

Projet de Physique P6
STPI/P6/2021 – 040

**MESURE DE LA VITESSE DE SON PAR
CAPTEURS ULTRASON**

Étudiants :

Antsa ANDRIATAHINY

Marine BOSSARD

Timoté DELAGE GAREZ

Léo KASMIERCZAK

Grace WOLEANG

Enseignant-Responsable du Projet :

Nabil MOKRANI

Cette page est laissée intentionnellement vierge.

Date de remise du rapport : 11/06/2021

Référence du projet : STPI/P6/2021 - 040

Intitulé du projet : Mesure de la vitesse de son par capteurs ultrason

Type de projet : Bibliographie et expérimental

Objectifs du projet :

- Mesurer la vitesse du son à l'aide de capteur ultrason
- Étudier expérimentalement l'influence des facteurs extérieurs sur la vitesse du son

Mots-clés du projet : mesure, ultrason, capteur, vitesse de son

Table des matières

Table des matières	4
Introduction	5
Contexte et problématique	6
Méthodologie / Organisation du travail	7
Travail réalisé et résultats	8
1- Généralités	8
1.1 - Historique	8
1.2 - Autour des ondes sonores	11
1.2.1 - Définition	11
1.2.2 - Caractéristiques des ondes sonores	12
1.2.3 - Différentes sortes d'ondes sonores	14
1.3 - Milieux d'application	15
1.3.1 - Dans l'air	16
1.3.2 - Dans l'eau	16
2- Le principe des capteurs ultrasonores	17
2.1 - Principe de fonctionnement	17
2.2 - Piézoélectricité	18
2.3 - Matériaux piézoélectriques	20
2.4 - Zones de détection	20
2.5 - Gamme de fréquence et fréquences de mesure	22
2.6 - Isolation acoustique et phonique	23
3- Applications	24
3.1- Dans la vie quotidienne	24
3.1.1 - Repérage d'obstacles	24
3.1.2 - Étude de cas 1 : les sonars marins	26
3.1.3 - Étude de cas 2 : le Park Distance Control	28
3.2 - Dans le domaine scientifique	30
3.2.1 - Découverte et principe de l'échographie	30
3.2.2 - Différentes utilisations pour soigner et traiter	32
3.2.3 - Enjeux de la recherche dans le domaine des ultrasons	34
3.3 - Applications industrielles et commerciales	36
3.3.1- Introduction à leur utilisation	36
3.3.2- Effets sur la santé et principe de sécurité	38
4- Partie expérimentale	41
Conclusion	44
Perspectives	45
Bibliographie	46
Annexes	50

Introduction

L'onde sonore est omniprésente dans notre monde. En effet, nous sommes tous entourés d'une manière ou d'une autre de sons : lorsque nous écoutons de la musique, dans la rue avec le bruit des passants et des voitures, ou tout simplement lors d'un simple échange verbal avec un autre individu. C'est pourquoi dans le cadre de l'enseignement de P6 mené en deuxième année de Sciences et Technologies Pour l'Ingénieur à l'INSA de Rouen Normandie, nous avons choisi de mener notre projet autour des ondes sonores et ultrasonores.

Ce projet, intitulé "Mesure de la vitesse de son par capteurs ultrason", constitue un bon moyen de développer nos compétences en gestion de projet ainsi que le travail de groupe qui sont des qualités essentielles pour un ingénieur.

Nous allons commencer par présenter le contexte et la problématique puis dans un premier temps, nous allons nous intéresser aux généralités des ondes sonores ; ensuite, nous allons étudier le fonctionnement des capteurs ultrason avant de regarder de plus près quelques applications dans la vie quotidienne et dans le domaine scientifique. Enfin, toutes ces connaissances nous ont permis de finaliser notre projet par une partie expérimentale où nous avons fait des mesures de la vitesse du son dans l'air et des mesures de température à l'aide de capteurs ultrason et de capteurs de température.

Contexte et problématique

Avec les avancées technologiques contemporaines et l'émergence de l'intelligence artificielle, la précision des mesures scientifiques est de plus en plus importante pour obtenir des résultats toujours plus optimales. Il est alors important de trouver des manières d'effectuer des mesures précises. La connaissance de la vitesse de l'onde sonore et ultrasonore peut s'avérer être une solution efficace pour obtenir des mesures de distance, de température, de densité, de concentration, de pression, etc... C'est pourquoi nous nous sommes intéressés dans notre projet de P6 à la mesure de la vitesse de son par capteurs ultrason en utilisant une carte Arduino.

Problématique : comprendre le fonctionnement et l'exploitation des capteurs ultrason et leurs applications dans des domaines variés dans l'objectif de nous familiariser avec ces outils (programmation, capteurs, liaisons capteur-microcontrôleur) et mise en place sur un support d'expérience.

Méthodologie / Organisation du travail

Concernant la méthodologie de travail, notre groupe a commencé les deux premières séances à discuter et à s'informer sur le sujet. Suite à nos réunions de groupe du vendredi, nous avons décidé de partager notre projet en deux parties distinctes : la rédaction d'un rapport et la réalisation d'une manipulation expérimentale. Afin de rendre un travail correct dans les temps, notre groupe a consacré la première partie des séances à la rédaction du rapport (de début février au 16 avril). A partir de mi-avril, notre groupe s'est concentré sur la partie pratique.

I- Rédaction du rapport

Pour la rédaction du rapport, nous avons choisi de nous répartir les tâches de la manière suivante :

BOSSARD Marine : 1- Généralités : 1.1- Historique

WOLEANG Grace : 1- Généralités : 1.2- Autour des ondes sonores / 1.3- Milieux d'applications

DELAGE GAREZ Timoté : 2- Le principe des capteurs ultrasonores

ANDRIATAHINY Antsa : 3- Applications : 3.1- Dans la vie quotidienne

KASMIERCZAK Léo : 3- Applications : 3.2- Dans le domaine scientifique / 3.3- Applications industrielles et commerciales

En plus d'échanger nos idées par rapport à nos différentes parties, nous avons organisé une réunion de groupe où chacun nous expliquait en détails la partie qu'il avait rédigé, pour s'assurer que tout le groupe avait parfaitement compris les notions abordées.

II- Partie expérimentale

Pour la partie expérimentale, nous nous sommes réunis tous les vendredis au laboratoire d'optique pour faire un point sur les avancées de l'expérience. Nous avons élaboré le montage ensemble et relevé les mesures en groupe. En plus de nos séances du vendredi, nous avons organisé une séance de manipulation pratique le jeudi 3 juin 2021 au laboratoire au cours de laquelle nous avons effectué les tâches suivantes :

- Réalisation du montage final
- Relevé des mesures et tracé des courbes

Il est à remarquer que pour réaliser l'expérience, l'INSA nous a fourni une carte Arduino et des fils, une potence, une plaque chauffante et le groupe a acheté des capteurs ultrason et température, matériel qui revient à un budget d'environ 70 euros.

