
Dédicaces

Je dédie ce mémoire :

♡ A Dieu tout puissant qui m'a donné jusqu'ici le souffle de vie, la force et le courage nécessaires pour franchir les obstacles.

♡ A ma mère Maman **TIOTSOP Pauline**, qui a toujours manifesté à mon endroit, beaucoup d'amour et surtout beaucoup d'attention. Qu'elle trouve ici le fruit de toutes ses œuvres.

Remerciements

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements :

- ✠ Au **Professeur WOAFU Paul**, qui a accepté me suivre tout au long de ce mémoire, et qui a toujours su répondre à mes différentes préoccupations.
- ✠ Au **Docteur NANA Bonaventure**, directeur de ce mémoire, avec qui j'ai eu la chance de travailler. Ses critiques, ses conseils et encouragements incessants m'ont permis de profiter de ses compétences scientifiques dans le domaine. Trouvez ici mes profonds remerciements.
- ✠ Aux **Honorables membres du jury**, pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de participer au jury et de juger ce travail.
- ✠ Au **Professeur KOFANE Timoléon Crépin** Chef de Département de Physique pour les enseignements et ses conseils avisés depuis le cycle de Licence.
- ✠ Au **Professeur TCHAWOUA Clément**, au **Professeur NDJAKA Jean Marie B**, au **Professeur ZEKENG Serge**, au **Docteur HONA Jacques**, au **Docteur WAKATA Annie** et au **Docteur NBONO SAMBA** pour les enseignements qu'ils nous ont dispensés durant cette année académique.
- ✠ A tous les doctorants du LaMSEBP et de Mécanique Générale, particulièrement aux doctorants TABEU Stéphane, GOUNE, BITANG AZIEM Daniel

C, pour leur disponibilité et nos échanges instructifs. Trouvez ici ma sincère reconnaissance.

✠ A tous les membres du club HITASTECH (High-Tech And Slow Technology Club) particulièrement aux membres TABEU Stéphane, TUECHE TEGHO Armand, NKEPSU BITOU Roland, TAGOUEGNI Senghor pour m'avoir soutenu et apporté quelques explications et conseils quant à la conception de mon dispositif. Puisse ce travail exprimer ma sincère reconnaissance.

✠ A mon cousin DOUANLA TCHOFFO Hyppolite pour son assistance et son soutien financier.

✠ A mes amis KAMENI Peguy, KEMAYOU NBIANDA A, YANA L. M, LADO Hugues, YONTA Francis, YOUTH A Octave et KAMDOUM G pour les obstacles que nous avons franchis ensemble en milieu scolaire et surtout pour l'amour et la solidarité qu'ils ont toujours témoignés à mon égard.

✠ A tous mes camarades de promotion pour la sincère collaboration, la solidarité, l'esprit de groupe et les débats passionnants qui nous font grandir.

✠ A tous les membres de ma famille qui m'aiment tendrement et qui m'ont toujours aidé et soutenu face aux difficultés. Trouvez ici l'expression de ma plus profonde gratitude.

✠ A tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à l'élaboration de ce mémoire et qui m'ont soutenu dans mon parcours académique dont les noms ne figurent pas dans ce document, je vous dis profondément merci.

Résumé

Ce mémoire porte sur la caractérisation non destructive des matériaux par propagation d'ondes ultrasonores. A cet effet, nous avons conçu et réalisé un émetteur et un récepteur des ondes ultrasonores. En procédant par réflexion, nous avons testé le dispositif sur les plaques de bois. L'analyse des signaux reçus, dues aux multiples réflexions sur les différents interfaces rencontrer par l'onde au cour de son déplacement dans les plaques, nous a permis dans un premier temps de dire si les matériaux analysés contiennent des défauts ou non. Dans un second temps, la détermination des différentes amplitudes des signaux reçus a permis de déterminer le coefficient d'absorption ou l'épaisseur de l'objet caractérisé.

Mots clés : Ultrasons, caractérisation, non destructif.

Abstract

This thesis focuses on the non-destructive characterization of materials by ultrasonic wave propagation. To this end, we have designed and realized a transmitter and a receiver of ultrasonic waves. By process of reflection we tested the device on wooden plaques. The analysis of the received signals due to multiple reflections on the different interfaces meet the waves at the heart of its movements in the plates, allowed us initially to say whether the analyzed materials contain the defect or not. Secondly, determining the different amplitudes of the received signals was used to determine the absorption coefficient or the thickness of the object characterized.

Keywords : Ultrasound, characterization, non destructive.

Table des matières

Dédicaces	I
Remerciements	II
Résumé	V
Abstract	VI
Listes des figures	VIII
INTRODUCTION GENERALE	1
1 GENERALITES SUR LES ULTRASONS ET LE CONTROLE NON DESTRUCTIF	4
1.1 HISTORIQUE ET DEFINITION DES ULTRASONS	4
1.1.1 Historique	4
1.1.2 Définition	5
1.1.3 Production des ultrasons	5
1.2 PRINCIPE PHYSIQUE DES ULTRASONS ET APPLICATIONS	6
1.2.1 Comportement des ultrasons dans les matériaux anisotropes	6
1.2.2 Equation de propagation des ondes ultrasonores	6
1.2.3 Solution de l'équation de propagation	7

1.2.4	Réflexion et réfraction des ultrasons	7
1.2.5	Les applications des ondes ultrasonores	8
1.3	LE CONTROLE NON DESTRUCTIF	9
1.3.1	Définition	9
1.3.2	Domaines d'utilisation	9
1.3.3	Principes généraux	10
1.3.4	Différentes méthodes de contrôle	10
1.3.5	Contrôle par ultrasons	11
2	CONCEPTION ET MODELISATION DES SYSTEMES EMET- TEUR ET RECEPTEUR DES ULTRASONS	12
2.1	CAHIER DES CHARGES ET SCHEMA BLOC DU DISPOSITIF	12
2.1.1	Cahier des charges	12
2.1.2	Schéma bloc du dispositif	13
2.2	FONCTIONNEMENT DU BLOC EMETTEUR	14
2.2.1	Le multivibrateur astable	14
2.2.2	L'oscillateur	16
2.2.3	Alimentation du transducteur émetteur	17
2.3	LE BLOC DE RECEPTION	18
2.3.1	Transducteur ultrasonore	18
2.3.2	Amplification et filtrage	19
2.3.3	Détecteur de crête	20
2.3.4	Détecteur de seuil	21
3	REALISATION DES SYSTEMES EMETTEUR ET RECEP- TEUR DES ULTRASONS ET APPLICATIONS	22

3.1	CIRCUITS COMPLETS DU DISPOSITIF	22
3.1.1	Circuit émetteur	22
3.1.2	Circuit Récepteur	23
3.2	DISPOSITIF EXPERIMENTAL	24
3.2.1	Appareillage	24
3.2.2	Composants électroniques	25
3.3	RESULTATS EXPERIMENTAUX	27
3.3.1	Application et principe	27
3.3.2	Résultats et interprétations	28
 CONCLUSION GENERALE		 33
 REFERENCES		 33

Table des figures

1.1	<i>Comportement d'une onde ultrasonore à une interface.</i>	8
1.2	<i>Synoptique d'un système de contrôle non destructif.</i>	10
2.1	<i>Synoptique du système.</i>	13
2.2	<i>Câblage du NE555 en astable.</i>	14
2.3	<i>Circuit simplifié de l'astable à amplificateur opérationnel.</i>	15
2.4	<i>Circuit de l'oscillateur à porte NAND.</i>	17
2.5	<i>Schéma de l'alimentation du transducteur émetteur.</i>	18
2.6	<i>Filtre passe haut à Amplificateur Opérationnel.</i>	19
2.7	<i>Schéma du détecteur d'amplitude.</i>	20
2.8	<i>Schéma du détecteur de seuil.</i>	21
3.1	<i>Schéma d'un émetteur des ultrasons.</i>	23
3.2	<i>Schéma d'un récepteur des ultrasons.</i>	24
3.3	<i>Photographie de la plaque à essai utilisée pour le montage.</i>	24
3.4	<i>a) Photographie de l'alimentation et b) photographie de l'oscilloscope.</i>	25
3.5	<i>Emetteur ultrason implémenté.</i>	26
3.6	<i>Récepteur ultrason implémenté.</i>	26
3.7	<i>Dispositif complet pour l'expérimentation.</i>	27
3.8	<i>Echantillon de bois à caractériser.</i>	28

3.9	<i>Signal émis directement par l'émetteur et capter par le récepteur..</i>	28
3.10	<i>Signal réfléchi par une seule plaque de bois.</i>	29
3.11	<i>Signal réfléchi par deux plaques de bois superposés.</i>	30
3.12	<i>Signal réfléchi par quatre plaques de bois superposés.</i>	30

INTRODUCTION GENERALE

Initialement développées vers les années 1960, les méthodes de contrôle non destructif ont vu leur emploi se généraliser à l'ensemble du monde industriel [1]. Parallèlement à cette évolution, le contrôle non destructif a élargi son champ d'application en passant du strict domaine de la détection, de la reconnaissance et du dimensionnement de défauts localisés à celui de l'évaluation des caractéristiques intrinsèques des matériaux, devenant ainsi un acteur incontournable de l'évaluation de la qualité des produits.

