



Mémoire de Projet de fin d'études

Préparé par :

ALMATROUCH ABDELHAFID

Pour l'obtention du diplôme

Ingénieur d'Etat en

SYSTEMES ELECTRONIQUES & TELECOMMUNICATIONS

Intitulé

**Réalisation d'une Plateforme Ultrason
pour diverses Applications
Industrielles**

Encadré par :

Pr : NAJIA Es-sbai

Mr : Rachid BENNANI (MAScIR)

Soutenu le 24 Juin 2016, devant le jury composé de :

Pr : NAJIA Es-sbai.....: Encadrante

Pr : Mohammed JORIO: Examineur

Pr : Mohcine RAZI.....: Examineur

Dédicaces



With Deepest Gratitude,
To my Parents, my Family, my Friends,
My Teachers
Who have Drenched my Life with their
Love and Wisdom.

Abdelhafid

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements pour tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pendant la durée de mon stage. Ainsi tous les professeurs et cadres qui ont contribué à ma formation durant toutes les étapes de ma vie scolaire.

Je tiens également à remercier **Mr. RACHID BENNANI** ingénieur Senior à MASciR qui n'a jamais hésité à m'aider et me fournir les ressources dont j'avais besoin. Un grand merci aussi à mon Encadrante interne **Mme. Najia Es-sbai** pour ses conseils et son soutien inconditionnel.

Des remerciements spéciaux à tout le corps des enseignants de la Faculté des Sciences et Techniques de Fès pour la formation qu'ils nous ont fournie durant les dernières trois années. La fondation MASciR pour les ressources, l'environnement du travail qu'elle m'a préparé durant mon stage, et tous les Marocains qui ont met leur confiance et leur argent pour nous former afin de changer le destin de cette nation.

Table des Matières

Dédicaces	1
Remerciements.....	2
Table des Matières	3
Résumé	6
Abstract	6
Liste des Abréviations	7
Table des Figures.....	8
Liste des tableaux.....	10
Introduction générale.....	11
CHAPITRE 1 :Organisme d’Accueil et Contexte Général du Projet.....	12
1. Introduction :.....	13
2. Organisme d’accueil :.....	13
2.1. Présentation de MAScIR :	13
2.2. MAScIR MicroElectronics :	14
3. Présentation du projet :.....	15
3.1. Etat de l’art :	15
3.2. Cadre général du projet :	18
4. Conclusion :	21
CHAPITRE 2 :Physique des Ultrasons et Leurs Applications	22
1. Introduction :.....	23
2. Physique des ultrasons :.....	23
2.1. Production des ultrasons :	23
2.2. Définition de l’onde ultrason :.....	25
2.3. Caractéristiques de l’onde ultrason :	25
3. Domaines d’applications :.....	30
3.1. Contrôle non destructif :.....	30
3.2. Imagerie ultrasonique :.....	34
4. Conclusion :	37
CHAPITRE 3 :Structure Générale de la Plateforme.....	38

1. Introduction :	39
2. Description de la plateforme :	39
3. Composants de la plateforme :	40
3.1. Transducteurs ultrasons :	40
3.2. Carte d'acquisition :	45
3.3. Générateur d'impulsions :	49
3.4. Interface graphique :	54
3.5. Communication entre différents modules :	58
4. Conclusion :	63
CHAPITRE 4 : Applications Ultrasons de la Plateforme.....	64
1. Introduction :	65
2. Détecteur d'obstacles :	65
2.1. Description :	65
2.2. Caractéristiques :	65
2.3. Broches de connexion :	66
2.4. Spécifications et limites :	66
2.5. Fonctionnement :	66
2.6. Distance de l'objet :	67
2.7. Branchement du capteur avec la carte d'acquisition :	67
3. Détection de bactéries dans le lait UHT :	71
3.1. Introduction :	71
3.2. Description :	71
3.3. Tests microbiologiques :	72
3.4. Instrumentation ultrason :	73
3.5. Résultats :	73
4. Détection de maturité des fruits « Oranges » :	76
4.1. Introduction :	76
4.2. Description :	76
4.3. Anatomie de la peau d'orange :	76
4.4. Technique utilisée :	78
4.5. Paramètres ultrasons :	78

5. Conclusion :	79
Conclusion et Perspectives	80
Références Bibliographiques.....	81
ANNEXES.....	82
Annexe 1 : Installation de SDFormatter.....	82
Annexe 2 : Installation de Imagewriter.....	84

Résumé

Ce rapport résume le travail accompli dans le cadre de mon projet de fin d'études, au sein de MAScIR, qui consiste en la réalisation d'une plateforme ultrason pour diverses applications industrielles.

La plateforme est constituée de capteurs ultrasons, de différentes fréquences selon l'application, qui ont pour rôle d'émettre et de recevoir des signaux ultrasons, d'un générateur d'impulsions qui alimente le transducteur ultrason, d'une carte d'acquisition de données « Raspberry Pi2 » et d'une interface graphique pour la visualisation et l'interprétation des signaux reçus à partir des cibles.

Pour s'assurer du bon fonctionnement de la plateforme on a pensé à réaliser plusieurs applications ultrasons tel que la mesure de distance d'un obstacle, la détection de bactéries dans le lait UHT et la détection de maturité des oranges

Abstract

This report summarizes the work done as part of my graduation project in MAScIR, which involves carrying out an ultrasonic platform for various industrial applications.

The platform consists of ultrasonic sensors of different frequencies depending on the application to have. the role of transmitting and receiving ultrasound signals, a pulse generator which supplies the ultrasonic transducer, a capture data card "Raspberry Pi2 "and a graphical interface for viewing and interpreting the signals received from the target.

To ensure proper operation of the platform we realized several applications such as ultrasonic distance measurement of an obstacle, the detection of bacteria in UHT milk and oranges maturity detection.

Liste des Abréviations

MAScIR: Moroccan Foundation for Advanced Science, Innovation and Research

API: Application Program Interface

CPU: Central processing unit

DSP: Digital signal process

GUI: Graphical User interface

RGB: Red, Green,Blue

ARM: Acorn RISC Machine

CSP: Chip Scaled Packaging

SMT: Surface Mount Technology

SEM: Scanning Electron Microscope

SAM: Scanning Acoustic Microscope

AFM: Atomic Force Microscopy

END : Evaluation Non Destructive

Table des Figures

FIGURE 1.1 : MACHINE SAM 300	17
FIGURE 1.2: MACHINE ULTRASON PORTABLE	18
FIGURE 1.3 : PLANNING DU PROJET SUR GANTTPROJECT	21
FIGURE 2.1: EFFET PIEZO-ELECTRIQUE DIRECTE ET INVERSE	24
FIGURE 2.2: LE SPECTRE DES FREQUENCES ACOUSTIQUES	25
FIGURE 2.3 : PHENOMENE DE REFLEXION ET DE REFRACTION DES ONDES.....	28
FIGURE 2.4: PHENOMENE DE DIFFUSION DES ONDES	28
FIGURE 2.5: PHENOMENE D'ABSORPTION DES ONDES.....	29
FIGURE 2.6: PHENOMENE D'ATTENUATION DES ONDES ULTRASON.....	29
FIGURE 2.7: FONCTIONNEMENT DE DETECTION ULTRASON DES MATERIAUX.....	32
FIGURE 2.8: CONTROLE NON DESTRUCTIF D'UN MATERIEL.....	33
FIGURE 3.1: PLATEFORME ULTRASON MASCIR.....	39
FIGURE 3.2: VUE ECLATEE BOITIER	40
FIGURE 3.3: VUE ASSEMBLEE DU BOITIER	40
FIGURE 3.4: CONSTITUANTS D'UN TRANSDUCTEUR ULTRASON	42
FIGURE 3.5: COUPLAGE DU TRANSDUCTEUR PAR IMMERSION.....	43
FIGURE 3.6: COUPLAGE D'UN TRANSDUCTEUR PAR CONTACT	43
FIGURE 3.7: TRANSDUCTEUR PAR CONTACT.....	44
FIGURE 3.8: TRANSDUCTEUR PAR IMMERSION.....	44
FIGURE 3.9: IMAGE ILLUSTRANT UNE CARTE RASPBERRY Pi2	45
FIGURE 3.10: TELECHARGEMENT SYSTEME D'EXPLOITATION RASPBIAN	46
FIGURE 3.11: LOGICIEL SDFORMATTER	47
FIGURE 3.12: LOGICIEL IMAGEWRITER.....	47
FIGURE 3.13: FORMATAGE DE LA CARTE SD	47
FIGURE 3.14: AJOUT DU SYSTEME D'EXPLOITATION SUR LA CARTE SD.....	48
FIGURE 3.15: SYSTEME D'EXPLOITATION RASPBIAN	48
FIGURE 3.16: GENERATEUR D'IMPULSIONS DPR 300	49
FIGURE 3.17: SCHEMA DU PULSEUR /RECEIVER DPR 300	50
FIGURE 3.18: CONFIGURATION DU GENERATEUR D'IMPULSIONS EN MODE PULSE-ECHO	51
FIGURE 3.19: CONFIGURATION DU GENERATEUR EN MODE TRANSMISSION	51
FIGURE 3.20: FONCTIONS D'ONDE DE L'INTERFACE GRAPHIQUE	54
FIGURE 3.21: SIGNAL SINUSOÏDAL SUR L'INTERFACE GRAPHIQUE.....	55
FIGURE 3.22: SIGNAL TRIANGULAIRE DE L'INTERFACE GRAPHIQUE	55
FIGURE 3.23: SIGNAL CARRE DE L'INTERFACE GRAPHIQUE	55
FIGURE 3.24: CURSEURS DE L'INTERFACE GRAPHIQUE	56
FIGURE 3.25: RAPPORT CYCLIQUE DE L'INTERFACE GRAPHIQUE	56

FIGURE 3.26: PARAMETRES DE SIGNAL DE L'INTERFACE GRAPHIQUE	57
FIGURE 3.27: CAPTURE DE SIGNAL DE L'INTERFACE GRAPHIQUE	57
FIGURE 3.28: ARCHITECTURE D'UN RESEAU USB	58
FIGURE 3.29: LES CONNECTEURS USB	59
FIGURE 3.30: COMPOSITION DES PERIPHERIQUES USB	60
FIGURE 4.1: CAPTEUR HC-SR04.....	66
FIGURE 4.2: FONCTIONNEMENT DU CAPTEUR HC-SR04	67
FIGURE 4.3: CAPTEUR HC-SR04 AVEC RASPBERRY Pi2	68
FIGURE 4.4: DIVISEUR DE TENSION	68
FIGURE 4.5: DISTANCE DU CAPTEUR A L'OBSTACLE.....	69
FIGURE 4.6: SIGNAUX DU CAPTEUR SUR L'INTERFACE GRAPHIQUE	70
FIGURE 4.7: MONTAGE DU CAPTEUR AVEC LA PLATEFORME	70
FIGURE 4.8: SIGNAL ULTRASONORE TRANSMIS SUR LE PACKAGE DU LAIT.....	74
FIGURE 4.9: TRANSFORMEE DE HILBERT APPLIQUEE SUR LE SIGNAL	74
FIGURE 4.10: MESURE DU TEMPS DE VOL DU SIGNAL ULTRASON PAR CORRELATION CROISEE.....	75
FIGURE 4.11: ANATOMIE DE L'ORANGE.....	77
FIGURE 5.1: PAGE DE TELECHARGEMENT DE SDFORMATTER	82
FIGURE 5.2: DESTINATION DU FICHIER D'INSTALLATION	82
FIGURE 5.3: INSTALLATION DE SDFORMATTER	83
FIGURE 5.4: SDFORMATTER VERSION 4.0	83
FIGURE 5.5: FICHIER D'INSTALLATION WIN32DISKIMAGER COMPRESSE.....	84
FIGURE 5.6: LE FICHIER EXECUTABLE DE WIN32DISKIMAGER	84
FIGURE 5.7: LOGICIEL WIN32DISKIMAGER.....	85

Liste des tableaux

TABLEAU 2-1: VITESSE DE PROPAGATION DES ONDES ULTRASONNS DE QUELQUES MATERIAUX	26
TABLEAU 2-2: IMPEDANCE ACOUSTIQUE DE QUELQUES MATERIAUX	26
TABLEAU 3-1: CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DU PULSER.....	52
TABLEAU 3-2: CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DU RECEIVER.....	52
TABLEAU 3-3: FORMAT D'UNE REQUETE USB.....	63
TABLEAU 4-1: SPECIFICATIONS DU CAPTEUR HC-SR04.....	66
TABLEAU 4-2: NORME MICROBIOLOGIQUE DU NOMBRE DE BACTERIES PAR 100ML.....	72

Introduction générale

L'orientation actuelle du département Micro-électroniques de la fondation MAScIR est le développement des systèmes miniaturisés de grandes performances au profit des industries Marocaines. Vu que la fondation est en contrat avec d'autres partenaires pour développer des systèmes profitant des nouvelles technologies, le besoin de faire des démonstrations qui prouvent la capacité de la fondation à mener ce type de projets s'impose. Dans cette optique, l'équipe Packaging a décidé de concevoir et mettre en place une Plateforme de démonstration ultrason pour diverses applications non destructives. Le but de mon stage au sein du département est de réaliser cette plateforme, partie matérielle et partie logicielle, et de l'utiliser pour faire des démonstrations pour des applications bien spécifiées.

Ce rapport est organisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre décrit en détail la fondation MAScIR, ses départements et ses thématiques de recherche, ensuite la situation du projet dans son contexte général, et son rôle dans la stratégie actuelle de la fondation. Ainsi que la planification du travail effectué durant mon stage.

Dans le second chapitre intitulé physique et applications industrielles des ultrasons, nous donnons une présentation succincte des ultrasons pour mieux comprendre les phénomènes qui surviennent dans la pratique aussi nous décrivons quelques applications industrielles des ultrasons.

Dans le troisième chapitre nous décrivons d'une manière exhaustive toutes les parties qui constituent la plateforme que nous avons réalisée et les raisons du choix de chaque élément.

Dans le quatrième chapitre « applications ultrasons de la plateforme » nous donnons les étapes suivies pour la mise en place de chaque application sur la plateforme ainsi que les résultats obtenus et l'importance de chaque modèle dans le domaine industriel.

Une conclusion résumant le travail effectué et des perspectives pour améliorer le produit final sont données à la fin de ce rapport.

CHAPITRE 1 :

**Organisme d'Accueil et
Contexte Général du Projet**

1. Introduction :

Le présent chapitre est une introduction au projet et son contexte général. Dans un premier temps, nous présentons le lieu d'accueil du stage à savoir la fondation MAScIR. Par la suite nous situons le projet dans la stratégie du département MicroElectronics et nous terminons par détailler le planning de la conduite du projet.

2. Organisme d'accueil :

Avant de développer notre projet en profondeur, il serait judicieux de présenter l'organisme d'accueil et de parcourir son historique pour se mettre davantage dans le contexte du stage et les raisons qui ont poussé à le mettre en réalisation.

2.1. Présentation de MAScIR :

MAScIR (Moroccan foundation for Advanced Science, Innovation and Research) est un organisme de recherche à caractère scientifique et technologique. Il est voué à la recherche en nanotechnologie, en biotechnologie, en technologie numérique, en microélectronique, en énergie et en environnement, la fondation se veut être présente là où les enjeux de la société l'exigent.

Rassemblant d'éminents chercheurs des quatre coins du monde, MAScIR regroupe des équipes scientifiques œuvrant dans des domaines innovants et complémentaires et met à leur disposition des instruments scientifiques de pointe.

Initialement fondée en 2007 par le Gouvernement Marocain en tant que fondation à but non lucratif.

MAScIR Microélectroniques : créé vers la fin de l'année 2008, a pour objectif de devenir un centre de Recherche et Développement dans le domaine de la microélectronique.

MAScIR Biotechnologie : deuxième centre inscrit dans MAScIR œuvrant dans le domaine de la recherche et développement des médicaments et des biocides.

MAScIR Nanotechnologie : a pour mission de mener des recherches appliquées, innovantes et à la fine pointe de la technologie pour créer de la propriété intellectuelle et des prototypes dans le domaine des nanomatériaux et des nanotechnologies. Ces recherches sont menées par une équipe internationale de haut calibre travaillant dans un environnement unique et utilisant une infrastructure de pointe.

2.2. MAScIR MicroElectronics :

MAScIR MicroElectronics est un centre d'innovation et de développement des technologies dans le milieu microélectronique. Il se concentre sur le micro packaging, l'ingénierie, les tests de simulation, le design, la qualification, le prototypage de produits micro-électroniques et les systèmes embarqués. Parmi les projets traités par MAScIR MicroElectronics, nous citons :

- *Design et Micro packaging CSP et PILR.*
- *Tests de fiabilité sur les packages.*
- *Circuits embarqués sur une application wafer level camera fabriquer au Maroc par Nemotek Technologie.*

La mission de MAScIR est de promouvoir l'excellence dans la recherche et le développement des technologies au MAROC dans le but de générer de la valeur, des emplois à travers l'intégration dans le marché des technologies avancées dans le but de produire de la propriété intellectuelle et de créer des spin-offs.

2.2.1. Équipements :

- *La modélisation, l'assemblage et la qualification.*
- *Systèmes embarqués.*
- *Management de projets.*

2.2.2. Missions :

La mission de MAScIR MicroElectronics est de devenir un centre d'excellence en Microélectronique et en Miniaturisation incluant l'électronique Digitale et Analogique, le Logiciel, l'Optique et les Technologies de packaging.

MAScIR MicroElectronics fournit des services pour des clients industriels, mais elle développe aussi son propre business dans les domaines suivants :

- *L'intégration et la miniaturisation des systèmes microélectroniques.*
- *L'analyse de fiabilité et défaillance des produits.*
- *Modélisation des systèmes complexes.*
- *Prototypage et industrialisation des produits innovants.*
- *Industrialisation des idées et résultats académiques.*

2.2.3. Laboratoires :

MAScIR possède plusieurs laboratoires équipés de technologie avancée :

- *Chambre blanche*
- *Laboratoire optique*
- *Laboratoire électronique*
- *Ligne CSP (Chip Scaled Packaging), Ligne SMT (Surface Mount Technology)*
- *SEM (Scanning Electron Microscope), SAM (Scanning Acoustic Microscope)*
- *X-Ray*
- *AFM (Atomic Force Microscopy)*

L'organisme d'accueil, et le contexte du travail étant éclaircis, la suite portera une description de l'état de l'art et du plan d'action sous Gantt.

3. Présentation du projet :

3.1. Etat de l'art :

La technologie ultrason devient de plus en plus utilisé dans tous les domaines industriels et Médicales vu son profil non invasif et non destructif. Pour cela on trouve sur le marché des machines pour diverses applications aussi des machines pour des utilisations spécifiques. La fondation MAScIR

possède une machine ultrason SAM 300 pour diverses applications qui se base sur la méthode de la microscopie acoustique.