Travail réalisé et résultats

1- Généralités

1.1 - Historique

Avant toute chose, nous allons étudier, historiquement, toutes les grandes découvertes concernant, d'une part, les ondes sonores et d'autre part, les ultrasons plus précisément.

Pour commencer, nous allons étudier les ondes sonores. Depuis de très nombreuses années, les Hommes ont cherché à expliquer ce qu'était le son et d'où il provenait. Par exemple, les Égyptiens, les Hindous s'y sont intéressés mais sans faire de grandes découvertes. Pour cela, il faudra attendre l'Antiquité. En effet, dans l'Illiade et l'Odyssée d'Homère, au VIII^{ème} siècle avant notre ère, les composantes du son telles que l'Intensité, la hauteur et le timbre étaient déjà définis et ce n'est pas la seule nouveauté à propos du son.

En effet, en 500 avant J-C, les premières expériences sur des cordes vibrantes par Pythagore ont eu lieu, ce qui lui permit de comprendre qu'il existe un lien entre la longueur de la corde, la tension de celle-ci ainsi que la note produite.

En 330 avant J-C, Aristote s'est penché sur le phénomène d'écho, pensant que celui-ci provenait de la réflexion des sons sur les obstacles. Cette découverte a été reprise et retravaillée par les Grecs et les Romains, ce qui a permis la naissance de l'acoustique architecturale, très utilisée dans la construction des théâtres et amphithéâtres romains.

Les découvertes suivantes furent beaucoup plus tardives car au XVI^{ème} siècle, Bacon et Galilée se sont concentrés sur les vibrations sonores. Et c'est au XVII^{ème} siècle que de nouvelles théories sont apparues.

En 1615, Gianfranco Sagredo fait une expérience avec une cloche dans le vide, cela amène la question de la propagation du son dans le vide.

Dans les années 1630, Marin Mersenne [1] cherche à déterminer la vitesse du son en utilisant un canon comme source lumineuse et sonore. Cette expérience a montré que la vitesse du son était indépendante de la puissance de la source et de la distance. Il montre également que l'atténuation de l'intensité du son est inversement proportionnelle au carré de la distance parcourue. Il démontre aussi que la hauteur du son produit est inversement proportionnelle à la longueur de la corde mais proportionnelle à la racine carrée de la tension.

En 1680, Joshua Walker mesure la vitesse du son avec 20 % de précision.

En 1701, Sauveur explique qu'un son complexe se décompose en une fréquence fondamentale et des harmoniques.

En 1710, Newton mesure la vitesse du son avec une précision de 16 %.

En 1711, John Shore invente le diapason accordé à 440 Hz.

En 1738, César François Cassini [3] détermine aussi, expérimentalement, la vitesse du son. En effet, son expérience consistait à placer un canon à Montmartre et un autre au pied de la Tour de Montlhéry, puis de tirer deux coups de canon de part et d'autre en relevant le temps mis par le son du canon pour atteindre l'autre point géographique. En connaissant le temps et la distance, il a pu avoir une mesure de la vitesse du son.

En 1816, Pierre Simon de Laplace donne la première théorie permettant de calculer de manière précise la vitesse du son.

En 1822, Fourier invente sa transformation dite « de Fourier » pour analyser tous les sons complexes. En 1822, François Arago et Riche de Prony font de nouvelles expériences pour mesurer la vitesse du son de manière plus précise en utilisant des tirs de canon croisés. Ils obtiennent la vitesse de 330.90 m/s.

En 1828, Charles Sturm et Jean Daniel Colladon se concentrent sur la vitesse du son dans l'eau en réalisant une expérience dans le lac de Genève. Ils trouvent une vitesse de 1435 m/s.

En 1842, Doppler découvre ce qu'on appelle, aujourd'hui, l'effet Doppler.

En 1843, Ohm crée les formules d'Ohm qui s'appliquent à l'électricité et aux ondes sonores.

En 1877, Thomas Edison crée le premier phonographe qui est un appareil permettant d'enregistrer puis de réécouter des voix humaines.

Au XX^{ème} et XXI^{ème} siècles, [1] il y a très peu de nouvelles propriétés du son qui sont découvertes, en effet, ce sont principalement des objets utilisant le son qui sont inventés. Par exemple, on peut retrouver l'invention des hauts parleurs, des premiers films avec une bande son stéréo, le début de radio FM, puis par la suite, la création des CD et des DVD. Il est évident que ces appareils ne cessent d'évoluer au cours du temps comme nous pouvons le voir avec le son au cinéma qui ne fait que connaître des améliorations depuis quelques années.

A présent, avant de voir les propriétés propres aux ultrasons, faisons un point sur les découvertes relatives à ceux-ci.

En 1774, les premiers soupçons sur l'existence des ultrasons apparaissent chez LAZZARO Spallanzani lors de l'observation des chauves-souris en pleine nuit.

En 1880, Pierre et Marie Curie découvrent la Piézo-électricité dont le principe sera explicité dans la Partie II.

Puis tout le long du XX^{ème} siècle, de nombreuses applications des ultrasons sont inventées. Elles touchent différents domaines comme celui militaire avec le premier sonar découvert par Paul Langevin, celui de l'industrie avec une méthode utilisant les ultrasons pour détecter les défauts des produits dans la fabrication. Mais les plus grandes avancées ont été du côté médical avec l'invention de l'échographie dans les années 1950 (le premier échographe a été industrialisé en 1960) ainsi que celle du doppler pour étudier les flux sanguins dans les années 1960-1970. Ces deux appareils ont donc connu de nombreuses évolutions depuis leur création notamment avec l'échographie en temps réel ou encore le doppler en couleur.[4]

1.2 - Autour des ondes sonores

1.2.1 - Définition

Une onde sonore est une onde mécanique correspondant à la propagation de perturbations mécaniques dans un milieu élastique[42]. Ces perturbations sont perçues par l'oreille humaine qui l'interprète comme des sons. Il ne peut y avoir propagation d'une onde sonore que s'il existe un milieu matériel, cela peut être de l'air, du métal, du bois, un matériau solide. Dans le cas du vide, puisque nous n'avons pas de milieu matériel, le son ne peut pas se propager[44].

La propagation des ondes sonores est une propagation d'une surpression des molécules d'air, et cette surpression est périodique car elle rend bien compte d'une vibration qui passe par un état maximum et minimum.

Une onde sonore est donc une succession de compressions et de dilatations des molécules dans un milieu. La propagation de l'onde va alors fortement dépendre des propriétés du milieu traversé.

