel sur presque tous les solides où le son se propage [Ing *et al.*, 2005]. Le principe est de définir une grille carrée de 1 cm de pixels (35×28 dans leur cas), les frapper pour créer une onde dans la surface et enregistrer avec un élément piézocéramique la réponse impulsionnelle. La localisation se fait en utilisant une corrélation d'une onde reçue avec les signaux contenus dans une base de données. Le niveau de corrélation le plus élevé correspond au pixel frappé. Le traitement est fait en utilisant un ordinateur personnel avec une fréquence de 700 MHz, 256 Mo de RAM et une fréquence d'échantillonnage de 44,1 kHz. Chaque image est obtenue en 20 ms. Cette technique est similaire à celle utilisée dans le présent document, mais les ondes sont maintenant générées avec un piézocéramique et des réflecteurs sont introduits à des points de contact permettant de faire un suivi constant de l'état du matériau. L'utilisation de transducteurs piézoélectriques intégrés est au coeur de ce domaine. Un exemple de ceci est la technique de EUSR [Yu et Giurgiutiu, 2005], dont le but est d'obtenir une image avec la connaissance des propriétés des matériaux. Selon le nombre et la position des transducteurs piézo-électriques, plusieurs réflecteurs peuvent être localisés sur une plaque. Afin d'avoir une localisation plus précise et une meilleure connaissance de l'état du matériau, la technique Excitelet a été développée [Quaegebeur *et al.*, 2011]. Cette technique considère un modèle pour la propagation des ondes, estime la dispersion de l'onde et corrèle le signal mesuré avec le signal attendu pour chaque point d'une plaque donnée. Une autre façon d'analyser un matériau est la méthode d'onde de Lamb inversée dans le temps [Ing et Fink, 1998] [Ing *et al.*, 2005]. En envoyant des ondes, les mesurant et les renvoyant après le renversement temporel, il est possible de localiser un réflecteur. Quelques autres techniques ont été développées dans le passé, mais pour la plupart d'entre elles, n'avaient pas l'objectif de l'imagerie en temps réel, car elles dépendent de la forme du matériau et de la résolution de l'image.

L'imagerie apporte plusieurs contraintes et décisions dans le choix entre la vitesse de rafraîchissement ou la résolution d'affichage. Certaines techniques donnent une image de bonne qualité, mais demandent beaucoup de temps pour parvenir à ce résultat, alors que d'autres permettent une estimation moins précise en peu d'opérations.

2.1.1 Ondes guidées

Les ondes guidées ont la propriété de rester confinées dans une surface mince et de pouvoir voyager sur de longues distances. Également, elles peuvent se propager dans une surface courbe, ce qui les rend bien adaptées pour l'inspection ultrasonique d'avions, de missiles, de cuves sous pression, de pipelines, etc. Dans les surfaces plates, les ondes voyagent comme ondes de Lamb ou ondes de cisailment horizontal. Comme la figure 2.1 le montre, les deux types d'onde peuvent être symétriques ou asymétriques par rapport au centre de la plaque [Giurgiutiu, 2006]. À partir de ces ondes, des techniques existent pour extraire l'information de la surface dans laquelle elles ont voyagé.

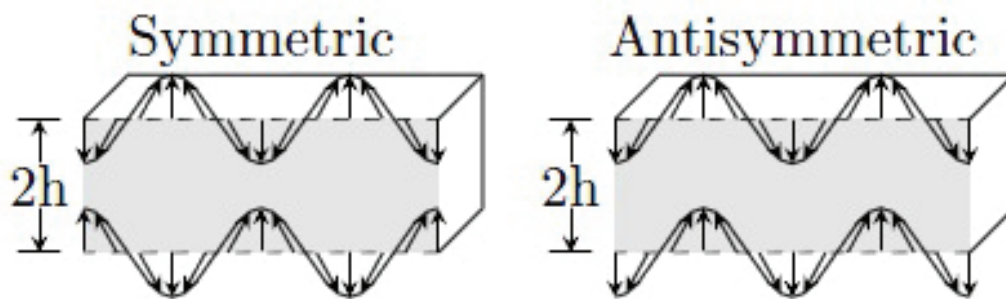


Figure 2.1 Ondes de Lamb symétriques et asymétriques [Ing et Fink, 1998]

Dans l'article de [Yu et Giurgiutiu, 2008], plusieurs piézoélectriques sont utilisés afin de former des antennes actives avec différentes directivités (PWAS). Ces antennes génèrent des ondes guidées qui permettent de faire de l'imagerie de surface. Selon la forme et la quantité d'éléments dans l'antenne, il est possible d'être sélectif dans la direction vers laquelle la plaque est sondée. Afin de surveiller un endroit précis, cette technique est très efficace selon les résultats. Cette technique ne permet pas d'étudier aussi précisément une plaque entière de façon rapide et égale. Elle nécessite beaucoup de pièces (PZT, fils et électronique de traitement) pour émettre et analyser les ondes. Avec une transformée discrète ou continue en ondelettes, le bruit est éliminé de façon considérable. D'autres résultats montrent que la technique permet de détecter deux défauts distincts de différentes dimensions et même mesurer ces dimensions.

2.1.2 *Embedded Ultrasonic Structural Radar (EUSR)*

De façon pratique, l'algorithme EUSR consiste à utiliser l'information générée par des éléments piézoélectriques qui agissent comme émetteurs et capteurs en mode à tour de

rôle (*round-robin*). Un seul émetteur à la fois envoie l'onde et les autres agissent comme récepteurs passifs. Les échos sont reçus et analysés pour obtenir une image. Il s'agit ici d'un mode *pitch and catch*, mais le cas où l'émetteur change de mode et écoute après avoir émis une onde est désigné mode pulse écho. L'algorithme permet de calculer d'avance une matrice contenant tous les temps de propagation d'une réflexion pour un endroit donné sur une plaque selon l'émetteur et le récepteur. Le principe est de prendre la valeur de l'amplitude de l'onde reçue à chaque temps calculé pour tous les émetteurs. Après avoir additionné ces amplitudes et compensé les pertes selon la distance, une carte contenant les défauts de la plaque est obtenue [Yu et Giurgiutiu, 2005].

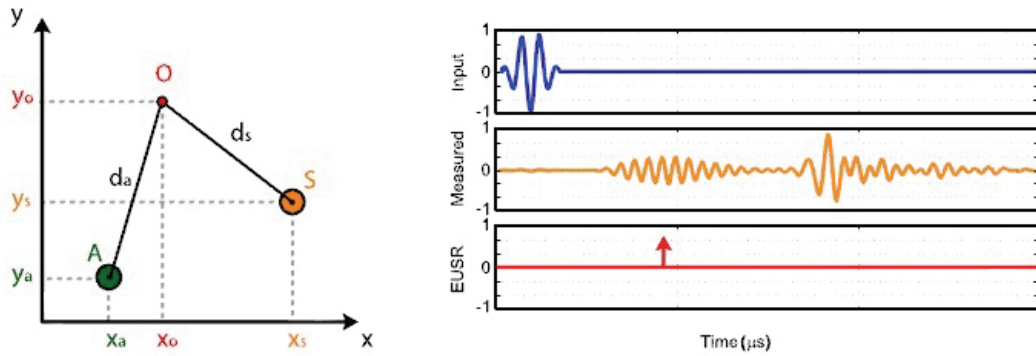


Figure 2.2 Exemple de détection et principe EUSR avec les ondes de l'émetteur et du récepteur [Quaegebeur *et al.*, 2011]

Avec les formules suivantes, la position des réflecteurs peut facilement être calculée.

$$d_a(x_o, y_o) = \sqrt{(x_o - x_a)^2 + (y_o - y_a)^2} \quad (2.1)$$

$$d_s(x_o, y_o) = \sqrt{(x_o - x_s)^2 + (y_o - y_s)^2} \quad (2.2)$$

Dans la figure 2.2, le cercle A représente l'émetteur, O le dommage et S le récepteur, et il est possible de voir la distance totale à calculer pour la réflexion. Il s'agit d'un algorithme très rapide vu sa simplicité. Par contre, il ne tient pas compte de la déformation de l'onde et effectue une corrélation seulement avec le point le plus important. Il faut également ajuster la fréquence afin d'avoir un seul mode, de préférence le mode S0 qui est moins dispersif que le mode A0 [Quaegebeur *et al.*, 2011].

2.1.3 Excitelet

Excitelet est un algorithme semblable à EUSR, mais au lieu de faire une corrélation en un seul point, il calcule la dispersion théorique du signal, puis il en fait la corrélation avec le signal reçu [Quaegebeur *et al.*, 2011]. La matrice contient les signaux après dispersion

à chaque point de réflexion. Il faut connaître les propriétés du matériau pour obtenir une image représentative contrairement à EUSR qui nécessite seulement la vitesse de groupe. Le temps de calcul est plus long, mais augmente les performances de détection. Une possibilité pour réduire les calculs est d'utiliser le signal émis pour la corrélation sans calculer sa dispersion. Dans le cas de la figure 2.3, quatre céramiques piézoélectriques sont utilisées (en bleu) et deux masses identiques (en rouge) sont déposées sur la surface. La mesure EUSR fait apparaître les zones de pression mais l'intensité relative de chacune diffère alors que la cartographie avec Excitelet fait apparaître clairement les deux zones de pression avec une intensité égale.

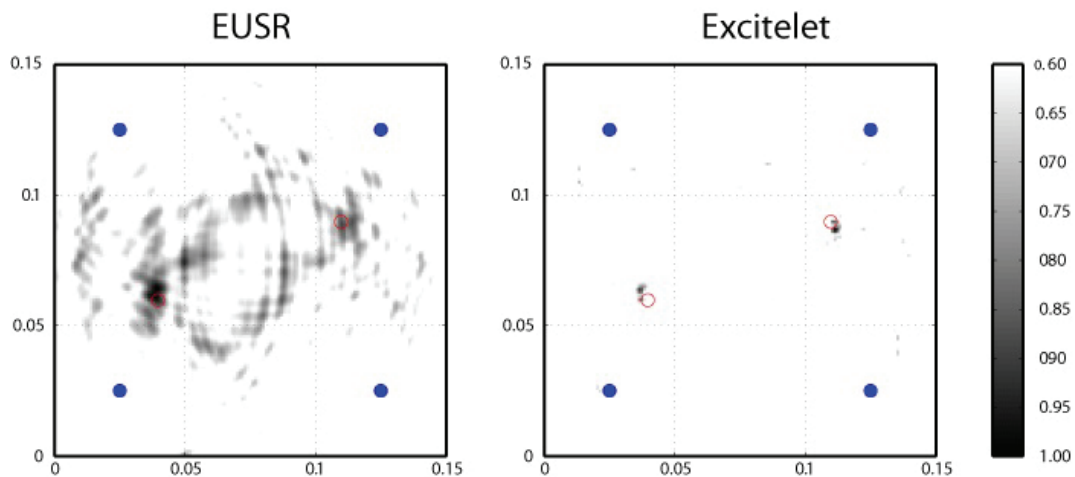


Figure 2.3 Imagerie avec EUSR et Excitelet [Quaegebeur *et al.*, 2011]

2.1.4 Retournement temporel

Le principe du retournement temporel est assez simple et permet de détecter la présence d'une anomalie dans une plaque [Ing et Fink, 1998].

1. Une onde de Lamb est émise d'un piézoélectrique A dans la plaque et reçue à un piézoélectrique B.
2. Le signal reçu en B est retourné dans le temps ($V(t) \rightarrow V(-t)$).
3. Le signal retourné est envoyé de B vers A.
4. Le signal à A est retourné et comparé avec l'original.

Dans le cas où la plaque est intacte, la corrélation entre les deux signaux va être élevée puisque le signal n'aura pas été déformé. En utilisant plusieurs transducteurs, le ou les

défauts de la plaque vont être détectés tout comme leurs positions. La précision du positionnement dépend de la quantité de transducteurs utilisés. Un avantage de cette technique est qu'elle compense les effets de dispersion du signal comme le présente la figure 2.4. Également, aucune mesure de base n'est nécessaire pour utiliser cette technique et elle

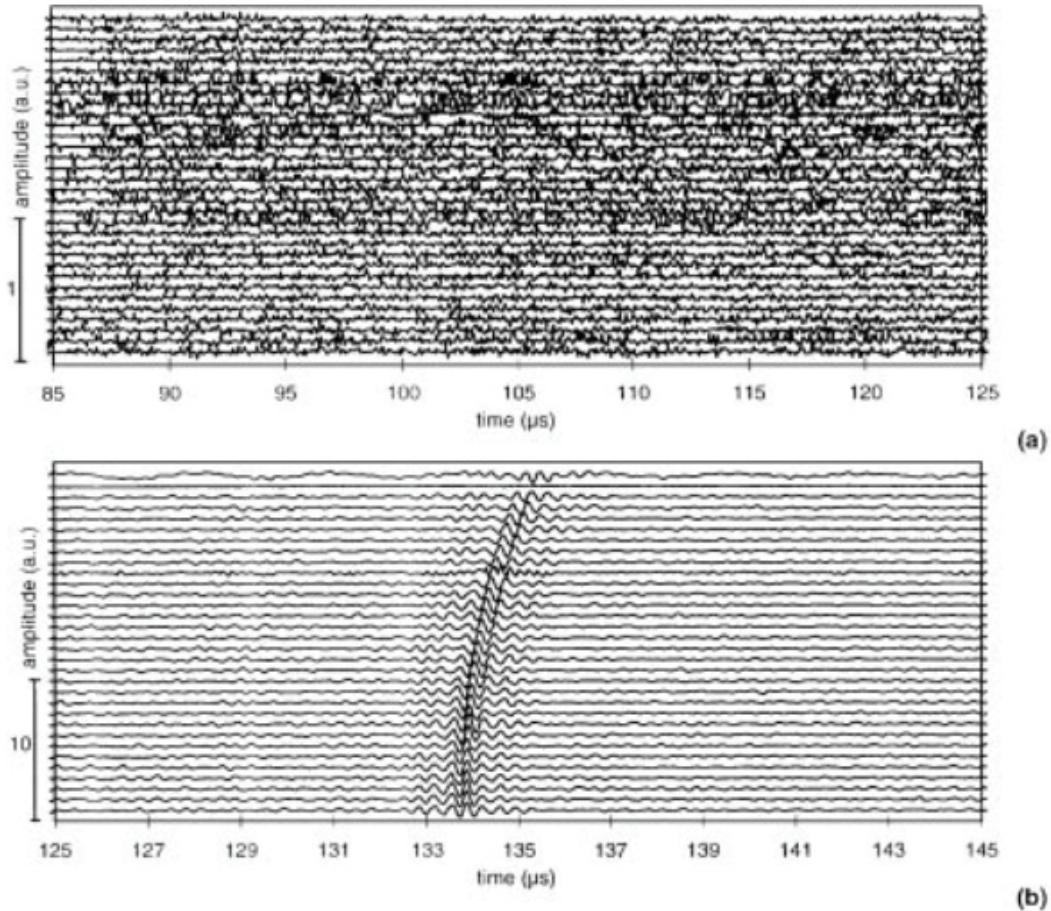


Figure 2.4 (a) Signaux aux 32 récepteurs B après excitation, (b) Signaux en A après revirement temporel [Ing et Fink, 1998]

peut détecter plusieurs défauts. Par contre, le temps d'exécution est plus long puisqu'un aller-retour des signaux est requis. Il faut aussi beaucoup de transducteurs pour obtenir une image précise. La figure 2.5 montre le processus où l'onde est émise dans une plaque, retournée et réémise.

2.1.5 *Damage Index*

D'autre part, l'article [Lallart *et al.*, 2012] tente de solutionner le problème de consommation relié au système portatif et utilise un algorithme diminuant la demande en quantité d'opérations et de puissance. La technique *Damage Index* utilise les ondes de Lamb pour

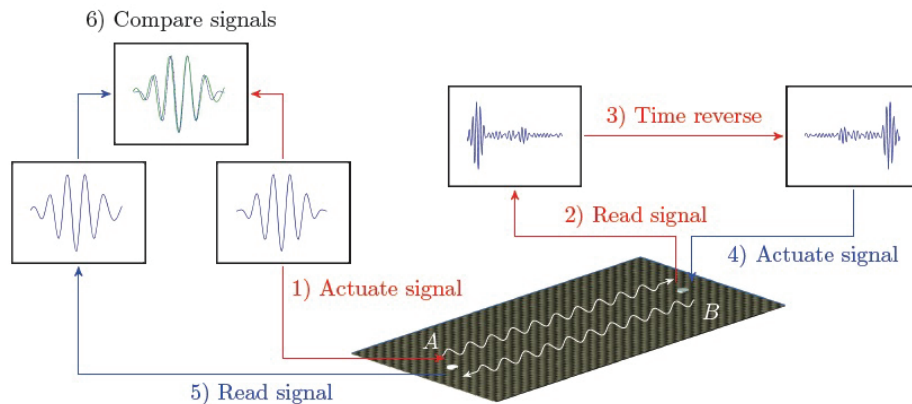


Figure 2.5 Processus du retournement temporel [Ing et Fink, 1998]

inspecter l'état d'une structure. En observant les changements de l'onde dans la structure, il est possible de détecter une modification significative qui indique un bris. Le principe demande très peu d'énergie puisqu'une vérification ne demande pas de calcul d'imagerie et ne s'effectue pas à plusieurs reprises. Un système embarqué de génération d'énergie utilisant les vibrations est suffisant pour faire les calculs et émettre un paquet d'ondes à intervalles réguliers. La figure 2.6 montre le fonctionnement de l'algorithme qui compte le nombre de pics dépassant un seuil fixé et le déphasage par rapport à la mesure originale.