3.1.1. La microscopie acoustique :

La microscopie acoustique est une technique non destructive, qui peut être utilisée pour caractériser la structure interne d'un échantillon à tester. C'est une méthode d'imagerie et de caractérisation utilisant des ondes mécaniques de fréquence suffisamment élevées (de quelques MHz à plusieurs GHz) pour atteindre des résolutions comparables à celles des microscopes optiques. Les applications sont nombreuses dans la recherche et l'industrie pour détecter des défauts dans des matériaux multicouches. Le contrôle non destructif fait partie des activités de cette méthode qui consiste à examiner un objet dans son volume ou une surface.

Cette technique s'appuie sur les principes de propagation d'onde mécanique dans les solides et les fluides, de fréquences situées dans le domaine ultrasonore. Plus précisément, il s'agit de produire une vibration dans la pièce à examiner et de détecter les signaux après interaction avec les éventuels défauts présents dans celle-ci. Cette technologie utilise la propagation d'ondes ultrasonores dans les milieux pour réaliser une image de l'échantillon par le biais de transducteur. La pièce à tester est plongé dans un milieu liquide, comme de l'eau ou de l'alcool, afin d'assurer une transmission optimale des ondes. Le transducteur à ultrasons émet des impulsions dans le milieu liquide et à travers l'échantillon. Les ondes sont réfléchies par les discontinuités et les interfaces au sein du composant analysé et sont reçues par le transducteur qui sert aussi de récepteur. Le transducteur transforme ces ondes acoustiques réfléchies en signal électromagnétique, visibles en pixel avec un niveau de gris qui est fonction de l'amplitude du signal de l'échantillon. L'intensité du signal reçue dépendra de la structure de l'échantillon et en particulier des adhérences des interfaces constitutives de la pièce.



Figure 1.1 : Machine SAM 300

3.1.2. Limitations de la machine SAM :

La machine SAM 300 possède plusieurs limitations, nous citons :

- ✓ Difficulté de déplacement vu sa grande taille.
- ✓ Difficulté de manipulation et de maintenance.
- ✓ Bande de fréquences restreinte.

3.1.3. Machines ultrasons portables :

Il existe sur le marché d'autres machines qui ont des utilisations spécifiques, par exemple la détection d'épaisseur ou la détection d'obstacles.



Figure 1.2: Machine ultrason portable

3.1.4. Limitations des machines portables :

Les machines ultrasons portables possèdent eux aussi plusieurs limitations, nous citons à titre d'exemple :

- ✓ Bande de fréquence limitée
- ✓ Utilisées pour un nombre d'applications limitées.

3.1.5. Approche MAScIR :

L'idée de MAScIR et plus précisément l'équipe packaging est de réaliser un équipement ultrason performant mais miniaturisé ; cette machine sera placée au laboratoire pour faire des tests au sein de MAScIR, ainsi la portabilité de la plateforme doit être assurée pour faire des tests sur terrain suite à la demande des clients.

3.2. Cadre général du projet :

3.2.1. Motivation :

Actuellement, le département Packaging de MAScIR possède une machine de test ultrason SAM 300 mais le problème c'est que cette machine n'est pas portable et la maintenance prend beaucoup de temps, le but de MAScIR est d'arriver à réaliser une machine avec plus de performance mais

qu'elle soit la plus petite possible c'est dans cette optique que vient le projet de réalisation d'une plateforme ultrason.

3.2.2. Objectifs :

L'objectif principal de mon projet de fin d'études à MAScIR est de faire un balayage de toutes les méthodes Ultrason qui existent sur le marché, par la suite proposer une architecture globale de la plateforme, finalement faire un assemblage de toutes les parties pour avoir une plateforme fonctionnelle.

3.2.3. Description :

Mon projet de fin d'études consiste à réaliser une plateforme ultrason de démonstration pour diverses applications technologiques suite à une demande client. Pour cette raison l'équipe Packaging a proposé qu'on travaille sur trois applications :

- Montage qui calcule la distance d'un capteur ultrason au premier obstacle qu'il rencontre.
- Détection du nombre de bactéries dans le lait UHT à partir du signal Echo reçu à partir d'un carton de lait UHT.
- Détection de la maturité des fruits à partir de l'épaisseur du flavédo.

Le projet couvre plusieurs aspects : préparer la carte d'acquisition, assurer la communication entre toutes les parties de la plateforme, réaliser une interface graphique et filtrage du signal.

3.2.4. Planification du projet :

Le 25 janvier 2016 marque le début officiel de mon stage au sein de la fondation MAScIR. Les grandes étapes de ce projet sont résumées dans la liste suivante :

- ✓ Réaliser une étude bibliographique sur les techniques existantes utilisées pour la détection ultrason. En particulier l'étude analysera l'état de l'art.
- ✓ Définition des méthodes et algorithmes permettant de définir les caractéristiques géométriques de l'obstacle à détecter.
- ✓ Conception et réalisation des prototypes de la plateforme de détection ultrason.
- ✓ Développement soft d'une application permettant de visualiser les performances souhaitées.
- ✓ Test et validation laboratoire des solutions proposées.

Le planning et l'avancement des taches sont résumés sur le diagramme de Gantt ci-dessous :

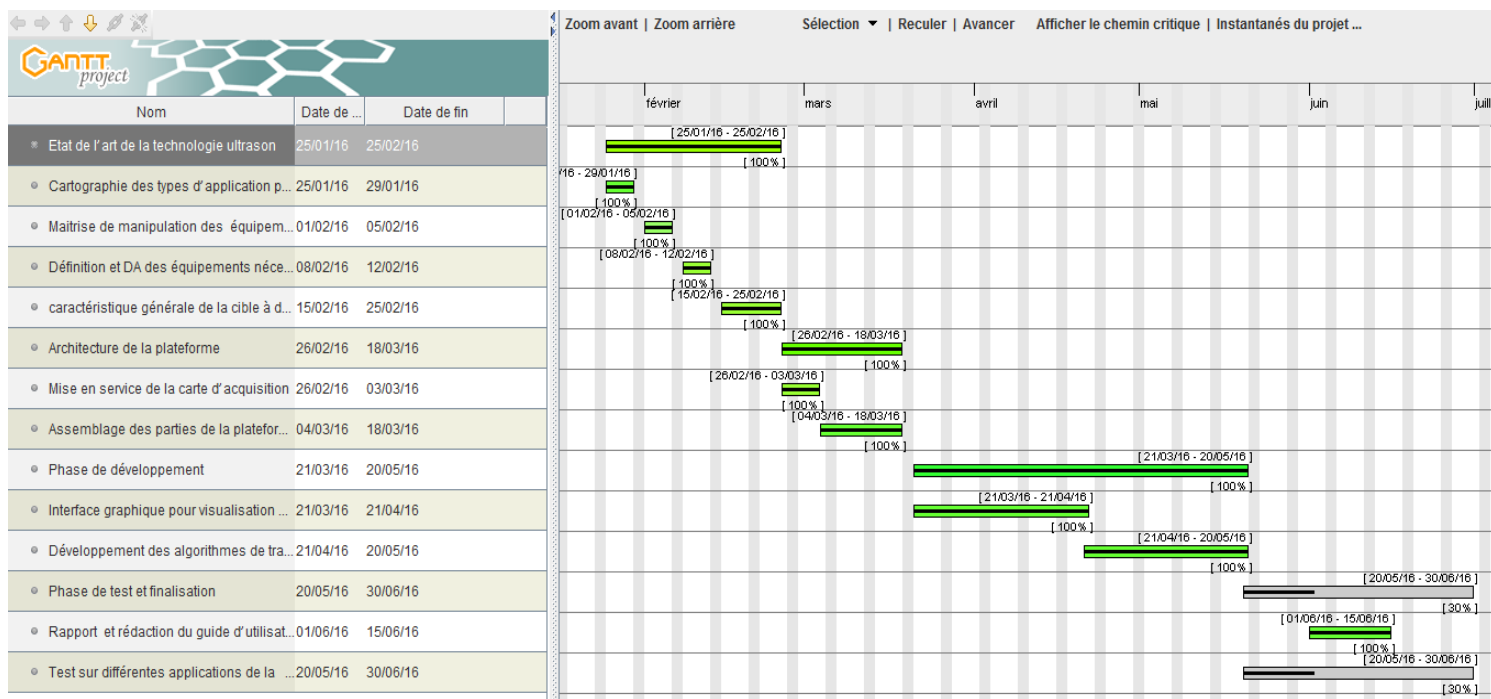


Figure 1.3 : Planning du projet sur GanttProject

4. Conclusion :

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté l'organisme d'accueil MAScIR, ses différents départements, et sa stratégie. Puis nous avons défini le cadre général du projet, et nous l'avons situé dans la tendance globale de l'équipe Packaging. Enfin nous avons donné le diagramme de Gantt adopté pour conduire le projet

CHAPITRE 2 :

**Physique des Ultrasons et
Leurs Applications**

1. Introduction :

Ce chapitre est une introduction au domaine des ultrasons, afin de définir les notions de base qu'on utilisera dans la suite du document. Ainsi, on met en évidence les paramètres physiques qu'il faut prendre en considération lors de la réalisation de la plateforme. Ensuite on présente les applications de la technologie ultrason dans le contexte industriel « contrôle non destructif » et médical « imagerie médical ».

2. Physique des ultrasons :

2.1. Production des ultrasons :

Toutes les sources de bruits audibles émettent des ondes mécaniques couvrant en partie le spectre ultrasonore. De nombreux animaux sont des émetteurs d'ultrasons (chauvesouris, dauphins, insectes, etc.).

Pour les fréquences de 20 à 100 kHz, la technologie est identique à celle des émetteurs sonores (sifflet ou sirène) mais fonctionnant à des fréquences plus élevées, non audibles par l'homme. Il existe d'autres générateurs d'ultrasons de basses fréquences, basés sur l'effet de magnétostriction en particulier.

Cependant, pour les fréquences du domaine médical et la majorité des fréquences industriels, la production d'ultrasons est basée uniquement sur l'effet piézo-électrique

2.1.1. Effet piézo-électrique :

La piézo-électricité se traduit par l'apparition de charges électriques à la surface de certains cristaux soumis à une contrainte mécanique. Il s'agit d'un phénomène réversible, puisqu'inversement, une modification mécanique peut engendrer l'apparition de charges donc un courant électrique. Les cristaux en cause doivent présenter un centre d'asymétrie lors d'une compression, le plus connu est le quartz qui est une forme cristalline de la silice (SiO₂) Lors de contraintes mécaniques imposées au cristal, il n'y a pas de modification du centre de gravité des charges, donc pas d'effet piézo-électrique.

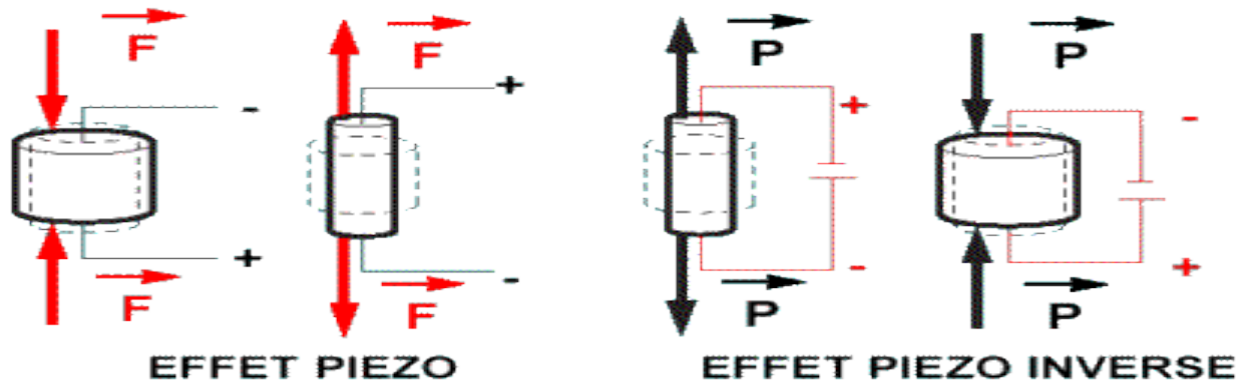


Figure 2.1: Effet piézo-électrique directe et inverse

Les contraintes mécaniques modifient le centre de gravité des charges électriques, donnant naissance à un dipôle électrique. L'apparition de cette différence de potentiel est l'effet piézo-électrique. Il existe ainsi un couplage électromécanique, car si une différence d'épaisseur se traduit par une différence de potentiel, à l'inverse une différence de potentiel imposée au cristal se traduit par une différence d'épaisseur

Si on ajoute une différence de potentiel, ΔV , l'épaisseur du cristal variera de Δd , de façon proportionnelle à ΔV .

$$\text{Il vient : } \Delta V = k \times \Delta d \quad (1)$$

k : est caractéristique du matériau. Lorsque la variation de potentiel est sinusoïdale, il existe une épaisseur de cristal pour laquelle celui-ci vibre par phénomène de résonance mécanique ; Une émission d'ultrasons de fréquence fixe est générée. Outre le quartz, il existe d'autres matériaux piézo-électriques. Citons les céramiques (titanate, zirconate de plomb, de calcium) refroidies dans un champ électrique intense, ce qui leur confère une polarisation et une capacité piézo-électrique. L'effet piézo-électrique présente une dualité émission-réception, car le même élément est à la fois émetteur et récepteur.

En émission, une différence de potentiel sinusoïdale imposée au cristal entraîne une vibration mécanique de nature ultrasonore. En réception, une onde ultrasonore reçue

par le cristal après réflexion produit une différence de potentiel mesurable au niveau du même cristal.

2.2. Définition de l'onde ultrason :

Les ultrasons sont des ondes infra-acoustiques, qui oscillent à des fréquences supérieures au seuil acoustique. ($20\text{KHz} < \text{ultrason} < 1\text{GHz}$) Un ultrason est une vibration de même nature que le son, mais de fréquence supérieure à la plus haute fréquence audible pour un homme. Ces vibrations sont produites dans la matière à une fréquence supérieure à 20 000 Hz. Les ultrasons se déplacent à des vitesses différentes dans les différents milieux traversés. Ils détiennent les mêmes propriétés générales que les ondes élastiques, c'est-à-dire des ondes vibratoires ou des ondes des pressions dépendant du milieu de propagation.

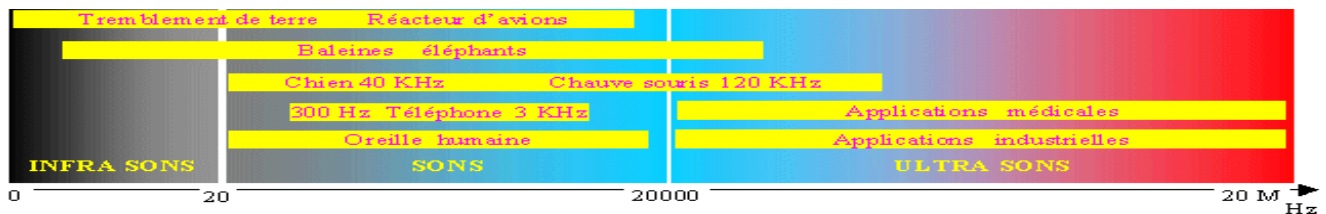


Figure 2.2: Le spectre des fréquences acoustiques

2.3. Caractéristiques de l'onde ultrason :

L'onde ultrason est une onde de pression longitudinale, les molécules vibrant dans la direction de propagation de l'énergie, Le passage de l'onde induit des zones de détente et compression. L'onde ultrason est définie par sa longueur d'onde λ et sa

fréquence f qui sont liées par la relation :

$$\lambda = \frac{C}{f} \quad (2)$$

C : correspond à la vitesse de propagation de l'onde dans le milieu, il est constant pour chaque milieu et dépend de son élasticité E (capacité du milieu à retrouver sa forme et taille d'origine) et de sa densité ρ (proximité des molécules).

$$C = \sqrt{\left(\frac{E}{\rho}\right)} \quad (3)$$

2.3.1. Vitesses de propagation :

La vitesse de propagation des ultrasons dépend des caractéristiques du milieu dans le tableau suivant, nous donnons la vitesse de propagation pour certains milieux usuels [1] :

Tissu	C (m/s)
Eau	1480
Air	340
Sang	1566
Graisse	1450
Muscle	1550-1630
Peau	1600
Cerveau	1530

Tableau 2-1: Vitesse de propagation des ondes ultrasons de quelques matériaux

2.3.2. Impédance acoustique :

L'impédance acoustique Z représente la résistance du milieu à la propagation de l'onde :

$$Z = \rho C \quad (4)$$

Tissu	Z (kg m⁻² s⁻¹)
Eau	1.48*10 ⁶
Air	440
Sang	1.66*10 ⁶
Muscle	1.65 – 1.74*10 ⁶
Cerveau	1.55*10 ⁶

Tableau 2-2: Impédance acoustique de quelques matériaux

2.3.3. Interface :

Une interface acoustique est définie comme étant la surface de séparation entre deux milieux de Z différents. L'onde entrant en contact avec cette interface subit de nombreux phénomènes qui selon leur importance et leurs combinaisons définiront l'image finalement restituée, il existe plusieurs phénomènes d'interaction :

Transmission :

Lorsqu'une onde passe d'un milieu à un autre, une partie de l'énergie incidente est transmise et l'autre est réfléchi au niveau de l'interface séparant ces deux milieux. La transmission est directement liée à l'impédance acoustique du milieu traversé.

$$I_{transmis} / I_{incident} = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (5)$$

Réflexion :

Le faisceau réfléchi repart avec un angle identique à l'angle d'incidence, La réflexion est aussi directement liée à l'impédance acoustique du milieu traversé.

$$I_{transmis} / I_{incident} = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (6)$$

Plus la différence d'impédance acoustique entre deux tissus est élevée, plus la réflexion est grande, si la réflexion a lieu sur une surface irrégulière, elle sera omnidirectionnelle et de faible amplitude.

Réfraction :

Le faisceau transmis ne conserve sa direction initiale que dans le cas où il est perpendiculaire à l'interface. Dans tous les autres cas il est partiellement dévié ce que l'on appelle la réfraction. La réfraction se produit avec un angle qui est fonction des différentes impédances acoustiques.