1.2.2 - Caractéristiques des ondes sonores

Les ondes sonores sont caractérisées par :

- Période :

La période, notée T elle se mesure en seconde, elle correspond à la durée au bout de laquelle la situation d'un point quelconque sur la courbe redevient la même. C'est la durée d'une vibration

complète. La période correspond à l'inverse de la fréquence : $T = \frac{1}{f}$

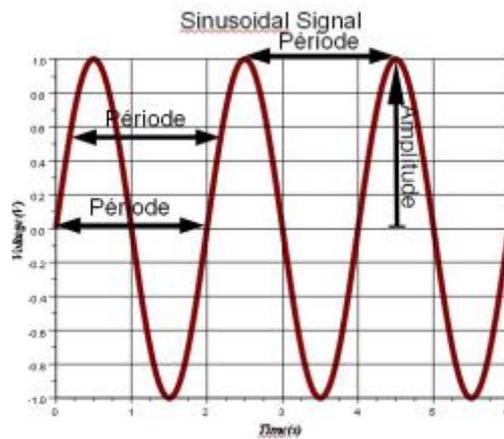


Figure 1 : Représentation d'une période

- Fréquence :

La fréquence, noté f se mesure en Hertz, elle mesure le nombre d'oscillation de la pression acoustique en une seconde. Si la fréquence est élevée dans ce cas la période est faible, on dit que le son est aigu et dans le cas où la fréquence est basse et la période élevée, on dit que le son est grave.

La fréquence correspond à l'inverse de la période : $f = \frac{1}{T}$

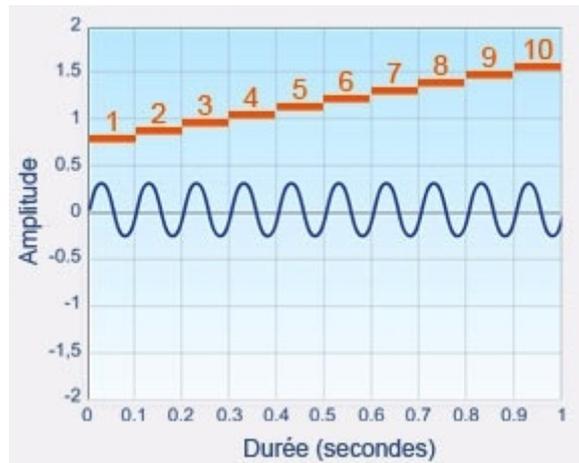


Figure 2 : Représentation d'une fréquence

Un son pur est caractérisé par une seule fréquence tandis qu'un son complexe est constitué de l'addition de plusieurs sons purs avec la particularité d'avoir un son prépondérant appelée «fréquence fondamentale» et autres sons purs appelé «harmoniques».

- Longueur d'onde :

La longueur d'onde, notée λ , se mesure en mètre, elle est une grandeur physique utilisée pour caractériser les phénomènes périodiques. On peut définir la longueur d'onde comme la plus courte distance séparant deux points de l'onde strictement identiques à un instant donné. Si la longueur d'onde est grande dans ce cas, la fréquence est faible. Dans un milieu donné, la fréquence et la longueur d'onde sont liées par la formule : $\lambda = \frac{c}{f} = c \times T$

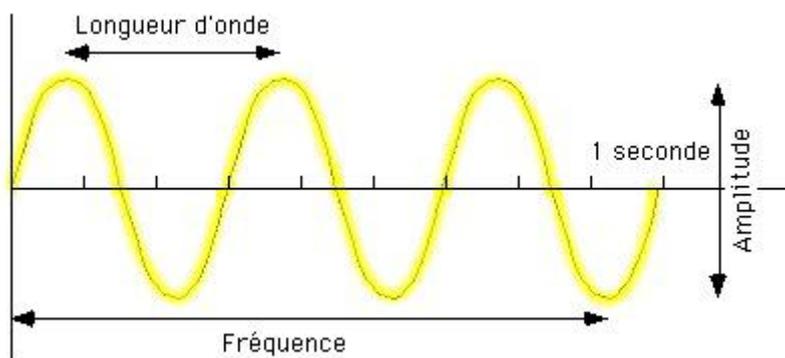


Figure 3 : Représentation d'une longueur d'onde

- Célérité du son :

La célérité notée c , c'est la vitesse de propagation d'une onde sonore dans un milieu donné. Elle se mesure en mètre par seconde. La caractéristique de la vitesse du son dépend de la température dans l'air des molécules est donné par $c = 20 \times \sqrt{T}$, avec T la température de l'air en Kelvin.

Dans l'air, à la température ambiante de 20°C et sous une pression atmosphérique, la célérité est d'environ 340 m/s équivaut à peu près à 1 km en 3 secondes.

La longueur d'onde dépendant de la célérité est donné par la formule $\lambda = \frac{c}{f}$. Si la célérité est affectée par quelconque élément extérieur, la longueur d'onde est également modifiée. Alors, la longueur d'onde d'une onde de fréquence donnée dans l'air dépend de la pression atmosphérique, de la température et de l'altitude.

1.2.3 - Différentes sortes d'ondes sonores

Suivant leur fréquence, les ondes sonores peuvent être classées en trois catégories : les ondes audibles, les infrasons et les ultrasons.

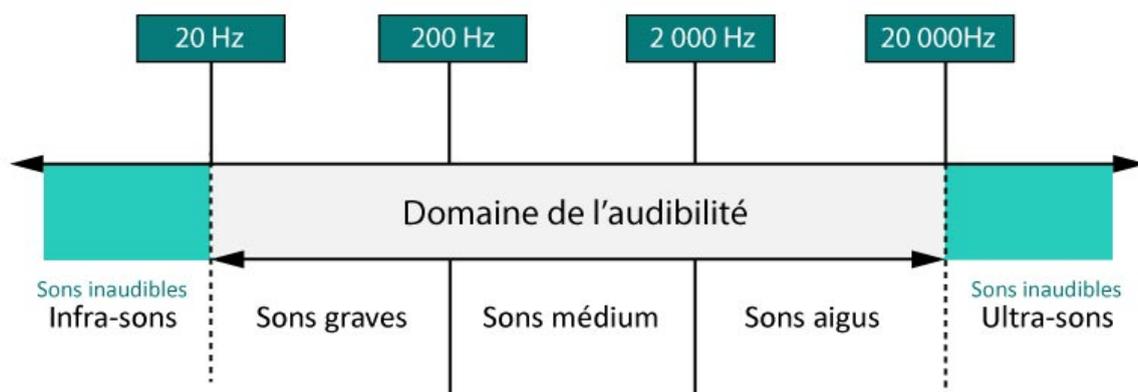


Figure 4 : Représentation d'un spectre des ondes sonores

- Ondes audibles :

Elles correspondent aux sons que le système auditif humain peut détecter. Leur fréquence est comprise entre 20 Hz et 20 000 Hz. Chaque personne possédant des capacités auditives personnelles qui peuvent changer avec l'âge, ces valeurs sont des valeurs de référence.