Les tests par ultrasons représentent environ le tiers des essais non destructifs de matériaux ou de structures en tout genre, et dans des secteurs d'applications très diversifiés (Aéronautique, industries des transports, de l'énergie, Génie Civil, etc) [2, 3]. Le contrôle ultrasonore est basé sur la propagation de faisceaux ultrasonores dans un matériau et sur l'évaluation des défauts provenant des perturbations du signal à la surface du défaut. La méthode la plus classique pour effectuer un contrôle ultrasonore utilise des traducteurs mono-élément [4].

Mais les dispositifs de test à ultrasons sont généralement très coûteux et ne sont donc pas à la portée de tous. C'est pour cette raison que nous avons choisi de travailler sur le thème "*Contribution à la caractérisation non destructive des matériaux par ultrasons*". L'objectif de ce travail est de concevoir puis de réaliser un système émetteur et un système récepteur des ondes ultrasonores pouvant être utilisés dans un contrôle non destructif des matériaux.

Pour mener à bien notre travail, ce mémoire sera subdivisé en trois chapitres.

Au premier chapitre, nous allons donner les généralités sur les ultrasons et leur utilisation dans les techniques de contrôle non destructif. Le second chapitre portera sur la conception d'un système émetteur et d'un système récepteur des ultrasons. Les différents blocs implémentés et les résultats expérimentaux des différents tests seront présentés dans le troisième chapitre. Nous finirons par une conclusion générale où nous donnerons quelques perspectives.

GENERALITES SUR LES ULTRASONS ET LE CONTROLE NON DESTRUCTIF

Introduction

Le contrôle non destructif par ultrasons a pour but d'évaluer la conformité d'une pièce sans la détériorer. Cette étape du processus industriel est destinée à garantir la sécurité d'utilisation des pièces contrôlées. Dans ce chapitre, il est question pour nous de présenter les généralités sur les ultrasons et leur utilisation dans des techniques de contrôle non destructif.

1.1 HISTORIQUE ET DEFINITION DES ULTRASONS

1.1.1 Historique

Les premières expériences sur les ultrasons ont été faites par Galton en 1883. Celui-ci grâce à son sifflet avait produit des vibrations juste au-dessus des fréquences audibles, ces vibrations étaient restées pendant plusieurs années une curiosité mal connue dont on ignorait les applications [2].

L'intérêt pour ces vibrations fut éveillé par la catastrophe du Titanic en 1912 [4]. A cette occasion, Richardson entrevoit la possibilité d'utiliser une méthode d'écho ultrasonore pour la détection des obstacles immergés comme les icebergs, les épaves, les récifs et autres écueils océaniques.

Cette idée prend corps durant la première guerre mondiale pour le repérage des sous-marins ennemis et un système rudimentaire est mis au point par Langevin utilisant le phénomène de piézoélectricité [1]. Les ultrasons se développèrent par la suite en bénéficiant des progrès scientifiques. En 1925, des ultrasons de quelques mégahertz sont produits par Pierce et en 1934, Sokolov fait les premiers pas dans le contrôle non destructif [3].

1.1.2 Définition

Les ondes acoustiques sont dues à une compression locale et temporaire du milieu. Elles regroupent les sons, les infrasons et les ultrasons. Les ultrasons sont des vibrations élastiques, de fréquence comprise entre 20 KHz et 100 MHz, qui se propagent dans des milieux fluides ou solides [4, 5]. L'onde ultrasonore subit plusieurs phénomènes tels que la réflexion, la réfraction, la diffusion et l'interférence. Une onde ultrasonore se propageant dans un milieu déterminé peut aussi être caractérisée d'une part par sa célérité, d'autre part par la perte d'énergie qu'elle subit par unité de longueur de milieu traversé, c'est-à-dire par un coefficient d'absorption.

Les ultrasons ne sont pas perceptibles par l'Homme mais certains animaux comme les chauves-souris émettent et captent des ultrasons de fréquence 50 KHz [2]. De même les dauphins et les baleines bleues s'orientent à l'aide des signaux acoustiques de fréquence 170 KHz qu'ils émettent et reçoivent [2].

1.1.3 Production des ultrasons

Les ultrasons peuvent être produits mécaniquement de différentes manières grâce aux transducteurs électroacoustiques. Il existe plusieurs types de transducteurs dont les plus utilisés sont les transducteurs magnétostrictifs et les transduc-

teurs piézoélectriques.

1.2 PRINCIPE PHYSIQUE DES ULTRASONS ET APPLICATIONS

1.2.1 Comportement des ultrasons dans les matériaux anisotropes

Il existe deux modes de propagation dans un solide en général. Pour le mode longitudinal ou de compression, les particules du milieu se déplacent parallèlement à la direction de propagation [5]. Le passage d'une onde longitudinale plane fait varier la distance entre deux plans parallèles. Le volume occupé par un nombre donné de particules varie donc, ce qui engendre des fronts de compression-dilatation.

Dans le deuxième mode, dit transversal ou de cisaillement, les particules du milieu vibrent suivant l'axe perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde (le déplacement des particules est alors perpendiculaire au vecteur d'onde). Dans ce mode de propagation, le volume occupé par un nombre donné de particules ne varie pas [5].

1.2.2 Equation de propagation des ondes ultrasonores

L'insonification d'un matériau anisotrope élastique par une onde ultrasonore crée des déplacements de particules. Ces déplacements de particules entraînent une variation des déformations et donc une variation des contraintes et de la pression sonore p . L'application du principe fondamental de la dynamique et de la loi de Hooke sur une unité de volume du milieu insonifié de masse volumique ρ permet d'obtenir l'équation de propagation du son dans un milieu matériel [6, 7].

Si nous nous limitons à une dimension, l'équation de propagation du son dans

un environnement réel est donnée par.

$$c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \mu c \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (1.1)$$

μ est le coefficient de dissipation du milieu et c est la célérité de l'onde définie par.

$$c = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} \quad (1.2)$$

Dans l'équation (1.2), P est la pression atmosphérique et $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$, où C_p et C_v sont les capacités calorifiques à pression constante et à volume constant respectivement.

1.2.3 Solution de l'équation de propagation

Une solution générale de l'équation (1.1) peut être prise sous la forme

$$p = Ae^{-k_i x} e^{j(\omega t - k_r x)} \quad (1.3)$$

où k_i et k_r sont donnés par les relations suivantes :

$$k_r = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\sqrt{1 + \left(\frac{\mu c}{\omega}\right)^2} + 1}{2}} \quad \text{et} \quad k_i = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\sqrt{1 + \left(\frac{\mu c}{\omega}\right)^2} - 1}{2}} \quad (1.4)$$

Le terme $Ae^{-k_i x}$ représente l'amplitude de l'onde. Elle est une fonction décroissante de l'espace et par conséquent les ondes sonores se propagent dans les milieux réels avec perte d'amplitude.

1.2.4 Réflexion et réfraction des ultrasons

Lorsqu'une onde ultrasonore atteint une interface, une partie de son énergie est réfléchiée donc renvoyée vers la source (formation d'un écho ultrasonore) et

l'autre partie est transmise comme le montre la figure 1.1. L'importance relative de l'intensité de cet écho par rapport à l'onde incidente dépend de l'interface acoustique, qui est définie par son coefficient de réflexion.

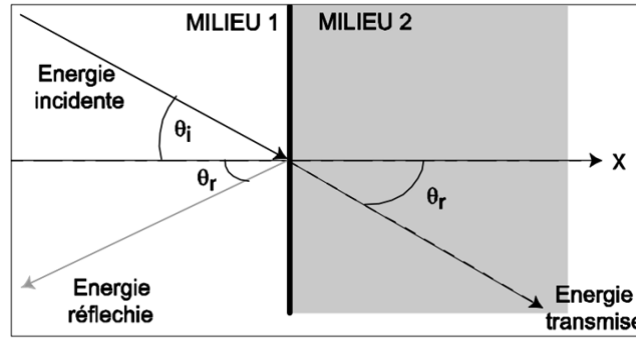


FIGURE 1.1 – Comportement d'une onde ultrasonore à une interface.