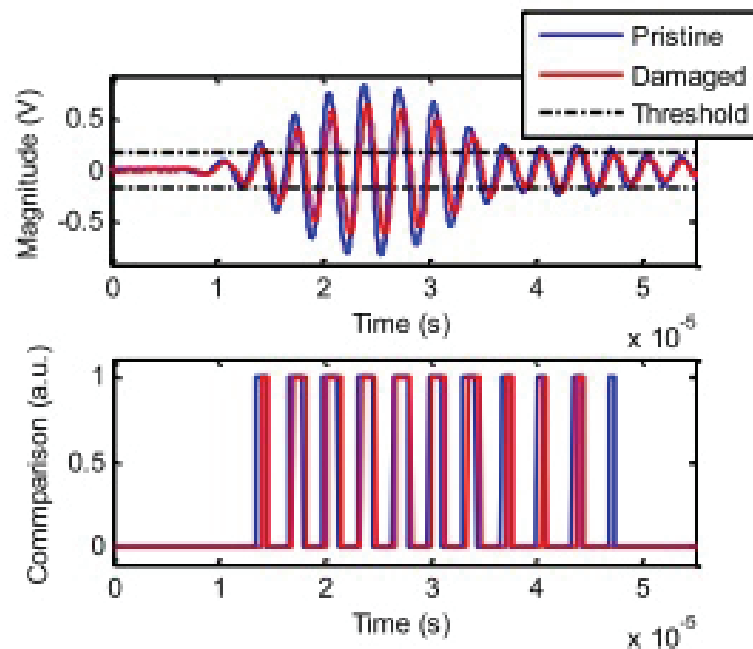


Figure 2.6 Principe du *Damage Index* [Lallart *et al.*, 2012]

Cet algorithme n'est pas applicable au présent projet puisqu'il n'y a pas localisation du défaut. Les considérations énergétiques restent tout de même intéressantes.

2.2 Traitement d'images

Dans cette section, plusieurs façons d'améliorer la qualité des signaux mesurés et des images sont discutées. Dans le cas présent, du bruit dû aux réflexions sur les parois est présent dans le signal, ce qui réduit les performances du système et il faut tenter de l'éliminer ou de l'utiliser. Également, les capteurs ne sont pas collés uniformément et l'électronique bruite les signaux, ce qui induisent des erreurs et déforme les paquets d'ondes. Avec les techniques d'imagerie actuelles, des arcs de cercles non-pertinents sont présents dans l'image et peuvent entraîner de fausses détections.

2.2.1 Filtrage

Le filtrage est souvent utilisé pour réduire le bruit et améliorer les images, ou pour mettre en valeur les éléments importants d'une image et enlever les anomalies. Dans l'application présente, le paquet d'ondes est à une fréquence connue et le mode S_0 est peu dispersif, ce qui permet d'éliminer avec un filtre étroit les autres fréquences.

Filtre médian

Le filtre médian permet de réduire le bruit aléatoire des images en enlevant les pixels qui ont des valeurs extrêmes comparativement à la valeur médiane des voisins. Ce type de correction est utile dans le cas où des images plus petites que ce qui doit être détectées ou lorsqu'il y a du grésillement. Par contre, la technique pour mettre en œuvre l'algorithme est longue puisqu'il faut parcourir la matrice de pixels en entier et vérifier les N voisins de chacun et en prendre la médiane. Dans le cas où l'objectif est la vitesse de traitement pour un projet en temps réel, il est mieux d'éviter ce filtrage.

Filtre Wiener

Ce filtre sert à retirer le bruit qui est introduit dans le signal en utilisant une approche statistique. Le principe est basé sur une convolution et est très complexe pour être appliqué sur un système embarqué. Les résultats obtenus sont similaires à celui d'un seuillage, mais sont tout de même intéressants vu le point de pression qui est clairement défini. La figure 2.7 montre les effets d'un filtre médian et de Wiener sur un résultat typique en imagerie par ondes guidées. Le filtre médian élimine les pixels d'amplitude isolée alors que le filtre de Wiener retire les arcs de cercle qui encombre l'image.

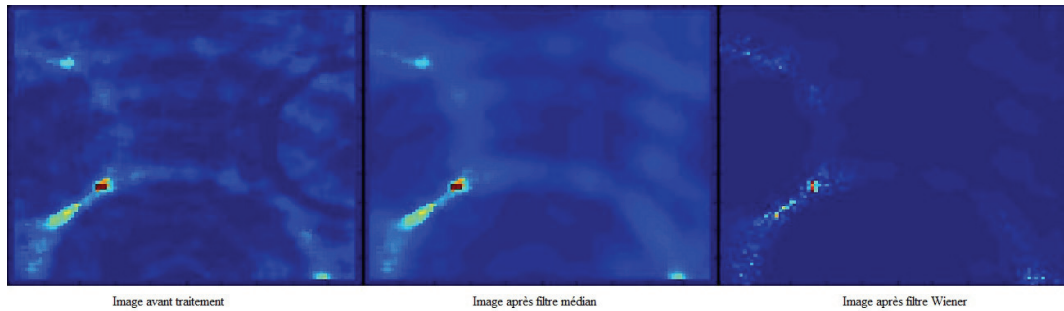


Figure 2.7 Comparaison de l'effet d'un filtre médian et d'un filtre de Wiener

Transformée de Hilbert

La transformée de Hilbert peut être utilisée de façon discrète à différentes fins [Kak, 1970]. Elle peut servir à dissimuler des informations dans un signal ou une image et à les extraire. Il est également possible d'obtenir l'enveloppe d'un signal puisque la transformée consiste à déphaser de $+90^\circ$ les fréquences négatives et -90° les fréquences positives. Ici, la pertinence d'obtenir l'enveloppe du signal est d'avoir un paquet d'ondes uniformes au lieu de plusieurs pics qui réduisent la qualité des images. Avec des techniques simplifiées, soit en doublant et en déphasant le nouveau signal par rapport à l'autre, il est possible d'implanter cette transformée sur un système dédié. Pour $n = \dots -1, 0, 1, \dots$ qui sont les indices des données discrètes $f(n)$, les formules suivantes peuvent être utilisées pour la transformée discrète $g(k)$:

$$g(k) = \frac{2}{\pi} \sum_{n \text{ impair}} \frac{f(n)}{k-n}; \quad k \text{ pair} \quad (2.3)$$

$$g(k) = \frac{2}{\pi} \sum_{n \text{ pair}} \frac{f(n)}{k-n}; \quad k \text{ impair} \quad (2.4)$$

Transformée en ondelettes

Il est possible de filtrer un signal ou une image avec la transformée discrète en ondelettes pour garder une bonne résolution temporelle à haute fréquence et une bonne résolution fréquentielle à basse fréquence. Ce qui veut dire que plus la fréquence est élevée, meilleure sera la résolution temporelle au détriment de la résolution fréquentielle. Le principe consiste à filtrer pour obtenir le signal formé des basses fréquences et un autre signal avec les hautes. En multipliant les itérations, des bandes de fréquences plus étroites sont obtenues. Plusieurs types d'ondelettes existent pour différents traitements. Les plus utilisées sont l'ondelette de Haar et de Daubechies pour les performances et la simplicité [Lu *et al.*, 2006]. En utilisant ce type de filtrage pour des bandes étroites de fréquences, les parties utiles du signal peuvent être extraites [Lu *et al.*, 2006]. C'est une méthode qui peut être effectuée rapidement si une ondelette simple est appliquée et les résultats sont améliorés comme la figure 2.8 le montre. Les signaux après la DWT (*Discrete Wavelet Transform*) et la CWT (*Continuous Wavelet Transform*) sont beaucoup moins bruités. La comparaison entre la transformation en ondelette discrète et continue montre les performances en terme de qualité de traitement. Il est pertinent de comparer les résultats avec ceux d'un simple filtre numérique dans l'application actuelle. La transformée de Fourier peut également être testée puisque la fréquence émise dans la plaque est connue et peut être extraite.

2.2.2 Intelligence artificielle

L'intelligence artificielle est utilisée dans plusieurs domaines afin de simplifier la résolution de problème. Le fait d'utiliser une technique qui peut s'adapter et évoluer selon les besoins diminue grandement la complexité du problème une fois implantée. Dans le domaine du traitement d'images, cela peut être utile pour filtrer, analyser, segmenter, simplifier et améliorer les figures. Il est également possible de traiter des ondes directement avec une des différentes techniques. Les plus connues sont le réseau de neurones, la logique floue et les algorithmes génétiques.

Pour le traitement d'images, le réseau de neurones peut être utilisé pour le filtrage [Rohani et Manry, 1992]. Le résultat est semblable à un filtre médian selon les figures 2.9, mais sans être flou. Le principe du réseau de neurones consiste à appliquer des entrées et indiquer au système qu'elles sorties sont désirées. Les poids entre chaque neurone peuvent s'ajuster automatiquement et donner en sortie le résultat voulu. Beaucoup de contraintes existent

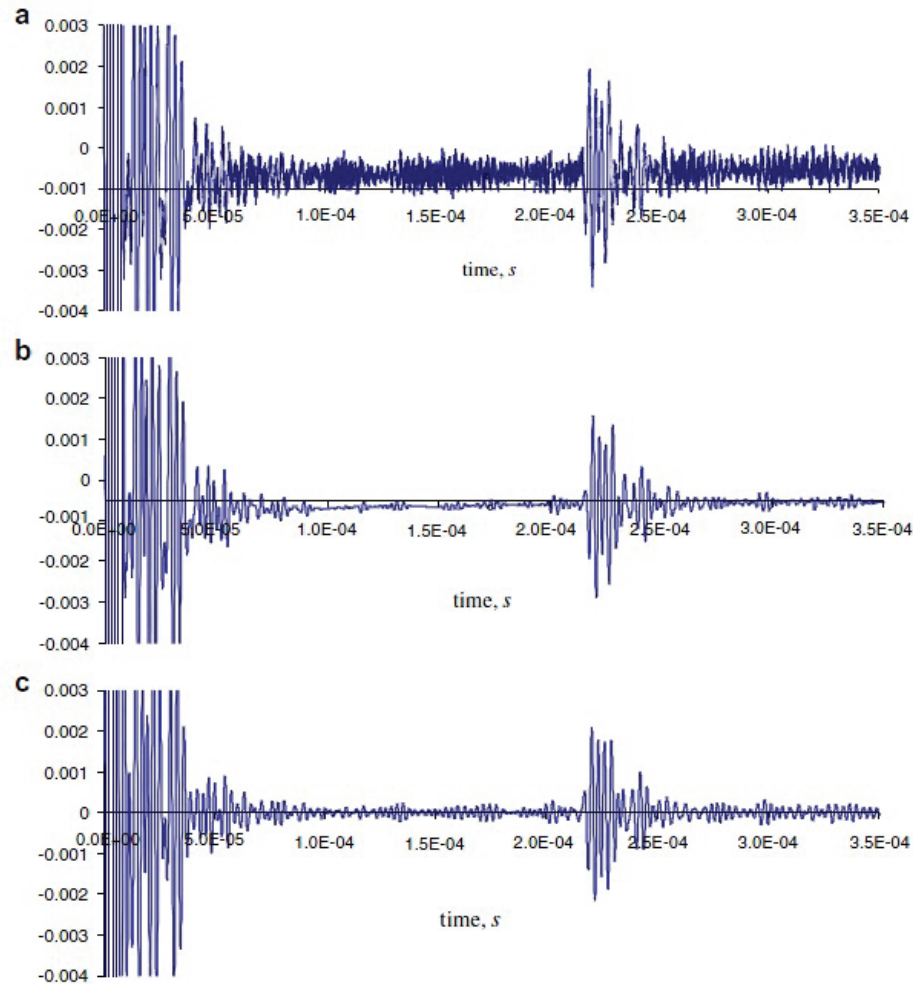


Figure 2.8 Transformée en ondelettes (a) Signal original, (b) Signal après DWT (c) Signal après CWT [Yu et Giurgiutiu, 2008]

dont le nombre de neurones, la structure et le type d'apprentissage. L'implantation dans le cas d'une génération d'image se ferait en utilisant un neurone pour chaque pixel en sortie et les entrées seraient des points d'intérêt dans les ondes. L'entraînement prendrait beaucoup de temps et serait sujet à des erreurs, mais l'exécution serait rapide une fois les poids calculés.

En traitement d'image, il est utile de faire de la détection de contours pour trouver des objets dans un milieu quelconque. Une fois les contours trouvés, soit avec un réseau de neurones ou la dérivée entre les pixels, les formes peuvent être analysées. Plusieurs autres types de détection existent dont la détection de formes particulières comme les coins [Shih *et al.*, 2005]. La méthode consiste à analyser les contours ou les niveaux de gris et à les comparer avec un modèle. Une autre technique utilise la logique floue sur les niveaux de gris. Dans le cas présent, il est intéressant d'utiliser un principe similaire pour trouver

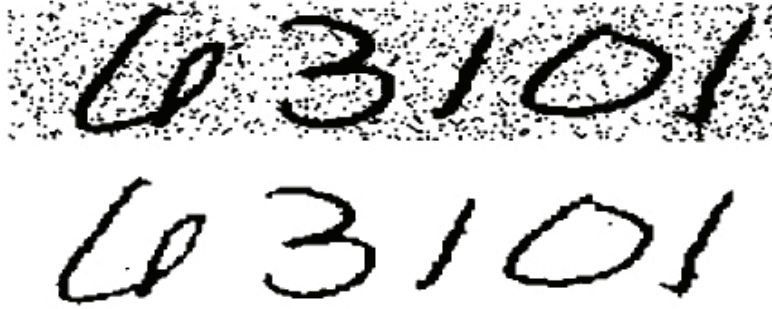


Figure 2.9 Effet du filtre en réseau de neurones [Rohani et Manry, 1992]

les maximums dans les paquets d'ondes reçus. Une fois ces maximums obtenus, un signal simplifié et plus rapide à traiter peut être créé avec seulement l'amplitude et la position des pics. Il est possible ici d'éviter de faire une transformée de Hilbert, ce qui augmente la vitesse de traitement. La détection de contours peut servir sur l'image obtenue pour trouver les points d'intérêts.

2.3 Applications

L'extraction en temps réel de données à partir d'ondes peut être appliquée à de nombreux domaines. Les techniques utilisées sont en développement depuis plusieurs années et sont utiles pour faire l'imagerie de surface ou interne de matériaux. Ici, les applications étudiées sont plus précisément le domaine de l'écran tactile et du NDT (*Nondestructive Testing*).

2.3.1 Écrans tactiles

Cette section discute des différents types d'écrans tactiles et la façon dont la donnée de localisation est extraite. Cela inclut les écrans résistifs et capacitifs largement utilisés dans les produits commerciaux ainsi que les écrans utilisant les ondes acoustiques pour capter les déformations appliquées sur une plaque. La compréhension du fonctionnement actuel des écrans tactiles est essentielle pour bien saisir l'impact de la nouvelle avenue proposée.

Résistif et capacitif

Les écrans résistifs et capacitifs sont les technologies les plus répandues grâce à la grande précision et stabilité qu'elles offrent [Dahlin, 2000]. Ils sont présents dans les applications comme les cellulaires intelligents, les tablettes et les lecteurs audio portatifs. Ces écrans sont peu coûteux et ils ont un principe relativement simple, mais dépendent des propriétés de la surface. Dans le cas de l'écran résistif, deux couches de matrices de fils

conducteurs sont superposées verticalement et horizontalement [Downs, 2005]. Lorsque l'écran est touché, un contact est établi entre certains fils permettant la circulation d'un courant électrique. Les tensions lues dans les colonnes et les rangées permettent de trouver la position du contact, mais pas la force appliquée. Les performances de ce type d'écran peuvent être réduites si la surface est endommagée.