Les jeunes perçoivent souvent mieux les fréquences dites «hautes» (qui sont proches de 20 000 Hz) que les adultes, dont l'audition s'effrite généralement. La fréquence d'une onde sonore est également liée à la «hauteur » du son perçu : quand la fréquence est faible il semble plus grave et, à l'inverse, quand la fréquence est élevée il semble plus aigu.

Les sons audibles ont une période comprise entre $5,0 \cdot 10^{-5}$ s et $5,0 \cdot 10^{-2}$ s. Les sons audibles sont dans l'air, à une température de 20°C et sous une pression d'une atmosphère, une longueur d'onde comprise entre 17 cm et 17 m.

- Ultrasons :

La fréquence des ultrasons est trop élevée pour que les humains puissent les détecter.

Leur fréquence est donc supérieure à 20 000 Hz. Des espèces peuvent cependant percevoir ces sons comme les chats, les chiens, les dauphins ou les chauve-souris.

- Infrasons :

La fréquence des infrasons est quant à elle trop faible pour que les humains les perçoivent. Leur fréquence est donc inférieure à 20 Hz. Les baleines, les girafes et les éléphants sont cependant capables de les entendre (ou d'en entendre une partie).

1.3 - Milieux d'application

La propagation d'une onde sonore est différente selon les milieux et cette différence est liée à ses propriétés physiques. La vitesse de propagation d'une onde dépend donc de la compressibilité et de

la masse volumique du milieu. Ces deux caractéristiques sont influencées par la température, la pression et le changement du milieu.

1.3.1 - Dans l'air

Dans l'air, la célérité du son est de 340 m/s. Plus la température augmente, plus la vitesse de propagation augmente. Cette propagation s'accompagne d'une variation de pression et de masse volumique se propageant de proche en proche. Plus surpression acoustique c'est-à-dire la variation de la pression par rapport à l'état d'équilibre est grande plus le volume sonore est élevé.

En effet, plus la température augmente, plus la masse volumique diminue car pour une masse donnée, l'air est plus volumineux.

Pour une température donnée, la pression à laquelle est soumise l'air modifie sa masse volumique. Moins la pression est forte, moins la masse volumique est importante car l'air se dilate.

1.3.2 - Dans l'eau

Dans un milieu tel que l'eau, à une température ambiante de 20°C, une onde sonore se propage à 1500 m/s. En effet, même si ces matériaux ont une masse volumique plus importante que l'air, leur coefficient de compressibilité est très faible. Ainsi, l'onde sonore s'y propage rapidement.

Remarque : dans le vide, aucune onde sonore ne se propage (car le milieu doit être constitué de matière), à l'inverse des ondes électromagnétiques qui peuvent s'y propager [42].

En guise de conclusion, une onde sonore ne peut se propager que dans un milieu matériel comme du gaz, un solide ou un liquide car c'est une onde mécanique dite périodique qui propage une surpression (augmentation de la pression "normale") dans le milieu. Elle ne peut donc pas se propager dans le vide.

2- Principe des capteurs ultrasonores

2.1 - Principe de fonctionnement

Les capteurs à ultrasons se composent généralement de plusieurs différentes parties. Dans un premier temps, un diaphragme fin et souple en contact avec le milieu extérieur, fabriqué dans un matériau facilement déformable. Ensuite un élément piézoélectrique cristallin qui est placé derrière le diaphragme et enfin d'une base fixe sur laquelle s'appuie le composant piézoélectrique.

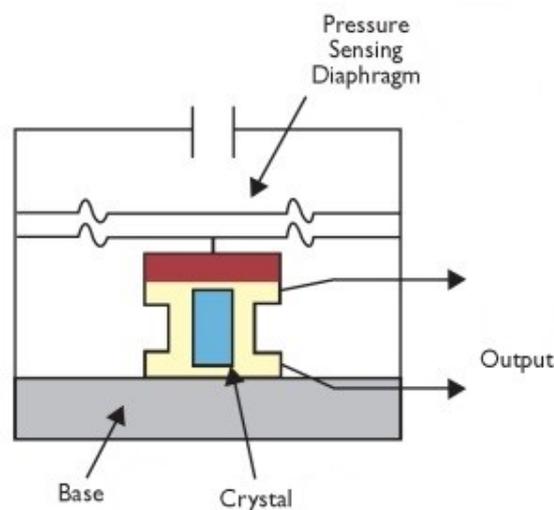


Figure 5 : Composition du Capteur

Lors de la détection d'un signal ultrasonore, l'onde sonore fait vibrer le diaphragme qui transmet donc une action mécanique à l'élément piézoélectrique du capteur en appuyant sur le cristal. Cette action mécanique produit une tension aux bornes de l'élément piézoélectrique qui peut être traduite, après avoir été amplifiée avec un montage à base d'un amplificateur opérationnel, par la détection d'une onde ultrasonore par un ordinateur.



Figure 7 : Exemple de capteur

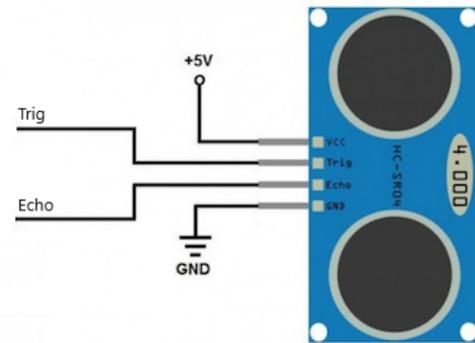


Figure 6 : Capteur Arduino

Les capteurs ultrason se présentent en général sous ces formes, celle de droite est en réalité une combinaison de deux capteurs car souvent utilisés pour des mesure de distance. Il y a alors quatres bornes : deux pour l'alimentation du capteur avec la borne positive et la masse et deux, une pour chaque capteur, bornes pour transmettre l'information. Ces deux dernières bornes sont utilisées pour recevoir une tension de la part d'un des deux capteurs quand il détecte une ultrason et pour transmettre une tension au capteur émetteur pour diffuser une onde ultrasonique.

Il est nécessaire d'alimenter le capteur ultrasonore car il contient, comme évoqué auparavant, un montage amplificateur à base d'un amplificateur opérationnel qui a besoin d'être alimenté électriquement. De plus, il est nécessaire d'avoir une tension de référence pour effectuer la mesure.

2.2 - Piézoélectricité

L'effet piézoélectrique, découvert en 1880 par les frères Curie, résulte d'un déplacement des charges internes dans la structure cristalline du matériau piézoélectrique, on parle alors de cristal piézoélectrique.