Chaque milieu est caractérisé par son impédance acoustique ($Z = \rho V$). Connaissant les impédances acoustiques Z_1 du milieu 1 et Z_2 du milieu 2, nous pouvons retrouver le coefficient de réflexion R et le coefficient de transmission T données respectivement par les relations (1.5) et (1.6) [8] :

$$R = \frac{I_r}{I_i} = \left(\frac{Z_2 \cos \theta_i - Z_1 \cos \theta_t}{Z_2 \cos \theta_i + Z_1 \cos \theta_t} \right)^2 \quad (1.5)$$

$$T = \frac{I_t}{I_i} = \frac{4Z_1 Z_2 \cos^2 \theta_i}{(Z_1 \cos \theta_i + Z_2 \cos \theta_t)^2} \quad (1.6)$$

Où I_r , I_i et I_t sont respectivement l'intensité de l'énergie réfléchie, incidente et transmise. θ_r , θ_i et θ_t respectivement les angles de réflexion, d'incidence et de transmission.

1.2.5 Les applications des ondes ultrasonores

On peut classer les applications au sondage en deux catégories : celles qui exploitent les propriétés de propagation des ondes et celles qui exploitent leurs

propriétés de diffraction. Dans les deux cas on peut atteindre l'imagerie [9].

Dans les applications qui exploitent les propriétés de diffraction, on peut distinguer deux groupes d'application : celles qui font appel à des mesures de diffraction avant (émetteur et récepteur de part et d'autre de l'objet), et celles qui font appel à des mesures de diffraction arrière (émetteur et récepteur du même côté), ou écho-sondage (sonar, échographie). Chacun délivre une information complémentaire sur le milieu ; la diffraction arrière étant essentiellement due aux fluctuations de l'impédance acoustique et la diffraction avant à celle de la célérité.

Parmi les nombreuses applications, nous pouvons citer entre autre, le sonar et l'acoustique sous-marine, l'échographie ultrasonore, mesure des constantes visco-élastiques des matériaux et l'héliosismologie.

1.3 LE CONTROLE NON DESTRUCTIF

1.3.1 Définition

Le contrôle non destructif est un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état de conformité des structures ou des matériaux, sans les dégrader, soit au cours de la production, soit en cours d'utilisation, soit dans le cadre de maintenance. On parle aussi d'essais non destructifs ou d'examens non destructifs

1.3.2 Domaines d'utilisation

Ces méthodes sont utilisées dans l'ensemble des secteurs industriels. On peut citer notamment : l'industrie pétrolière (pipelines, tubes, barres, soudures, réservoirs) ; l'industrie navale (contrôle des coques) ; l'aéronautique (poutres, ailes d'avion, nombreuses pièces moteurs, trains d'atterrissage, etc.) ; l'aérospatiale et l'armée ; l'industrie automobile (contrôle des blocs moteurs) ; la sidérurgie ; la

chaudronnerie et la tuyauterie en fabrication ; l'industrie de l'énergie : réacteurs nucléaires, chaudières, turbines, etc. (maintenance des installations) ; le ferroviaire en fabrication et en maintenance notamment pour les organes de sécurité (essieux, roues, boggies) ; l'inspection alimentaire et le Génie Civil et le bâtiment [9-12].

1.3.3 Principes généraux

Quelle que soit la méthode adoptée, nous pouvons représenter la mise en œuvre d'un système de contrôle non destructif par synoptique de la figure 1.2.

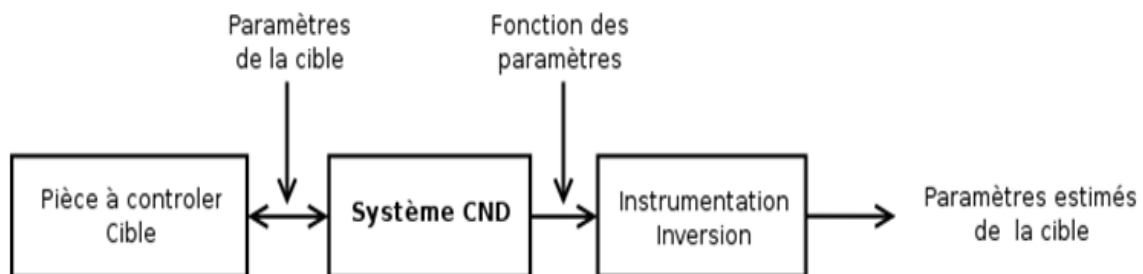


FIGURE 1.2 – *Synoptique d'un système de contrôle non destructif.*

La cible se caractérise par un ensemble de paramètres que l'on va chercher à estimer afin de former un diagnostic de conformité. La mise en œuvre d'un système de contrôle non destructif adéquat va permettre de produire un certain nombre de signaux qui sont fonction des paramètres recherchés. Une étape d'inversion, plus ou moins compliquée, est bien souvent nécessaire afin de retrouver les paramètres initiaux de la pièce.

1.3.4 Différentes méthodes de contrôle

Il existe de nombreuses méthodes de contrôle non destructif. Ce sont par exemple le contrôle par examen visuel, le contrôle par ressuage, le contrôle radiologique, le contrôle par ultrasons, l'émission acoustique, la thermographie, etc. Parmi ces différentes méthodes de contrôle, celle par ultrason est la plus utilisée.

1.3.5 Contrôle par ultrasons

Le contrôle par ultrasons est basé sur la transmission, la réflexion et l'absorption d'une onde ultrasonore se propageant dans la pièce à contrôler. Le train d'onde émis se réfléchit sur les défauts puis revient vers le traducteur. L'interprétation des signaux permet de positionner le défaut et de définir ses dimensions relatives. Cette méthode présente une résolution spatiale élevée et la possibilité de trouver des défauts aussi bien dans le volume de la matière qu'en surface.

Ses principaux avantages sont : Ne nécessite qu'une seule face d'accès, plus grande sensibilité de contrôle sur les pièces de forte épaisseur, résultat du contrôle en temps réel, contrôle plus rapide pour des épaisseurs importantes et meilleure sensibilité de contrôle pour les défauts filiformes (fissures, tapures, criques) d'orientation aléatoire, présente des dangers limités liés à son utilisation.

Comme inconvénients, certains matériaux métalliques sont difficilement contrôlables (matériaux à gros grains), contrôle plus lent pour les faibles épaisseurs et plus faible sensibilité à la détection de porosités.

Conclusion

Dans ce chapitre il était question pour nous de faire une revue de la littérature sur les ultrasons et les méthodes de contrôle non destructif. Il en ressort que la méthode de contrôle ou de détection par ultrason est fondée sur la déformation du champ émis par une discontinuité. On exploite alors le phénomène physique produit qui peut être l'atténuation, la réflexion ou la réfraction pour qualifier ou caractériser le matériau.

CONCEPTION ET MODELISATION DES SYSTEMES EMETTEUR ET RECEPTEUR DES ULTRASONS

Introduction

Dans le domaine de la caractérisation et du contrôle non destructifs par ultrasons, toute l'information est contenue dans un signal électrique, appelé signal écho. La qualité du contrôle (détection, précision dans le positionnement et le dimensionnement du défaut, possibilité de distinguer deux défauts voisins ...) ainsi que la qualité d'une caractérisation non destructive est donc conditionnée par celle des appareils utilisés. C'est ainsi que nous nous proposons dans ce chapitre de concevoir un système émetteur et récepteur des ultrasons. Pour y parvenir, nous allons décomposer chaque bloc du système en ses différents composants, expliquer leur fonctionnement et les dimensionner.

2.1 CAHIER DES CHARGES ET SCHEMA BLOC DU DISPOSITIF

2.1.1 Cahier des charges

Le système que nous nous proposons de concevoir doit être capable de réaliser les tâches suivantes :

- L'émetteur doit générer des ultrasons à des fréquences appropriées capable de se

propager dans les matériaux.

- Le récepteur doit percevoir les ultrasons provenant des matériaux.

2.1.2 Schéma bloc du dispositif

Les systèmes émetteur et récepteur des ultrasons que nous proposons sont constitués essentiellement de deux grands blocs tous deux comportant un transducteur soit émetteur pour le bloc d'émission soit capteur pour le bloc de réception. Le schéma bloc du dispositif est celui de la figure 2.1.