Pour l'écran capacitif, une plaque isolante recouverte d'une couche conductrice est utilisée [Gray, 2009]. Un contact avec la plaque cause une distorsion dans le champs électrique local, soit un changement capacitif. Pour détecter ce changement, des électrodes peuvent être positionnées dans les coins. Le champ électrique sera alors uniforme jusqu'à ce que la plaque soit touchée et que le courant électrique soit modifié dans les électrodes. La figure 2.10 fait référence à l'écran capacitif qui détecte un doigt selon la variation de la capacitance. En utilisant la différence entre ces courants en X et en Y, la position peut être déterminée selon l'amplitude des différences. Une autre technique consiste à installer deux matrices de fils transparents dans une plaque. En installant une matrice horizontale et une autre verticale, le doigt sur la plaque vient modifier la capacitance en X et Y permettant de localiser la pression. Le problème principal est la dérive des courants qui demande une calibration régulière. Par contre, un brevet d'écran sensible à la pression a été développé dernièrement avec un fonctionnement capacitif [Pance *et al.*, 2013]. Cela rend ce type d'écran plus intéressant vu le marché qui est déjà ouvert à la fabrication de cette technologie. Dans l'ensemble, ces écrans demandent des fils conducteurs ou des couches supplémentaires dans la plaque, diminuant ainsi la transparence. Chaque fil conducteur doit être connecté dans un circuit électrique pour lire les modifications de tension ou de courant. C'est un principe simple, mais qui demande beaucoup d'acquisition pour une définition élevée. Pour ce qui est de la fabrication, la production de masse a permis de réduire les coûts malgré la conception délicate en salles blanches.

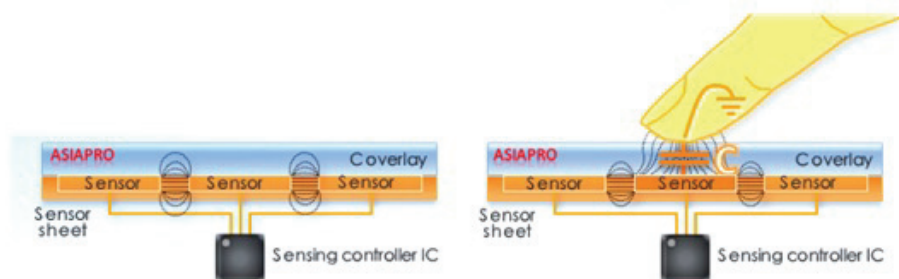


Figure 2.10 Fonctionnement écran capacitif

Ondes acoustiques

Une approche d'écran tactile avec des ondes acoustiques est présentée pour faire un lien avec le présent projet. Avec cette méthode, les ondes émises dans la plaque sont absorbées par la pression appliquée et c'est ce qui est détecté par le système [Kent *et al.*, 2007]. Les ondes sont analysées selon les modifications en amplitude. L'écran tactile de Adler [Adler et Desmares, 1987] utilise des ondes de surface (SAW) générées par des éléments piézoélectriques à une fréquence très élevée, soit entre 4.5 et 6.5 MHz. Le concept utilise un empilement de trois plaques très minces de verre, polystyrène et encore du verre. Pour être utilisable, la surface doit être propre et intacte, ce qui rend le système très sensible aux contaminants (rayures/liquides). L'électronique doit permettre la gestion de l'envoi des ondes pour deux piézoélectriques et l'analyse à la réception. Ce principe peut détecter deux points de contact et il est principalement utilisé pour des guichets automatiques et des applications à l'intérieur.

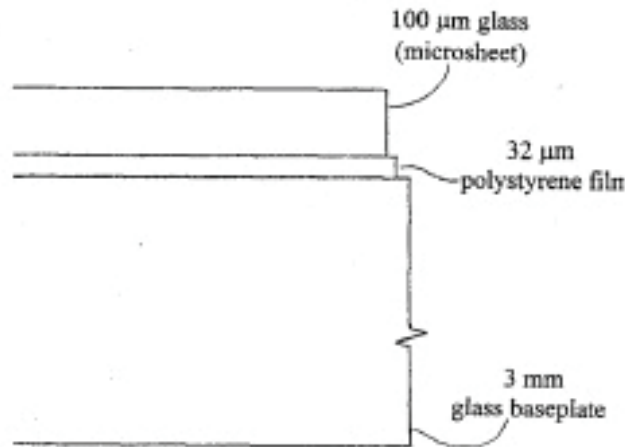


Figure 2.11 Vue en coupe d'un écran tactile de Adler [Kent *et al.*, 2007]

Une autre façon de faire l'imagerie dans des applications d'écrans tactiles consiste à déterminer la différence du temps d'arrivée entre deux signaux mesurés par des éléments piézoélectriques [Reis *et al.*, 2010]. Pour calculer la distance, il utilise un comparateur pour détecter l'arrivée d'une onde. Après avoir fait la différence entre les temps d'arrivée, la vitesse du son est utilisée pour déterminer la position d'appui sur la plaque de verre. Cette technique présente des résultats concluants en même temps que d'être rapide et simple. Le prototype a été testé avec un microcontrôleur, ce qui montre que le principe peut être mis en œuvre sur une petite plateforme. D'un autre côté, la force de pression exercée n'est pas mesurée malgré les informations reçues aux récepteurs. Si une entrée analogique était utilisée au lieu du comparateur, une importante amélioration au système serait faite. L'électronique pour interfacer le piézoélectrique consiste en un amplificateur

différentiel de charge qui sert de filtre passe-bande en plus d'amplifier le signal. Le circuit à la figure 2.12 est simple et peut être utile comme référence future.

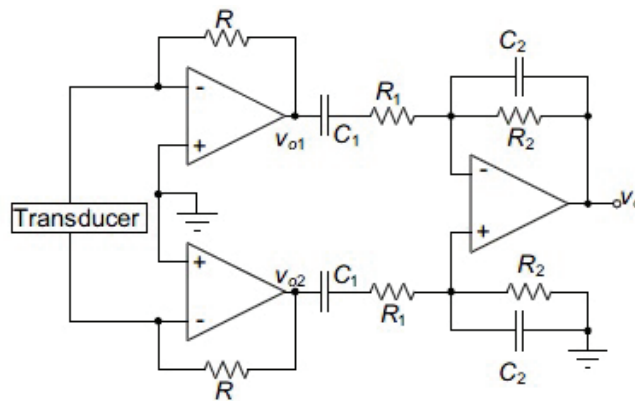


Figure 2.12 Amplificateur de charge modifié [Reis *et al.*, 2010]

Une autre approche utilisant la réflexion des ondes sur une masse ajoutée est décrite dans [Quaeghebeur *et al.*, 2013]. Les travaux sont en lien direct avec le projet puisqu'ils utilisent des piézoélectriques pour émettre et recevoir des paquets d'ondes qui interagissent avec la pression exercée sur une plaque. La sélection du matériau est basée sur la dimension et la masse du contact, soit $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ avec une poids approximatif de 500 g. Une plaque de verre avec une épaisseur de 0.5 mm et une fréquence de 300 kHz ont été sélectionnées pour des piézoélectriques possédant un diamètre de 10 mm. La technique d'imagerie utilisée est une corrélation théorique qui compare les résultats entre le mode A0 et S0 comme la figure 2.13 le montre.

Pour assurer la présence unique des réflexions, la mesure à vide est retirée de chaque lecture. L'approche peut utiliser l'information présente dans les réflexions du défaut et des rebords de la plaque, ce qui élimine le besoin d'absorbant sur le contour. Pour être appliqué à un système en temps réel, le calcul théorique peut s'effectuer à l'avance et seulement les références sont enregistrées dans le programme. Une résolution élevée (haute définition) demande beaucoup de mémoire et une vitesse d'accès rapide, ce qui nécessiterait un ajustement de l'algorithme.

Écran optique

Dans le cas d'un écran tactile utilisant des émetteurs et des récepteurs infrarouges, des rangées et des colonnes sont distribuées au pourtour de la surface [Apperley *et al.*, 1982]. Lorsque les chemins de certains faisceaux sont interrompus par un objet ou un doigt, la position en X et Y est alors déterminée. Avec cette façon de faire, l'écran est complètement

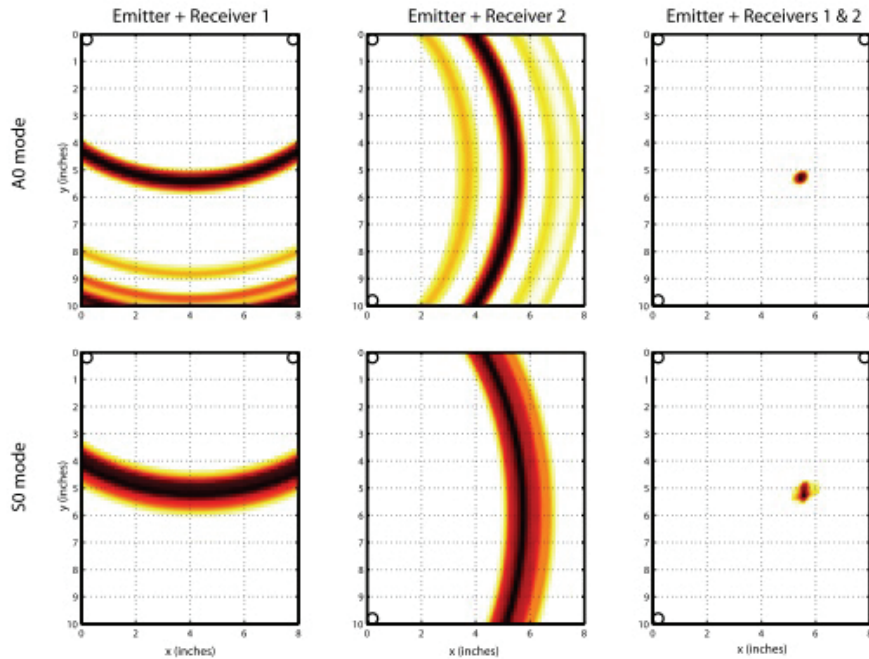


Figure 2.13 Imagerie avec corrélation théorique des réflexions dues au défaut du mode A0 et S0 [Quaegbeur *et al.*, 2013]

indépendant du système tactile, ce qui permet une plus grande liberté dans le choix du matériel. Le système reste très simple, mais est sensible à la lumière environnante qui peut aller jusqu'à l'arrêt du fonctionnement de détection. Le coût est assez élevé, limitant son marché de façon massive. Un autre système utilisant des caméras pour positionner le contact a été développé, mais il présente les mêmes défauts que celui utilisant les infrarouges et ne peut être appliqué à petite échelle. Par ailleurs, la technologie *in-cell* intègre les capteurs avec les cellules d'affichage d'un écran LCD [Hotelling *et al.*, 2012]. De cette façon, l'écran est plus mince, plus léger et moins dispendieux. Les capteurs et l'affichage utilisent la même électrode et sont inclus dans la même couche.

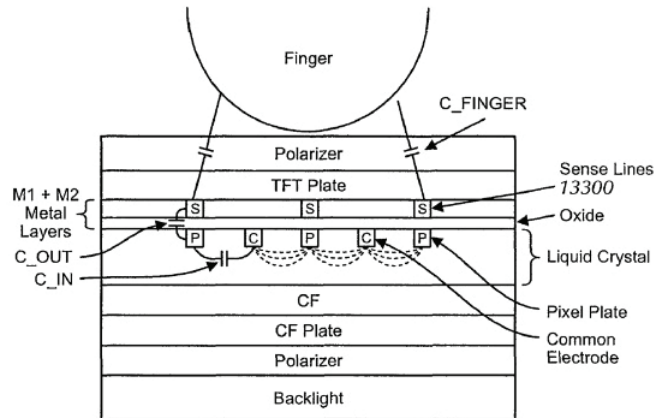


Figure 2.14 Vue en coupe d'un écran avec la technologie *in-cell* [Hotelling *et al.*, 2012]

Développements récents

La technologie la plus utilisée actuellement est la technique de capacitance projetée (P-Cap) [Lee, 2011]. Elle est toutefois limitée pour son expansion et les compagnies se tournent vers l'intégration *in-cell* ou *on-cell* qui s'incruste dans les cristaux LCD. Par contre, le coût de cette nouvelle technologie et leur trop grande fragilité les rendent difficilement viables. Dans ce cas, il est prévu que les techniques *on-cover* (sur la protection) détiendront une part de marché de 33% d'ici 2018. Cela permettrait l'entrée des technologies acoustiques dans le marché.

2.4 Électronique haute vitesse

La quantité de calculs et d'opérations matricielles nécessaires à l'imagerie et au traitement de signal est très élevée. De ce fait, il est important d'avoir une électronique haute vitesse destinée au traitement de signal et possiblement à la parallélisation des calculs. Le fait de vouloir obtenir un flux vidéo ou un positionnement en temps réel demande des algorithmes simplifiés et optimisés. Il faut aussi penser à l'émission de signaux haute tension et adapter la réception de ces signaux. Les pièces sélectionnées devront avoir une précision élevée et pouvoir travailler à des fréquences supérieures à 300 kHz, ce qui est la fréquence qui sera utilisée. Des contraintes en coût et de dimension doivent également être respectées afin d'avoir un produit commercialisable.

2.4.1 Microcontrôleur

Les microcontrôleurs sont des composantes intéressantes pour ce qui est des systèmes embarqués. Ils incluent tout ce qu'il faut pour une application précise dans un même circuit intégré, contrairement aux microprocesseurs auxquels il faut ajouter des modules. Ce principe est peu coûteux et facile à implanter puisque tout le nécessaire est déjà assemblé et fonctionnel, seule la programmation reste et l'ajout de modules supplémentaires. Par contre, la fréquence d'horloge est plus basse qu'un microprocesseur (20-80 MHz) et ne permet pas de faire du traitement de signal à une vitesse élevée. Également, l'architecture interne n'est pas optimisée pour ce genre d'opération ni pour garder un bon synchronisme. Les microcontrôleurs PIC de la compagnie Microchip sont largement utilisés pour les applications à plus basse fréquence. Il existe principalement des architectures 8, 16 et 32 bits dans leur gamme de produits, mais ils ont également des DSPIC qui permettent jusqu'à 70 MIPS (million d'instructions par seconde) servant au traitement audio et au contrôle de moteurs. Ils ont jusqu'à 53248 octets de mémoire RAM et la fréquence d'horloge peut aller jusqu'à 140 MHz.

2.4.2 Microprocesseur

Le microprocesseur est plus versatile qu'un microcontrôleur et il est principalement utilisé à des applications d'ordinateur. Par contre, le *digital signal processor* (DSP) est spécialement conçu pour faire rapidement des opérations mathématiques sur un nombre élevé de données, mais est très spécialisé. De façon normale, les données analogiques sont converties en numérique, puis elles sont traitées. Ce genre de processeur n'est pas fait pour le traitement différé, il doit analyser ce qui entre et le sortir à la même vitesse. Pour ce faire, il est fréquent d'utiliser un FPGA (Field Programmable Gate Arrays) qui gère les données acheminées au DSP [Donglai *et al.*, 2005]. Ce type de combinaison augmente les coûts, mais assure un traitement rapide et stable.

Les microprocesseurs ARM ont une architecture simple et consomment peu d'énergie. De plus, ils ont une gamme de DSP et une librairie pour le traitement de signal. L'utilisation de ces microprocesseurs se fait surtout dans le domaine du téléphone portable, de la tablette et du GPS. Les compagnies Texas Instruments, Motorola et Hitachi offrent également des DSP avec des options de traitement de signal. Le choix est déterminé par le faible coût ou la performance dans tous les cas. À prix égal avec le DSPIC, le DSP de Texas Instruments permet 600 MIPS à une fréquence de 300 MHz et possède 256000 octets de mémoire RAM, ce qui est plus approprié pour une application temps réel. La possibilité d'utiliser un DSP

à virgule fixe ou flottante est également importante dans le choix. Le type virgule fixe est souvent moins cher, moins précis et n'offre pas de plage dynamique.

2.4.3 FPGA

Un FPGA est, à la base, un ensemble de composantes logiques programmables permettant de faire du traitement de données en parallèle. Des fonctions de logique combinatoire et des portes logiques peuvent être implantées pour obtenir un design complet. Plusieurs composantes électroniques externes peuvent être interfacées avec le FPGA comme la mémoire ROM et RAM, des convertisseurs analogiques numériques, des ports de communication et des entrées-sorties configurables. Dans un concept de traitement de données haute-vitesse, un FPGA est utile pour assurer une précision dans les séquences d'acquisitions pour garder un synchronisme constant [Donglai *et al.*, 2005]. De plus, il est possible de traiter plusieurs acquisitions en parallèle permettant d'avoir beaucoup d'entrées. Ce principe est intéressant pour une application en temps réel avec plusieurs piézoélectriques qui répondent en même temps. Un filtrage numérique pourrait être fait par le FPGA pour réduire les coûts des composantes électroniques. D'un autre côté, le coût d'achat d'un FPGA est relativement élevé. Les plus importants fabricants de FPGA sont Xilinx et Altera. L'avantage de Altera par rapport à Xilinx est surtout relié à la performance de ses outils logiciels en terme d'optimisation.