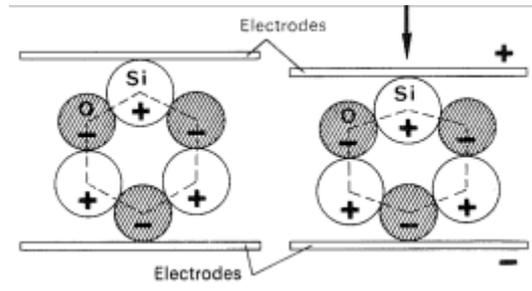


Figure 8 : Principe de la Piézoélectricité¹

Lorsqu'une pression est exercée sur le cristal, ce dernier se déforme et les barycentres des charges positives et négatives du cristal ne sont plus confondus. Le cristal devient alors polarisé et une différence de potentiel apparaît entre les électrodes placées à ses extrémités.

Pour les applications acoustiques, et donc pour les ultrasons, l'effet piézoélectrique est souvent utilisé sous forme d'une bilame piézoélectrique.

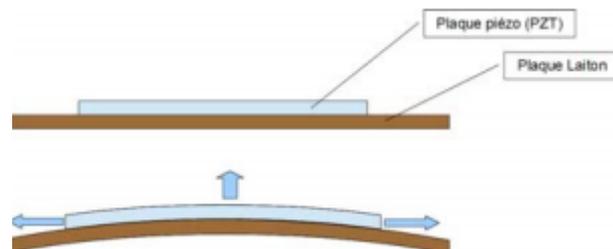


Figure 9 : Bilame Piézoélectrique²

La plaque piézoélectrique en cristal de quartz est collée à une lame en métal.

Lorsqu'une tension électrique est appliquée sur la plaque piézoélectrique, cette dernière s'allonge et provoque donc une flexion de la plaque de métal. L'avantage de ce dispositif est de permettre un mouvement incident ou résultant qui est transverse au sens d'élongation de la plaque piézoélectrique.

¹[4]

²[4]

Le phénomène inverse est aussi observable. C'est à dire qu'une oscillation mécanique qui fait vibrer la plaque de métal transversalement induira une oscillation de la tension au borne de la plaque piézoélectrique.

Ce montage est utilisé par exemple dans les capteurs piézo pour les tables d'harmonie de guitare [24].

2.3 - Matériaux piézoélectriques

Il existe une multitude de matériaux piézoélectriques. Il y en a d'origine naturelle comme les cristaux tourmaline et de quartz, qui sont utilisés dans l'horlogerie, mais dans l'industrie et les capteurs, les matériaux les plus utilisés sont des céramiques. Douces ou dures les plus courantes sont des alliages de titane notamment le PZT, un alliage de plomb de zirconium et de titane. Les matériaux synthétiques ont l'avantage d'avoir des coefficients piézoélectriques bien supérieurs au cristaux naturels [37].

matériau	exemple	coefficient piézoélectrique
oxydes ferroélectrique	titano-zirconate de plomb (PZT)	140
oxydes non ferroélectrique	quartz	2.3
semi-conducteurs	ZnO	
Polymères	PVDF	251
Sels	sulfate de triglycine	

2.4 - Zones de détection

Un inconvénient des capteurs à ultrasons est l'existence d'une zone aveugle juste devant le capteur. Cette zone résulte du fait que la distance parcourue par l'impulsion par le faisceau n'est pas assez

grande pour que le capteur aie le temps de passer en mode réception du signal avant que l'onde ne revienne sur le capteur, ou simplement que le temps de parcours de l'onde sonore est trop faible pour être mesurable. Ces zones dépendent de la précision, de la distance de mesure du capteur et de sa puissance.

Sur le schéma ci-dessous, la zone morte correspond à l'espace vide entre le capteur et le début de la zone indiquée en rouge.

Ensuite, on peut définir deux zones supplémentaires pour les capteurs à ultrason : la zone de travail typique et la zone de travail maximale [29].

- La zone de travail typique, représentée en rouge sur le schéma, est définie par la zone dans laquelle le capteur peut détecter un objet fin tel qu' une barre de métal. A savoir que ce type de capteur à plus de mal à détecter les objets fins car il réfléchissent une plus petite partie de l'onde émise par le capteur.
- La zone de travail maximale, représentée en bleu, est la région de l'espace dans laquelle le capteur est au maximum de ses capacités de détection. Il s'agit de la zone ou il ne peut détecter qu'une plaque de métal, c'est-à-dire un objet large, réfléchissant une plus grande partie de l'impulsion émise par le capteur.

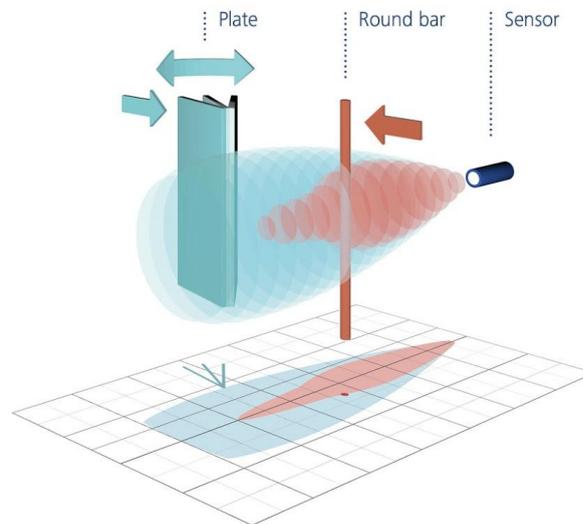


Figure 10 : Zones de détection³

Il est aussi nécessaire, pour effectuer une mesure précise et utiliser les capteurs ultrasons au maximum de leurs capacités, d'orienter les objets à détecter correctement par rapport au capteur. En effet pour être détecté au mieux, il faut orienter un objet plane de manière à ce qu'il soit perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde, ou parallèle au front d'onde.

Enfin, lors de l'utilisation de plusieurs capteurs pour une mesure de dimension d'un objet par exemple, il est nécessaire de synchroniser l'émission et la réception du signal des capteurs pour éviter les interférences entre les capteurs et accéder à une mesure fiable.

2.5 - Gamme de fréquence et fréquences de mesure

Les ultrasons, par définition, ont une fréquence comprise entre 16 kHz et 10 MHz. Cependant quand on recherche des capteurs ultrason dans le commerce, les capteurs utilisés couramment et les moins chers ont une fréquence de mesure aux alentours de 40 kHz, mais quand on monte dans les prix et dans les gammes de précision des capteurs, la fréquence peut s'avérer être plus grande, on

³ [29]

peut ainsi trouver des capteurs dans le commerce qui mesurent à 120 kHz ou à 400kHz, ils restent cependant beaucoup plus cher.

2.6 - Isolation acoustique et phonique

Dans une optique d'augmenter la précision de la mesure obtenue par une expérience contenant des capteurs ultrasons, on peut vouloir isoler des sons extérieurs parasites qui pourraient faire aboutir à une mesure imprécise voire incorrecte. Pour cela, on utilise des matériaux qui ont des propriétés d'isolation sonore. On distingue alors l'isolation phonique de l'isolation acoustique : l'isolation phonique cherche à réduire les bruits de voix tandis que l'isolation acoustique s'efforce de réduire les bruits de manière plus générale. De manière générale, plus un matériau est dense, plus il est isolant acoustique de part la loi de masse [22]. Il existe cependant une multitude de matériaux isolants acoustique ou phonique, tous présentant une performance et des propriétés physiques différentes. Il convient de trouver le matériau le plus adéquat pour chaque application.