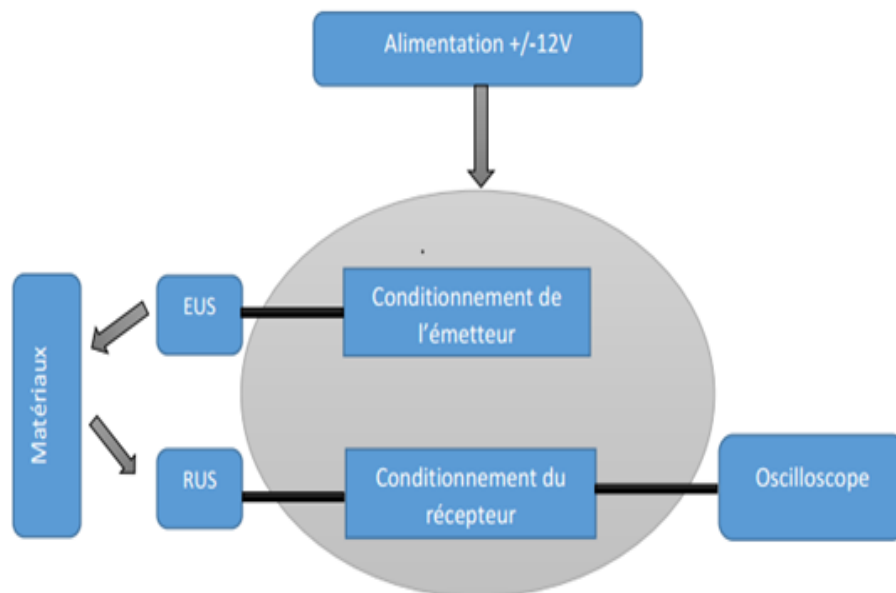


FIGURE 2.1 – *Synoptique du système.*

Les ondes ultrasonores émises réfléchissent sur les interfaces principales du matériau et ainsi que les hétérogénéités internes produisant des échos par rupture d'impédance acoustique. La distance entre différents échos par rapport aux échos d'entrée dans la pièce est reliée directement au temps de propagation allé et retour de l'onde dans l'épaisseur de celle-ci. Le résultat mesuré est représenté sous forme d'un échogramme traduisant l'amplitude des échos en fonction de la distance traversée par l'onde.

2.2 FONCTIONNEMENT DU BLOC EMETTEUR

Dans cette partie nous allons expliciter le fonctionnement de chaque bloc en donnant la liste des composants constitutifs ainsi que le dimensionnement de chaque composant électronique intervenant.

Le bloc d'émission est la partie chargée d'émettre l'ultrason, il est constitué :

- D'un multivibrateur astable.
- D'un oscillateur.
- D'un circuit d'inversion de la tension aux bornes de l'émetteur.
- D'un transducteur ultrasonore émetteur.

2.2.1 Le multivibrateur astable

C'est un générateur de signaux rectangulaires. Le composant central est le NE555 qui est un circuit intégré bipolaire comportant deux comparateurs analogiques, une bascule asynchrone RS et un transistor bipolaire NPN fonctionnant en interrupteur. Le schéma de la figure 2.2 est celui d'un temporisateur de type NE555 branché comme multivibrateur astable. La tension V_{cc} appliquée à la broche 8 peut être choisie entre 5 et 15 volts.

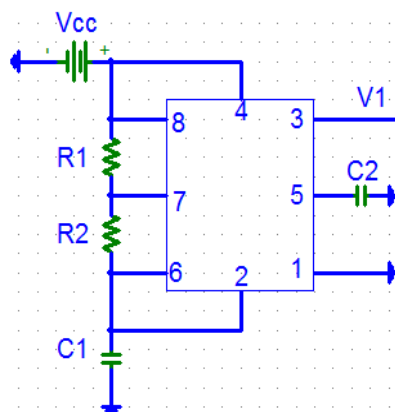


FIGURE 2.2 – Câblage du NE555 en astable.

Afin de déterminer la durée de charge t_h et de décharge t_b du condensateur C_1 , la période T et le rapport cyclique α_T , nous allons considérer le circuit simplifié à base d'un seul amplificateur opérationnel de la figure 2.3.

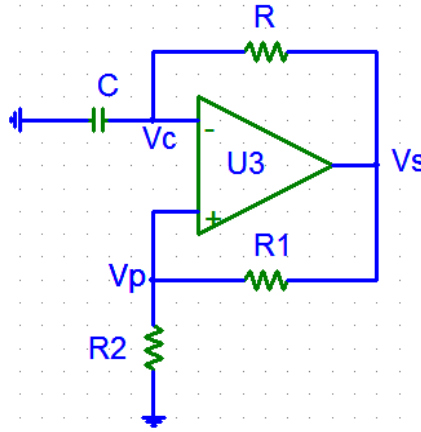


FIGURE 2.3 – Circuit simplifié de l'astable à amplificateur opérationnel.

La tension V_c aux bornes du condensateur obéit à l'équation différentielle

$$\frac{dV_c}{dt} + \frac{1}{RC}V_c = V_s \quad (2.1)$$

L'équation (2.1) a une solution de la forme :

$$V_c = V_s + K \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \quad (2.2)$$

En tenant compte de la condition initiale, à $t = 0$, $V_c = V_0$ nous obtenons

$$V_c = (V_0 - V_s) \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) + V_s \quad (2.3)$$

De la relation (2.3), nous pouvons obtenir l'expression générale donnant le temps de charge et le temps de décharge du condensateur.

$$t = RC \ln\left(\frac{V_0 - V_s}{V_c - V_s}\right) \quad (2.4)$$

En considérant le câblage de l'astable, nous pouvons déterminer les temps de charge et de décharge ainsi que la période des signaux.

Pour le temps de charge, le produit RC est remplacé par $(R_1 + R_2)C_1$ et nous avons : $V_0 = \frac{V_{cc}}{3}$, $V_c = \frac{2V_{cc}}{3}$ et $V_s = V_{cc}$. Par conséquent,

$$t_h = (R_1 + R_2)C_1 \ln 2 \quad (2.5)$$

En ce qui concerne le temps de décharge du condensateur, le produit RC sera remplacé par R_2C_1 . Nous avons $V_0 = \frac{2V_{cc}}{3}$, $V_c = \frac{V_{cc}}{3}$ et $V_s = 0$, d'où l'expression du temps de décharge donné par

$$t_b = R_2C_1 \ln 2 \quad (2.6)$$

La période T de l'astable et son rapport cyclique α_T correspondant sont donnés par les relations suivantes :

$$T = t_h + t_b = (R_1 + 2R_2)C_1 \ln 2 \quad \text{et} \quad \alpha_T = \frac{t_h}{T} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + 2R_2} \quad (2.7)$$

2.2.2 L'oscillateur

L'oscillateur que nous proposons ici est construit autour de deux portes NAND : il est constitué d'une résistance R_4 de protection de l'entrée de la porte U4, de deux portes NAND, d'une résistance variable R_{v1} et d'une capacité C_3 , il a pour rôle l'amplification du signal généré par le multivibrateur.

Lorsque le multivibrateur produit un signal, la broche d'entrée est au niveau haut (état 1) correspondant à V_{\max} la porte U5 se comporte en inverseur car les deux entrées sont reliées et en sortie nous avons un signal positif qui est envoyé à l'entrée de l'oscillateur. Le rapport cyclique de l'oscillateur est $\alpha = 0.5$ et sa fréquence est donnée par la relation suivante :

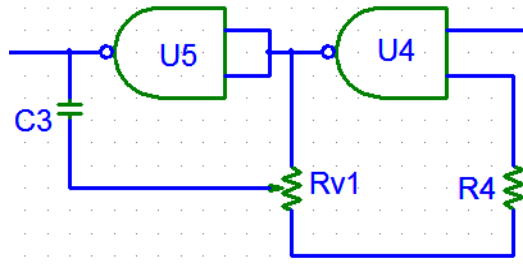


FIGURE 2.4 – Circuit de l'oscillateur à porte NAND.

$$f = \frac{1}{2R_{v1}C_3 \ln 3} \quad (2.8)$$

Pour la production d'un signal d'émission de fréquence $f = 40$ KHz nous avons choisis $R_4 = 1M\Omega$, $R_{v1} = 2.4K\Omega$ et $C_3 = 4.7nF$.

2.2.3 Alimentation du transducteur émetteur

Le transducteur émetteur est alimenté par un montage constitué de deux portes NAND montées en pont qui délivre une tension en forme de créneaux (V_{\max} et $-V_{\max}$) et de rapport cyclique 0.5 correspondant au signal provenant de l'oscillateur.

Si la tension de sortie de l'oscillateur est nulle, l'oscillateur est en position basse. Il n'y a pas de signal, la borne contenant le condensateur C_4 est en position haute (V_{\max}), la tension aux bornes de l'émetteur est V_{\max} . Si la sortie de l'oscillateur est haute, la borne contenant le condensateur est en position basse, l'autre en position haute et la tension aux bornes de l'émetteur est $-V_{\max}$. Le condensateur C_4 ici a pour rôle de bloquer les composantes continues pour le fonctionnement du transducteur HP.

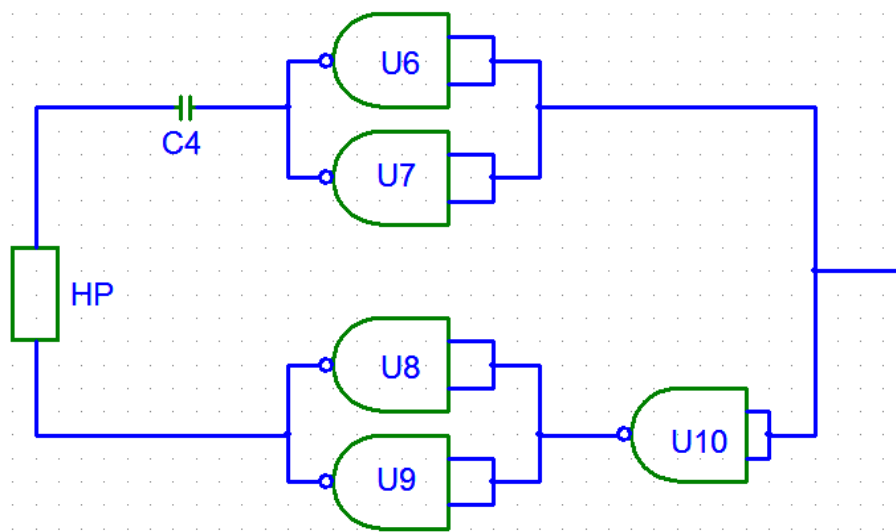


FIGURE 2.5 – Schéma de l'alimentation du transducteur émetteur.