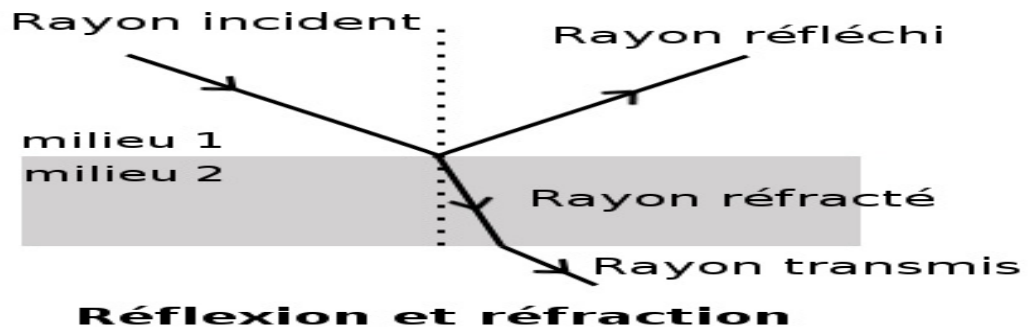


Figure 2.3 : Phénomène de réflexion et de réfraction des ondes

Diffusion :

Correspond à la réémission dans toutes les directions de l'espace d'une fraction minime de l'énergie ultrasonore. Elle dépend de la taille des structures internes des organes et de son rapport à la longueur d'onde. Diffusion directionnelle si $\Phi > \lambda$, Diffusion antérieure et postérieure si $\Phi = \lambda$, Diffusion omnidirectionnelle si $\Phi \ll \lambda$.

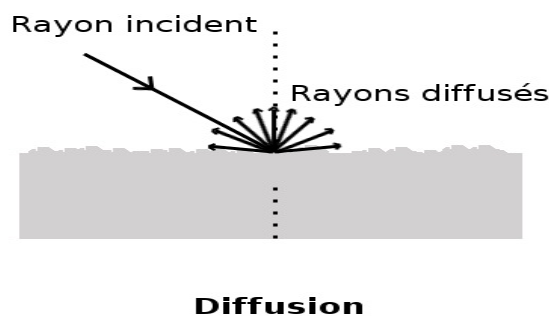
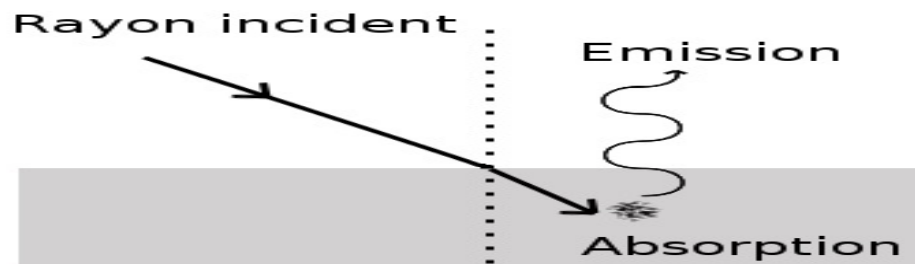


Figure 2.4: Phénomène de diffusion des ondes

Absorption :

Elle est due à la transformation de l'énergie mécanique en chaleur par des phénomènes de friction interne (liés à la viscosité) et au temps de relaxation des molécules (durée du retour à leur position initiale entre chaque onde).



Absorption

Figure 2.5: Phénomène d'absorption des ondes

Atténuation : Au cours de sa propagation au sein du tissu l'énergie de l'onde est atténuée par de multiples mécanismes (réflexion, réfraction, diffusion, absorption et divergence du faisceau). Elle est décrite par une décroissance exponentielle :

$$I_x = I_0 e^{-\mu x} \quad (7)$$

Où x est l'épaisseur traversée et μ le coefficient d'atténuation.

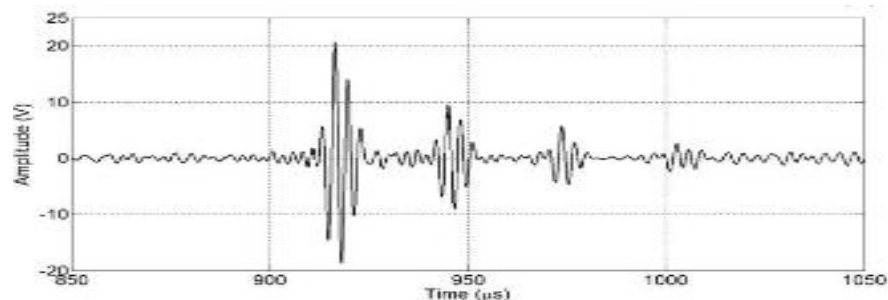


Figure 2.6: Phénomène d'atténuation des ondes ultrason

3. Domaines d'applications :

3.1. Contrôle non destructif :

3.1.1. Principe de fonctionnement général :

Le principe du contrôle par ultrasons consiste à émettre et faire se propager une onde ultrasonore dans la pièce à inspecter puis à recueillir et analyser l'onde à l'issue de son interaction avec le matériau. Sur la base de ce principe très général, il existe de nombreuses techniques spécifiques, suivant que le contrôle est effectué en transmission ou bien en réflexion, suivant que les dispositifs en émission et en réception sont confondus ou non, suivant le type et l'inclinaison des ondes ultrasonores utilisées, etc.

La modalité de contrôle la plus répandue, dite en réflexion, (« pulse /écho » en anglais), est comparable à l'échographie médicale. L'émetteur et le récepteur (confondus ou non) sont positionnés du même côté de la pièce. Le récepteur recueille les échos engendrés par réflexion ou diffraction sur les obstacles rencontrés par l'onde, tels que les défauts, les interfaces entre matériaux ou encore la surface de la pièce.

Les dispositifs émetteurs et récepteurs, dits « traducteurs ultrasonores », sont en général basés sur l'effet piézo-électrique. L'élément principal, le transducteur, est constitué d'une pastille piézo-électrique convertissant un signal électrique en vibration mécanique et inversement.

Une évolution majeure dans le domaine des contrôles par ultrasons a été la progression des techniques multiéléments utilisant des réseaux de traducteurs piézo-électriques pilotés électroniquement à la réception ou à l'émission. Cette technologie, aujourd'hui couramment utilisée, permet d'adapter les caractéristiques de l'onde émise, en particulier sa focalisation ou son inclinaison, en appliquant aux différents éléments des retards électroniques calculés en fonction de l'objectif visé. Une région de l'espace peut être ainsi balayée ou le faisceau ultrasonore peut être ainsi focalisé dans le matériau à différentes profondeurs, à l'aide d'un même transducteur.

La fréquence des ondes ultrasonores utilisées varie en fonction des matériaux et des applications sur une gamme qui s'étend environ de 100 kHz à 20 MHz. Le choix de la fréquence résulte d'un compromis, entre résolution spatiale (d'autant meilleure que la fréquence est élevée) et pouvoir de pénétration (qui décroît avec la fréquence en raison du phénomène d'atténuation). Le contrôle d'une pièce en acier s'effectue typiquement à des fréquences variant entre 1 et 5 MHz.

3.1.2. Mode d'examen :

Dans la configuration dite en réflexion, la plus commune, l'inspection d'une pièce consiste à déplacer un traducteur ultrasonore, jouant les rôles d'émetteur et de récepteur, sur ou au-dessus de la surface et à collecter puis analyser les signaux reçus.

On distingue les contrôles au contact, pour lesquels le traducteur ultrasonore est positionné sur la surface de la pièce avec utilisation d'un couplant et les contrôles en immersion, le traducteur étant alors déplacé à une certaine distance de la pièce dans un milieu liquide, en général de l'eau. On distingue également les contrôles manuels pour lesquels le déplacement du traducteur est effectué par un opérateur et les contrôles automatisés.

Le choix du traducteur, de ses dimensions, de la fréquence des ondes qu'il fournit, de l'application de réglages spécifiques (lois de retards pour les multiéléments) détermine les caractéristiques du faisceau ultrasonore transmis dans la pièce et par voie de conséquence la sensibilité et la résolution spatiale du contrôle. Aujourd'hui, la modélisation est couramment utilisée en phase de conception pour estimer ces caractéristiques.

Le diagnostic s'effectue à partir de l'analyse des signaux reçus, la présence d'un défaut se signalant par la réception d'échos provenant de la réflexion ou diffraction du faisceau incident. Le temps de vol, c'est-à-dire le temps séparant la réception de l'écho de l'excitation de l'émetteur informe sur la localisation du défaut tandis que l'amplitude est utilisée pour la détection. La fenêtre d'acquisition temporelle est ainsi définie en fonction de la région de la pièce dans laquelle les défauts sont recherchés.

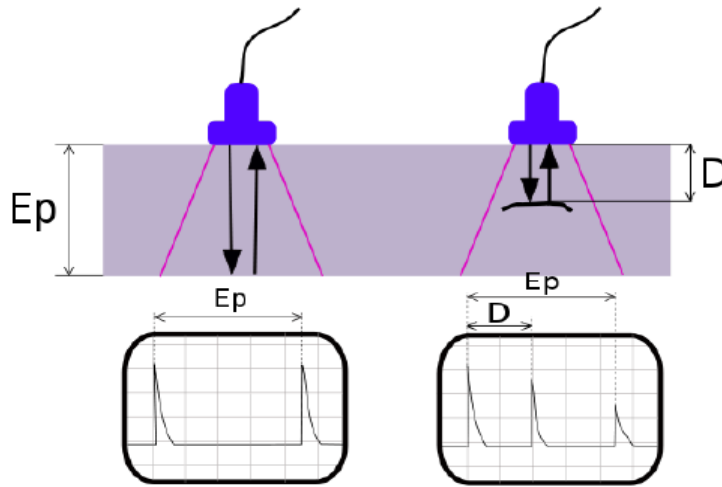


Figure 2.7: Fonctionnement de détection ultrason des matériaux

Suivant l'application, le diagnostic peut s'appuyer sur un simple dépassement d'un seuil en amplitude lors du déplacement du capteur ou bien faire intervenir une analyse plus poussée d'images échographiques de la région inspectée. On parle d'images de représentations de type B-scan, C-scan, etc. Les amplitudes mesurées sont toujours des amplitudes relatives à une référence. Un contrôle par ultrasons comporte toujours une phase de calibration sur des maquettes contenant des réflecteurs de référence à partir de laquelle sont notamment définis les seuils de détection.

3.1.3. Applications industrielles :

Les ultrasons sont l'une des méthodes d'END les plus largement utilisées aujourd'hui. Méthode large spectre, elle peut s'appliquer à de nombreux matériaux et s'adapter à différentes géométries. Elle peut être utilisée pour la détection de tout défaut se traduisant par une discontinuité des propriétés mécaniques (fissure, inclusion, porosité, etc.).

Parmi les très nombreuses applications, citons la recherche de fissures dans les matériaux métalliques, le contrôle des soudures, le contrôle des matériaux composites, en particulier pour l'aéronautique, la recherche de porosités. A côté de la détection de défauts, les ultrasons sont également utilisés pour de l'analyse dimensionnelle (mesure d'épaisseur), le tri et la caractérisation de matériaux (identification de nuances d'acier) ou la caractérisation de traitements de surface (traitements thermiques par exemple).



Figure 2.8: Contrôle non destructif d'un matériel

3.1.4. Normes associées :

Pour faire des tests ultrason et il faut qu'ils suivent les normes pour s'assurer de leurs validités [2].

NF EN 1330-4 Essais non destructifs - Terminologie - Partie 4 : termes utilisés pour les essais par ultrasons.

NF EN 16018 Essais non-destructifs - Terminologie - Termes utilisés pour le contrôle par ultrasons en multiéléments.

NF EN ISO 16810 Essais non destructifs - Contrôle par ultrasons - Principes généraux.

NF EN ISO 16811 Essais non destructifs - Contrôle par ultrasons - Réglage de la sensibilité et de la base de temps.

NF EN ISO 16823 Essais non destructifs - Contrôle par ultrasons - Technique par transmission.

NF EN ISO 16826 Essais non destructifs - Contrôle par ultrasons - Contrôle des discontinuités perpendiculaires à la surface.

NF EN ISO 16827 Essais non destructifs - Contrôle par ultrasons - Caractérisation et dimensionnement des discontinuités.

NF EN ISO 16828 Essais non destructifs - Contrôle par ultrasons - Technique de diffraction du temps de vol utilisée comme méthode de détection et de dimensionnement des discontinuités

NF EN ISO 2400 Essais non destructifs - Contrôle par ultrasons - Spécifications relatives au bloc d'étalonnage n° 1

NF EN ISO 7963 Essais non destructifs - Contrôle par ultrasons - Spécifications relatives au bloc d'étalonnage n° 2.

3.2. Imagerie ultrasonique :

3.2.1. Généralités :

Les fréquences ultrasonores les plus utilisées en médecine sont situées dans la gamme allant de 3 à 15 MHz, ce qui correspond à des longueurs d'onde d'une fraction de millimètre, la vitesse des ultrasons dans les tissus mous étant de 1540 m s^{-1} à 5% près. Les ultrasons se propagent assez bien dans les tissus du corps humain, le coefficient d'atténuation, sensiblement proportionnel à la fréquence ultrasonore utilisée, variant de 0,5 à 3,5 $\text{dB cm}^{-1} \text{ MHz}^{-1}$. L'impédance acoustique des tissus est le produit de leur masse spécifique par la vitesse de propagation des ultrasons. Cette impédance est voisine de celle de l'eau avec des valeurs comprises en 1,3 et 1,7 ($10^6 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). La différence d'impédance acoustique entre deux milieux est à l'origine des échos renvoyés par les tissus traversés. Des échos dits spéculaires (un peu comme la réflexion sur un miroir pour la lumière) sont obtenus sur les capsules d'organes, les fibres tendineuses ou musculaires et les parois vasculaires, mais ils n'ont pas un intérêt majeur en diagnostic. En effet, ce sont les échos de diffusion (*speckle* en anglais) qui contribuent à créer l'image de la « texture ultrasonore » d'un organe (le verre dépoli pour la lumière), et permettent donc de différencier un tissu sain d'un tissu malade.

3.2.2. Description :

On place une sonde sur la région à examiner après avoir appliqué sur la peau un gel qui permet de supprimer la présence d'air entre la sonde et la peau (l'air empêche la transmission d'ultrasons) Cette sonde est faite de plusieurs émetteurs disposés côte

à côté. Quand l'un d'entre eux émet un ultrason, celui-ci pénètre donc les tissus jusqu'à ce qu'il soit arrêté par une structure et réfléchi (l'ultrason qui est émis dans cette structure est en partie absorbé par les éléments qui la compose et en partie réfléchi). Il est alors renvoyé en direction de la sonde comme un faisceau lumineux par un miroir. Plus la structure est éloignée plus il mettra du temps à revenir. L'écho qui en résulte est enregistré et donne des informations sur la position et la densité des tissus rencontrés.

3.2.3. Techniques de balayage :

L'imagerie échographique des structures peut être obtenue grâce à plusieurs types de balayage :

- Le balayage sectoriel mécanique : le capteur est déplacé grâce à un moteur et produit 10 à 30 images par seconde. Le mouvement mécanique est obtenu essentiellement de deux manières : oscillation d'un transducteur autour d'un point fixe ou déplacement linéaire de va- et-vient si l'amplitude du déplacement est faible. Le balayage mécanique est actuellement réservé aux sondes de fréquences ultrasonores supérieures à 15 MHz, pour lesquelles le balayage électronique n'est pas encore utilisable.

- Le balayage sectoriel électronique par déphasage (*phased array*) : une petite barrette de transducteur (par exemple 64 éléments de 0,25 mm de côté) est utilisée pour générer et recevoir les ultrasons. Les impulsions d'émission transmises à chaque transducteur élémentaire sont déphasées entre elles linéairement, de manière à exciter avec un léger décalage de temps les éléments adjacents de la barrette. Le front d'onde constitué par la somme des fronts élémentaires émis se propage alors dans une direction qui fait un angle θ (qui dépend des valeurs des retards) avec la normale au capteur. Le même déphasage est appliqué ensuite sur les signaux reçus par les différents transducteurs. La variation des retards à chaque nouvelle séquence d'émission-réception permet de réaliser un balayage sectoriel dont l'ouverture maximale est de 90° environ. L'image obtenue a la forme d'un secteur dont le sommet correspond au point de contact de la sonde avec la peau du patient. Dans les appareils récents, on

superpose des retards supplémentaires aux retards de déflexion, afin de réaliser une focalisation électronique.

- Le balayage électronique linéaire sur sonde plane : cette technique repose sur l'utilisation d'un barreau détecteur de 3 à 12 cm de long, constitué d'un nombre important de capteurs de petite dimension (de l'ordre d'une fraction de millimètre), placés côte à côte. La surface d'émission-réception est obtenue en associant un certain nombre d'éléments de ce barreau (24 à 128 par exemple), excités simultanément. Après chaque séance d'émission-réception correspondant à l'exploration d'une ligne, la surface de travail est translatée d'un élément, de sorte que l'espace entre chaque ligne d'exploration est égale à la largeur de chaque transducteur élémentaire. La commutation rapide d'une ligne à l'autre permet, comme en balayage sectoriel électronique, d'obtenir des cadences d'images de 30 à 100 par seconde, sans aucune pièce en mouvement, et de générer des fréquences ultrasonores jusqu'à 15 MHz environ. Ces capteurs fournissent des images rectangulaires avec des lignes d'acquisition parallèles, très appréciées en exploration abdominale et en obstétrique.

- Le balayage électronique linéaire sur sonde convexe : en utilisant un balayage linéaire le long d'un barreau convexe de transducteurs, on peut orienter les faisceaux d'ultrasons émis, dans un secteur de l'ordre de 60° ; cette technique récente associe les avantages du balayage électronique linéaire (simplicité de l'électronique et fréquence ultrasonore élevée) et du balayage électronique sectoriel (surface de contact réduite, utilisation à travers des fenêtres acoustiques de faible dimension). Cette technique s'impose progressivement dans la majorité des applications de l'échographie transcutanée.

3.2.4. Applications diagnostiques :

On distingue schématiquement quatre grands domaines d'application de routine des ultrasons en diagnostic médical :

- L'imagerie des tissus peu mobiles et directement accessibles à travers la peau : c'est le cas par exemple de l'utérus, du foie et des voies biliaires, des reins, de la rate, des seins, de la thyroïde.

- L'exploration des structures en mouvement, comme le cœur et le sang circulant, qui repose sur l'utilisation de techniques combinant échographie rapide, techniques Doppler et enregistrement du mouvement des structures en mode temps-mouvement (ou T.M.).
- L'échographie par voie endocavitaire lorsqu'il est nécessaire de rapprocher le capteur de la région à explorer pour gagner en résolution, ou pour éviter de traverser des structures osseuses ou gazeuses. On utilise pour cela des capteurs miniaturisés et de fréquence ultrasonore relativement élevée.
- Les applications nouvelles qui relèvent d'équipes spécialisées, comme l'échographie-Doppler cérébrale, l'échographie avec produits de contraste, l'échographie 3D, l'échographie interventionnelle avec guidage de ponctions ou de gestes thérapeutiques, l'imagerie ultrasonore paramétrique.

3.2.5. Caractérisation tissulaire par ultrasons :

De nombreux travaux ont été réalisés depuis une vingtaine d'années pour caractériser les tissus par ultrasons. Jusqu'à présent l'imagerie échographique n'a que peu bénéficié de ces recherches, car il est souvent nécessaire de mettre en œuvre un traitement de signal relativement long et complexe. Les premières applications de routine reposent sur deux grandes techniques :

- La caractérisation de l'os par mesure de la vitesse et de l'atténuation d'une onde acoustique se propageant dans le calcanéum par exemple
- L'étude de la réponse non linéaire des tissus aux variations de pression instantanées liées au passage de l'onde acoustique (imagerie harmonique).

4. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons mis l'accent sur les phénomènes qui régissent la propagation d'une onde ultrasonore, puis nous avons cité quelques applications de la technologie ultrason surtout le domaine du contrôle et de l'évaluation non destructifs.

CHAPITRE 3 :

**Structure Générale de la
Plateforme**

1. Introduction :

Avant de commencer le travail, nous avons été amenés à proposer une architecture de la plateforme et de la valider avec l'équipe packaging. Pour cela nous nous sommes inspirés de l'existant. La plateforme est constituée de quatre parties essentielles à savoir :

- Un générateur d'impulsion qui va alimenter les capteurs ultrason.
- Des transducteurs ultrasons qui vont permettre l'émission et la réception des ondes.
- Une carte d'acquisition pour traitement des données reçu à partir de cible.
- Une interface graphique pour la visualisation et interprétation de données.

Dans ce chapitre nous donnons une idée générale sur la plateforme proposée puis nous détaillons chaque partie.

2. Description de la plateforme :

La plateforme ultrason réalisée à MAScIR est constituée de quatre éléments principaux : générateur d'impulsions, transducteurs ultrasons, carte d'acquisition et une interface graphique.

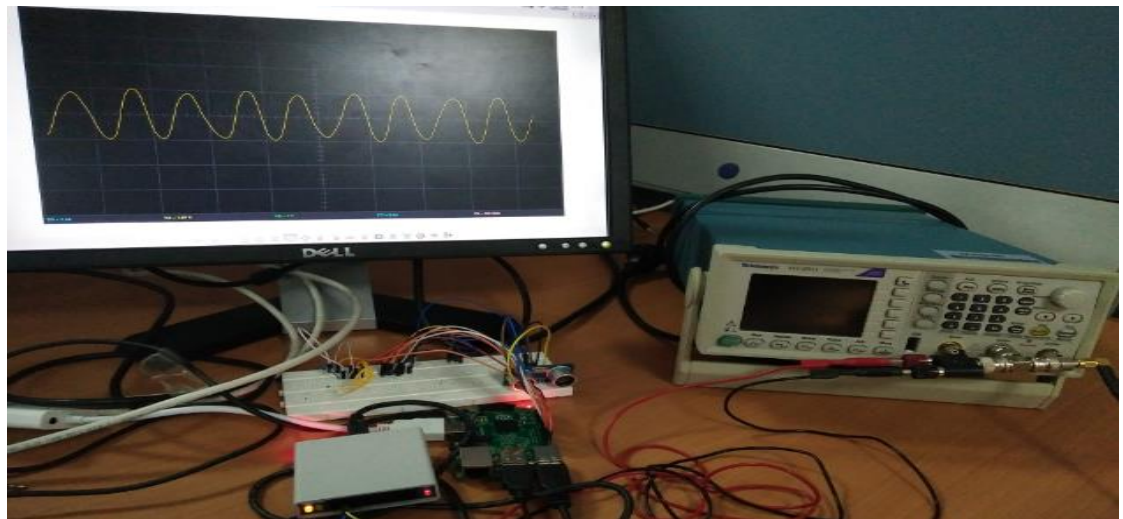


Figure 3.1: Plateforme ultrason MAScIR

Dans la tendance de miniaturisation de la plateforme on a conçu un boîtier pour rassembler la majorité des équipements sous forme d'un kit (machine portable).

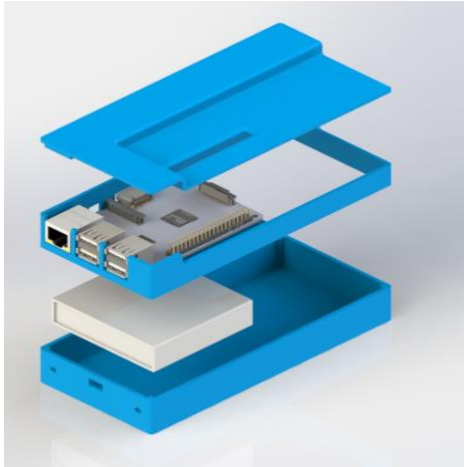


Figure 3.2: Vue éclatée boîtier



Figure 3.3: Vue assemblée du boîtier

L'idée de conception d'un boîtier pour la plateforme c'est de partir avec un produit efficace qui couvre une large plage de fréquence pour faire le maximum de test sans avoir besoin de déplacer un lourd matériel tel que la machine SAM 300.

3. Composants de la plateforme :

Chaque module de la plateforme joue un rôle primordial dans le bon fonctionnement de la plateforme par la suite, nous décrivons puis nous donnons l'utilité de chaque composant de la plateforme.

3.1. Transducteurs ultrasons :

3.1.1. Généralités :

Le transducteur est une partie très importante du système d'instrumentation à ultrasons. Le transducteur comprend un élément piézo-électrique, qui convertit les signaux électriques en vibrations mécaniques (mode de transmission) et des vibrations mécaniques en signaux électriques (mode de réception). De nombreux facteurs, y compris le matériel, la construction mécanique et électrique, ainsi que les conditions

mécaniques et électriques externes influencent le comportement d'un transducteur. Construction mécanique comprend des paramètres tels que la surface de rayonnement, amortissement mécanique, le logement, le type de connecteur et d'autres variables de la construction physique. A ce jour, les fabricants de transducteurs ont du mal lors de la construction de deux transducteurs qui ont des caractéristiques de performance identiques.

3.1.2. Modélisation du transducteur :

Dans l'industrie manufacturière de haute technologie, la conception et la simulation de l'inspection de la pièce une partie se fait dans le monde virtuel de l'ordinateur. La modélisation du capteur est nécessaire de faire des prédictions précises sur la façon dont une partie d'un composant peut-être inspectée, avant la construction proprement dite de cette partie. La modélisation par ordinateur est également utilisée pour concevoir des transducteurs à ultrasons. Un transducteur à ultrasons peut être caractérisé par des mesures détaillées de ses propriétés de rayonnement électriques et sonores. De telles mesures peuvent complètement déterminer la réponse de tout un transducteur individuel. Il y a des recherches en cours pour développer des modèles généraux qui se rapportent entrées électriques (tension, courant) à sorties mécaniques (la force, la vitesse) et vice-versa. Ces modèles peuvent être très robustes en donnant la prédiction exacte de la réponse du capteur, mais souffrent d'un manque de modélisation précise des variables physiques inhérentes à la fabrication du capteur.

3.1.3. Efficacité du transducteur, la bande passante et la fréquence :

Certains capteurs sont spécialement fabriqués pour être des émetteurs plus efficaces et les autres d'être des récepteurs plus performants. Un capteur qui fonctionne bien dans une application ne sera pas toujours produire les résultats souhaités dans une autre application. Par exemple, la sensibilité à de petits défauts est proportionnelle au produit de l'efficacité du transducteur comme émetteur et un récepteur. Résolution, la capacité de localiser des défauts près de la surface ou à proximité dans le matériau, nécessite un transducteur fortement amorti.

Il est également important de comprendre le concept de la bande passante ou la plage de fréquences associée à un transducteur. La fréquence indiquée sur un transducteur est la fréquence centrale ou centre et dépend essentiellement de la matière de support. Plus la gamme de fréquence d'un capteur est élevée plus la pénétration est importante et moins la résolution est bonne et vice versa. La fréquence centrale définira également les capacités d'un transducteur.

Les basses fréquences (0.5MHz-2.25MHz) offrent une plus grande énergie et la pénétration dans un matériau, tandis que les cristaux de haute fréquence (15.0MHz-25.0MHz) fournissent une pénétration réduite mais une plus grande sensibilité aux petites discontinuités. Les Transducteurs haute fréquence, lorsqu'ils sont utilisés avec l'instrumentation appropriée, peuvent améliorer la résolution des défauts et des capacités de mesure d'épaisseur de façon spectaculaire.

Les transducteurs sont construits pour résister à certains abus, mais ils doivent être manipulés avec précaution. Une mauvaise utilisation, comme la chute, peut provoquer la fissure de la plaque d'usure, ou le matériau de support.

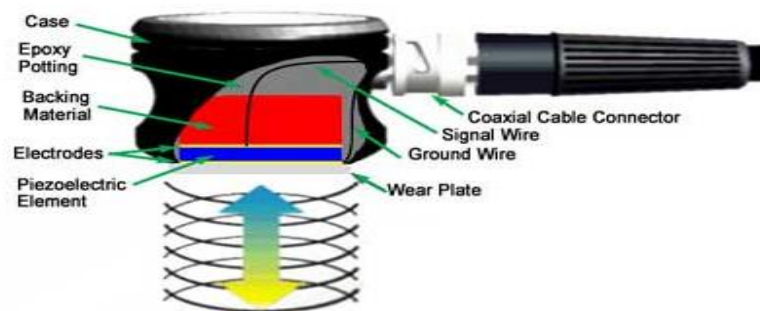


Figure 3.4: Constituants d'un transducteur ultrason

3.1.4. Couplant :

Le couplant est un matériau (le plus souvent liquide) qui facilite la transmission d'énergie à ultrasons provenant du transducteur dans l'échantillon d'essai, Il est généralement nécessaire parce que la différence d'impédance acoustique entre l'air et des solides est grande. Par conséquent, la quasi-totalité de l'énergie est réfléchi et très peu sont transmises dans le matériau d'essai pour cette raison le couplant déplace l'air et permet d'obtenir plus d'énergie acoustique dans l'échantillon d'essai de sorte qu'un signal à ultrasons utilisable peut être obtenu.

En général une couche mince d'huile, de la glycérine ou de l'eau est généralement utilisée entre le capteur et la surface d'essai.

Remarque : Dans le contrôle par ultrasons en immersion à la fois le transducteur et la pièce sont immergées dans le milieu de couplage, qui est typiquement de l'eau. Cette méthode de couplage permet de maintenir plus facilement le couplage cohérent tout en déplaçant et en manipulant le transducteur et ou la pièce.



Figure 3.6: Couplage d'un transducteur par contact

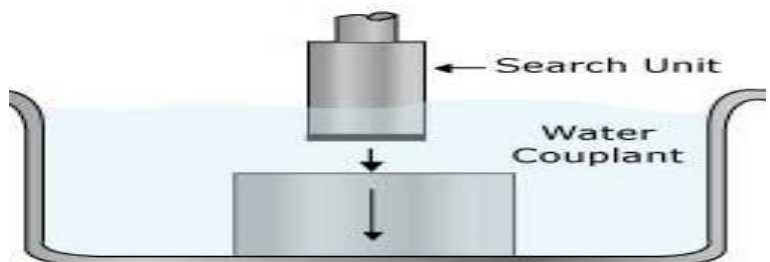


Figure 3.5: Couplage du transducteur par immersion

Les transducteurs ultrasons sont fabriqués pour une variété d'applications et peuvent être fabriqués sur mesure, si nécessaire. Une attention particulière doit être accordée à la sélection du transducteur approprié pour l'application.

Le plus souvent, le transducteur est choisi soit pour augmenter la sensibilité ou la résolution du système.

3.1.5. Types de transducteurs ultrasons :

Il existe deux types transducteurs ultrasons :

Transducteurs par contact : sont utilisés pour les inspections de contact direct, Ils ont des éléments protégés dans un boîtier robuste pour résister à un contact avec une variété de matériaux de glissement. Ces transducteurs ont un design ergonomique de sorte qu'ils sont faciles à saisir et à déplacer le long d'une surface. Ils ont souvent des plaques d'usure remplaçables pour allonger leur durée de vie utile. Matériaux de couplage de l'eau, de la graisse, des huiles ou des matériaux commerciaux sont utilisés pour enlever l'entrefer entre le capteur et le composant inspecté.

Transducteurs d'immersion : ne touchent pas le composant ces capteurs sont conçus pour fonctionner dans un environnement liquide, et toutes les connexions sont étanches à l'eau. Les transducteurs d'immersion ont généralement une couche d'adaptation d'impédance qui permet d'obtenir plus d'énergie sonore dans l'eau et, à son tour, dans le composant en cours d'inspection.



Figure 3.7: Transducteur par contact



Figure 3.8: Transducteur par immersion

3.2. Carte d'acquisition :

Tous système technologique nécessite une carte d'acquisition qui va faire l'acquisition et le traitement de donné, pour mon projet j'ai choisi d'utiliser la carte Raspberry Pi2 tous d'abord à cause de ses performances et en suivant la politique d'utiliser des cartes LOW Cost.

3.2.1. Généralités :

La **Raspberry Pi2** est un nano ordinateur mono carte à processeur ARM conçu par le créateur de jeux vidéo David Braben, dans le cadre de sa fondation Raspberry Pi Cet ordinateur, qui a la taille d'une carte de crédit, est destiné à encourager l'apprentissage de la programmation informatique ; il permet l'exécution de plusieurs variantes du système d'exploitation libre GNU/Linux et des logiciels compatibles. Il est fourni nu (carte mère seule, sans boîtier, alimentation, clavier, souris ni écran) dans l'objectif de diminuer les coûts et de permettre l'utilisation de matériel de récupération.

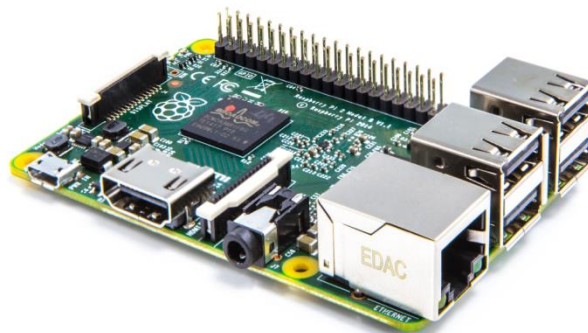


Figure 3.9: Image illustrant une carte Raspberry Pi2

3.2.2. Caractéristiques techniques :

- Ram : 1 Go
- Nombre de processeur : 4
- Processeur : ARMv7
- Cadence du processeur : 900 Mhz
- Stockage : Carte MicroSD

3.2.3. Mise en service de la carte d'acquisition :

Pour la mise en marche de la carte Raspberry Pi 2, elle a besoin de plusieurs périphériques externes pour assurer son bon fonctionnement :

Micro- câble USB : pour alimenter la carte avec un voltage de 5V, Adaptateur HDMI to VGA pour assurer la communication de la carte avec l'écran, Lecteur de carte SD Clavier et souris Le système d'exploitation utilisé dans Raspberry Pi est une distribution Linux. Il y a beaucoup de distributions pi linux spécifique présent, qui peuvent tous téléchargés à partir de leur site web. Dans le projet ultrason on a utilisé Raspbian ; Par la suite vient l'étape de l'installation du système d'exploitation dans la carte Raspberry dans la carte pour cette raison il y a plusieurs étapes à suivre :

Etape1 : On télécharge la distribution Raspbian <http://raspberrypi.org/downloads/> ; On obtient un fichier compresser qu'on le télécharge[11].

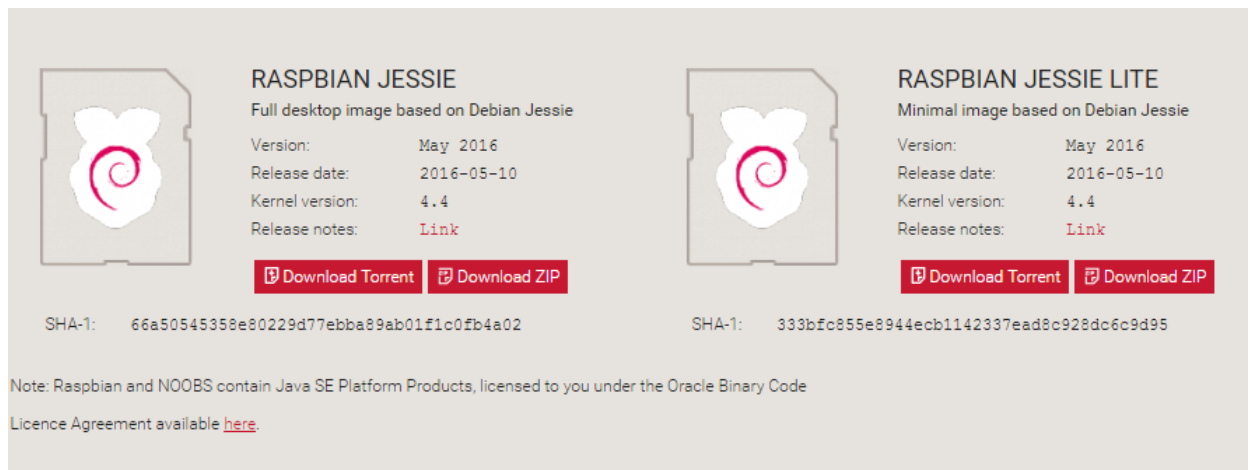


Figure 3.10: Téléchargement Système d'exploitation Raspbian

Etape 2 : Téléchargez et installez SDformatter[12] :

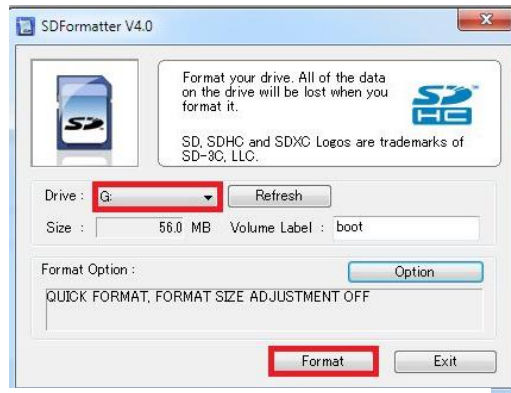


Figure 3.11: Logiciel SDFormatter

On télécharge le fichier puis on fait l'extraction pour obtenir le fichier d'exécution.