2.5 Temps réel

Le défi principal dans ce mémoire est de mettre en œuvre des algorithmes d'imagerie afin qu'ils génèrent des images à une fréquence élevée. L'utilisateur de l'écran tactile ne doit pas être en mesure de voir de délai dans la vitesse de rafraîchissement, ce qui demande des algorithmes efficaces et des composantes électroniques performantes comme discuté précédemment. D'autres auteurs ont abordé ce sujet pour des applications utilisant également des ondes. Leurs solutions et la façon qu'ils traitent le problème donnent une ligne directrice en ce qui concerne les critères importants pour ce type de système.

[Tanter et Fink, 2014] présentent une solution électronique en présentant les avantages et la puissance de calcul d'un GPU. Une carte graphique GeForce GTX 580 de Nvidia Corp. permet une vitesse de traitement de 1500 GFlops, ce qui dépasse facilement les microprocesseurs. L'algorithme traitant les ondes de cisaillement mis en place demande quelques secondes pour traiter une image, ce qui ne sera plus le cas selon eux dans quelques années lorsque les GPU seront plus performants. Bien que la puissance de calcul soit élevée,

ce n'est pas une option possible pour l'application d'écran tactile qui doit être petit et peu dispendieux. Également, les calculs sont simples et peu nombreux. Il est surtout intéressant de voir qu'une solution en termes de composantes électriques fonctionne bien.

2.6 Sommaire

Les différentes techniques de détection avec l'utilisation d'ondes guidées permettent d'envisager la fabrication d'un écran tactile. Le traitement d'image et des ondes sont des domaines connus qui sont pertinents lors de la programmation embarquée. Les techniques sont robustes, connues et très efficaces ce qui assurera des images de qualités et une bonne performance de détection. De ce fait, le défi est de concevoir un circuit électronique compact ayant la capacité de réaliser une technique de détection en temps réel. Vu la puissance de calcul et les différentes possibilités en terme d'électronique, le projet a un excellent potentiel de réalisation. Le domaine des ondes guidées est en pleine expansion et des projets d'envergure semblables en temps réel ont déjà été fait dans le passé.

CHAPITRE 3

CONCEPTION ET VALIDATION

Ce chapitre décrit la conception complète d'un écran tactile basée sur les ondes ultrasonores guidées et la mise en œuvre de techniques d'imagerie sur un microcontrôleur. L'objectif est d'abord de définir toutes les exigences en termes de matériel pour parvenir à un système capable de traitement en temps réel en utilisant des éléments piézoélectriques. Une première estimation de la mémoire, la vitesse de processeur et la vitesse de conversion a été obtenue avant la sélection des composantes. L'algorithme a été testé sur une puissante plate-forme d'acquisition de données commerciale pour évaluer la performance optimale en termes de positionnement du point de contact. La performance de cette plate-forme est alors dégradée pour simuler un prototype portable plus réaliste et valider les exigences finales du système. Un système embarqué a ensuite été conçu pour tester le concept avec un algorithme utilisant des données expérimentales et pour valider la performance optimale du système nécessaire.

3.1 Cahier des charges

Le cahier des charges donné au tableau 3.1 présente les requis de performance pour chaque aspect de l'écran tactile. Les critères les plus importants sont par rapport à l'émission et la réception des ondes qui doivent rencontrer les exigences finales. Les autres critères sont moins critiques pour la preuve de concept qui sert principalement à tester l'algorithme et le traitement des ondes. La fréquence et l'amplitude des ondes émises doivent rester ajustables afin de tester différentes configurations. La résolution pour la réception de l'onde doit être fine puisque l'onde est très atténuée. Une bonne gestion du bruit lors de la lecture est primordiale pour ne pas noyer le signal dans le bruit. La mémoire minimale concerne uniquement le prototype dans le but de tester l'algorithme, mais est insuffisante pour un produit complet. Le calcul pour le test se base sur une fréquence d'échantillonnage de 1 MHz, 500 ms de signal et une grille 10×10 . De cette façon, une mémoire minimale de 50 kbytes est requise ($1 \text{ MHz} \times 500 \times 10 \times 10$) pour mettre en mémoire 100 références de un octet. La fréquence de traitement peut varier selon plusieurs facteurs. Afin de laisser une certaine liberté, une fréquence de 300 MHz est indiquée, mais reste très flexible. La fréquence de transmission établie permet la transmission d'une image de 200×200 à une cadence de 25 images/seconde, ce qui est amplement suffisant pour le prototype.

Tableau 3.1 Cahier des charges pour le prototype d'écran tactile

Fonctions	Critères	Niveaux	Flexibilité
Émettre des ondes acoustiques	Amplitude	5 à 100 V	±1 V
	Fréquence	300 kHz	±100 kHz
Recevoir des ondes acoustiques	Résolution	6 mV	±5 mV
	Échantillonnage	1 MHz	Minimum
Garder en mémoire des références	Mémoire	52 Kbytes	Minimum
Analyser les ondes acoustiques	Fréquence d'opération	300 MHz	±200 MHz
Générer une image à partir des ondes acoustiques	Fréquence	25 images/seconde	0
	Résolution	0,5 cm	0
Transmission d'image	Vitesse de transmission	1 MHz	Minimum

3.2 Approche des ondes guidées pour les écrans tactiles

Actuellement, l'utilisation d'ondes ultrasonores dans les matériaux est très courante pour l'inspection structurale et peut avoir de nombreuses autres applications. Pour cette raison, des techniques utilisant des ondes guidées pour détecter les défauts sur une structure sont élaborées et discutées dans cette section. L'exploitation et la caractérisation de ces ondes sont des sujets en plein essors dans la communauté scientifique. Étant donné que les ondes acoustiques sont bien connues, une stratégie peut être envisagée pour créer un écran tactile. Plus précisément, les ondes de Lamb sont utilisées dans les surfaces minces et se propagent bien dans certains matériaux. Elles peuvent être générées avec une certaine fréquence et reçues par des éléments piézo-céramiques collés à la surface. En fonction de la fréquence et du mode générés, les ondes peuvent traduire un endommagement [Alleyne et Cawley, 1992] de la surface. Avec l'utilisation des réflexions, des techniques d'imagerie peuvent identifier la position du dommage et son amplitude. Pour un écran tactile, le défaut est représenté sous la forme d'une masse ajoutée [Quaegebeur *et al.*, 2013], qui est un doigt ou toute masse qui entre en contact avec l'écran.

Il y a de nombreux avantages liés à l'utilisation des ondes de Lamb par rapport aux technologies actuelles tels que :

- la réduction du nombre de composantes (peut descendre à un seul récepteur-émetteur piézo-céramique) ;

- la flexibilité de la résolution qui dépend de la précision du convertisseur analogique-numérique et peut être ajusté par l'algorithme ;
- la taille de l'écran tactile affecte le prix de fabrication que dans une très faible mesure ;
- la pression appliquée est mesurée précisément.

Une illustration des réflexions dans une plaque avec un seul contact est présentée à la figure 3.1. L'émetteur envoie une impulsion dans la plaque qui se propage et se reflète sur les bords et le point de contact. Pendant ce temps, le récepteur reçoit toutes les données avec un certain retard en raison de la vitesse de propagation. Tous les signaux reçus peuvent être utilisés pour trianguler l'endroit où se trouve le contact.

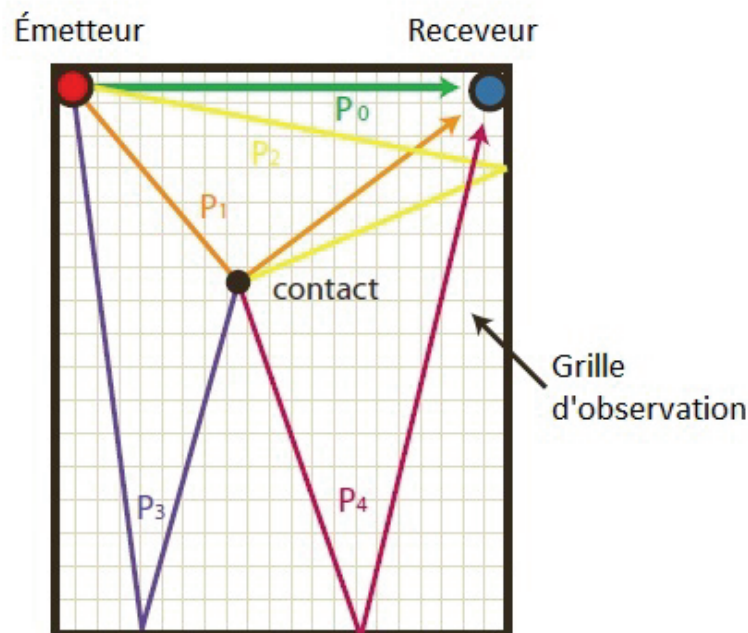


Figure 3.1 Réflexions d'ondes dans une plaque

Pour utiliser toutes les informations obtenues dans le signal, une approche expérimentale est utilisée. Cette technique détermine tout d'abord une grille de pixels pour une plaque donnée et enregistre une référence pour chaque pixel prémesuré. Une corrélation normalisée est réalisée pour un signal reçu avec toutes les références pour obtenir une image [Quaegebeur *et al.*, 2013]. Les organigrammes présentés dans la figure 3.2 illustrent l'algorithme qui est composé de deux parties. La Partie I est l'acquisition des signaux de la base de données où une pression est appliquée sur chaque pixel un à la fois. Une référence

est créée pour être par la suite soustraite aux signaux reçus. La différence entre les deux signaux est ensuite enregistrée dans une base de données qui sera utilisée pour l'imagerie. La Partie II est l'imagerie en temps réel où la différence entre le signal reçu et la référence est corrélée avec les signaux de la base de données précédemment enregistrée.

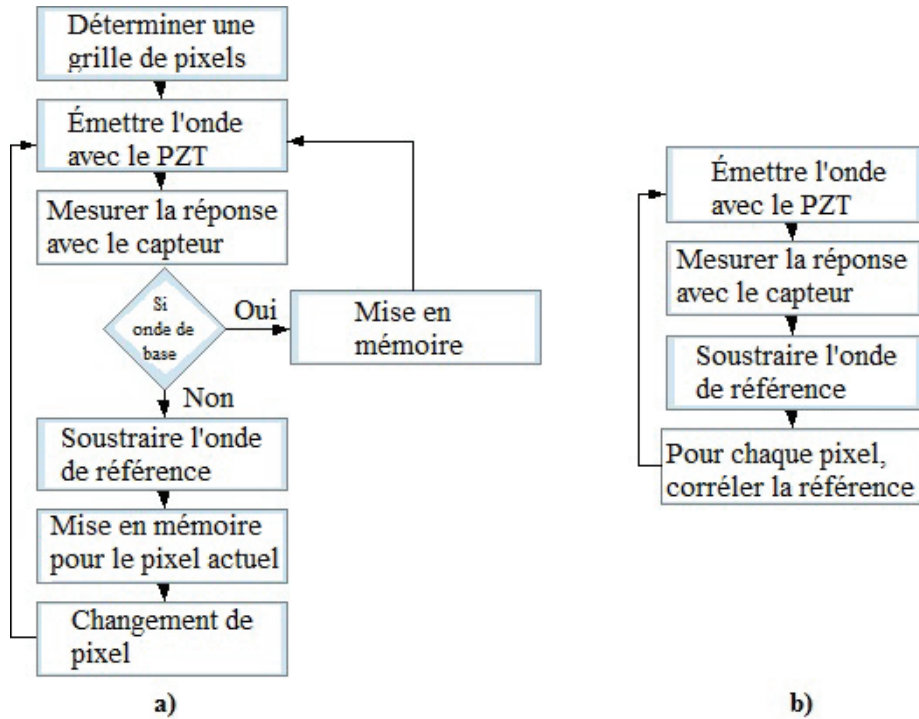


Figure 3.2 Schémas de l'algorithme de corrélation a) Partie I : Algorithme pour obtenir la base de données de chaque pixel ; b) Partie II Imagerie par corrélation

La corrélation est simplement définie à l'équation. (3.1) :

$$P(x, y) = \frac{\sum_{i=0}^n W_i R_i(x, y)}{\sum_{i=0}^n W_i \sum_{i=0}^n R_i(x, y)} \quad (3.1)$$

où P est le coefficient de corrélation de chaque pixel, n est la longueur du signal de corrélation, W représente le signal mesuré à l'aide des capteurs que l'on veut mettre en corrélation au cours de la deuxième partie de l'algorithme, R sont les références à partir de la base de données représentant chaque pixel obtenu dans la Partie I. La corrélation d'un signal complet composé d'un grand nombre d'échantillons prend du temps, ce qui peut être réduit en ne gardant qu'un certain nombre de maxima et leurs positions à partir des références. La corrélation se compose désormais d'un nombre réduit d'opérations et la base de données nécessite moins de mémoire. Ces maxima doivent être normalisés les uns par rapport aux autres pour ne pas être biaisés.

3.3 Algorithme

Afin d'obtenir un niveau de pression et la position d'un réflecteur dans une plaque, un algorithme de corrélation est utilisé. Un signal de référence reçu par chaque capteur à vide est enregistré afin d'être retiré de chaque mesure et ainsi obtenir seulement les perturbations du matériau. Le signal reçu est corrélé avec tous les signaux pré-enregistrés comme décrit par le code suivant :

```
ImageBase=ones(Nunits,Definition,Definition);

for unit=1:Nunits
for defX=1:Definition
for defY=1:Definition
Image(unit,defX,defY)=sum((Wave(unit,defX,defY,:))').*(signal(unit,:));
end
end
end
```

où *Wave* représente la base de donnée des ondes préenregistrées, *signal* est le signal obtenu une fois la *baseline* retirée et *Image* enregistre l'image pour chaque piézoélectrique.

3.4 Configuration et procédure expérimentale

Dans cette section, la configuration expérimentale pour valider le nouveau concept d'écran tactile est décrite. Dans un premier temps, la contrainte de temps réel a été enlevée pour déterminer les paramètres optimaux à utiliser et valider l'algorithme. Les paramètres à déterminer sont les dimensions des éléments piézocéramiques, les propriétés de la plaque, la vitesse d'échantillonnage du convertisseur analogique-numérique et sa résolution, la fréquence de l'onde et le nombre de cycles.

Afin d'obtenir une base de données représentative des signaux de référence pour l'algorithme de corrélation expérimentale, une configuration optimale est souhaitée. Pour cette raison, une plate-forme de banc d'essai a été conçue et construite, comme le montre la figure 3.4, afin d'appliquer une masse à des endroits précis sur la plaque. Les deux piézo-céramiques sont identifiés par le numéro 4 : l'un est l'actionneur et l'autre est le récepteur. Cette plate-forme permet la création d'une base de données où des signaux de référence sont fiables. Pour la preuve de concept, un puissant système *off-the-shell* d'acquisition de données a été utilisé pour l'émission et la réception des ondes de Lamb, dont la configu-

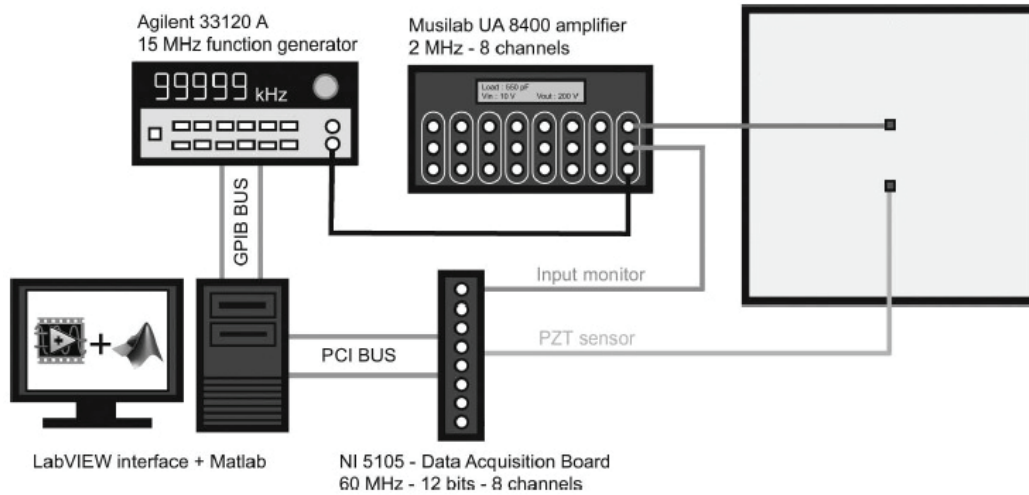


Figure 3.3 Configuration du système d'acquisition des données

ration est présentée à la figure 3.3. La précision et la vitesse du système permettent une acquisition à 60 MHz avec une résolution de 12 bits. Grâce à cela, de petits réflecteurs (0.5 mm) sur une plaque peuvent être détectés et analysés. En outre, le système offre la possibilité de modifier les paramètres d'acquisition pour tester l'effet sur les résultats.