2.3 LE BLOC DE RECEPTION

Ce bloc assure la réception du signal provenant du matériau. Il est constitué d'un capteur (transducteur récepteur), d'un étage amplificateur, d'un filtre, d'un détecteur d'amplitude et d'un détecteur de seuil ou comparateur.

2.3.1 Transducteur ultrasonore

Le transducteur ultrasonore est l'élément clé d'une chaîne de contrôle ultrasonore. Son choix est primordial pour la réussite d'une évaluation non destructive ou une détection. Il en existe plusieurs types basés sur des principes physiques différents tels que la piézoélectricité ou l'électromagnétisme. Il est caractérisé du point de vue électrique par sa fréquence de résonance, son facteur de qualité et sa bande passante. Et du point de vue acoustique, il est caractérisé par la répartition spatiale de la pression acoustique qu'il génère dans le milieu de propagation.

2.3.2 Amplification et filtrage

L'écho reçu par le capteur provenant du matériau est non seulement très faible mais aussi fortement bruité dont il doit être amplifié avec un très grand gain et doit être aussi débarrassé des signaux parasites. Pour le contrôle de défauts, nous avons besoin des ultrasons de fréquence très grande. Pour éliminer ces fréquences indésirables, nous avons utilisé un filtre passe haut de fréquence propre $f = 30$ KHz avec un gain en amplification de $A_v = 1000$. Son schéma est celui de la figure 2.6.

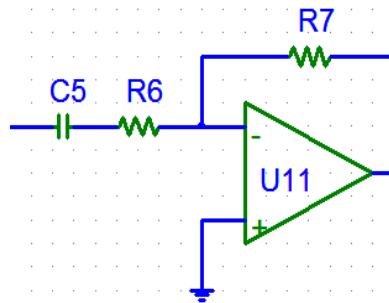


FIGURE 2.6 – Filtre passe haut à Amplificateur Opérationnel.

Pour le dimensionnement de ce filtre, nous allons déterminer sa fonction de transfert H .

$$H = -\frac{R_7}{R_6} \frac{jR_6C_5\omega}{1 + jR_6C_5\omega} = -\frac{R_7}{R_6} \frac{j\frac{\omega}{\omega_c}}{1 + j\frac{\omega}{\omega_c}} \quad (2.9)$$

Le rapport $A_v = \frac{R_7}{R_6}$ représente le gain du filtre alors que la quantité $\omega_c = \frac{1}{R_6C_5}$ est la pulsation de coupure du filtre. Pour obtenir une fréquence de coupure de 30 KHz et un gain de 1000, nous choisissons les valeurs des composants suivantes : $C_5 = 33\text{nF}$, $R_6 = 1\text{K}\Omega$ et $R_7 = 1\text{M}\Omega$.

2.3.3 Détecteur de crête

Un détecteur de crête est un montage permettant de mémoriser la tension la plus élevée de celles mesurées en entrée. Le signal provenant de l'amplificateur est une sinusoïde et doit être transformé. Le rôle du détecteur d'amplitude est donc d'extraire la valeur crête d'une tension alternative. En sortie on obtient donc une tension continue positive qui suit le niveau acoustique reçu. Son schéma est présenté à la figure 2.7.

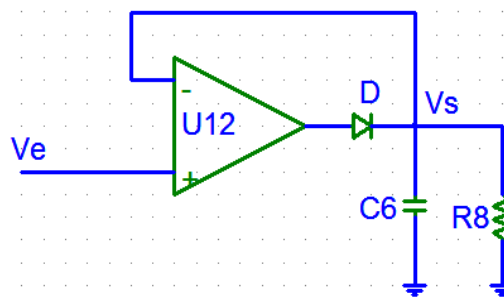


FIGURE 2.7 – Schéma du détecteur d'amplitude.

Le montage équivaut à une diode parfaite (sans seuil) en série avec un condensateur C_6 connecté en parallèle avec une charge de résistance R_8 . La diode conduira dès que la tension d'entrée V_e sera supérieure à la tension V_s aux bornes de la capacité. Si elle conduit, elle chargera le condensateur à cette nouvelle valeur. Lorsque $V_e < V_s$, la diode sera bloquée et la tension aux bornes du condensateur sera alors inchangée.

Pour que le montage fonctionne, il faut premièrement que le condensateur se décharge le moins possible, ce qui nous amène à choisir un modèle à faible courant de fuite et surtout à avoir une résistance de décharge la plus élevée possible et une capacité de grande valeur. D'autre part, l'amplificateur opérationnel choisi doit être capable de supporter une grande tension d'entrée. Les types LM101 et LM301 possèdent cette caractéristique. Nous prendrons $C_6 = 100\mu\text{F}$ et $R_8 = 100\text{K}\Omega$.

2.3.4 Détecteur de seuil

Le montage détecteur de seuil permet d'indiquer si un signal est bien dans une plage désirée. Dans sa forme simple, il s'agit d'un circuit comparateur constitué d'un amplificateur opérationnel et d'un potentiomètre permettant de fixer le seuil ou la référence du signal à détecter. Le montage est celui de la figure 2.8.

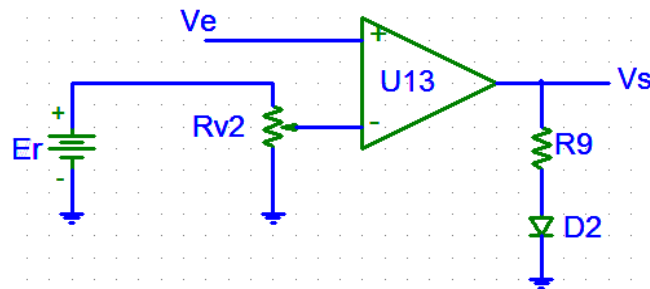


FIGURE 2.8 – Schéma du détecteur de seuil.

La tension V_- présente à l'entrée inverseuse de l'amplificateur opérationnel est donnée par la relation $V_- = x \cdot E_r$. La tension de sortie V_s est donnée par $V_s = V_{cc} \cdot \text{sign}(V_e - x \cdot E_r)$. Donc si le niveau acoustique est suffisamment grand ($V_e \geq x \cdot E_r$), la sortie du comparateur est à un niveau haut, la LED D_2 s'allume et il y'a transmission du signal.

En absence d'ultrason ou en présence d'ultrason de faible niveau acoustique, la sortie du comparateur est au niveau bas, la LED est éteinte et pas de transmission.

Conclusion

Ce chapitre était consacré à la conception du système émetteur et récepteur des ultrasons. Nous allons dans le chapitre suivant réaliser ces différents systèmes et analyser son fonctionnement.

REALISATION DES SYSTEMES EMETTEUR ET RECEPTEUR DES ULTRASONS ET APPLICATIONS

Introduction

Ce chapitre est consacré à la réalisation expérimentale des systèmes émetteur et récepteur des ultrasons. Une application visant à détecter uniquement les fissures dans les matériaux sera présenté.

3.1 CIRCUITS COMPLETS DU DISPOSITIF

3.1.1 Circuit émetteur

En connectant convenablement les différents blocs étudiés au chapitre précédent, nous obtenons le schéma complet de l'émetteur ultrasons. Le circuit complet est celui de la figure 3.1.

Pour produire des ultrasons, il nous faudra un transducteur (HP). Les plus courants fonctionnent autour d'une fréquence de 40 KHz. Nous pouvons comparer le transducteur à un petit haut-parleur car il transforme un signal électrique en vibration de la pression de l'air. Cependant il existe 2 différences importantes.

Un haut parleur utilise généralement une inductance et un aimant pour faire vibrer la membrane, un transducteur ultrasons utilise par contre l'effet piézo-électrique qui fait déformer un cristal lorsque on applique dessus une tension.