Etape 3 : Télécharger Imagewriter [13] :

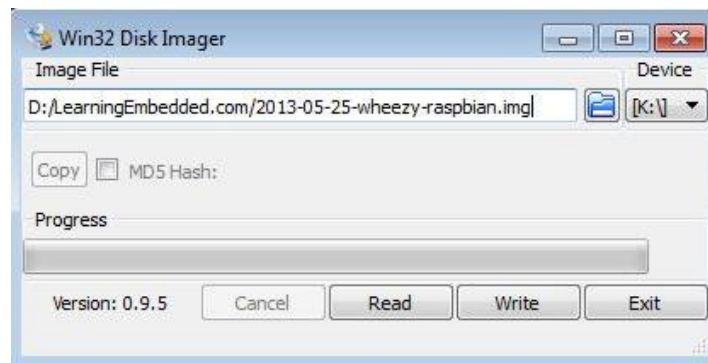


Figure 3.12: Logiciel Imagewriter

Etape 4 : Connectez votre carte SD à votre PC en utilisant le lecteur de carte SD

Etape5 : Formater la carte SD en utilisant SDformatter puis Ouvrir SDformatter

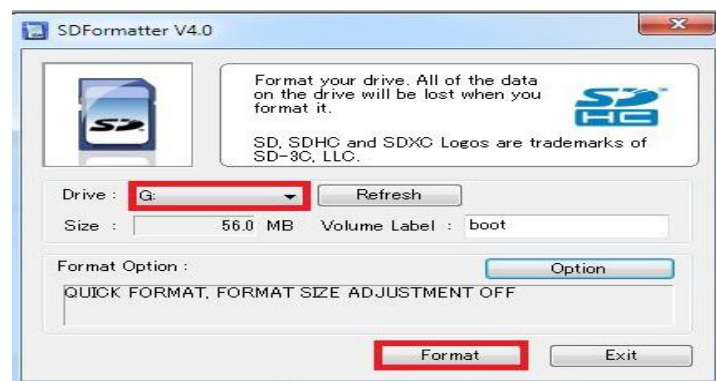


Figure 3.13: Formatage de la carte SD

Sélectionnez le lecteur et ajouter une étiquette ensuite Cliquez sur Format.

Etape 6 : Ecrire l'image Raspbian sur la SDcard utilisant win32Diskimager puis Ouvrir win32Diskimager.

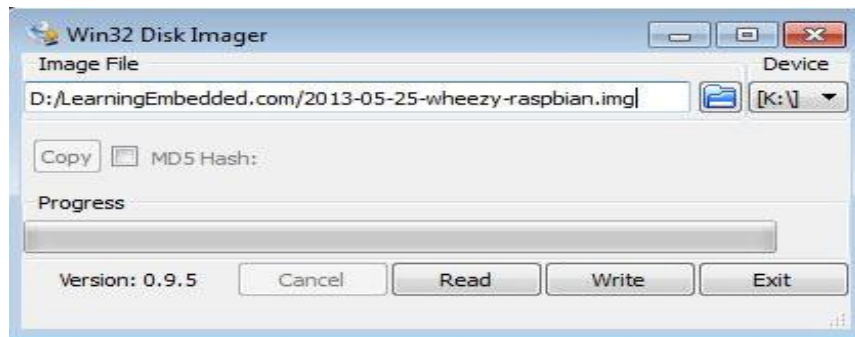


Figure 3.14: Ajout du système d'exploitation sur la carte SD

Sélectionnez l'emplacement du fichier image wheezy raspbian, Choisir le bon appareil finalement Cliquez sur écriture et Fermer Win32DiskImager après l'écriture.

Etape 7 : Maintenant on peut connecter tous les périphériques et allumer la carte

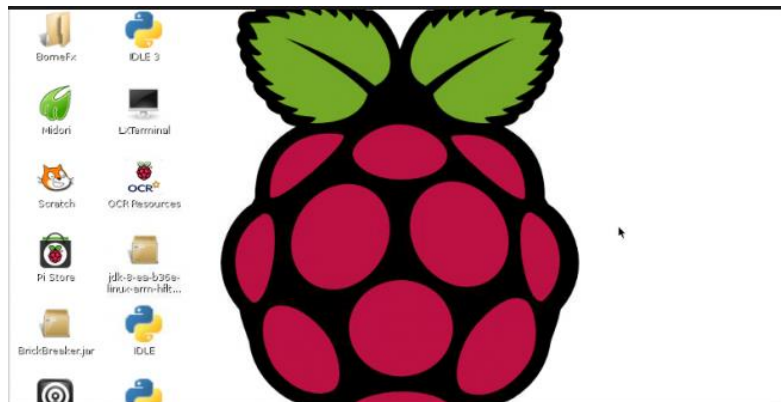


Figure 3.15: Système d'exploitation Raspbian

3.3. Générateur d'impulsions :

3.3.1. Introduction :

Pour mettre notre transducteur en marche il lui a fallu une source d'énergie, c'est le rôle du générateur d'impulsions qui génère des courtes impulsions avec une amplitude variable selon l'application, il existe plusieurs types de générateur d'impulsions dont les performances dépendent de l'utilisation pour cette raison on va utiliser pour nos tests le générateur DPR300 :



Figure 3.16: Générateur d'impulsions DPR 300

3.3.2. Description :

Le pulseur / récepteur DPR300 est composé des blocs fonctionnels représentés sur la figure ci-dessous. Ces blocs fonctionnels comprennent le panneau avant et le matériel de commande à distance, l'alimentation électrique à haute tension, pulseur, PRF oscillateur, amplificateur de réception, filtres récepteurs passe-bas, les filtres récepteurs passe-haut, et l'interface RS-232 pour les appareils avec la télécommande option de contrôle du PC. Logiciel de contrôle de l'instrument réside dans l'ordinateur distant et contrôle l'appareil via l'interface série bus RS-232.

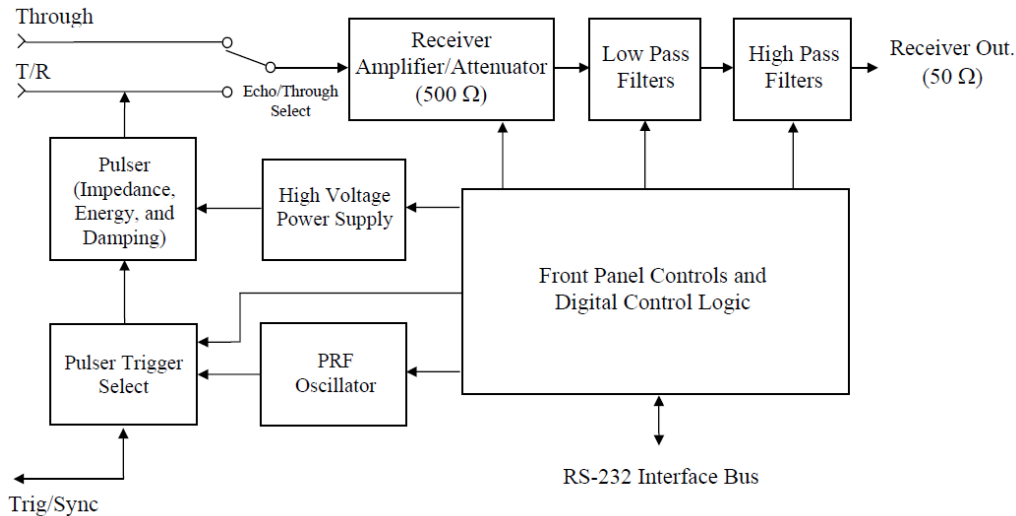


Figure 3.17: Schéma du pulseur /receiver DPR 300

3.3.3. Alimentation délivrée :

L'alimentation haute tension de précision régulée alimente le transducteur. La régulation de tension permet au pulseur DPR300 de maintenir l'amplitude d'impulsion constante indépendamment des changements de soit le taux de répétition des impulsions ou d'autres commandes de l'instrument. La tension peut être réglée de 100V à 475V ou de 100V à 900V en fonction de l'option de tension de pulser installé.

3.3.4. Mode de fonctionnement :

- Mode Pulse - Echo :

Dans le mode de fonctionnement pulse-écho, un seul transducteur est utilisé pour la génération d'impulsions et la réception d'écho. Pour configurer le DPR300 afin de fonctionner en mode Pulse-Echo, l'émission / réception le transducteur est relié au connecteur BNC du panneau arrière marqué T / R, typiquement par l'intermédiaire d'un câble coaxial d'impédance de 50Ω.

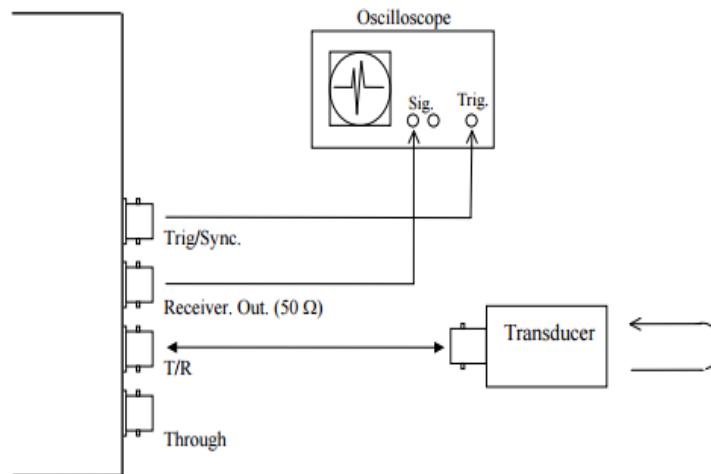


Figure 3.18: Configuration du générateur d'impulsions en mode pulse-écho

- Mode de fonctionnement en Transmission :

Pour un fonctionnement en mode de transmission, les transducteurs d'émissions et de réception sont séparés. Le transducteur d'émission est relié à la T/ R connecteur DPR300 et le transducteur de réception est Relié au connecteur BNC.

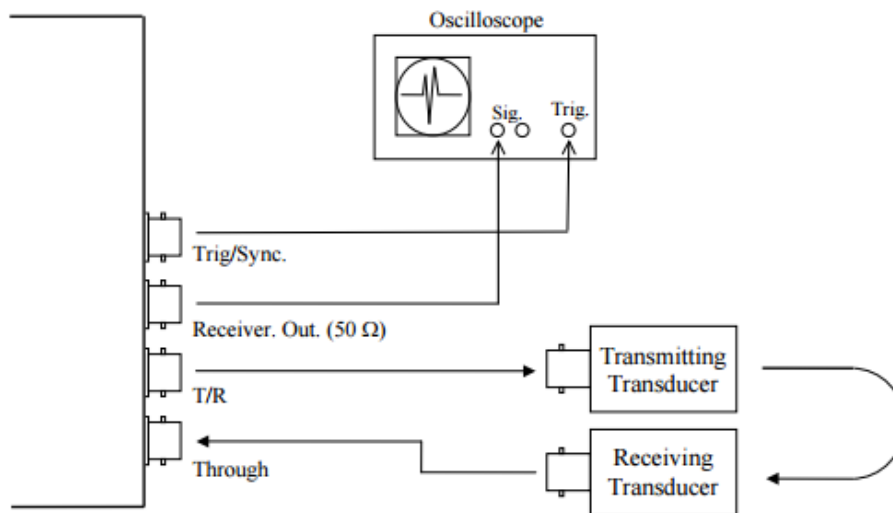


Figure 3.19: Configuration du générateur en mode transmission

✓ Ci-dessous les caractéristiques techniques du pulseur / receiver :

Pulse type	Negative spike pulse
High voltage supply	100V to 475V or 100V to 900V, Precision regulated. Sixteen discrete voltage selections are available over the range in equal increments
Initial transition	<5ns typical for 475 V pulsers
Pulse amplitude	-475V or -900V peak. Amplitude depends on Energy, Impedance, Damping control settings, and pulser type.
Pulse energy	1.55 μ Joules minimum, 304 μ Joules maximum for 475V pulsers. Dependent upon energy and voltage setting.
Pulse duration	Typically, 10-70 ns FWHM for 50 Ω load. Function of the Energy, Impedance, and Damping controls.
Mode	Pulse-echo or through transmission.

Tableau 3-1: Caractéristiques techniques du pulseur

Gain	-13 to 66 dB in 1 dB steps controlled by the host computer
Impedance	50 Ω (through transmission)
Bandwidth	0.001 - 35 MHz (-3 dB) or 0.001 - 50 MHz (-3 dB)
High pass filter	DC, 1, 2.5, 5, 7.5, and 12.5 MHz.
Low pass filter	3.0, 7.5, 10, 15, 22.5 (35 MHz BW) or 5, 10, 15, 22.5, 35 (50 MHz BW)

Tableau 3-2: Caractéristiques techniques du receiver

3.3.5. Amplificateur de réception :

Contrôle l'amplification ou l'atténuation des signaux traités par le récepteur DPR300. Le gain de récepteur peut varier de -13 dB à +66 dB. Le récepteur DPR300 a une entrée impédance de 500 ohms et est disponible dans les deux largeurs de bande de 35MHz et 50MHz.

3.3.6. Filtres passe-bas :

Ces filtres sont disponibles pour réduire la bande passante du récepteur DPR300. La bande passante de haute fréquence de coupure peut être utilisée pour améliorer le rapport signal sur bruit pour applications qui ne nécessitent pas la bande passante du récepteur complet, et les fréquences précises de coupure du filtre dépendent de la largeur de bande de récepteur sélectionné.

3.3.7. Filtres passe-haut :

Ces filtres sont disponibles pour l'élimination indésirable d'énergie à basse fréquence à partir du signal de récepteur DPR300. Le filtrage passe-haut peut être utilisé comme un moyen de fournir plus rapidement la récupération du récepteur à partir des signaux forts tels que l'impulsion d'excitation les forts échos.

3.4. Interface graphique :

3.4.1. Introduction :

Pour visualiser les signaux reçus à partir des transducteurs ultrason on avait besoin d'une interface graphique pour interpréter les signaux. L'interface graphique est constituée de plusieurs éléments :

L'interface graphique est conçue pour visualiser tous forme de signal et avoir l'accès à tous les parties de signal pour l'interpréter tous d'abord on va commencer par les formes d'ondes qu'on peut acquérir sous l'interface graphique par la suite je vais aborder les différents techniques pour avoir le signal voulu et tirer les paramètres nécessaires pour chaque étude.

3.4.2. Fonctions d'onde :



Figure 3.20: Fonctions d'onde de l'interface graphique

La première étape lors de la programmation du générateur de forme d'onde est de choisir une fonction d'onde.

1. TONE : formes d'ondes sinusoïdales
2. STEP : donne les formes d'onde d'impulsion carrées.
3. RAMP : donne les formes d'onde triangulaire et triangulaire inverse.

La fonction d'onde n'est pas la forme d'onde elle-même. Il est plutôt la fonction mathématique utilisée pour synthétiser la forme d'onde en fonction des paramètres du générateur de forme d'onde déterminée.

3.4.3. Fonction sinusoïdale :

A partir de l'interface graphique on peut visualiser un signal sinusoïdal dont la fréquence peut aller jusqu'au 100 MHz.

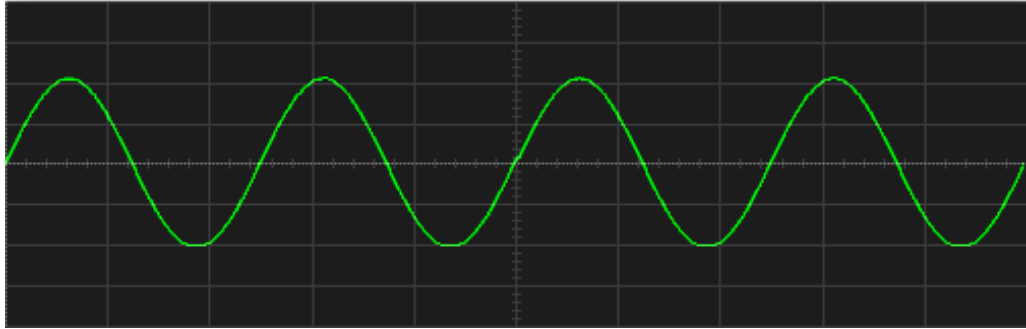


Figure 3.21: Signal sinusoïdal sur l'interface graphique

3.4.4. Fonction Rampe :

Si on aura besoin de travailler avec des signaux rampes on peut visualiser sur l'interface graphique un signal de ce type don la fréquence peut aller jusqu'au 100 MHz

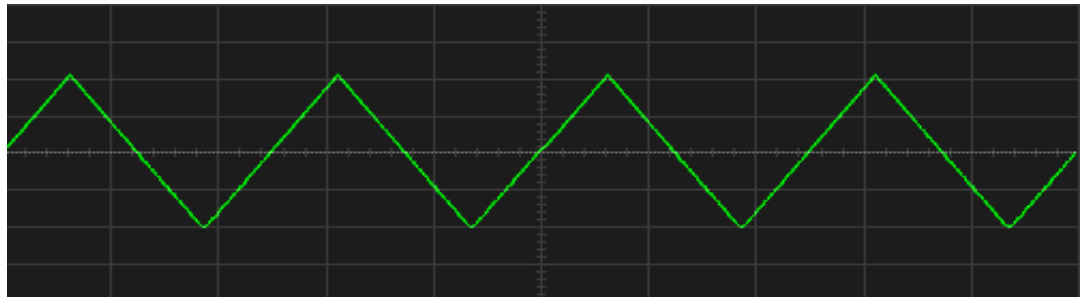


Figure 3.22: Signal triangulaire de l'interface graphique

3.4.5. Fonction carrée (impulsions) :

Pour mon projet je dois alimenter mon transducteur par une tension carrée de haute fréquence et demandent une tension très élevé l'interface graphique peut faire l'affaire

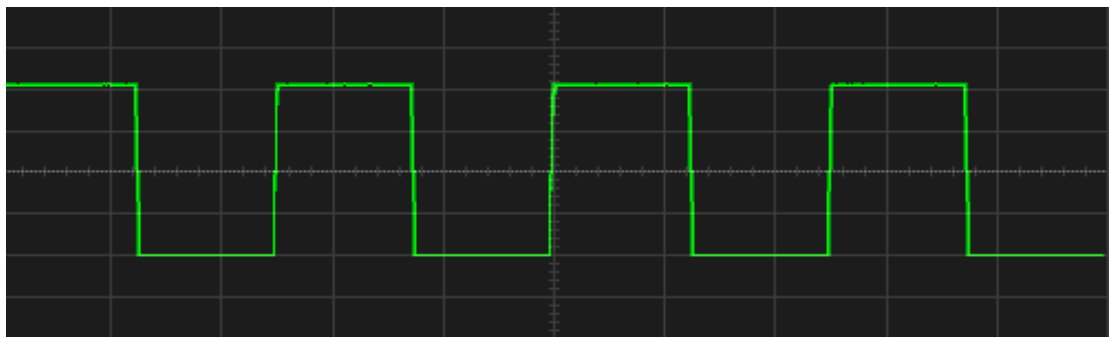


Figure 3.23: Signal carré de l'interface graphique

3.4.6. Curseur :

Pour délimiter le signal et tirer que le signal dont j'aurai besoin lors de l'étude ultrasonore, il est judicieux d'ajouter deux curseurs horizontaux et deux curseurs verticaux.