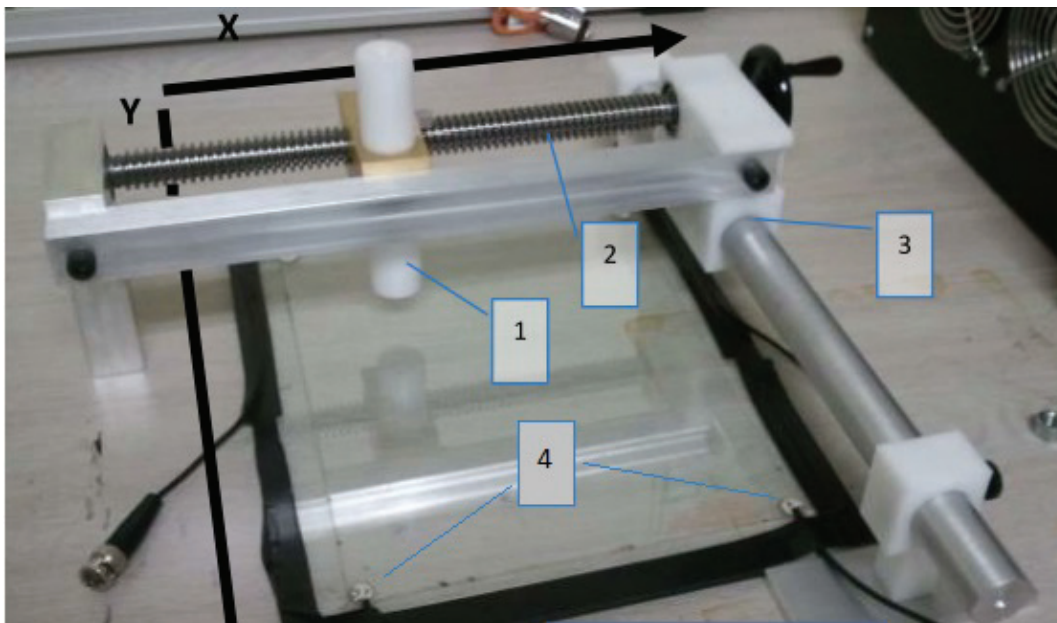


Figure 3.4 Photographie du prototype avec le banc d'essai (1 : axe Z, 2 : axe X, 3 : l'axe Y, 4 : PZT)

Pour ce prototype, une plaque de verre rectangulaire 203× 254 mm d'épaisseur de 500 um est utilisée. Ce verre est mince et robuste pour répondre aux besoins d'un système réel tel que testé par [Quaegebeur *et al.*, 2011]. Un actionneur et un capteur sont montés à l'aide

de colle cyanoacrylate. Des piézocéramiques circulaires de 10 mm de diamètre sont utilisés pour cette question [Quaegebeur *et al.*, 2012] tout en permettant de garder une dimension restreinte. Un diamètre plus petit peut également être utilisé dans le futur puisque cela n'a pas beaucoup d'impact sur l'algorithme utilisé. Le système commercial pour la génération du signal et la réception est une plate-forme FPGA (NI PXI-5105 de National Instruments monté en PCI). La fréquence du signal d'excitation envoyé à l'actionneur est déterminée en utilisant les courbes de dispersion simulées pour cette plaque et représentés sur la figure 3.5. Cela conduit à un choix de 3,5 cycles centrées à 350 kHz, ce qui donne une longueur d'onde de 1,5 cm. A0 et S0 sont les seuls modes présents et ils sont dans une région où la dispersion est très faible comme le montre la figure 3.5 où la vitesse de phase varie d'environ km/s sur une plage de 100 kHz.

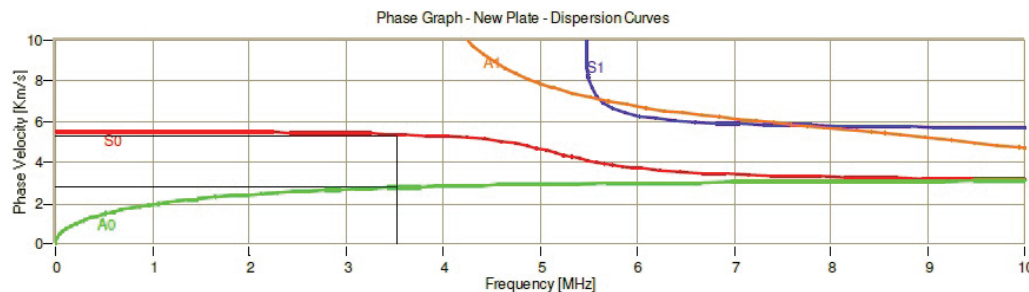


Figure 3.5 Vitesse de phase pour une plaque de verre de 0,5 mm d'épaisseur

3.5 Résultats expérimentaux

En utilisant l'installation précédemment décrite avec un seul piézocéramique en tant que récepteur, des images de réflecteurs dans la plaque sont obtenues avec l'algorithme de corrélation expérimentale. Toutes les références ont d'abord été mesurées et enregistrées pour chaque pixel en utilisant la figure 3.2 a) de l'algorithme. Afin d'identifier l'emplacement du point de contact, le niveau de chaque pixel de corrélation est calculé par l'équation 3.1 et la valeur la plus élevée correspond à la localisation du point de contact. Trois masses différentes sont appliquées au même point pour montrer le niveau croissant de la corrélation avec le poids croissant. Ceci peut être observé à la figure 3.6 avec le niveau de couleur du pixel (21,34) où la résolution en pixels est de 0,5 cm. Les masses de gauche à droite de la figure 3.6 sont respectivement 88 g, 335 g et 678 g. Avec ces résultats, la faisabilité du système d'écran tactile compact est démontré puisque le point de contact peut être détecté et le niveau de corrélation linéaire selon la masse peut être observé.

Une autre considération importante dans la mise en œuvre d'un écran tactile est la possibilité de détecter plus d'un réflecteur. La figure 3.7 présente un test simple utilisant les

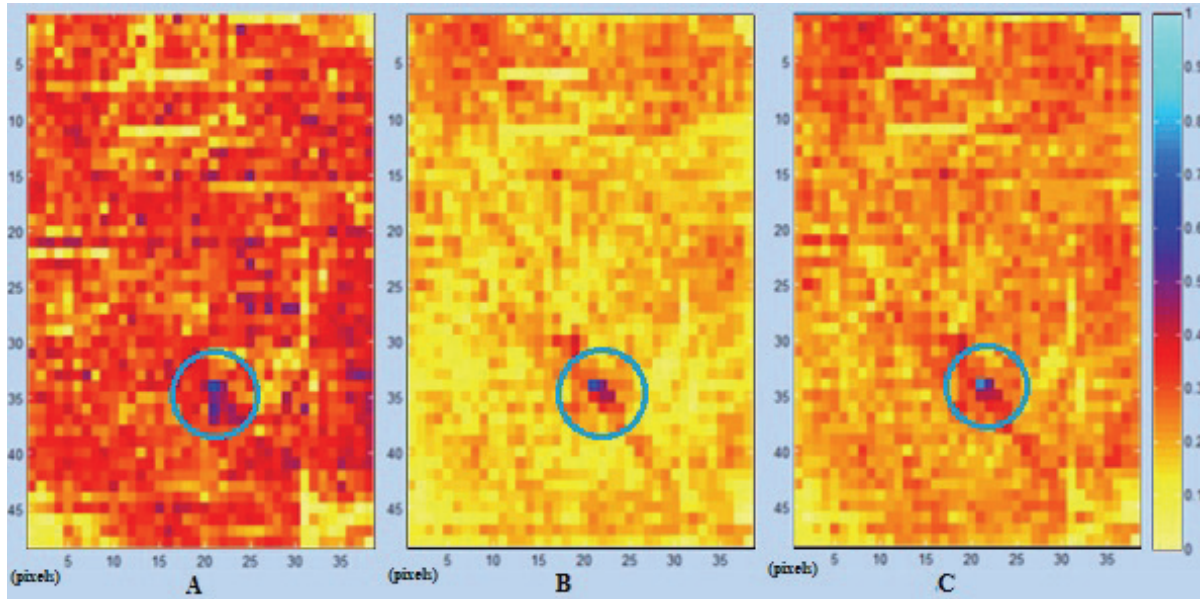


Figure 3.6 Résultats de l'imagerie à l'aide de la configuration optimale pour 88 g (A), 335 g (B) et 678 g (C) masses avec l'algorithme de corrélation

paramètres précédents avec deux masses différentes (335 g et 678 g) en même temps sur la plaque. Aucun algorithme n'est utilisé ici pour différencier les deux masses, il s'agit d'un test de mesure uniquement.

3.6 Influence des paramètres d'acquisition

Afin d'orienter la mise en œuvre de l'approche sur un système compact, la fréquence d'échantillonnage nécessaire et la durée du signal sont à évaluer dans cette section. La fréquence d'échantillonnage détermine quel convertisseur analogique-numérique à utiliser alors que la durée du signal reçu sert au chapitre 4 pour calculer la mémoire nécessaire pour stocker les signaux de référence de la base de données. Pour voir l'impact de ces deux facteurs, le signal mesuré utilisé dans la corrélation a été modifié pour simuler la performance limitée d'un système en temps réel compact. Les paramètres minimaux obtenus en réduisant progressivement la fréquence et la longueur de signal sont une fréquence d'échantillonnage de 1 MHz et une longueur de signal de 0,2 ms. La figure 3.8 présente l'effet de la dégradation des performances du système d'acquisition sur les résultats de l'imagerie. Il est difficile de localiser le point de contact (16,20) où la pression est appliquée en utilisant le système dégradé, mais il est encore possible de le faire, de sorte que le système en temps réel compact est conçu selon ces lignes directrices afin d'en simplifier sa conception.

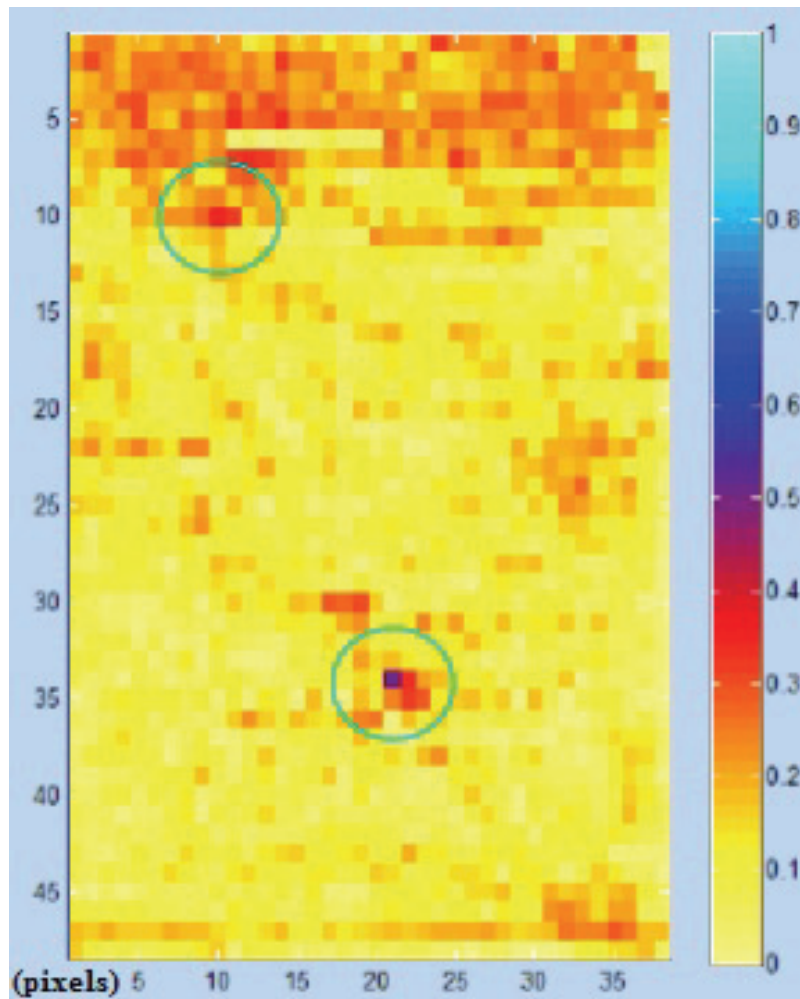


Figure 3.7 Résultat d'imagerie avec deux masses différentes, 335 g à (10,11) et à 678 g (34,21)

3.7 Sommaire

Tous les tests précédents ont été réalisés dans le but de choisir des composants électroniques rencontrant des critères de performance précis. De cette façon, le système compact est assuré d'avoir des performances semblables à ceux testés précédemment. Le défi est de réduire au maximum les dimensions du système tout en gardant suffisamment de puissance de calcul pour obtenir une localisation en temps réel.

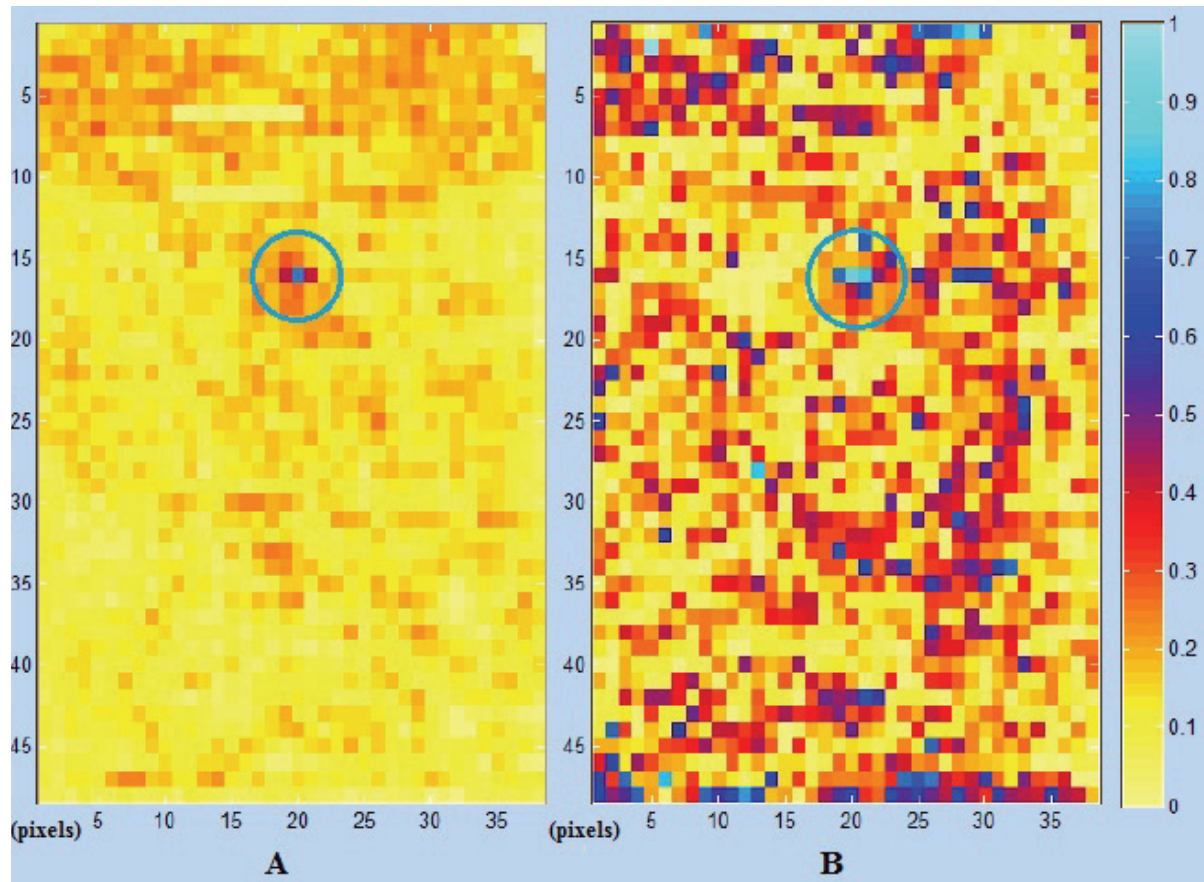


Figure 3.8 Comparaison des résultats en utilisant des conditions optimales (A) et les conditions dégradées (B) en temps réel

CHAPITRE 4

IMPLANTATION SUR UN SYSTÈME COMPACT TEMPS RÉEL

Le chapitre 4 valide le concept d'écran tactile utilisant les ondes guidées dans différentes situations. La performance de localisation est basée sur les paramètres d'acquisition et sert de guide dans le choix des composants. Dans cette section, le concept de l'écran tactile est mis en œuvre sur un système compact intégré en temps réel.