Si notre souhait est de réaliser une mesure expérimentale très précise, il peut s'avérer déterminant de pousser l'isolation sonore au maximum et de réaliser l'expérience dans une chambre anéchoïque. Une chambre anéchoïque est une pièce isolée phoniquement et acoustiquement de toute part, il en résulte une expérience surprenante d'une pièce complètement silencieuse. Réaliser une expérience qui se veut très précise dans un tel endroit peut être un élément déterminant pour écarter toute forme de bruit parasite.

3- Applications

Après s'être familiarisé de plus près avec les ondes sonores et ultrasonores et avoir étudié le principe de fonctionnement des capteurs à ultrasons, nous allons nous intéresser dans cette dernière partie aux diverses applications et utilisations des ultrasons dans la vie quotidienne et dans le domaine scientifique. Pour cela, nous nous intéresserons particulièrement au repérage d'obstacles à travers les sonars militaires et le dispositif d'aide au stationnement, au domaine médical avec le développement de l'échographie et au domaine industriel.

3.1- Dans la vie quotidienne

De nos jours, on retrouve les ultrasons un peu partout dans notre vie quotidienne. Depuis les années 1915, c'est-à-dire pendant la Première Guerre mondiale, les ultrasons sont utilisés par les marines de guerre non seulement pour détecter les bateaux et sous-marins ennemis mais également pour provoquer des lésions chez les soldats opposants. En effet, une trop longue exposition aux ultrasons peut provoquer des pertes d'audition temporaires ou permanentes, et des lésions au niveau des poumons.

3.1.1 - Repérage d'obstacles

[7] Dans un premier temps, nous allons étudier en détails le principe de fonctionnement du repérage d'obstacles par ultrason. Le repérage d'obstacles par ultrason est aujourd'hui un procédé qui est beaucoup utilisé dans la vie quotidienne. Par exemple, nous le retrouvons pour les détecteurs de présence dans les immeubles, l'aide au stationnement pour les véhicules ou encore la mesure de la profondeur de l'océan.

En premier lieu, il faut disposer d'un émetteur et d'un récepteur d'ultrasons. Aujourd'hui, de nombreux dispositifs existent et remplissent les deux fonctions. Nous pouvons par exemple faire

référence aux capteurs à ultrasons dont les caractéristiques ont été détaillées dans la Partie II. Cependant, il est également possible d'utiliser deux appareils différents mais cela pourrait être moins intéressant d'un point de vue pratique.

L'émetteur et le récepteur d'ultrasons sont placés dans l'idéal l'un à côté de l'autre. Bien évidemment, si on utilise un appareil qui fonctionne comme émetteur et récepteur, il sera placé à un seul endroit. On commence par déclencher l'émetteur pour qu'il produise des ultrasons puis on attend que ces derniers rencontrent l'obstacle. Une fois qu'ils atteignent l'obstacle, les ultrasons sont réfléchis et émettent un écho dans le sens inverse. Le récepteur d'ultrasons reçoit alors l'ultrason réfléchi, et on relève la durée entre l'émission de l'onde et sa réception.

Pour plus de précision et minimiser les facteurs d'erreurs, il est souvent conseillé de brancher l'émetteur et le récepteur à un logiciel d'acquisition et de traitement du signal. Ainsi, on peut repérer exactement le moment où l'onde a été émis et le moment où il est reçu.

Comme on connaît la vitesse de déplacement de l'ultrason (vu dans la Partie I), la distance entre l'émetteur et l'obstacle est donnée par la formule :

$$d = \frac{v \times t}{2}$$

avec d : distance entre l'émetteur et l'obstacle

v : vitesse de déplacement de l'ultrason (dépend du milieu) en m.s^{-1}

t : durée observée en s

Remarque : dans la formule, nous divisons par 2 car l'ultrason fait un aller-retour, donc 2 fois le trajet entre l'émetteur et l'obstacle.

Nous allons dans la suite de cette partie faire deux études de cas d'application du repérage d'obstacles dans la vie quotidienne.

3.1.2 - Étude de cas 1 : les sonars marins

[8] Un sondeur plus communément appelé sonar, qui signifie sound navigation and ranging en anglais, est un appareil de détection par ultrasons permettant de repérer des objets sous-marins [9]. Au cours de la Première Guerre mondiale, les sonars sont utilisés par les marines de guerre pour détecter les sous-marins des opposants et ainsi prévenir d'éventuelles attaques. De nos jours, il permet aux marins de naviguer correctement, en mesurant la profondeur de l'océan pour éviter de se heurter au fond, ou également de détecter les obstacles (icebergs, rochers) et les autres navires en mer.

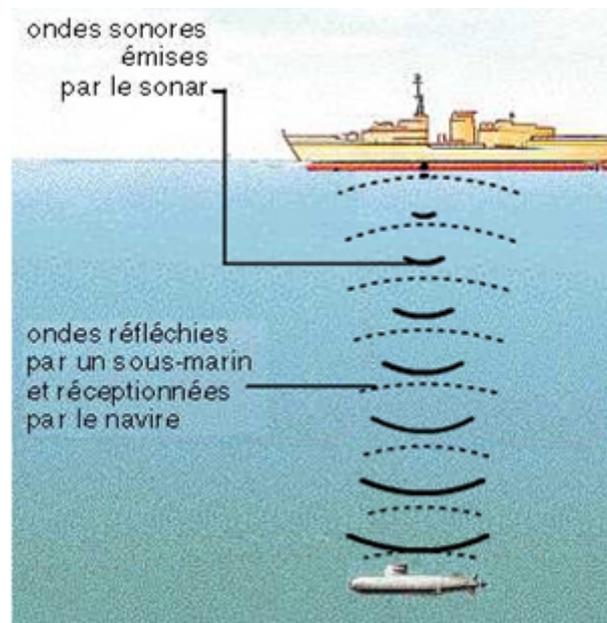


Figure 11 : Principe de fonctionnement des sonars marins

Il existe principalement deux types de sonars : les sonars actifs dont le principe est d'émettre une impulsion ultrasonore et d'écouter son écho sur les obstacles qu'elle rencontre et les sonars passifs qui ne concernent que l'écoute des sons sans en émettre. Les sonars actifs sont très utilisés dans le domaine militaire. Un sonar actif est constitué d'un émetteur d'ondes sonores et d'un récepteur capable d'identifier l'écho de l'onde émise.