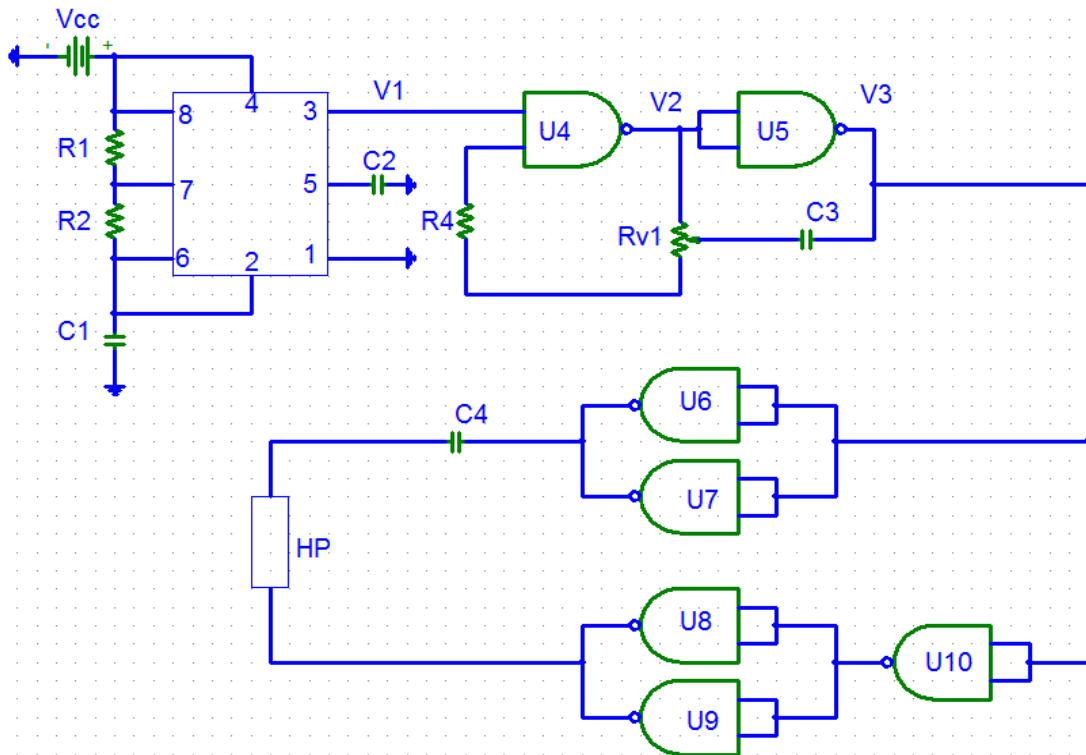


FIGURE 3.1 – Schéma d'un émetteur des ultrasons.

D'autre part, un bon haut parleur doit reproduire un maximum de fréquence dans la gamme audible (20 Hz à 20 KHz), pour un transducteur à ultrasons, nous désirons plutôt un maximum de puissance à une seule fréquence.

3.1.2 Circuit Récepteur

Il s'agit d'un détecteur d'ultrasons, dont le maximum de sensibilité est situé à la fréquence de 40 KHz. Quand des ultrasons sont détectés, la LED D_2 s'allume et le potentiomètre $Rv2$ permet de régler le seuil de détection.

Le transducteur récepteur à ultrasons (TR) est comparable à un microphone, il transforme les variations de pression en signaux électriques. L'effet piézoélectrique est encore utilisé, mais dans l'autre sens.

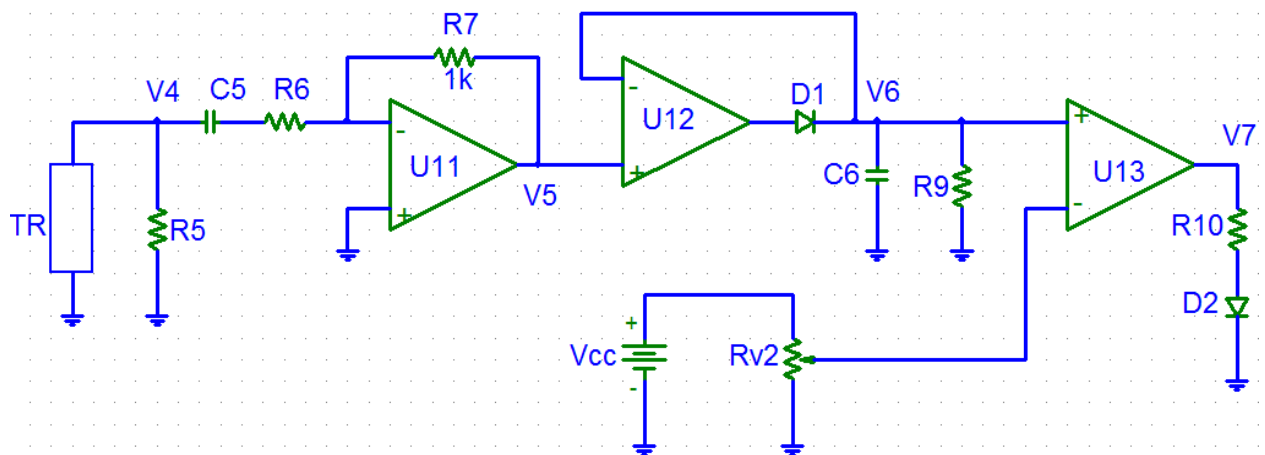


FIGURE 3.2 – Schéma d'un récepteur des ultrasons.

3.2 DISPOSITIF EXPERIMENTAL

3.2.1 Appareillage

Les travaux expérimentaux ont été menés à l'Université de Yaoundé I au Laboratoire de Simulation en Ingénierie, Biomimétismes et Prototypes. Pour notre expérience, nous avons utilisé les appareils suivants :

- Deux plaques à essaie sur lesquelles les circuits ont été réalisés. La photographie est celle de la figure 3.3.

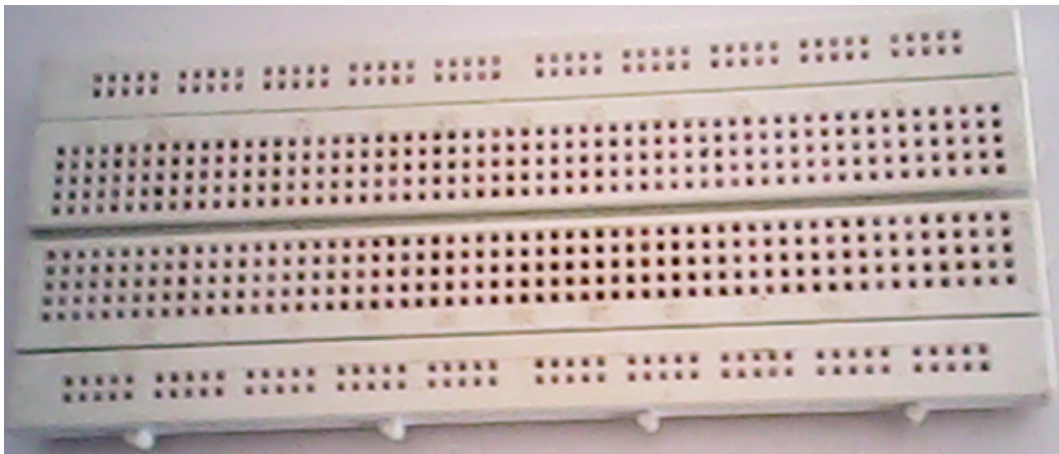


FIGURE 3.3 – Photographie de la plaque à essaie utilisée pour le montage.

- Une alimentation stabilisée de type **DC POWER SUPPLY TPR3005-2D** ayant deux sorties variables (0-30 V) et une sortie fixe de 5 V. La figure 3.4a) présente une photographie de l'alimentation.
- Un oscilloscope de type **VC2040A 600MHz**. Une photographie est donnée à la figure 3.4b).



a)



b)

FIGURE 3.4 – a) Photographie de l'alimentation et b) photographie de l'oscilloscope.

Comme le montre la figure 3.4a), notre circuit sera alimenté par trois tensions, dont deux de 2x12 V symétriques et une de 5 V.

3.2.2 Composants électroniques

En plus des trois amplificateurs opérationnels (LM301), 7 portes logiques NAND (HEF4011B), un multivibrateur (NE555) et des deux transducteurs ultrasonores, les autres composants électroniques utilisés et leurs valeurs sont les suivants : $C_1 = 47\text{nF}$, $C_2 = 1\text{nF}$, $C_3 = 4.7\text{nF}$, $C_4 = 10\text{nF}$, $C_5 = 33\text{nF}$, $C_6 = 100\mu\text{F}$, $R_1 = 1\text{M}\Omega$, $R_2 = 47\text{K}\Omega$, $R_{v1} = 2.4\text{K}\Omega$, $R_4 = 1\text{M}\Omega$, $R_{v2} = 20\text{K}\Omega$, $R_5 = 47\text{K}\Omega$, $R_6 = 1\text{K}\Omega$, $R_7 = 1\text{M}\Omega$, $R_8 = 100\text{K}\Omega$, $R_9 = 100\text{K}\Omega$, $R_{10} = 2.2\text{K}\Omega$, $D_1 =$

IN4007 et une LED. Deux condensateurs de capacité $4700\mu\text{F}$ ont été utilisés pour le filtrage de l'alimentation.