La puissance de traitement nécessaire pour l'imagerie en temps réel en utilisant le système proposé peut être estimée avec le nombre d'opérations par pixel. Le nombre d'opérations et la taille de mémoire nécessaire pour l'algorithme de corrélation dépendent de la longueur du signal. En utilisant un convertisseur analogique-numérique, la fréquence d'échantillonnage détermine le nombre d'octets pour chaque signal mesuré. En se basant sur l'équation (4.1), le nombre d'opérations est estimé en utilisant une addition et une multiplication (deux opérations) pour chaque signal à corrélérer :

$$N_{op} = 2 * (pX * pY) * (L * f_{ADC}) * N_{re} \quad (4.1)$$

où N_{op} est le nombre d'opérations par image, pX et pY représentent le nombre de pixels dans les directions x et y , L désigne la longueur du signal en secondes, N_{re} est le nombre de piézocéramiques en réception et f_{ADC} est la fréquence d'échantillonnage du convertisseur analogique-numérique. Connaissant le taux de rafraîchissement souhaité en temps réel, la fréquence du système doit être au moins N_{op} fois que le taux de rafraîchissement plus le temps d'attente pour le signal à être reçu (typiquement 2 ms pour des résultats optimaux), et le nombre de moyennes. En terme de mémoire, les ondes de référence devant être stockées pour chaque pixel sont une préoccupation importante. L'équation (4.2) estime la mémoire nécessaire en terme d'octets :

$$N_{by} = P_{ADC} * (pX * pY) * (L * f_{ADC}) * N_{re} \quad (4.2)$$

où N_{by} est le nombre d'octets de mémoire nécessaires à l'algorithme et la résolution est P_{ADC} convertisseur analogique-numérique en termes d'octets. Le tableau 4.1 présente la vitesse de traitement et la taille de la mémoire pour les différentes résolutions sur la plaque

de 203 mm × 254 mm. Les équations (4.1) et (4.2) sont utilisées avec un signal de 250 ms, un récepteur, un convertisseur analogique-numérique 1 MHz avec résolution de 8 bits et 25 images / seconde.

Afin de réduire la puissance de traitement et les besoins de mémoire pour le système compact en temps réel, seulement une partie (50 × 50 mm²) de l'écran est analysée avec une résolution de 10 × 10 pixels² (5 × 5 mm²). Avec cette considération, seulement 25 kO de mémoire et environ 50 000 opérations par seconde sont nécessaires pour la corrélation. Un microcontrôleur de développement peu dispendieux et rapide est suffisant pour répondre à ces exigences. Un processeur de signaux numériques dsPIC de la compagnie Microchip est sélectionné pour la conception et son convertisseur interne analogique-numérique est utilisé. La conception complète est décrite à la section 4.1 ainsi que la sélection des composantes.

4.1 Conception du prototype et choix des composantes

Basé sur les exigences présentées ci-dessus, le système compact en temps réel est conçu dans le but de tester des algorithmes d'imagerie en temps réel. Afin de générer et recevoir une onde avec un piézocéramique, l'amplitude et l'impédance doivent être adaptées avec un suiveur de tension.

Plusieurs versions de prototypes ont été conçues et testées pour arriver aux spécifications finales. Une première version incluant un écran sur le circuit imprimé, deux microcontrôleurs, huit alimentations, un convertisseur numérique-analogique (CNA) à la sortie suivi d'un multiplexeur, quatre entrées et quatre sorties a montré que la conception doit être moins complexe pour réduire le bruit et les erreurs possible dans un prototype. La possibilité d'avoir autant de sorties et d'entrées était intéressante, mais peu réaliste dans un système commercial. Les microcontrôleurs ne disposaient pas d'une vitesse de calcul suffisante pour le traitement en temps réel puisqu'ils n'étaient pas adaptés à ce genre d'application. De plus, le temps de communication entre les deux microcontrôleurs (12.5 Mbps) ralentissait beaucoup le processus. Un système parallèle serait plus adapté pour la tâche permettant de transmettre les données en même temps que l'acquisition et faire la

Tableau 4.1 Nombre d'opérations et mémoire pour les résolutions typiques

Résolution (mm)	10x10	5x5	1x1
Nombre d'opérations (M)	0.25	1	25.78
Mémoire (MB)	0.125	0.5	12.89

gestion des ondes. Les composantes sélectionnées étaient, de façon générale, trop volumineuses puisqu'elles ne pouvaient pas être placées dans une aire de 10 cm × 10 cm et trop coûteuses dans l'optique de commercialisation. La figure 4.1 présente le prototype.

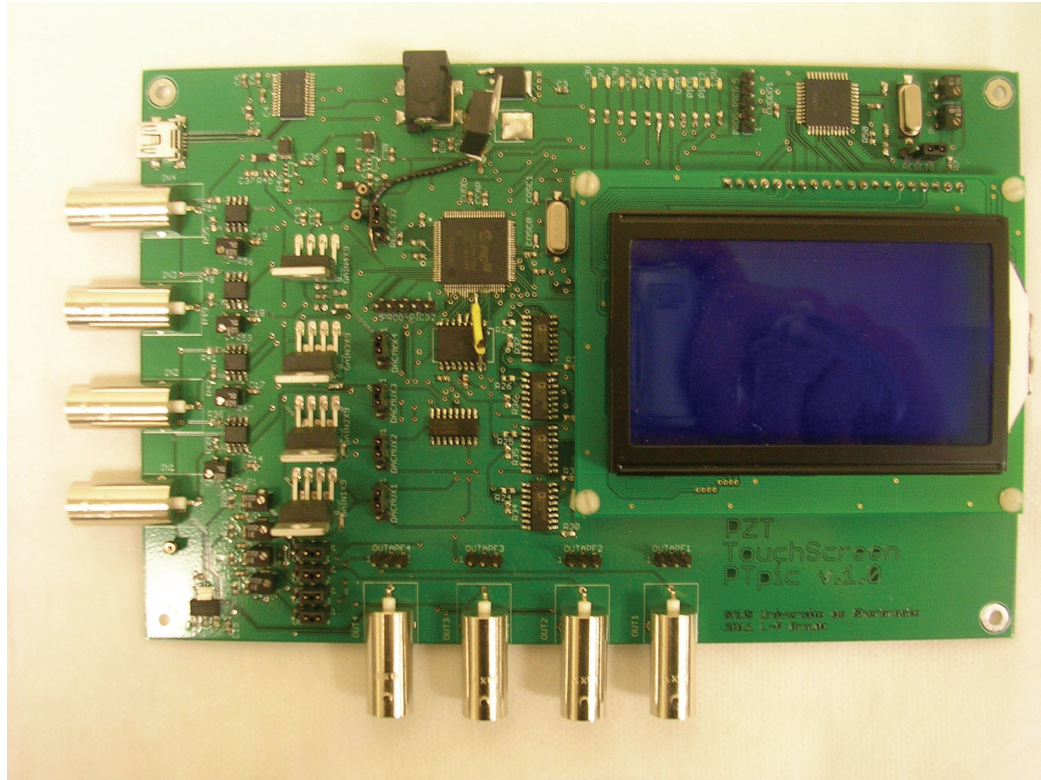


Figure 4.1 Photographie du premier prototype compact

Les prototypes suivants ont permis de régler certains problèmes au niveau de l'adaptation d'impédance et de l'alimentation négative. Des optimisations de positionnement des composantes et du routage ont également été faites.

Pour le prototype final, une communication USB entre un ordinateur et le système compact ainsi qu'une tension d'alimentation de 5V unique sont utilisés directement à partir du même connecteur pour maintenir une conception sûre, simple et compacte. Un schéma-bloc des composantes est illustré à la figure 4.2 afin de simplifier la présentation des requis du système.

Le convertisseur interne analogique-numérique du dsPIC est utilisé pour la même raison que le premier prototype, malgré ses limitations par la résolution de 10 bits et une faible fréquence d'échantillonnage. Le microcontrôleur a été choisi principalement pour ses 70 MIPS permettant du calcul rapide à un faible coût. En outre, la mémoire flash interne (536 kO) permet un stockage de référence pour la technique EUSR pour un écran 730 × 730 pixels en supposant que les données sont de 8-bits. Même si les exigences minimales pour

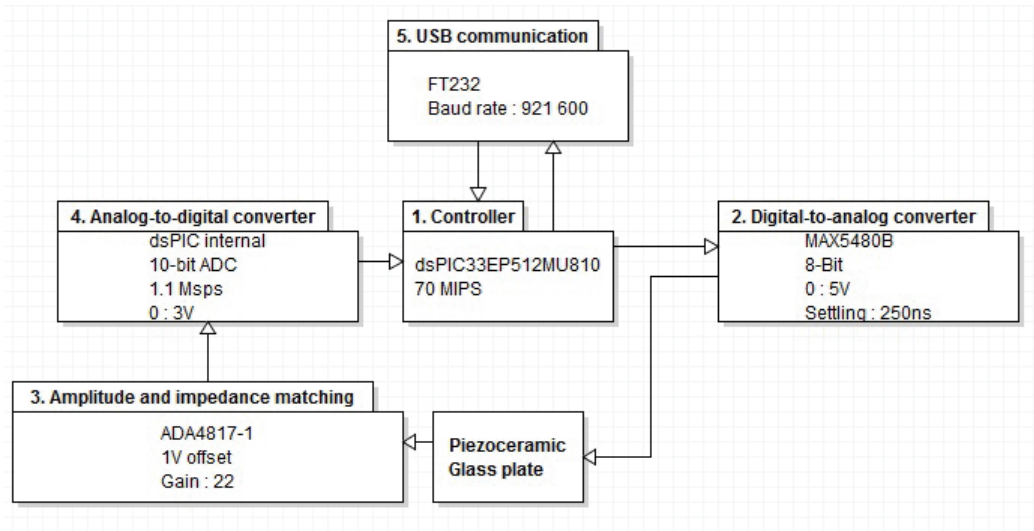


Figure 4.2 Schéma-bloc des composants du prototype compact

un écran à haute résolution (1920×1080 pixels) ne sont pas remplies dans cette conception, des connaissances utiles sont obtenues pour les conceptions futures. Afin de maintenir le synchronisme pour l'émission et la réception d'ondes, des compteurs et des interruptions permettent de contrôler le flux de l'algorithme. Une autre considération en utilisant une faible amplitude d'onde est le bruit qui doit rester sous la résolution du convertisseur analogique-numérique (3 mV). À cette fin, des fils coaxiaux et des condensateurs de filtrage sont utilisés. Les schémas sont présentés aux figures 6.1 et 6.2.

Le circuit électrique à la figure 4.3 montre la face du circuit imprimé où les composants ont été placés stratégiquement afin d'éviter les boucles créant des antennes. Le bruit est ainsi réduit, ce qui est important avec des ondes dont le signal est très faible. De plus, les composants sont regroupés selon leurs applications pour simplifier les connexions et réduire la longueur des traces de cuivre. Le plan de masse a été placé sur le dessus et l'alimentation principale (5 V) sur le dessous pour fournir suffisamment de surface. La figure 4.4 montre que les connexions sont faites de façon à ne pas couper le plan de masse, tout comme les connexions sur le dessus sont faites de manière à éviter d'éviter de créer des antennes.

La figure 4.5 présente la carte compacte du système ($1.83'' \times 2.11''$) avec les sections du diagramme correspondants.

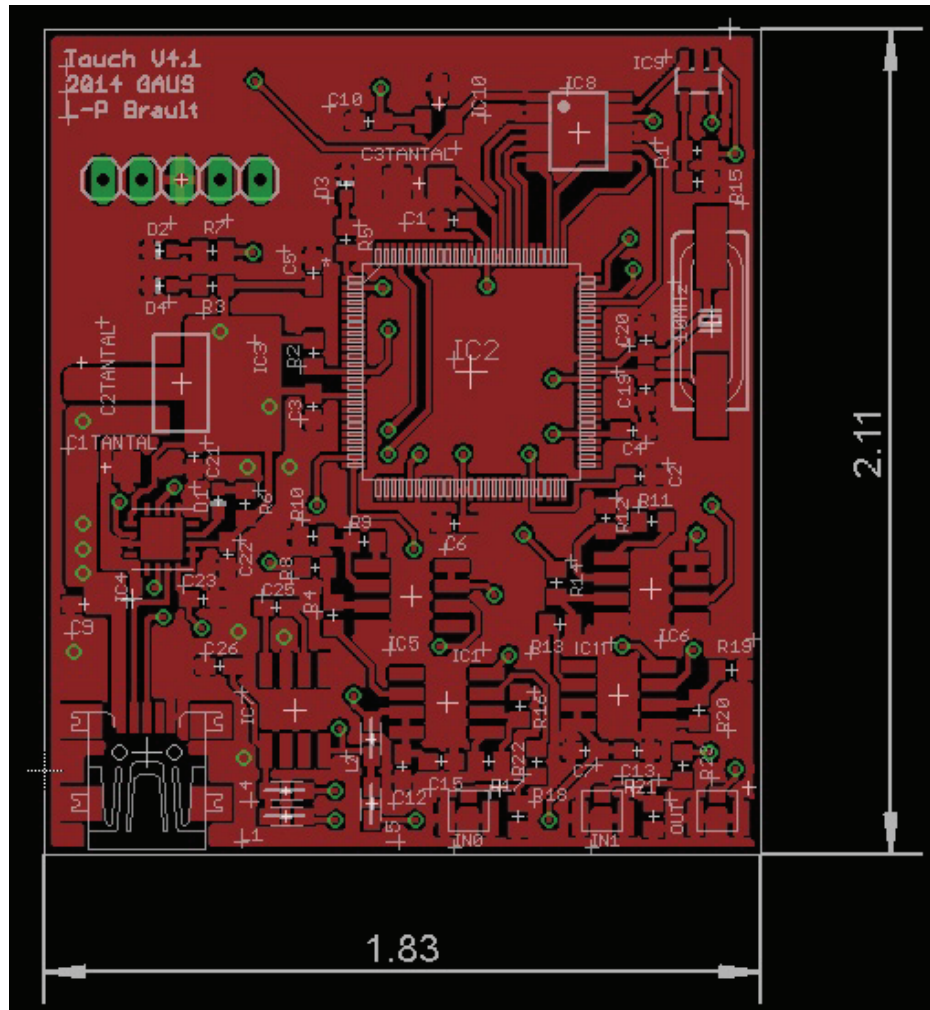


Figure 4.3 Vue du haut du circuit imprimé pour le prototype final compact échelle en pouces

4.2 Résultats expérimentaux avec le système compact en temps réel

Dans cette section, les résultats utilisant le système compact sont présentés puis comparés avec le système optimal présenté à la section 3.3. Le logiciel utilisé pour afficher et recevoir les images par communication USB est conçu avec JAVA. Tout d'abord, un exemple d'une onde reçue est présentée à la figure 4.6 pour montrer ce que le système compact est capable d'acquérir en temps réel.