Pour mieux comprendre le fonctionnement de ces appareils, nous allons considérer un navire équipé d'un sonar marin qui doit mesurer la profondeur de l'océan. En effet, pour éviter de toucher le fond de l'océan et donc ainsi prévenir un éventuel naufrage dû à un endommagement du navire, il est essentiel de rester suffisamment en hauteur et donc de connaître précisément la distance qui sépare le fond et le bateau. Ici, l'obstacle à détecter est donc le fond marin.

Nous réalisons une première mesure : le sonar émet des ultrasons et reçoit un premier signal au bout de 80 ms. Calculons la profondeur de l'eau à cet endroit.

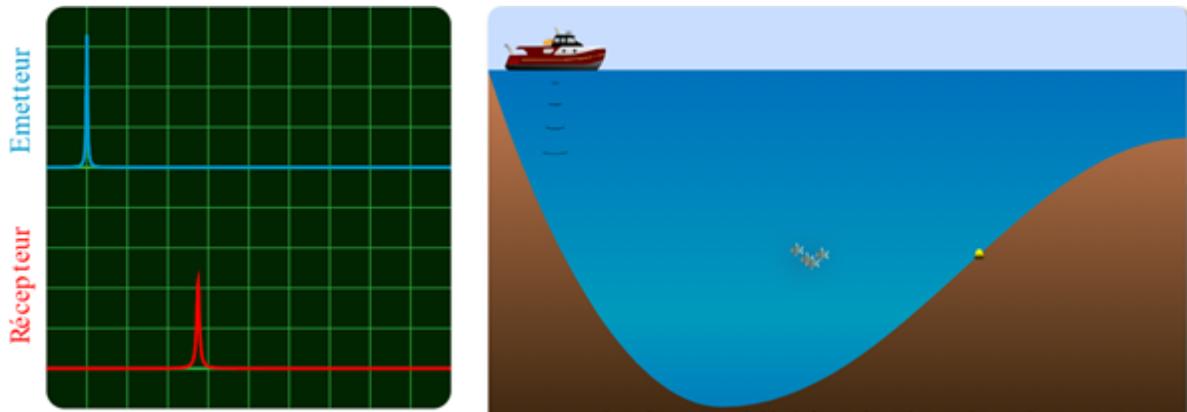


Figure 12 : Première mesure de la profondeur de l'eau

On sait que dans l'eau, la vitesse de l'ultrason est de $v = 1500 \text{ m.s}^{-1}$. Ce qui nous donne la profondeur de l'océan d'après la formule vue précédemment :

$$d = \frac{v \times t}{2} = \frac{1500 \times 0,08}{2} = 60 \text{ m}$$

La profondeur est donc de 60 m, ce qui n'est pas très profond donc constitue un risque de toucher le fond marin et d'ainsi causer un dégât sur le navire.

Après avoir parcouru une certaine distance, on refait une mesure.

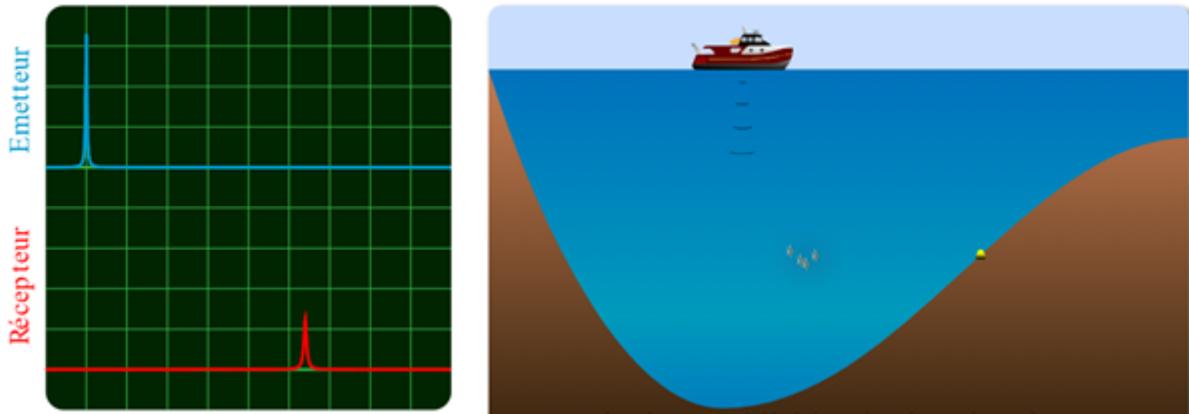


Figure 13 : Deuxième mesure de la profondeur de l'eau

Le sonar émet des ultrasons et reçoit un deuxième signal au bout de 3,5 s.

$$d = \frac{v \times t}{2} = \frac{1500 \times 3,5}{2} = 2625 \text{ m}$$

A cet endroit, la profondeur de l'eau est donc de 2625 m, ce qui laisse largement une marge pour éviter tout risque.

3.1.3 - Étude de cas 2 : le Park Distance Control

Le Park Distance Control, ou aide au stationnement en français, est un système qui assiste le conducteur lors des manœuvres de stationnement en l'avertissant de la présence d'obstacles situés à proximité immédiate du véhicule [10]. Le système fonctionne à l'aide de capteurs ultrasonores installés sur le véhicule. Plus il y a de capteurs installés, plus la mesure sera précise. En fonction de la marque du véhicule, le conducteur est alerté de la présence d'un obstacle par un signal sonore ou visuel.

Étudions les éléments qui constituent le système :

- le calculateur : il s'agit d'un élément central de l'aide au stationnement. En effet, il transforme les échos reçus par les capteurs ultrasonores en signaux électriques dans le but d'informer le

conducteur d'un problème éventuel. Dans le cas de l'aide au stationnement, le capteur détermine la distance entre l'obstacle et le véhicule. Ensuite, lorsque cette distance est inférieure à un certain seuil (160 cm pour une Golf V Plus par exemple), le capteur active l'émetteur de signal acoustique pour avertir le conducteur de la présence de l'obstacle.

- les capteurs à ultrasons : le principe de fonctionnement des capteurs à ultrasons est détaillé dans la Partie II. Le capteur à ultrasons permet l'émission des ultrasons et la réception de leurs échos lorsque celui-ci rencontre un obstacle. Il est constitué d'un élément de découplage, d'une membrane, d'un raccordement électrique et d'un boîtier. Chacun des capteurs installés sur le véhicule est relié au calculateur par un câble de données. Cependant, ils ont tous une alimentation électrique commune. Le capteur à ultrasons émet des ultrasons dès que la marche arrière est enclenchée.

- l'émetteur de signaux acoustiques : lorsque la distance entre le véhicule et l'obstacle est inférieure à un seuil défini, le calculateur active l'émetteur de signaux acoustiques qui génère un son discontinu d'une fréquence d'environ 1 kHz. Lorsque le véhicule continue de se rapprocher de l'obstacle et que la distance devient inférieure à 20 cm, le signal sonore devient continu pour alerter le conducteur.