Le circuit émetteur et le circuit récepteur implémentés sur les plaques à essaie sont présentés à la figure 3.5 et à la figure 3.6 respectivement.

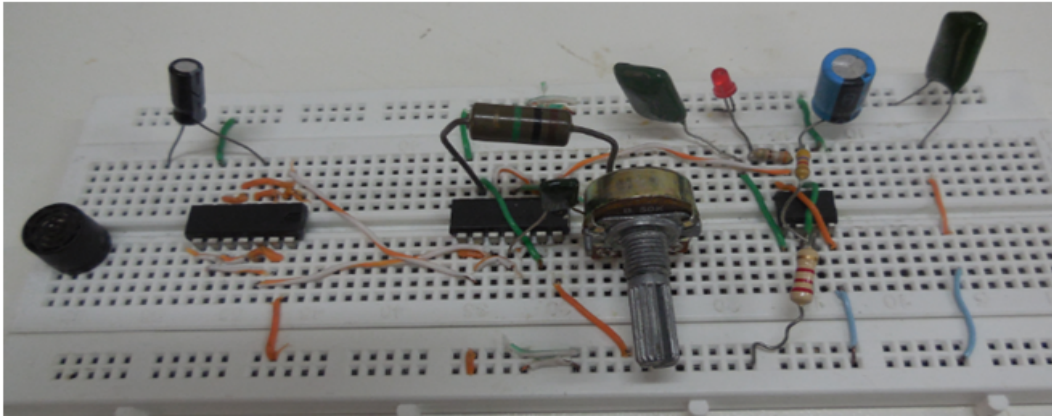


FIGURE 3.5 – *Emetteur ultrason implémenté.*

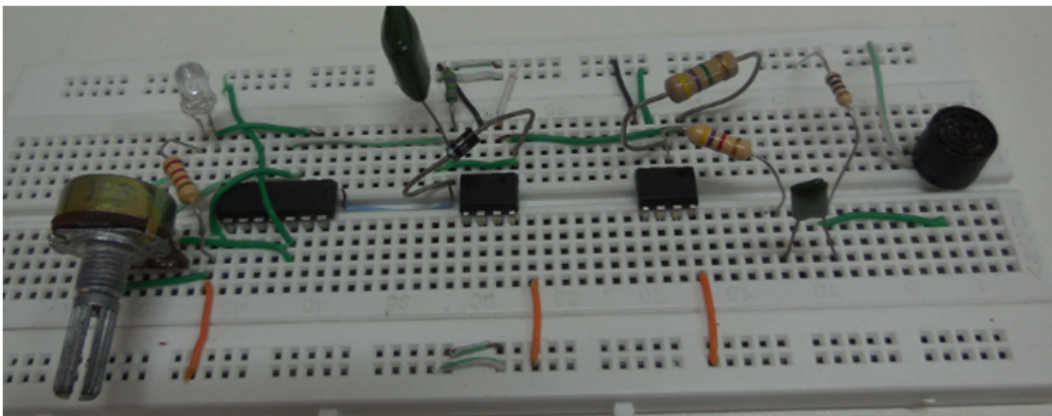


FIGURE 3.6 – *Récepteur ultrason implémenté.*

3.3 RESULTATS EXPERIMENTAUX

3.3.1 Application et principe

Nous avons réalisé un émetteur et un récepteur à ultrasons. Ce projet pourra être utilisé pour différentes applications, par exemple :

- Contrôle non destructif des matériaux,
- Détection de passage, barrière invisible,
- Mesure de distance, sonar,
- Mesure de la vitesse de l'air,
- Transmission de données sans fils.

Dans ce mémoire, nous utiliserons le système implémenté pour la caractérisation des matériaux. La photographie de la figure 3.7 présente la réalisation au laboratoire du système complet obtenu en regroupant les différents blocs.

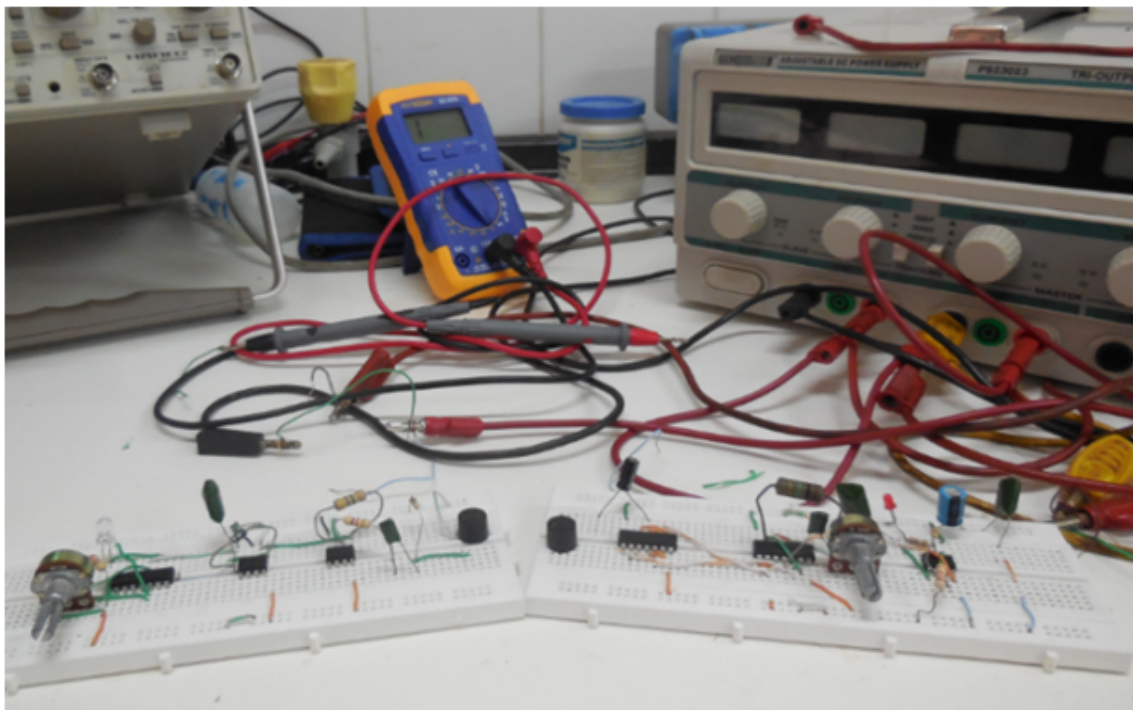


FIGURE 3.7 – *Dispositif complet pour l'expérimentation.*

Pour le test de notre dispositif, nous avons choisi comme matériau le bois. Pour se faire nous avons usiné des petites plaques en bois sapelli de densité $d = 0.69$ et d'épaisseur $e = 1$ cm dont un échantillon est présenté à la figure 3.8.



FIGURE 3.8 – *Echantillon de bois à caractériser.*

3.3.2 Résultats et interprétations

Les transducteurs sont placés du même côté donc nous allons travailler en mode réflexion, les signaux produits par l'émetteur ont une fréquence centrale de 40KHz. La Figure 3.9 présente le signal émis directement par l'émetteur.

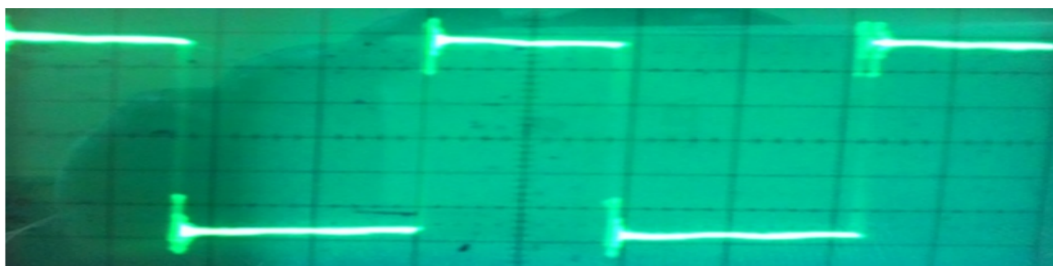
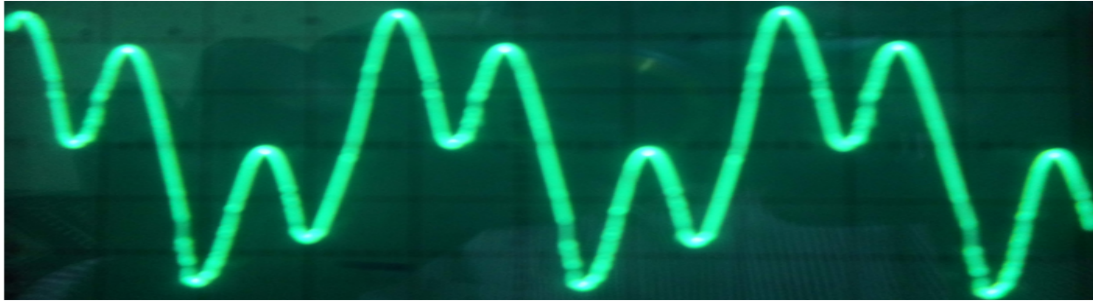


FIGURE 3.9 – *Signal émis directement par l'émetteur et capté par le récepteur..*

Le signal ci-dessous est obtenu par réflexion sur une seule plaque de bois.