La figure 4.7 présente une image obtenue en utilisant une triangulation (EUSR) [7] avec deux récepteurs (vert) piézocéramiques et un émetteur (blanc). La résolution est de $100 \times$

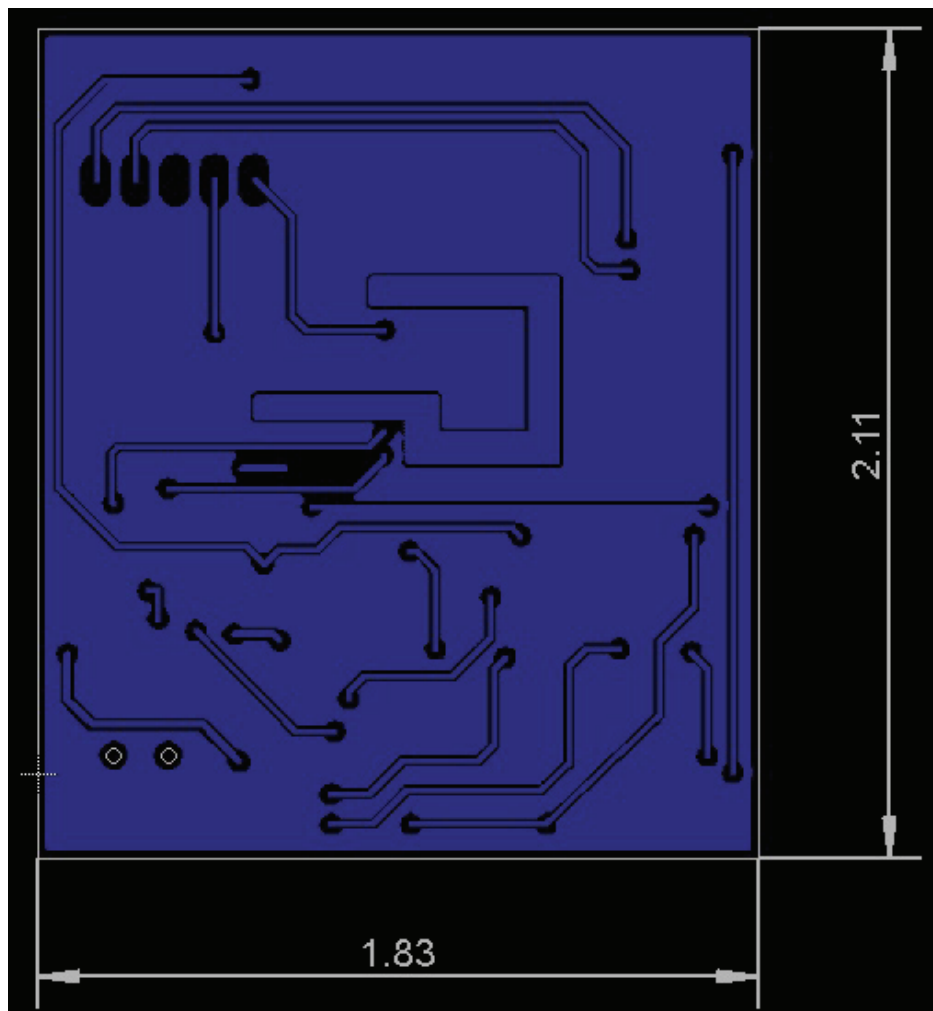


Figure 4.4 Vue du bas du circuit imprimé pour le prototype embarqué échelle en pouces

100 pixels et l'onde est à une fréquence de 350 kHz à 3,5 cycles. Une masse ajoutée de 246 g est représentée par le cercle rouge avec un X, les axes sont en mètres.

Ce résultat montre le manque de précision de la technique avec le système actuel si aucune compensation de dispersion ou de traitement d'image ne sont effectuées vu la localisation de la masse qui a un décalage de 2 cm. Même si cette technique ne nécessite pas beaucoup de puissance de traitement, elle ne répond pas aux exigences en terme de précision.

Les résultats suivants sont obtenus avec la corrélation expérimentale en utilisant un émetteur et un récepteur. L'approche expérimentale est mise en œuvre sur une petite surface de la plaque ($50 \times 50 \text{ mm}^2$) avec un seul émetteur et un récepteur pour tester la faisabilité d'une haute résolution sans utiliser la plaque complète, ce qui exigerait plus de mémoire que celle disponible. La résolution est de 5 mm en utilisant une longueur du signal de

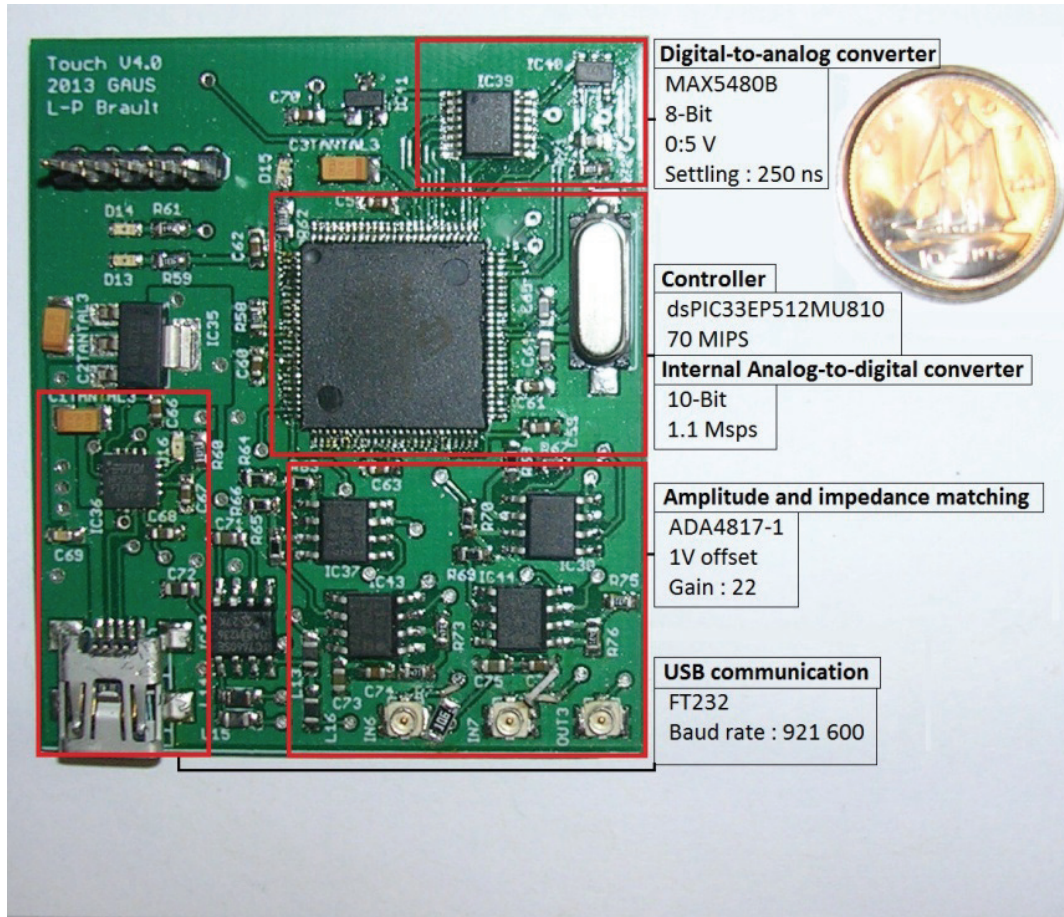


Figure 4.5 Prototype final compact temps réel

0,25 ms pour l'algorithme de corrélation expérimentale. L'équation 3.2 est utilisée pour déterminer la position de la masse de 246 g sur le pixel (3,3) à la figure 4.8.

La figure 4.8 montre que la localisation de la masse est précise et l'imagerie en temps réel peut être effectuée sur cette petite partie de la plaque. Afin d'augmenter le nombre de pixels, de la mémoire supplémentaire (128 Mb) est nécessaire et un meilleur convertisseur analogique-numérique permettrait de fournir de meilleures références.

Basé sur les résultats actuels, une estimation pour chacun des paramètres est donnée dans le tableau 4.2 pour un futur système compact temps réel. Puisque que les références de l'algorithme de corrélation expérimentale ont besoin de beaucoup de mémoire, la mise à niveau de la mémoire est le facteur le plus important .

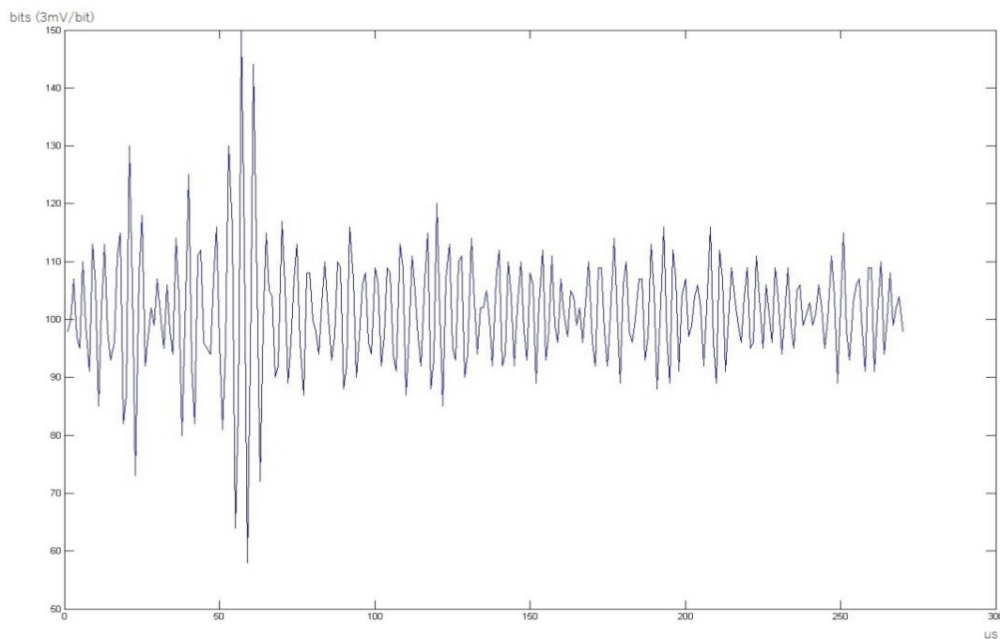


Figure 4.6 Onde typique mesurée par un récepteur et acquise en utilisant le système compact en temps réel

Tableau 4.2 Comparaison des paramètres actuels et de leur valeur désirée pour un futur prototype

Composante	Paramètre	Actuel	Désiré
Convertisseur analogique-numérique	Échantillonnage	1 MHz	5 MHz
	Résolution	10 bits	12 bits
CPU	Fréquence	70 MIPS	100 MIPS
RAM/ROM	Mémoire	52 kB	128 MB

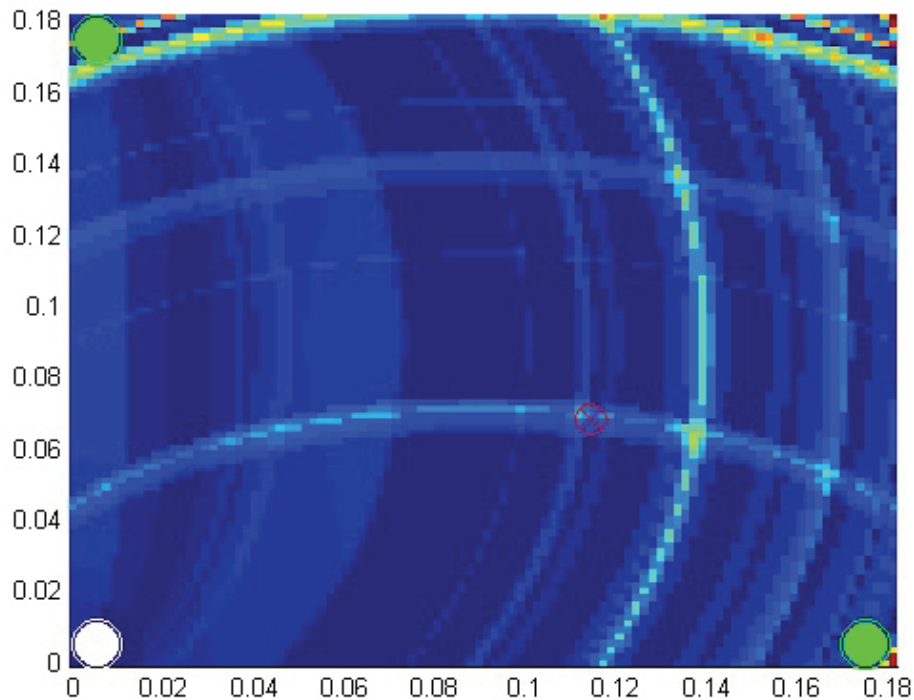


Figure 4.7 Imagerie EUSR en utilisant le mode A0 avec le système compact en temps réel

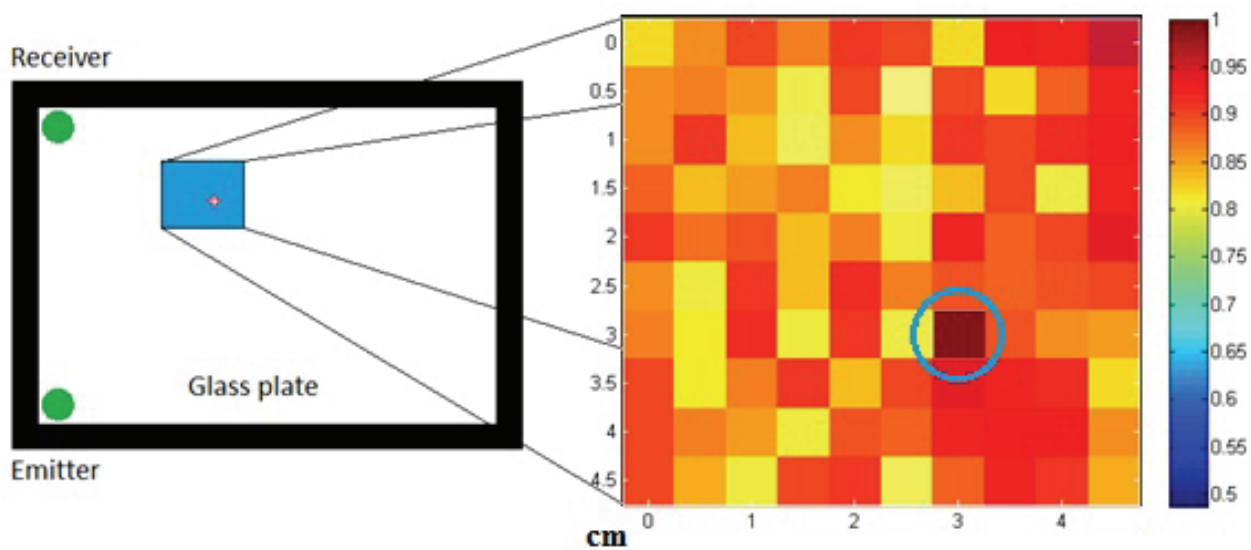


Figure 4.8 Image de corrélation expérimentale avec une masse de 246 g à (3,3)

CHAPITRE 5

CONCLUSION

Ce mémoire présente les algorithmes d'imagerie à base d'ondes guidées, testés d'abord sur un système commercial puissant et ensuite sur un système compact en temps réel dédié à un écran tactile. Les paramètres de conception sont discutés et expliqués afin d'arriver à une localisation en temps réel. Les performances minimales ont été évaluées avec le système conçu pour localiser une masse sur une plaque de verre. Les résultats montrent la faisabilité d'un futur produit commercial en utilisant des éléments piézocéramiques et une carte électronique embarquée. Les contraintes imposées par le matériel sur la performance des algorithmes d'imagerie ont été simulées à l'aide d'un système de haute performance dégradé. Les considérations futures pour la sélection des composantes et les options de conception sont données. Les travaux en cours vise à mettre en oeuvre cet algorithme sur un système compact en temps réel amélioré, compte-tenu des exigences en terme de fréquence, de mémoire et de précision électronique. Les résultats obtenus prouvent que le système actuel fonctionne à petite échelle. Ceci indique que le système compact en temps réel est acceptable, mais pourrait être amélioré pour atteindre des performances optimales. Les paramètres à être améliorés ont été identifiés avec un estimé pour une conception future.

Le projet a le potentiel d'être développé et utilisé pour des écrans tactiles de grandes dimensions tels que les télévisions et les écrans industriels. Le marché du cellulaire est peu accessible et ne s'applique pas bien au projet actuel, qui vise des écrans de grandes dimensions. Des preuves de concept sur des télévisions seront effectués afin de montrer l'avantage des piézoélectriques au niveau du coût et de la détection de la pression appliquées. Avec une production de masse, le coût, qui serait élevé avec les techniques actuelles, deviendrait très abordable et pourrait être incorporé facilement dans les produits domestiques. La miniaturisation et l'incorporation des piézoélectriques dans le verre permettrait d'avoir une taille négligeable par rapport au produit tout en restant dans les spécifications en terme de précision et de rapidité. Également, des perspectives pour le domaine médical sont étudiées. La répartition du poids d'une personne ou d'un animal permettrait d'évaluer la douleur et l'efficacité du traitement. L'écran tactile en développement permettrait ce genre d'application qui est de plus en plus en demande.