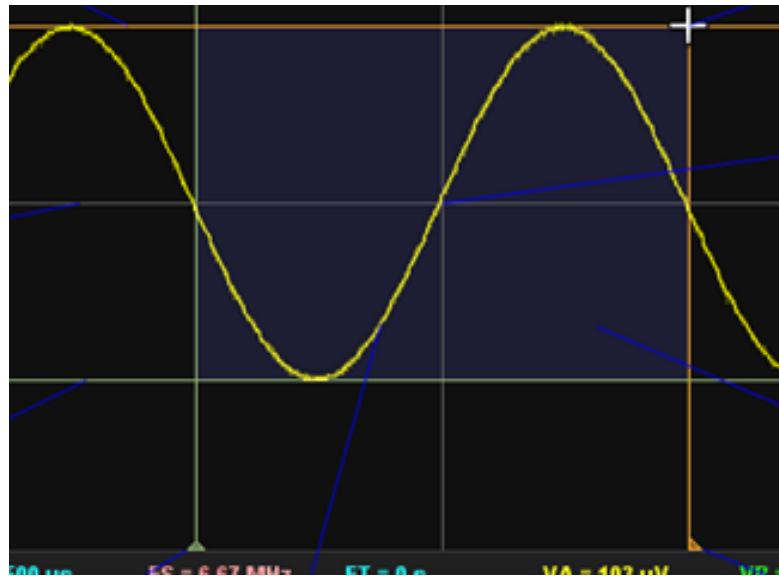


Figure 3.24: Curseurs de l'interface graphique

3.4.7. Rapport cyclique/Amplitude :

Des fois pour avoir un signal clair il fallait modifier le rapport cyclique et l'amplitude pour cette raison cette partie de l'interface graphique est primordial pour l'interprétation du signal.

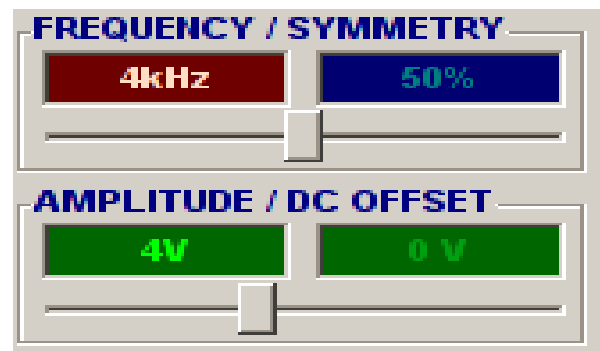


Figure 3.25: Rapport cyclique de l'interface graphique

3.4.8. Paramètres de signal :

L'interface graphique permet aussi de visualiser les signaux en temps réel cela veut dire que lorsqu'on met le curseur sur un point de signal acquis on peut visualiser l'amplitude l'offset la sensibilité horizontal et vertical la fréquence chose qui nous fait penser à l'oscilloscope.

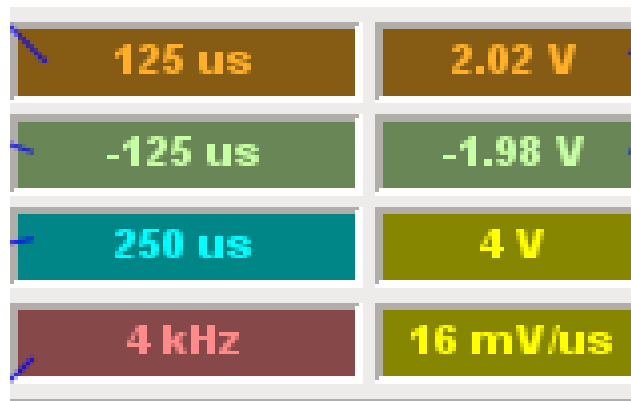


Figure 3.26: Paramètres de signal de l'interface graphique

3.4.9. Capture de signal :

Si on veut juste faire une capture de signal à un instant donné on clique sur le bouton **TRACE** et si on veut que la visualisation se poursuive en temps réel on clique alors sur **REPEAT**.



Figure 3.27: Capture de signal de l'interface graphique

3.5. Communication entre différents modules :

Une fois j'ai eu presque tous le matériel nécessaire pour réaliser ma plateforme vient l'étape de rassembler tous ses composants pour mettre en test la plateforme. Le problème majeur dans cette partie c'est d'assurer la communication entre tous les modules. Pour cette raison j'ai beaucoup travaillé sur la communication USB puisque ma carte d'acquisition possède quatre ports USB.

3.5.1. La Communication USB :

3.5.1.1. Présentation du protocole de communication :

L'USB (Universal Serial Bus) est, comme son nom l'indique, un protocole de communication série entre entités. Du point de vue utilisateur, le bus USB se présente sous la forme d'une architecture étoilée et pyramidale, l'hôte se trouvant au centre du réseau, et les périphériques à l'extérieur. Les échanges de données se font à une vitesse prédéfinie dans la spécification USB : 1,5 Mbits/s ou 12 Mbits/s selon la tolérance du périphérique concerné. L'intérêt principal de ce bus est le fait qu'un grand nombre de périphériques (jusqu'à 126) peuvent être connectés simultanément au même hôte, et qu'à tout moment, il est possible de les débrancher et de les rebrancher sans redémarrer le contrôleur hôte (c'est-à-dire l'ordinateur). Ci-dessous un exemple d'architecture d'un réseau USB :

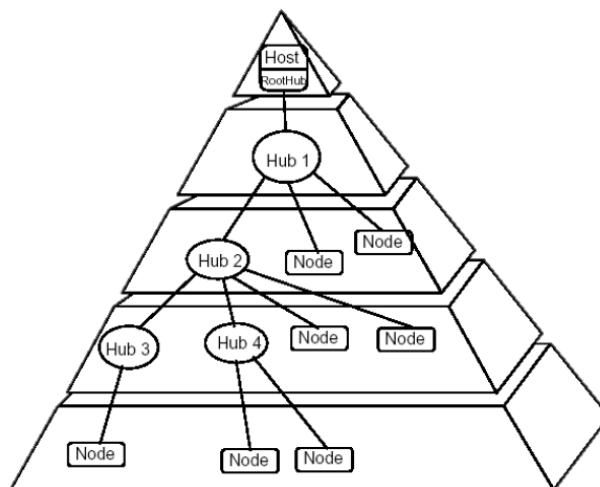


Figure 3.28: Architecture d'un réseau USB

3.5.1.2. Description physique de l'USB :

Le bus USB utilise quatre fils, ainsi que des connecteurs particuliers. Deux des fils permettent d'acheminer l'alimentation électrique du périphérique et deux véhiculent les données elles-mêmes.

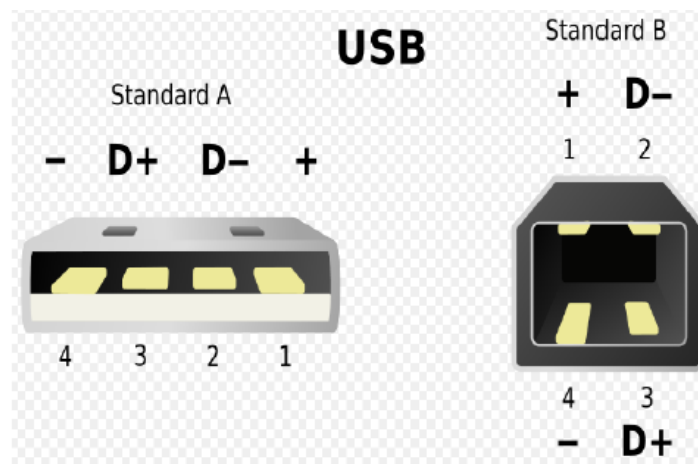


Figure 3.29: Les connecteurs USB

La spécification USB impose une tension maximale de 5V sur les fils et un courant maximal de 500 mA.

3.5.1.3. Protocole de communication USB :

La spécification USB impose un protocole de communication en plusieurs couches superposées ce qui permet à l'utilisateur de ne manipuler que la ou les couches supérieures.

3.5.2. Les transactions :

Les transactions USB se font par l'intermédiaire de l'émission de plusieurs paquets dont le format obéit à un standard. Chaque transaction consiste d'une succession d'un :

3.5.2.1. Paquet Jeton (Token) :

C'est dans ce paquet où figurent le type de transaction (lecture ou écriture), l'adresse du périphérique de destination, et la terminaison désignée.

3.5.2.2. Paquet de données (DATA) :

C'est ce paquet qui contient les informations réellement utiles dans la transaction.

3.5.2.3. Paquet d'état (HandShake) :

C'est ce paquet d'état qui indique si l'échange s'est correctement déroulé ou non.

3.5.3. Les terminaisons :

En fait, comme l'indique la figure 3-9, chaque périphérique USB est décomposé en plusieurs sous blocs, possédant chacun un rôle différent dans la communication.

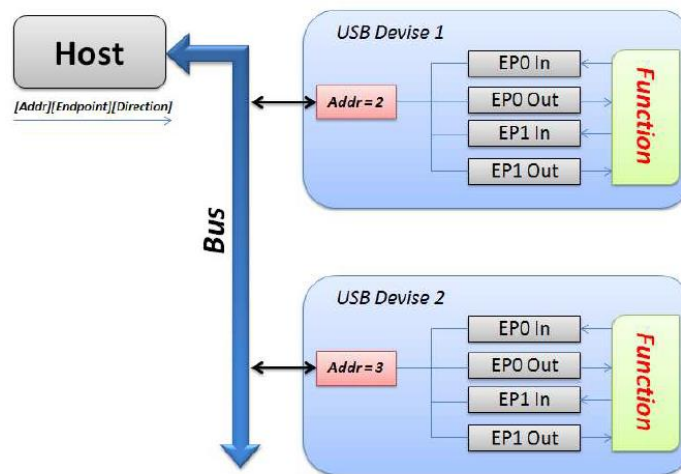


Figure 3.30: Composition des périphériques USB

Nous pouvons distinguer 3 sous blocs principaux :

La partie qui décode l'adresse émise par l'hôte dans le paquet Jeton. Cette entité permet au périphérique de savoir que c'est bien à lui que l'hôte s'adresse,

La partie terminaison, La partie réalisant la fonction USB proprement dite.

Les terminaisons peuvent être vues comme des intermédiaires, des tampons entre le bus et la fonction USB. En effet, il n'est pas possible pour le bus d'écrire directement dans la fonction, et pour la fonction d'écrire directement sur le bus. Les données sont donc stockées temporairement (jusqu'à ce que l'hôte ou le périphérique les lisent) dans les terminaisons. C'est donc pour cette raison que dans le paquet Jeton, l'hôte précise la terminaison à laquelle il veut s'adresser.

On peut remarquer qu'une même fonction USB peut utiliser plusieurs terminaisons.

La paire de terminaison utilisée par défaut par l'hôte pour dialoguer avec le périphérique est EPO.

3.5.4. Les types de transfert :

La spécification de l'USB définit 4 types de transferts entre l'hôte et les périphériques.

3.5.4.1. Les transferts de commande « Control transferts » :

Ce sont les transferts qui sont généralement utilisés pour les opérations de commande et d'état.

Ces transferts surviennent généralement en paquets directs et par rafales initiés par l'hôte, de manière à utiliser le meilleur rendement de livraison. Le transfert de commande est fiable : en cas d'erreur sur un paquet, il est répété.

3.5.4.2. Les transferts d'interruption « Interrupttransfers » :

Ce type de transfert est très utilisé, puisque c'est celui qui est mis en œuvre pour les souris, les claviers, ... En fait, quand le périphérique a une donnée à transférer à l'hôte, il lui faut attendre que l'hôte l'interroge pour lui signaler qu'il a une information urgente à transférer. En fait, ce n'est pas réellement un système d'interruption au sens informatique du terme. L'hôte n'interrompt pas le transfert en cours avec un autre périphérique pour se précipiter vers le périphérique nécessitant un transfert urgent.

3.5.4.3. Les transferts isochrones « Isochronoustransfers » :

C'est certainement le mode de transfert le plus efficace en matière de débit, de disponibilité de la bande passante et du délai d'attente. Mais c'est aussi le plus complexe. Il est utilisé principalement pour des données ayant des durées de vies critiques telles que les trames audio ou vidéo.

Ce type de transfert assure un débit maximum, mais il y peut arriver que certains paquets soient erronés.

3.5.4.4. Les transferts en Bloc « Bulktransfers » :

Ce type de transfert est utilisé quand il faut transférer une grande quantité d'information pendant un temps relativement court. Par exemple, un appareil photo ou un caméscope utilise ce type de transfert pendant lequel 90% de la bande passante du bus est attribué au périphérique et les paquets erronés sont répétés.

3.5.5. Les descripteurs USB :

Ce point est essentiel pour le fonctionnement correct du bus. En effet chaque périphérique possède des caractéristiques propres qui le différencient du voisin. L'hôte doit être en possession de toutes ces caractéristiques pour initier une communication avec le périphérique en question. Pour cela, chaque périphérique possède une série de descripteurs qui précisent complètement son identité, la façon de communiquer avec lui, ...etc.

3.5.6. Les énumérations :

Le concept de l'énumération agit sur le périphérique nouvellement connecté au bus et s'identifier auprès de l'hôte, pour que celui-ci lui attribue une adresse.

En pratique, l'hôte remarque qu'un nouveau périphérique a été connecté au bus en détectant la variation de tension résultante.

Après avoir attendu que l'alimentation 5V se stabilise, l'hôte émet un *Reset*, autorisant ainsi le périphérique à répondre sur l'adresse 0 qui correspond au point final (endpoint) de contrôle.

Le périphérique, à la demande de l'hôte, envoie la liste de ses descripteurs, et se voit attribuer une adresse. De son côté, l'hôte informe le système d'exploitation de l'ordinateur qu'un périphérique a été connecté, pour qu'il se charge d'aller chercher le driver correspondant. Le périphérique est alors prêt à fonctionner.

3.5.7. Les requêtes USB :

Tout appareil USB doit répondre aux paquets d'installation sur le canal de communication par défaut. Les paquets d'installation sont utilisés pour la détection et la configuration de l'appareil et véhiculent des fonctions courantes telles que la mise en

place de l'adresse de l'appareil USB, la demande d'un descripteur d'appareil ou la vérification de l'état d'une terminaison. Un hôte USB conforme s'attend à ce que toutes les requêtes soient traitées dans une période maximale de 5 secondes. Il précise aussi des temps plus stricts pour des requêtes particulières :

Les requêtes standards d'appareils sans étage de données doivent être accomplies en 50 ms.

Les requêtes standards d'appareils avec un étage de données doivent commencer à renvoyer les données 500 ms après la requête.

Chaque paquet de données doit être envoyé dans les 500 ms de la transmission réussie du paquet précédent.

L'étage d'état doit être accompli dans les 50 ms après la transmission du dernier paquet de données.

Chaque requête commence avec un paquet d'installation de 8 octets qui a le format suivant.

Décalage	Champ	Taille	Valeur	Description
0	bmRequestType	1	Bit-Map	D7 Direction de transfert de phase de données 0 = Hôte vers l'appareil 1 = Appareil vers Hôte D6..5 Type 0 =00= Standard 1 =01= Classe 2 =10= Constructeur 3 =11= Réservé D4..0 Destinataire 0 = Appareil 1 = Interface 2 = Terminaison 3 = Autre 4..31 = Réservé
1	bRequest	1	Valeur	Requête
2	wValue	2	Valeur	Valeur
4	wIndex	2	Index ou Décalage	Index

Tableau 3-3: Format d'une requête USB

4. Conclusion :

Tout au long de ce chapitre nous avons décrit d'une manière exhaustive tous les composants de la plateforme ainsi que la communication entre toutes les parties pour assurer le bon fonctionnement en temps réel et aussi garantir un maximum de transfert de données c'est à dire augmenter le rapport signal bruit.

CHAPITRE 4 :

Applications Ultrasons de la Plateforme

1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous décrivons les applications mises en place sur la plateforme pour s'assurer de son bon fonctionnement.

Nous commençons d'abord par une application ultrason de basse fréquence à savoir le détecteur d'obstacle de fréquence centrale 40 KHz.

Par la suite, nous décrivons la méthode de détection de bactéries dans le lait UHT en utilisant un transducteur ultrason de fréquence 0.5 MHz, puis l'application de la méthode ultrasonore pour la détection de la maturité des oranges.

2. Détecteur d'obstacles :

La technologie ultrason trouve ses applications aussi bien pour les hautes que pour les petites fréquences, dans cette optique vient l'idée de faire une application pour les petites fréquences. L'application implantée sur la plateforme utilise le capteur ultrason HC-SR04.

2.1. Description :

Le capteur HC-SR04 utilise les ultrasons pour déterminer la distance d'un objet. Il offre une excellente plage de détection sans contact, avec des mesures de haute précision et stables. Son fonctionnement n'est pas influencé par la lumière du soleil ou des matériaux sombres, bien que des matériaux comme les vêtements puissent être difficiles à détecter.

2.2. Caractéristiques :

- Dimensions : 45 mm x 20 mm x 15 mm
- Plage de mesure : 2 cm à 400 cm
- Résolution de la mesure : 0.3 cm
- Angle de mesure efficace : 15 °
- Largeur d'impulsion sur l'entrée de déclenchement : 10 µs

2.3. Broches de connexion :

- Vcc = Alimentation +5 V DC
- Trig = Entrée de déclenchement de la mesure (Trigger input)
- Echo = Sortie de mesure donnée en écho (Echo output)
- GND = Masse de l'alimentation



Figure 4.1: Capteur HC-SR04

2.4. Spécifications et limites :

Paramètres	Min	Type	Max	Unité
Tension d'alimentation	4.5	5	5.5	V
Courant de repos	1.5	5	2.5	Ma
Courant de fonctionnement	10	15	20	Ma
Fréquence des ultrasons	-	40	-	KHz

Tableau 4-1: Spécifications du capteur HC-SR04

2.5. Fonctionnement :

Pour déclencher une mesure, il faut présenter une impulsion "high" (5 V) d'au moins 10 μ s sur l'entrée "Trig". Le capteur émet alors une série de 8 impulsions ultrasoniques à 40 kHz, puis il attend le signal réfléchi. Lorsque celui-ci est détecté, il envoie un signal

"high" sur la sortie "Echo", dont la durée est proportionnelle à la distance mesurée.