Le signal reçu présente deux maxima correspondant au signal réfléchi sur la face avant et au signal réfléchi sur la face arrière. Le morceau de bois ayant deux faces,

FIGURE 3.10 – *Signal réfléchi par une seule plaque de bois.*

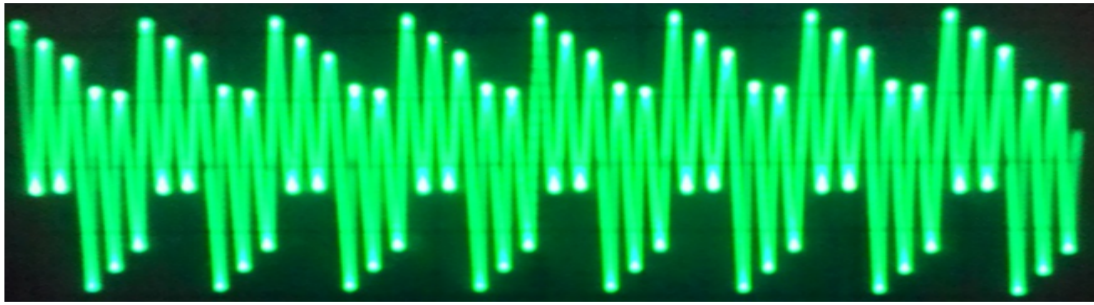
nous pouvons premièrement conclure que ce morceau de bois ne contient pas de défaut. L'amplitude des maxima peut se mettre sous la forme $A = A_0 \exp(-2kx)$ où A_0 est l'amplitude initiale, k est le coefficient d'absorption du bois et x est la profondeur du bois parcourue par l'ultrason. Soient A_1 et A_2 les amplitudes des maxima, nous avons $A_1 = A_0$ et $A_2 = A_0 \exp(-2ke)$. L'épaisseur e du matériau ou le coefficient d'absorption k peut donc être obtenu par la relation suivante :

$$k \cdot e = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \quad (3.1)$$

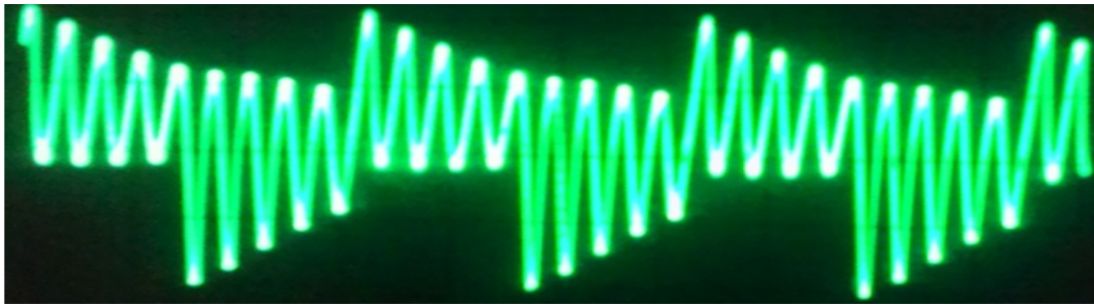
Nous avons trouvé $A_1 = 10.3$ V et $A_2 = 7.8$ V, puisque $e = 1$ cm, nous trouvons $k = 13.9 \text{ m}^{-1}$.

Analysons maintenant le cas où le matériau à caractériser présente un défaut. Pour simuler le défaut, nous avons superposé deux morceaux de bois presque identiques à celui utilisé précédemment. Le signal reçu est celui de la figure 3.11.

Le signal reçu maintenant présente trois maxima correspondant aux multiples réflexions par la face avant, par l'interface et par la face arrière. Puisque nous avons plus de deux maxima, le second pic représente donc l'écho de défaut. En règle générale, le nombre de défaut présent dans le matériau caractérisé est égal au nombre de pics observés moins deux. Ici, nous avons noté $A_1 = 10.3$ V, $A_2 = 7.8$ V et $A_3 = 6.0$ V.

FIGURE 3.11 – *Signal réfléchi par deux plaques de bois superposés.*

Un résultat similaire est obtenu lorsque nous superposons quatre morceaux de bois presque identiques à celui utilisé précédemment. Le résultat obtenu est présenté sur la photographie de la figure 3.12.

FIGURE 3.12 – *Signal réfléchi par quatre plaques de bois superposés.*

Le signal obtenu présente cinq pics correspondants aux réflexions sur les faces avant, arrière et sur les trois interfaces. Ici, nous avons noté $A_1 = 10.3 \text{ V}$, $A_2 = 7.8 \text{ V}$, $A_3 = 6.0 \text{ V}$, $A_4 = 4.5 \text{ V}$ et $A_5 = 3.0 \text{ V}$. Les trois pics intermédiaires qui caractérisent les réflexions sur les interfaces peuvent être vus comme les échos de défauts. Comme précédemment nous observons une perte d'amplitude de l'onde ultrasonore lors de sa propagation, et le fait que les différents pics soient régulièrement espacés montre que les interfaces le sont aussi.

conclusion

Il était question dans ce chapitre de réaliser un circuit émetteur et un circuit récepteur des ultrasons. Nous avons montré expérimentalement comment le système monté peut servir à faire un contrôle non destructif des matériaux. Les différents résultats obtenus sur le bois ont été présentés dans ce chapitre.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail portait sur la caractérisation non destructive des matériaux en utilisant les ultrasons. Dans un premier temps, nous avons présenté les ultrasons, ses applications potentielles et avons fait une description des contrôles non destructifs. Dans la suite, nous avons conçu un système émetteur et un système récepteur des ultrasons. Les schémas électroniques correspondants et les valeurs de paramètres ont été donnés. La réalisation expérimentale des deux systèmes a constitué le début de la troisième phase.

Une fois le dispositif complet réalisé, nous avons procédé à la caractérisation de morceaux de bois d'épaisseur bien connue. L'expérience a été menée avec succès et nous avons pu déterminer le coefficient d'absorption du bois utilisé. Le dispositif ainsi réalisé peut nous permettre de détecter et de localiser les défauts dans certains matériaux.

Avec un seul transducteur émetteur et un seul capteur récepteur, la caractérisation est ponctuelle et ne donne pas une vue étendue des matériaux. Nous projetons dans l'avenir, de coupler plusieurs transducteurs émetteurs et plusieurs capteurs récepteurs pour une caractérisation surfacique des matériaux. La réalisation des dispositifs à fréquence variable est un sujet aussi intéressant car il permettra la caractérisation de plusieurs types de matériaux.

Bibliographie

- [1] C. C Domingues, "conception des transducteurs acoustiques micro-usinés", thèse préparé au laboratoire Tima, 2005.
- [2] Franz Herger. "Bruits des installations à ultrasons", Secteur industriel des arts et métiers, 2012.
- [3] Bididi Bouda Ali "Caractérisation des matériaux par les ondes ultrasonores", 2004.
- [4] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B Coppens, J. V.sanders, "Fundamentals of acoustics". Jhon Wileyfsons, New York, 1982.
- [5] E. Cianci, A. Minotti, V. Foglietti, G. Caliono, M. Pappaturdo, "one dimensional capacitive micro machined ultrasonic transducers arrays for echo graphic probes", microelectronic Engineering val. 73 pp.802-507, 2004.
- [6] J. P. Sferuzzar. "Développement des transducteurs ultrasonores élémentaires en vue de réduire la dimension des générateurs d'ondes de choc", Trek INSERM, 2001.
- [7] Elodie Peronnet, "Identification expérimentale du comportement d'un fuselage composite : détection de défauts par mesure de champ", Laboratoire Génie de production (Ecole Nationale d'ingénieurs de Tarbes).
- [8] Maurice WANNIN, "Evaluation non destructive de la qualité des matériaux". New york, 2012.

-
- [9] A. P. Mauritz, C. Town send and M. Z. Shah Khan. "Non destructive detection of fatigue damage in thick composite by pulse-echo ultrasonic", *composites sciences and technologic*, 60, 23, 2000.
 - [10] Bar-Cohen, Y. AK. Mal, C. J. Hellier, "non-destructive evaluation and qualify control", ASM International. Vol 17. 2009.
 - [11] M. Cherfoaui, "Essais non destructifs chapitre contrôle par ultrason". *Technique de l'ingénieur*, 2000.
 - [12] M. La croix, "Essais non destructifs chapitre ultrasons", *tech, rep, technique d'ingénieur*, 1986.