CHAPITRE 6

ANNEXE 1 : Figures

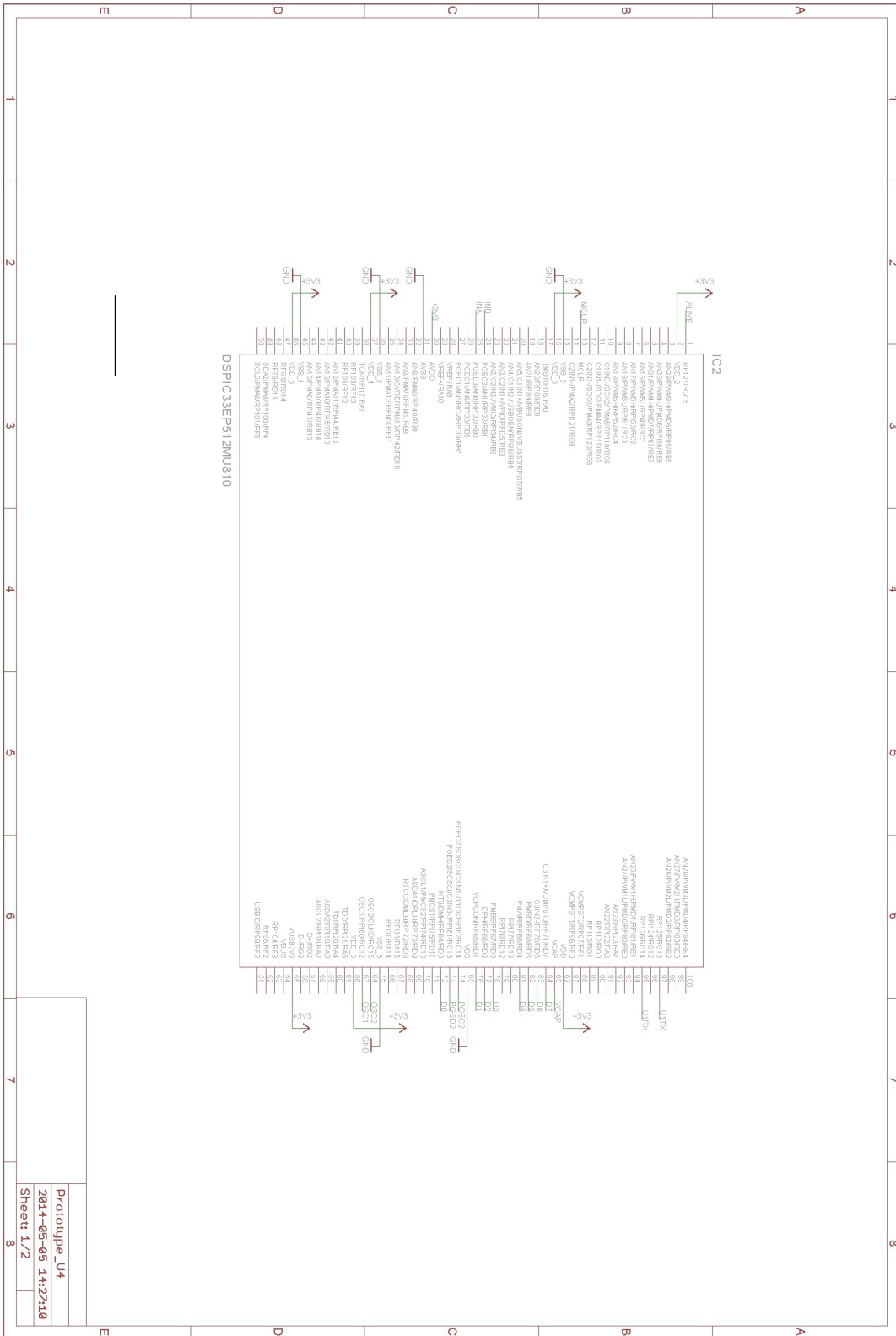


Figure 6.1 Schéma électrique du prototype final partie 1

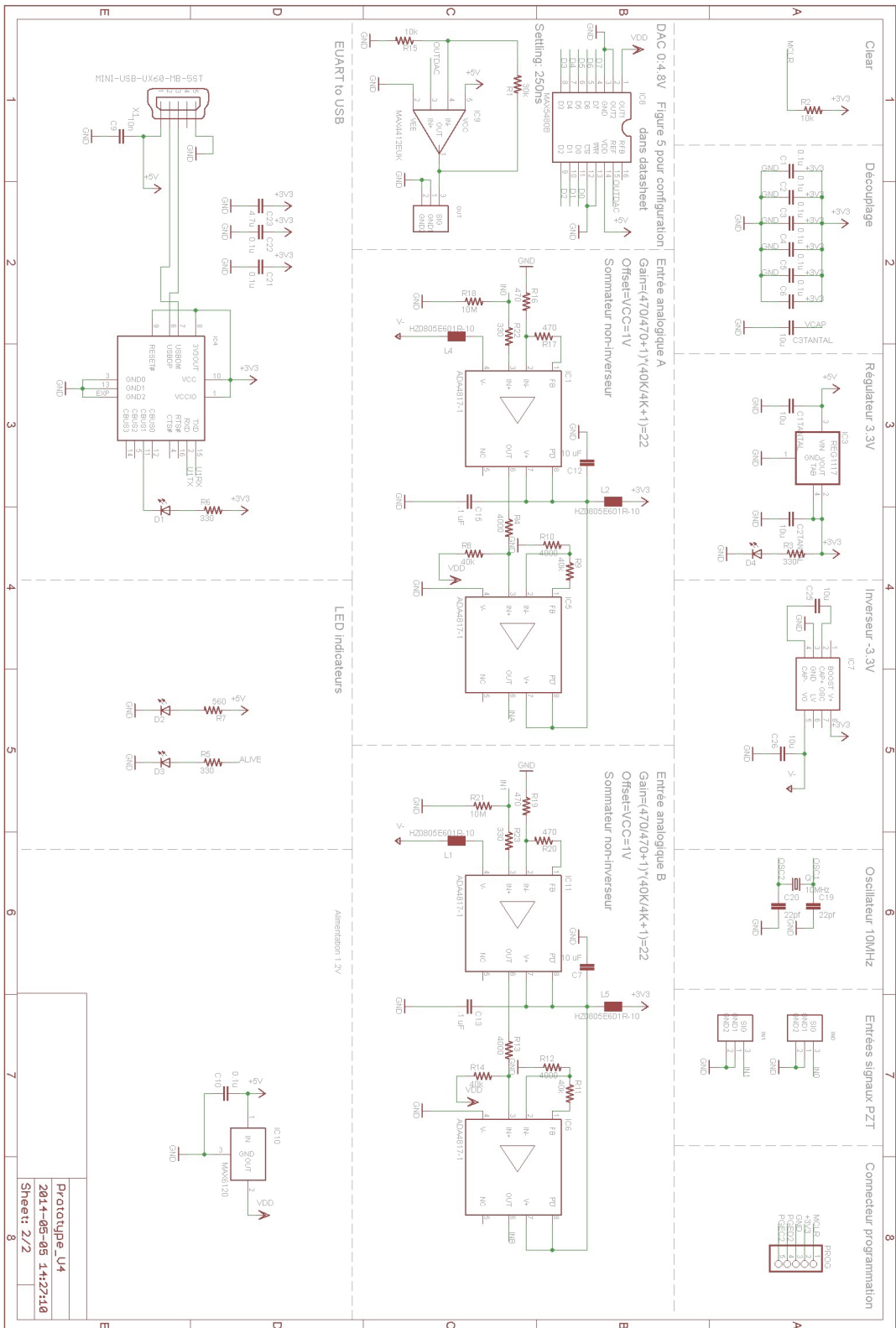


Figure 6.2 Schéma électrique du prototype final partie 2

Prototype_U4
 2014-05-05 14:27:10
 Sheet: 2/2

CHAPITRE 7

ANNEXE 2 : Codes

```
1  /*.....*/
2  Create the signal
3  /*.....*/
4  void createWave(void)
5  {
6      double cycleWave=3.5;
7      double t=0;
8      double pulseTemp;
9      double period=1.0/FREQ;
10     int lenght;
11     int i;
12
13     lenght=(cycleWave/FPULSE)*FREQ;
14
15     for (i=0;i<lenght;i++)
16     {
17         t=period*i;
18         pulseTemp=255*(sin((2*3.14*0.5*FPULSE/cycleWave)*t)*sin(2*3.14*FPULSE*t)+2.5+2.5)/5;
19         pulse[i]=pulseTemp;
20     }
21     for (i=lenght;i<LENGHTSEND;i++)
22         pulse[i]=128;
23
24 }
```

Figure 7.1 Code C pour créer le signal à générer par le piézoélectrique

```
25 /*.....*/
26 Generate EUSR tables
27 /*.....*/
28 #ifdef EUSREN
29 void setEUSR(void)
30 {
31     int nbRecei;
32     int count;
33     int gridX;
34     int gridY;
35     double ds;
36     double ds;
37     double linSpaceX[GRID];
38     double linSpaceY[GRID];
39     double stepX=(PZTpos[0][0])/GRID+PZTpos[0][0]/GRID/(GRID-1);
40     double stepY=(PZTpos[2][1])/GRID+PZTpos[2][1]/GRID/(GRID-1);
41
42     for (count=0;count<GRID;count++)
43     {
44         linSpaceX[count]=count*stepX;
45     }
46     for (count=0;count<GRID;count++)
47     {
48         linSpaceY[count]=count*stepY;
49     }
50
51     for (nbRecei=1;nbRecei<=2;nbRecei++)
52     {
53         for (gridX=0;gridX<GRID;gridX++)
54         {
55             for (gridY=0;gridY<GRID;gridY++)
56             {
57                 ds=sqrt(pow((linSpaceX[gridX]-PZTpos[0][0]),2.0)+pow((linSpaceY[gridY]-PZTpos[0][1]),2.0));
58                 ds=sqrt(pow((linSpaceX[gridX]-PZTpos[nbRecei][0]),2.0)+pow((linSpaceY[gridY]-PZTpos[nbRecei][1]),2.0));
59                 if (nbRecei==1)
60                 {
61                     correlationMaxPos1[gridX*GRID+gridY]=((3.5/300000)/2+(ds+ds)/VG/1000)*FECH;
62                     correlationMaxPos1[gridX*GRID+gridY]=correlationMaxPos1[gridX*GRID+gridY]&0b0000000011111111|0b00000000100000000;
63                 }
64                 #ifdef TWOPZI
65                 else
66                 {
67                     correlationMaxPos2[gridX*GRID+gridY]=((3.5/300000)/2+(ds+ds)/VG/1000)*FECH;
68                     correlationMaxPos2[gridX*GRID+gridY]=correlationMaxPos2[gridX*GRID+gridY]&0b0000000011111111|0b00000000100000000;
69                 }
70                 #endif
71             }
72         }
73     }
74 }
75 #endif
76
```

Figure 7.2 Code C pour générer les matrices EUSR

```

78  /*.....
79  Find correlate image
80  /*.....
81  #if defined(EUSREN) || defined(CORRELATION)
82  void correlateSignal(void)
83  {
84      int i,j,k,amp,amp2,pos,pos2,count=0,maxFos=0,maxAmp=0,corr=0,corr2=0;
85
86      sendEuhart(0b11111111);
87      sendEuhart(xMax);          //X MAX
88      sendEuhart(yMax);          //Y MAX
89
90      for (i=0;i<GRID;i++)
91      {
92          for (j=0;j<GRID;j++)
93          {
94              for (k=0;k<MAXCORR;k++)
95              {
96                  //Correlation
97                  amp=(correlationMaxFos1[count]&0b1111111100000000)/256;
98                  pos=correlationMaxPos1[count]&0b0000000011111111;
99                  corr+=(wavePZT1[pos])*amp;
100
101                  #ifdef TWOPZT
102                  amp2=(correlationMaxFos2[count]&0b1111111100000000)/256;
103                  pos2=correlationMaxPos2[count]&0b0000000011111111;
104                  corr2+=(wavePZT2[pos2])*amp2;
105                  #endif
106                  count++;
107                  corrDivided[j]=((corr+corr2)/pixelDiv); //40b00000001111111;
108
109                  if ((corr/pixelDiv)>0b11111111)
110                  {
111                      corrDivided[j]=0b11111111;
112                  }
113                  //Check if maximum value
114                  if (corrDivided[j]>ampMax)
115                  {
116                      ampMax=corrDivided[j];
117                      xMax=j;
118                      yMax=i;
119                  }
120                  corr=0.0;
121                  corr2=0.0;
122              }
123              setResultImage (corrDivided);
124          }
125          ampMax=0b00000000;
126      }
127  #endif

```

Figure 7.3 Code C permettant la corrélation du signal reçu avec les signaux de références

LISTE DES RÉFÉRENCES

- Adler, R. et Desmares, P. J. (1987). An economical touch panel using saw absorption. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, volume UFFC-34, numéro 2, p. 195–201.
- Alleyne, D. N. et Cawley, P. (1992). The interaction of lamb waves with defects. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, volume 39, numéro 3, p. 381–97.
- Apperley, M. D., Spence, R. et Koanantakool, H. (1982). A ‘locate-and-select’ touch screen. *Displays, Technology and Applications*, volume 3, numéro 3, p. 131–4.
- Dahlin, T. (2000). Reach out and touch : Designing a resistive touchscreen. *Circuit Cellar Ink*, , numéro 114, p. 20–2.
- Donglai, Z., Dongsheng, Z., Jian, Z., Chao, W. et Ying, Z. (2005). Data sampling system with high speed and high timing synchronization precision for power line fault position detection based on dual ports traveling wave distance measurement method. *IEEE*, p. 4.
- Downs, R. (2005). Using resistive touch screens for human/machine interface. *Analog Applications Journal, Texas Instruments Incorporated Data Acquisition*, volume 3Q, p. 5–10.
- Giurgiutiu, V. (2006). Structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors. *DEStech Publications Inc*, p. 185–238.
- Gray, T. (2009). Using projected capacitive displays to create durable gesture-based touch screen interfaces. *Disponible : <http://www.embedded.com/print/4008290>*.
- Hotelling, S. P., Chen, W., Kraih, C. H., Elias, J. G., Yao, W. H., Zhong, J. Z., Hodge, A. B., Land, B. R. et Boer, W. D. (2012). Touch screen liquid crystal display. *Disponible : www.freepatentsonline.com/8243027.html*.
- Ing, R., Quieffin, N., Catheline, S. et Fink, M. (2005). In solid localization of finger impacts using acoustic time-reversal process. *Applied Physics Letters*, volume 87, numéro 20, p. 204104 – 1.
- Ing, R. K. et Fink, M. (1998). Time-reversed lamb waves. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, volume 45, numéro 4, p. 1032–43.
- Kak, S. C. (1970). The discrete Hilbert transform. *Proceedings of the IEEE*, volume 58, numéro 4, p. 585.
- Kent, J., Takeuchi, M. et Laux, G. (2007). Robert Adler’s touchscreen inventions. *2007 IEEE Ultrasonics Symposium*, p. 9–20.
- Lallart, M., Guyomar, D. et Monnier, T. (2012). Low-power computation methods and self-powered systems for structural health monitoring techniques using lamb waves for embedded sensing. *Shock and Vibration*, volume 19, numéro 5, p. 867–77.

- Lee, D. (2011). The state of the touch-screen panel market in 2011. *Information Display*, volume 27, numéro 3, p. 12–16.
- Lu, Y., Ye, L. et Su, Z. (2006). Crack identification in aluminium plates using lamb wave signals of a pzt sensor network. *Smart Materials and Structures*, volume 15, numéro 3, p. 839–49.
- Pance, A., King, N. V., Kerr, D. et Bilbrey, B. (2013). Sensing capacitance changes of a housing of an electronic device. *Disponible* : <http://www.freepatentsonline.com/8390481.pdf>.
- Quaegebeur, N., Masson, P., Brault, L.-P., Beaudet, N. et Sarret, P. (2013). Pressure mapping system based on guided waves reflection. *The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE); American Society of Mechanical Engineers*, volume 8695.
- Quaegebeur, N., Masson, P., Langlois-Demers, D. et Micheau, P. (2011). Dispersion-based imaging for structural health monitoring using sparse and compact arrays. *Smart Materials and Structures*, volume 20, numéro 2, p. 12.
- Quaegebeur, N., Masson, P., Micheau, P. et Mrad, N. (2012). Broadband generation of ultrasonic guided waves using piezoceramics and sub-band decomposition. volume 59, p. 928–938.
- Reis, S., Correia, V., Martins, M., Barbosa, G., Sousa, R. M., Minas, G., Lanceros-Mendez, S. et Rocha, J. G. (2010). Touchscreen based on acoustic pulse recognition with piezoelectric polymer sensors. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, p. 516–20.
- Rohani, K. et Manry, M. T. (1992). Nonlinear neural network filters for image processing. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, p. 373–6.
- Shih, F. Y., Chuang, C.-F. et Gaddipati, V. (2005). A modified regulated morphological corner detector. *Pattern Recognition Letters*, volume 26, numéro 7, p. 931–937.
- Tanter, M. et Fink, M. (2014). Ultrafast imaging in biomedical ultrasound. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency control*, volume 61, numéro 1, p. 102–119.
- Yu, L. et Giurgiutiu, V. (2005). Multi-damage detection with embedded ultrasonic structural radar algorithm using piezoelectric wafer active sensors through advanced signal processing. *Health Monitoring and Smart Nondestructive Evaluation of Structural and Biological Systems IV*, volume 5768, p. 406–17.
- Yu, L. et Giurgiutiu, V. (2008). In situ 2-D piezoelectric wafer active sensors arrays for guided wave damage detection. *Ultrasonics*, volume 48, numéro 2, p. 117–134.