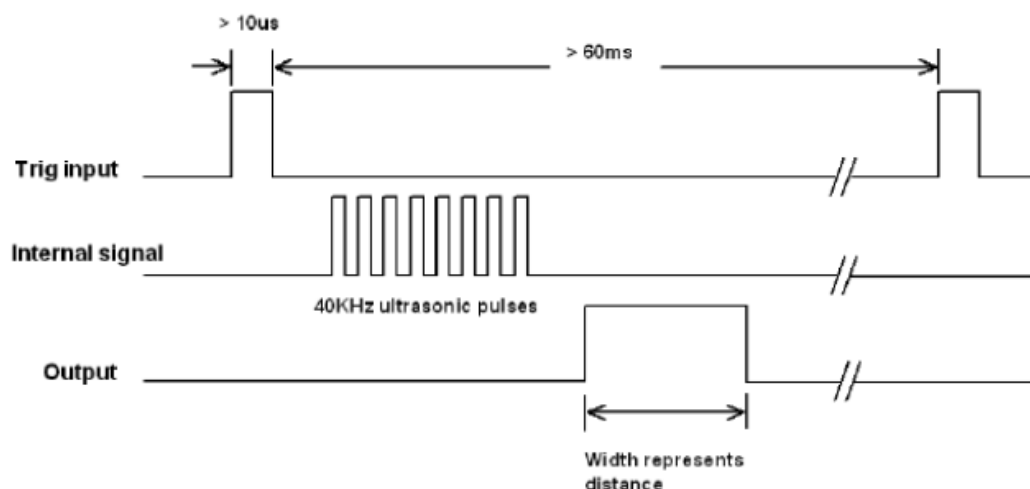


Figure 4.2: Fonctionnement du capteur HC-SR04

2.6. Distance de l'objet :

La distance parcourue par un son se calcule en multipliant la vitesse du son, environ 340 m/s (ou 34'000 cm/1'000'000 µs) par le temps de propagation.

$$\text{Soit : } d = v \times t \quad (8)$$

Où d est la distance parcourue et t le temps de propagation

Le HC-SR04 donne une impulsion en dizaines de µs. Il faut donc multiplier la Valeur obtenue par 10 µs pour obtenir le temps t. On sait aussi que le son fait un Aller-retour. La distance vaut donc la moitié.

$$d = 34'000 \text{ cm}/1000000 \text{ µs} \cdot 10\text{us} \cdot \text{valeur} / 2$$

$$\text{En simplifiant : } d = 17/100 \text{ cm} \cdot \text{valeur}$$

2.7. Branchement du capteur avec la carte d'acquisition :

L'objectif de ce montage est de travailler avec un capteur ultrason de basse fréquence et qui ne demande pas une grande alimentation cela est dans l'objectif de tester le bon fonctionnement de la plateforme.

2.7.1. Diviseur de tension :

Le module est alimenté en 5V et sa sortie fournit un créneau à cette tension. Le 5V ne peut pas être appliqué directement sur une entrée du GPIO sous peine de destruction de l'entrée, Il faut donc diminuer cette tension en utilisant un diviseur de tension, appelé également pont diviseur :

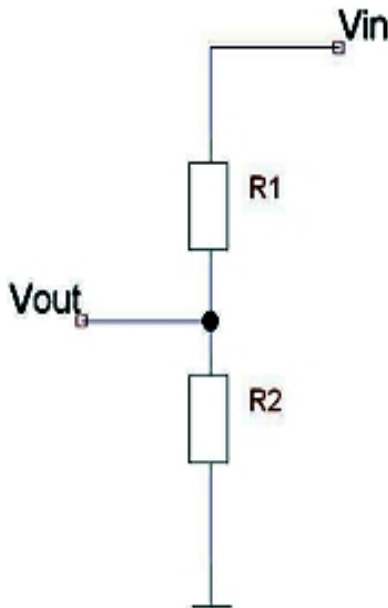


Figure 4.4: Diviseur de tension

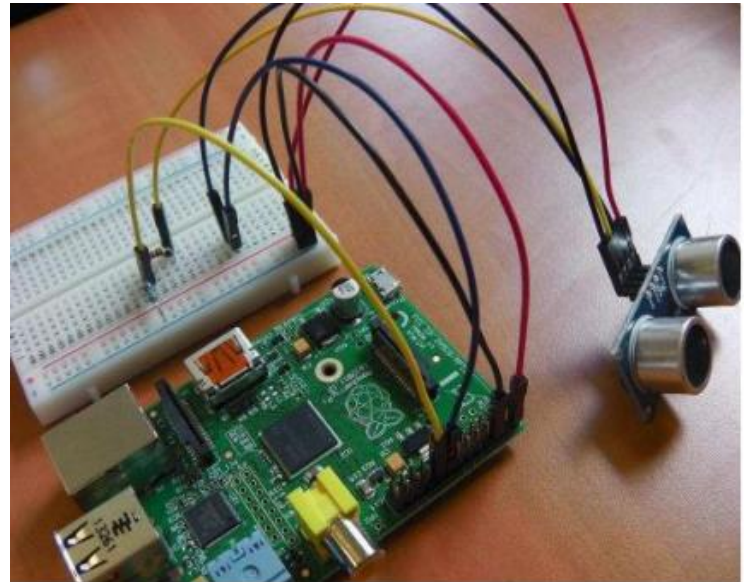


Figure 4.3: Capteur HC-SR04 avec Raspberry Pi2

2.7.2. Code python et résultat sur moniteur :

Le montage ainsi réalisé donne des résultats en temps réel des distances qui séparent le premier obstacle rencontré par le capteur HC-SR04.

On a utilisé le langage python pour la compilation du programme qui lit le capteur ultrason .

```

Ultrasonic Measurement
WAITING FOR SENSOR
Distance : 2.3
>>> =====
>>>
Ultrasonic Measurement
WAITING FOR SENSOR
Distance : 3.9
>>> =====
>>>
Ultrasonic Measurement
WAITING FOR SENSOR
Distance : 5.0

```

```

>>> #!/usr/bin/python
# Date : 26/04/2016
# Name : hafid

# Import required Python libraries
import time
import RPi.GPIO as GPIO
# Use BCM GPIO references
GPIO.setmode(GPIO.BCM)
# Define GPIO to use on Pi
TRIG = 23
ECHO = 24
print "Ultrasonic Measurement"
GPIO.setup(TRIG,GPIO.OUT)
GPIO.setup(ECHO,GPIO.IN)
GPIO.output(TRIG,False)
print"WAITING FOR SENSOR"
time.sleep(2)
GPIO.output(TRIG,True)
time.sleep(0.00001)
GPIO.output(TRIG,False)
while GPIO.input(ECHO)==0:
    pulse_start = time.time()
while GPIO.input(ECHO)==1:
    pulse_stop = time.time()
# Calculate pulse length
elapsed = pulse_stop-pulse_start
# Distance pulse travelled in that time is time
# multiplied by the speed of sound (cm/s)
distance = elapsed * 17150
# That was the distance there and back so halve the value
distance = round(distance,2)
print "Distance : %.1f" % distance
GPIO.cleanup()

```

Figure 4.5: Distance du capteur à l'obstacle

On obtient d'une manière continue la distance qui sépare le capteur du premier obstacle rencontré.

Sur l'interface graphique on visualise les signaux donnés par le capteur, chose qui va nous servir pour valider le résultat obtenu sur le moniteur (voir figure4.6).

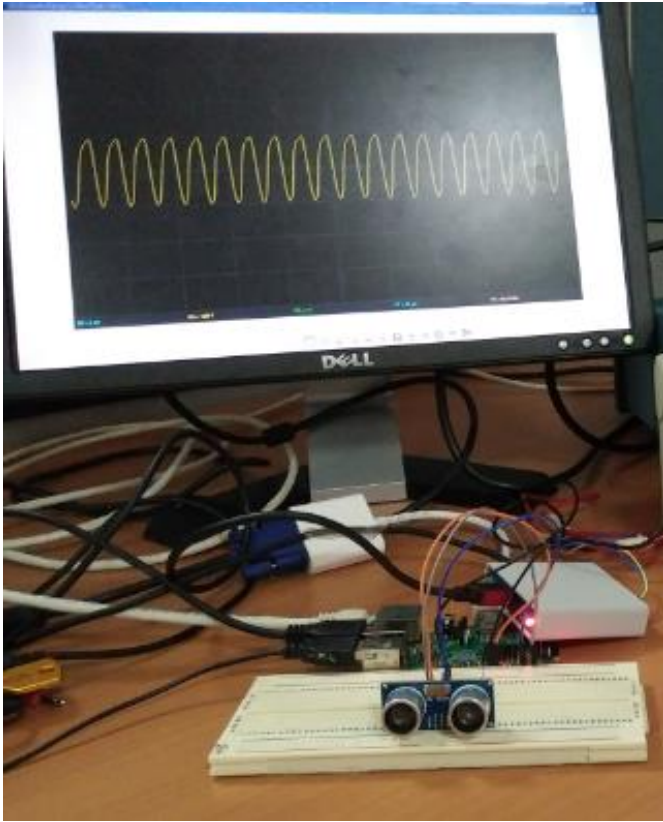


Figure 4.7: Montage du capteur avec la plateforme

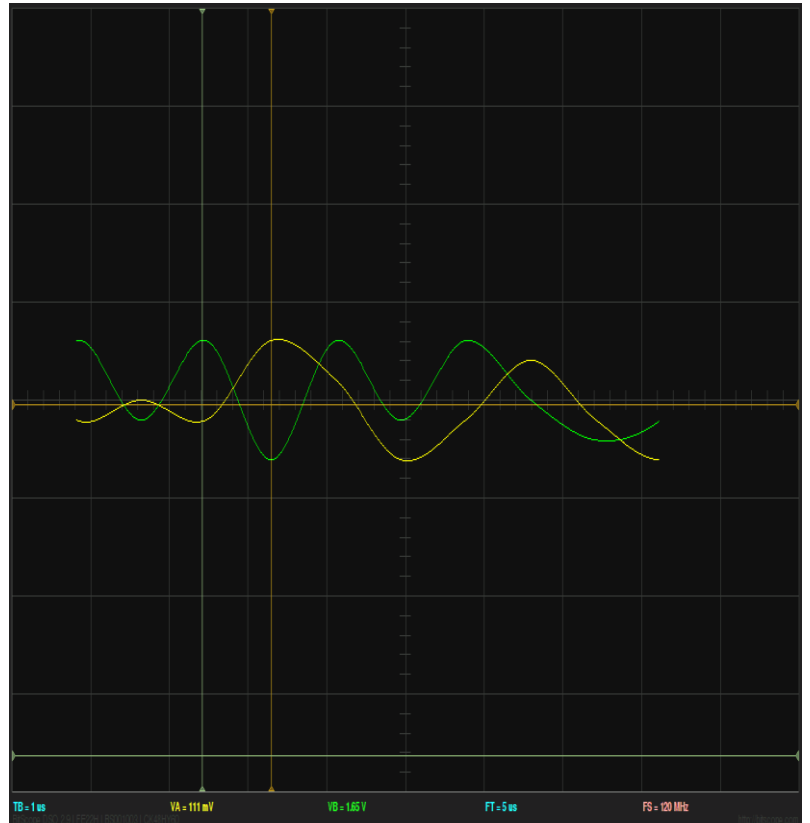


Figure 4.6: Signaux du capteur sur l'interface graphique

- A partir de l'interface on obtient deux signaux décalés l'un coïncide avec le signal émis et l'autre avec le signal écho.
- Avec les curseurs on calcule le décalage temporel entre les deux signaux et on conclut la distance à partir de la formule suivante :

$$d = \frac{v \times t}{2} \quad (9)$$

3. Détection de bactéries dans le lait UHT :

3.1. Introduction :

Le contrôle de qualité est un aspect important dans la production alimentaire. Le principal objectif de ce contrôle est de vérifier la conformité des produits alimentaires en termes de valeur et de sécurité nutritionnelle. Le développement de nouvelles techniques pour le contrôle de la qualité continue d'augmenter en fonction des exigences imposées par les consommateurs et l'authentification des aliments.

3.2. Description :

Le potentiel d'ultrasons comme outil de contrôle de qualité non destructif de produits alimentaires est en cours d'enquête. Les ondes ultrasonores ont une caractéristique précieuse qui consiste dans sa capacité à caractériser les matériaux opaques tels que le lait UHT emballé.

Récemment des techniques par ultrasons ont été utilisées pour contrôler la fermentation lactique du lait, la mesure des compositions de lait et le contrôle de la coagulation du lait [14].

La technologie des ultrasons a récemment fait une tâche très délicate qui affecte directement un besoin critique de consommateurs. Cet avantage majeur consiste dans la détection de la contamination microbienne du lait. Dans ce contexte vient l'idée de travailler sur la qualité du lait UHT suite à une demande client.

Dans le présent travail, notre objectif est de caractériser la qualité du lait UHT dans son ensemble, sans aucune destruction. Nous proposons d'utiliser le procédé de transmission d'ultrasons qui est adapté pour la caractérisation des milieux opaques comme le lait UHT. Pour cela, nous suivons l'évolution des paramètres ultrasonores dans des températures différentes en fonction de l'intrusion l'air à l'intérieur paquet. Nous avons analysé les résultats expérimentaux entre les deux cas : paquet avec

l'intrusion d'air et Paquet sans intrusion d'air. Nous procédons par cette étude comparative afin d'enquêter sur la pertinence, la faisabilité et la fiabilité de la plateforme réalisée à MAScIR.

Avant de tester notre plateforme ultrason pour la détection de bactérie dans le lait UHT on a travaillé avec l'équipe microbiologie pour fixer un seuil du nombre de bactérie dans le lait UHT pour qu'il soit contaminé.

3.3. Tests microbiologiques :

3.3.1. Norme microbiologique :

Quantité du lait UHT (ml)	Nombre de colonie bactériales	Qualité du lait
100	<10	Sain
100	>10	Contaminé

Tableau 4-2: Norme microbiologique du nombre de bactéries par 100ml

3.3.2. Expérience :

On a pris 100 ml du lait UHT qu'on l'a laissé 24 heure dans une température de 30°C, on a remarqué que le nombre de colonies bactériales est inférieur à dix. Donc on peut considérer que ce lait est sain. C'est ce lait qu'on va le prendre comme référence pour caractériser le signal ultrasonore du lait UHT sain.

Le deuxième test consiste à ouvrir l'emballage du lait UHT pour le laisser réagir avec l'air pendant toute la période de sa validité écrite sur l'emballage, après on chauffe le lait sur 100 °C et on vérifie que le lait est contaminé.

Par suite on prend 100 ml de ce lait on le laisse 24 heure dans une température de 30 °C, on remarque que le nombre de colonies bactériales dépasse largement les dix fixer par la norme de microbiologie.

3.4. Instrumentation ultrason :

- **Choix du transducteur ultrason :**

Pour cette application on a décidé de travailler avec un transducteur par immersion pour plusieurs raisons :

- ✓ Offre un couplage uniforme,
- ✓ Possède une couche dont la longueur d'onde est quart d'onde donc une grande puissance de sortie.

- **Choix de la fréquence :**

Pour le choix de la fréquence 0.5MHz, il ya toujours le compromis entre la résolution et pénétration plus la fréquence est grande plus la résolution est bonne et la pénétration diminue pour notre cas on aura besoin d'analyser un signal donc la résolution n'est pas une exigence.

Dans cette méthode, nous avons utilisé deux transducteurs identiques. Ces transducteurs et les échantillons ont été immergés dans l'eau à l'intérieur d'un thermostat. Les transducteurs (0,5 MHz comme fréquence centrale) sont montés face à face sur les côtés opposés de l'emballage UHT.

3.5. Résultats :

3.5.1. La mesure de l'amplitude crête à crête :

La figure ci-dessous montre un exemple du signal ultrasonore transmis à travers l'emballage du lait UHT. Il Est clair que ce signal transmis est constitué de plusieurs parties chevauchées, ce qui complique le calcul de ce paramètre parce que nous ne savons pas comment ces échos vont évoluer au cours de toute l'expérience.

Pour éviter ce problème, nous suivons l'enveloppe du signal dans chaque acquisition, pour cette raison nous avons appliqué la transformée de Hilbert cela facilite la tâche pour mesurer la crête d'amplitude en délimitant l'enveloppe supérieure et l'enveloppe inférieure du signal ultrasonore. Enfin, nous revenons à la valeur de l'amplitude crête

à crête en faisant la soustraction de la valeur maximale supérieure de l'enveloppe à l'égard du minimum inférieur.

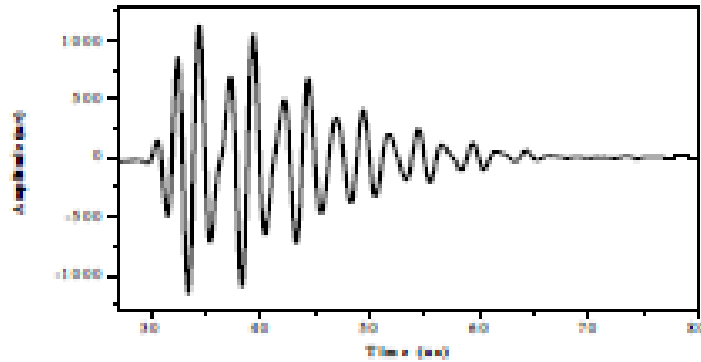


Figure 4.8: Signal ultrasonore transmis sur le package du lait

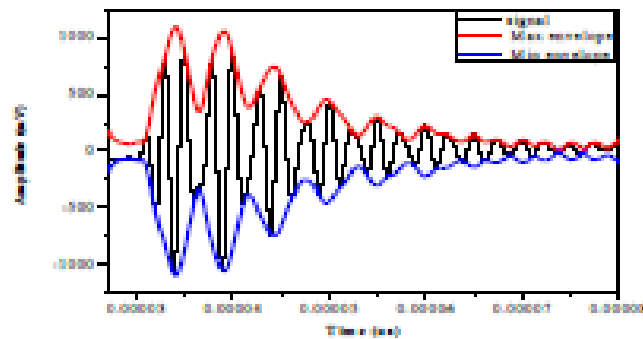


Figure 4.9: Transformée de Hilbert appliquée sur le signal

3.5.2. Mesure du temps de vol :

Dans notre cas, nous mesurons à temps de vol en exploitant la méthode de corrélation croisée. Le principe de cette technique est de prendre le premier signal transmis comme une référence, ensuite nous calculons la fonction de corrélation entre ce signal de référence et le signal acquis dans chaque acquisition jusqu'à la fin de l'expérience.

$R(t)$ est la fonction de corrélation croisée entre le signal de référence et le signal émis.

$H(t)$ est la transformée de Hilbert de la fonction $R(t)$, l'enveloppe de la corrélation $E(R(t))$ est donnée selon la formule suivante :

$$E(R(t)) = \sqrt{(R(t)^2 + H(t)^2)} \quad (10)$$

La figure ci-dessous montre le résultat de l'application de cette méthode dans une acquisition donnée. Le temps de vol correspond à la majeure partie de l'enveloppe. Dans la plate-forme développée dans ce travail, nous appliquons cette technique pour toute acquisition, dont le but de suivre l'évolution du temps de vol.

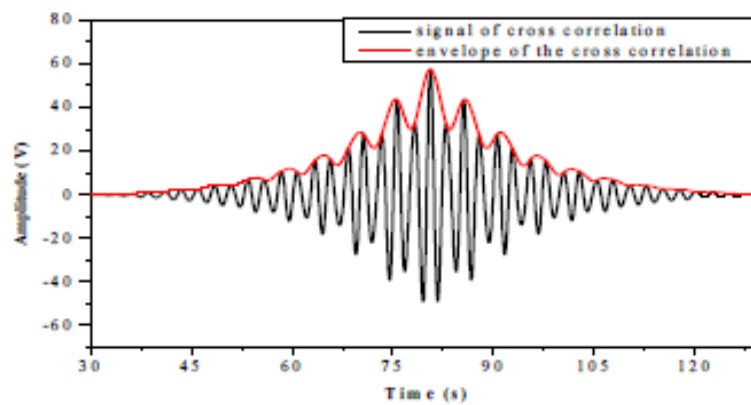


Figure 4.10: Mesure du temps de vol du signal ultrason par corrélation croisée

4. Détection de maturité des fruits « Oranges » :

4.1. Introduction :

Pour mettre en œuvre notre plateforme ultrason et tenant compte que notre économie nationale se base principalement sur l'export des produits agricoles vient l'idée de contrôler le degré de maturité des fruits par la méthode ultrasonore sans avoir besoin de passer par des méthodes visuelles ou laboratoires.

4.2. Description :

Dans le présent travail, notre objectif est d'étudier la faisabilité du contrôle de la maturité des fruits en particulier les oranges par la méthode ultrasonore par immersion.

Pour cette étude on a choisi un transducteur de 20 MHz comme fréquence centrale. En tenant compte de la forte atténuation des ultrasons dans la texture des fruits et légumes, nous allons limiter notre étude seulement à la caractérisation de la couche externe appelé flavédo caractérisé par sa très faible épaisseur. L'utilisation des hautes fréquences va nous permettre une caractérisation de haute résolution de la peau d'orange avec une haute résolution spatiale. Ce contrôle est principalement basé sur la mesure des paramètres ultrasoniques éventuellement la vitesse et de l'atténuation dans le but de vérifier l'aptitude de cette méthode par ultrasons pour détecter le degré de maturité du fruit sans passer par pénétrométrie et les mesures biochimiques qui sont le plus souvent en corrélation avec la perception humaine en ce qui concerne la fermeté des fruits, mais ils sont généralement destructifs.

4.3. Anatomie de la peau d'orange :

Le fruit d'orange présente plusieurs zones distinctes pour leurs fonctions biologiques et de leur nature physique. La partie la plus externe du fruit est la peau extérieure appelée flavédo. Cette couche a une structure solide avec un haut pourcentage d'eau il a la caractéristique de couleur orange du fruit. La couche de flavédo est constituée de deux couches :

La couche appelée épiderme qui se compose de quelques lignes de cellules et la couche de l'hypoderme, qui contient les glandes sébacées. Vers l'intérieur, une autre couche appelée albédo. Cette couche est nettement différenciée par rapport à la première couche ; il a une structure poreuse et solide de couleur blanche avec quelques millimètres d'épaisseur.

Etant donné le caractère multi- couche de la peau d'orange qui se compose de deux couches. Ces couches se distinguent par leurs propriétés biologiques et physiques, par conséquent ils doivent être examinés individuellement lors de n'importe quelle étude.

Dans la présente étude, nous nous intéressons uniquement à la Caractérisation de la couche de flavédo, parce qu'en tenant compte de la forte atténuation des ultrasons dans la peau et la gamme des hautes fréquences utilisées, il sera raisonnable que les échos des ultrasons rétrodiffusés signaux soient spécifiques uniquement à la couche de flavédo.

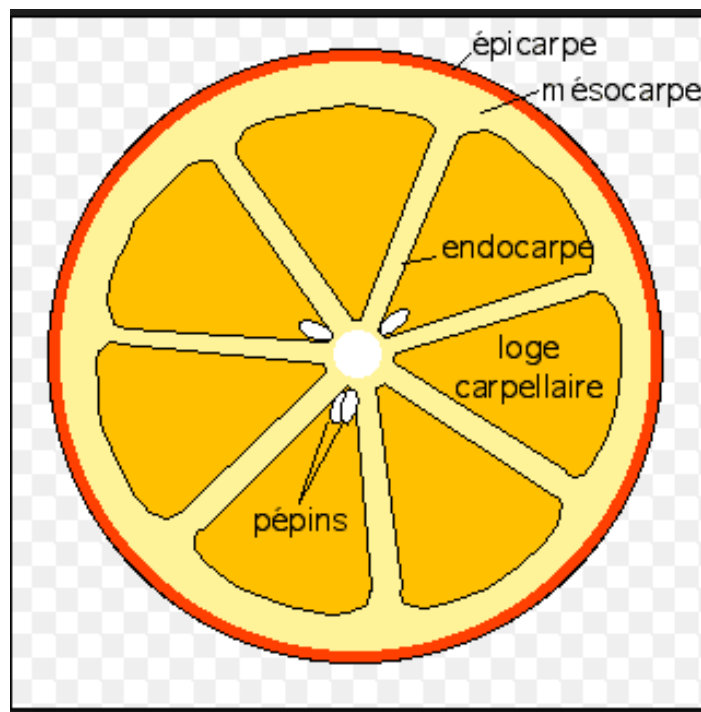


Figure 4.11: Anatomie de l'orange

4.4. Technique utilisée :

Il est difficile, voire impossible, de détecter par ondes ultrasonores un fruit entier parce qu'elles sont atténuées considérablement en passant par les fruits à cause de pourcentage élevé de l'air et les grands aspirateurs intercellulaires dans la peau du fruit. Ainsi, la méthode de réflexion a été utilisée pour mesurer la vitesse des ondes longitudinales dans la peau d'orange et de l'atténuation ultrasonore provoquée par celle-ci. Cette non destructive technique est très intéressante d'essayer la possibilité de l'évaluation de la qualité interne de fruits orange en contrôlant que sa couche externe, sachant que la qualité de l'orange peut être déduite de la caractérisation de son pelage.

Remarque : Il est cependant intéressant d'annoncer qu'il ne sera pas facile d'évaluer les paramètres ultrasonores en raison des formes et des tailles irrégulières des échantillons étudiés, et des structures non uniformes tels comme l'épaisseur de la peau qui ne garde pas un uniforme.

4.5. Paramètres ultrasons :

4.5.1. Mesure de la vitesse des ultrasons :

Pour mesurer la vitesse des ondes ultrasonores dans le flavédo, nous mesurons le temps de vol nécessaires pour faire propager le signal dans l'épaisseur de cette couche à partir du signal ultrasonore rétrodiffusé par la peau. :

4.5.2. Mesure d'atténuation ultrasonore :

Le coefficient d'atténuation ultrasonore α (dB / mm) est mesurée à partir du domaine des fréquences. La méthode utilisée consiste d'abord à isoler le premier écho et le deuxième écho puis on calcule la FFT de chaque écho, après on déduit de la FFT, l'amplitude spectrale correspondant à chaque écho.

Finalement on déduit le coefficient d'atténuation d'après la formule suivante :

$$\alpha = \frac{20}{2d} \text{Log}\left(\frac{A1}{A2}\right) \quad (11)$$

Où A_1 : amplitude du premier signal écho, A_2 : Amplitude du deuxième signal écho,
 d : épaisseur de la couche flavédo.

5. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons mis l'accent sur les applications ultrasons de la plateforme pour valoriser le travail de l'assemblage et de la réalisation de la plateforme aussi on a mis le point sur plusieurs paramètres tel que la vitesse de propagation des ultrasons, l'atténuation et le temps de vol qui permettent de caractériser la cible à détecter.

Conclusion et Perspectives

Le travail présenté dans ce rapport a pour objectif, la réalisation d'une plateforme ultrason de test pour diverses applications industrielles.

Le premier volet de ce projet a été dédié à l'aspect physique des ultrasons et les applications de cette technologie innovante caractérisée par le profil non destructif et par la précision des mesures.

La deuxième partie a été consacrée à la structure générale de la plateforme tout en mettant le point sur les différentes parties constituantes à savoir les transducteurs ultrasons, le générateur d'impulsions, la carte d'acquisition et de traitement de données et l'interface graphique pour la visualisation et l'interprétation en temps réel des signaux.

La dernière partie a été consacrée pour mettre le point sur les applications réalisées sur la plateforme à savoir le capteur de distance qui peut être utile pour différentes applications, la détection de bactéries dans le lait UHT et la détection de maturité des oranges.

En perspectives, la tendance de la fondation MAScIR est de concevoir des systèmes industriels miniaturisés pour assurer la portabilité et la qualité des produits MAScIR pour cette raison on compte faire la conception d'une carte électronique dédié pour ce projet, ainsi la réalisation d'un générateur d'impulsions de grandes performances mais miniaturisé, pour avoir une plateforme portable et très performante.

Références Bibliographiques

Fonction	Site web
[1] paramètres ultrasons	facmed.univ-rennes1.fr
[2] Normes de contrôle par ultrason	afnor.org/norme/nf-en-iso-17640/
[3] Méthodes de contrôle non destructif	www.nde-ed.org
[4] Matériels ultrason :	www.olympus-ims.com
[5] Mode d'examen des tests ultrason :	http://www.cofrend.com
[6] Générateur d'impulsion miniaturisé :	www.ultratek.com
[7] Wikipédia	www.wikipédia.org
[8] Structure de la plateforme	http://www.ni.com
[9] Echographie ultrason	www.creatis.insa-lyon.fr
[10] Vente de matériaux ultrason	www.ndt.net
[11] Mise en service de la carte Raspberry	www.raspberrypi.org
[12] Installation SDformatter	www.sdcard.org
[13] Téléchargement windisk32	http://sourceforge.net/projects/win32diskimage
[14] contrôle de qualité du lait	www.researchgate.net

ANNEXES

Annexe1 : Installation de SDFormatter

La première étape est d'aller sur le site officiel de sdcard

https://www.sdcard.org/downloads/formatter_4/eula_windows/ Vous allez trouver la version actuelle dans un fichier zip téléchargeable ou dans une installation de Windows

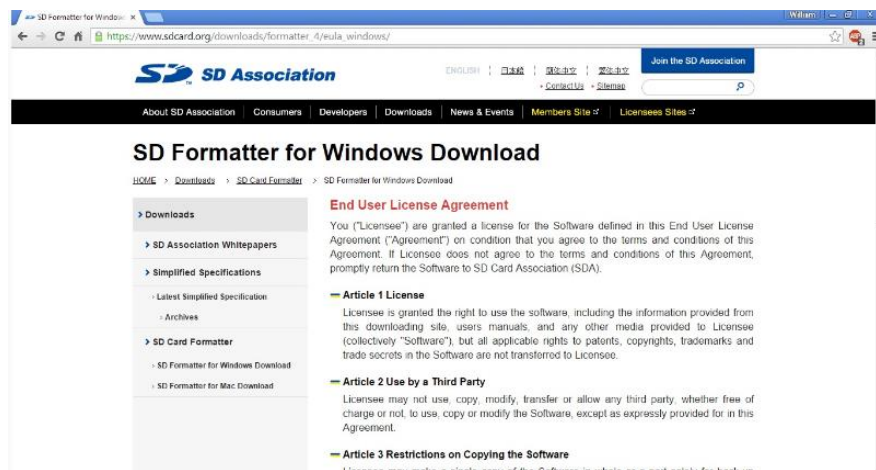


Figure 5.1: Page de téléchargement de SDFormatter

Après avoir décompresser le fichier on choisit la destination du fichier :

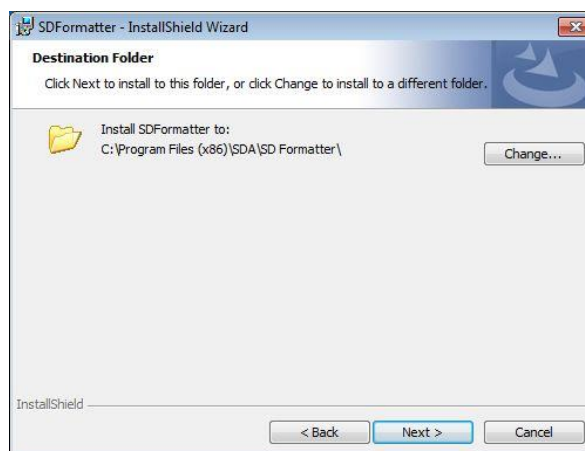


Figure 5.2: Destination du fichier d'installation

L'étape suivante est l'installation de tous les modules nécessaire au bon fonctionnement de sdformatter



Figure 5.3: Installation de SDFormatter

Finalement on obtient SDformatter, indispensable pour mettre en service la carte SD qui va servir par la suite comme disque dur de notre carte d'acquisition.

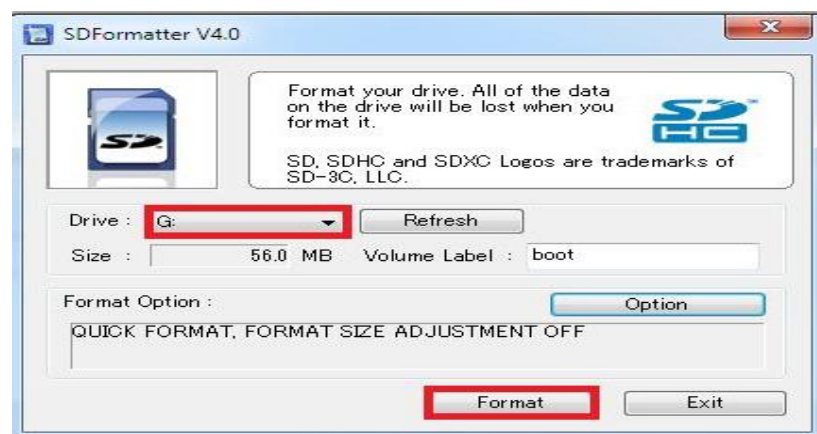


Figure 5.4: SDFormatter version 4.0

:

Annexe 2 : Installation de Imagewriter

On ouvre le lien de téléchargement :

<https://sourceforge.net/projects/win32diskimager/postdownload?source>, on obtient un fichier compressé.

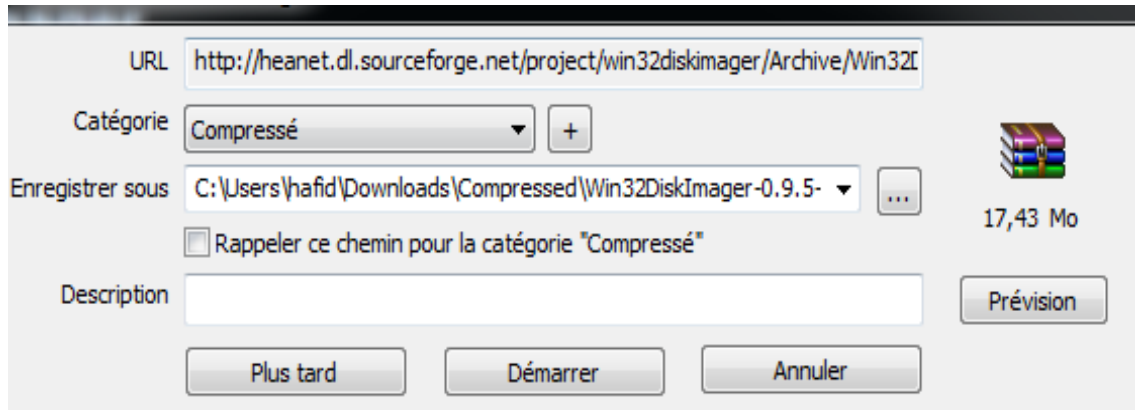


Figure 5.5: Fichier d'installation win32diskImager compressé

On décompresse le fichier puis on l'installe :

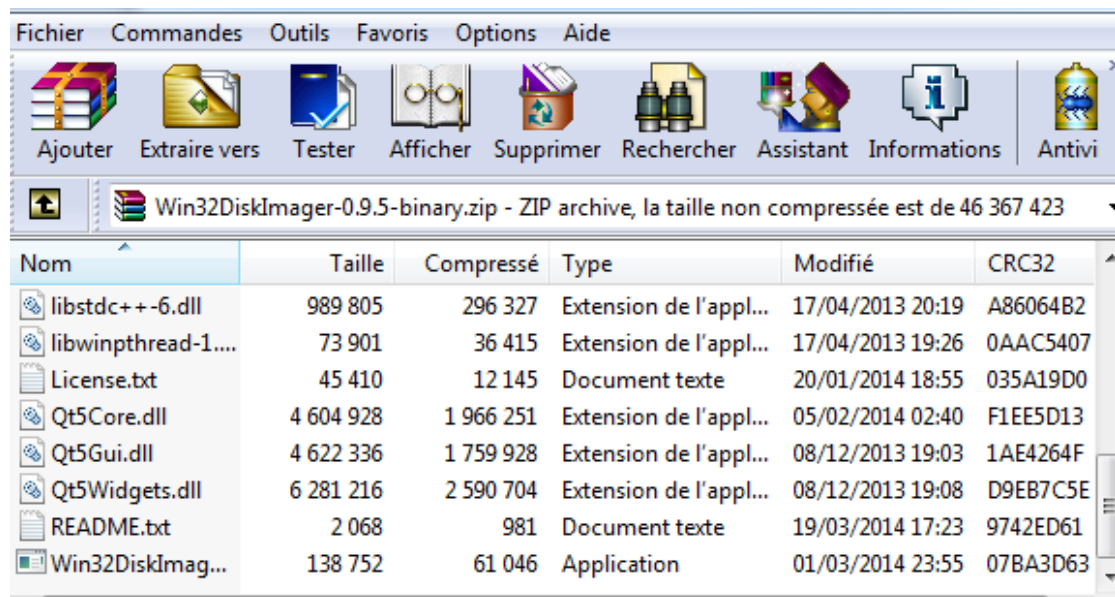


Figure 5.6: Le fichier exécutable de win32DiskImager

Finalement on obtient le win32DiskImager qui va aider à copier l'image de système d'exploitation Raspbian sur la carte SD.

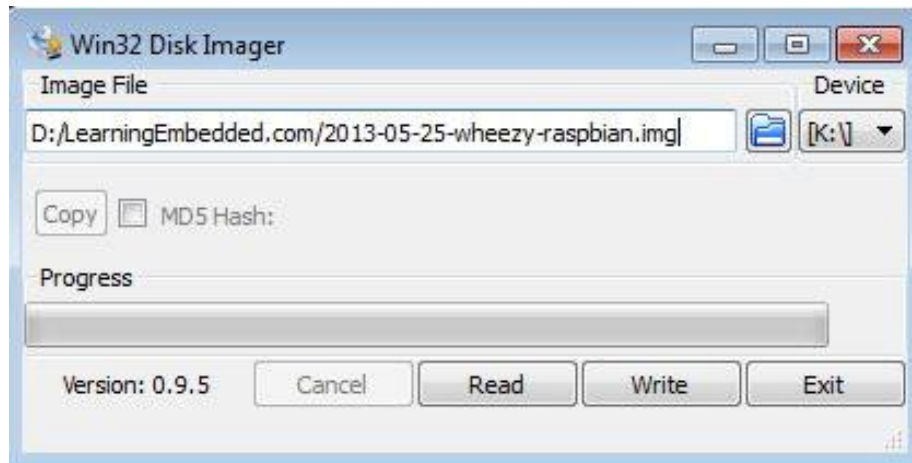


Figure 5.7: Logiciel win32DiskImager