Avant de résumer le fonctionnement de l'aide au stationnement, voici quelques caractéristiques techniques importantes à connaître sur le système en général :

Tension d'alimentation	entre 9 et 16 V
Fréquence des ultrasons	50 kHz - 60 kHz
Angle de détection	$(60 \pm 10)^\circ$
Portée	250 cm
Plage de température	entre -40°C et 85°C

Tableau 1 : Caractéristiques du système d'aide au stationnement à ultrasons

Résumons alors le principe de fonctionnement du système à l'aide de ce schéma :

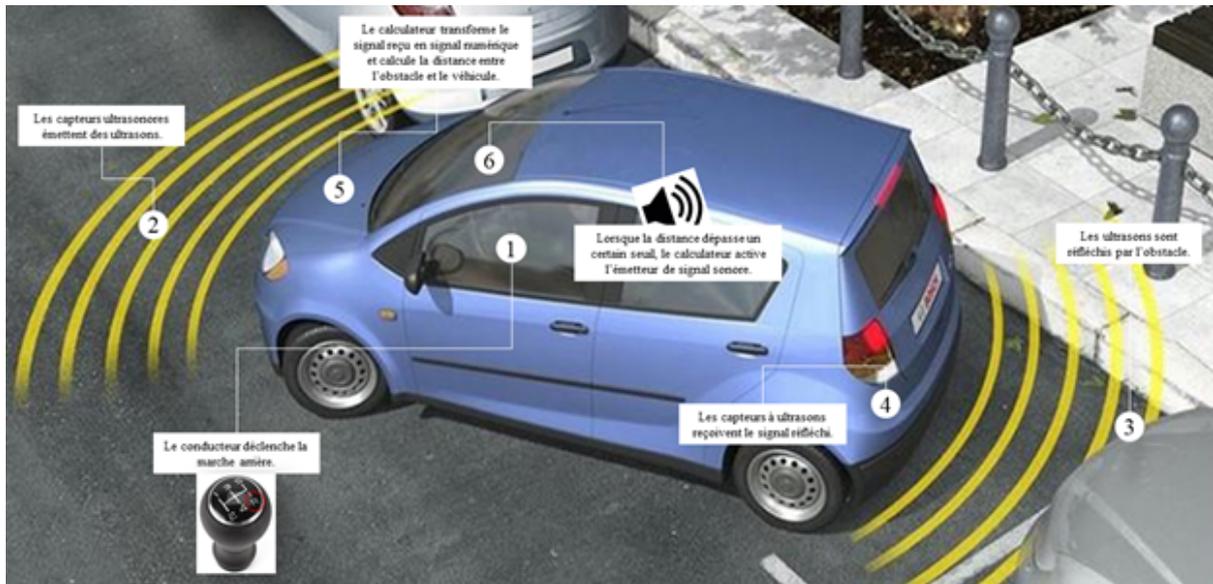


Figure 14 : Fonctionnement de l'aide au stationnement à ultrasons

3.2 - Dans le domaine scientifique

[38]

3.2.1 - Découverte et principe de l'échographie

La France est considérée comme précurseur dans l'utilisation des ultrasons, en effet, en 1880, lorsque Pierre Curie théorise la piézoélectricité permettant de créer des ultrasons à partir d'un courant électrique. Les ultrasons peuvent être utilisés dans de nombreux domaines notamment dans le domaine médical. Le développement de l'utilisation de ces derniers dans cette filière est arrivé bien plus tard, et notamment à travers l'échographie développée par les Britanniques. En effet, la première sonde échographique fut mise au point dans les années 1950 suivie de la première sonde échographique 2D au début des années 1970. Le développement de l'échographie et son utilisation dans l'évaluation du débit sanguin et de la résistance vasculaire ont été dirigés par un célèbre chercheur nommé Léandre Pourcelot, directeur de l'unité « Système nerveux du fœtus à l'enfant » à la faculté de Tours de 1988 à 2003.

Le principe de l'échographie consiste à envoyer des ondes ultra-sonores à l'intérieur du corps qui vont se propager dans les tissus. Une petite partie des ondes sont alors réfléchies par les diffuseurs

afin de nous renvoyer un écho qui est capté par la sonde échographique qui enregistre ce signal afin de l'envoyer vers une machine électronique qui, elle, est capable de présenter l'image.



Figure 15 : échographie d'un fœtus de 14 semaines⁴

Dans l'échographie classique en 2D, un balayage permet à plusieurs lignes de tir d'être émises dans différentes directions en même temps. Le traitement informatique des échos collectés permet de représenter le support traversé en fonction de son impédance, recréant ainsi une image en deux dimensions représentant un plan de coupe de la zone analysée. Les milieux à faibles impédances (échos faibles) sont représentés en noir ; ils peuvent correspondre à des liquides ou des tissus mous. Les milieux à forte impédance (fort écho) sont affichés en blanc. Lors d'examens échographiques externes, le gel est généralement utilisé pour éviter les interférences de l'air entre la sonde et la peau, car son impédance est comparable à cette dernière.

Récemment, l'échographie 3D a été développée et, comme son nom l'indique, elle permet d'acquérir des images en trois dimensions. Dans ce cas, le balayage mécanique ou électronique peut accumuler des informations obtenues à partir de différents points d'émission à différents points d'écho. Leur traitement informatique permet de créer des images 3D. L'amélioration des sondes piézoélectriques et des fonctions de calcul d'acquisition permet de envisager l'imagerie 4D, c'est-à-dire une 3D au cours du temps. De telles méthodes sont déjà utilisées dans les laboratoires de

⁴ Figure 15 : <https://www.inserm.fr/information-en-sante/dossiers-information/ultrasons-biomedicaux>

recherche, et leur développement fournira bientôt une méthode de prélèvement ultra-rapide permettant d'observer des organes ou des fœtus avec une précision inégalée.

Enfin, il existe un dernier type d'échographie appelée l'échographie Doppler. Elle est très utilisée pour l'examen non-invasif des vaisseaux sanguins. Elle repose sur le principe de l'effet Doppler : lorsqu'une source d'onde se déplace, la fréquence qu'elle émet varie selon le sens et la vitesse de direction. Un exemple marquant de l'effet Doppler est le son d'une sirène de voiture qui passe des aigus aux graves en s'approchant puis en dépassant un observateur fixe. Appliqué au flux sanguin, ce principe permet de mesurer la fréquence réfléchiée et de la comparer à la fréquence d'émission en fonction de la vitesse des globules rouges dans le vaisseau sanguin.

3.2.2 - Différentes utilisations pour soigner et traiter

[39] Dans le monde de la médecine, il existe énormément d'applications des ultrasons comme l'imagerie (échographie) permettant de réaliser des dépistages ou des diagnostics de maladies, mais aussi la thérapie puisque de nos jours, on peut désormais traiter le corps humain à distance : c'est de la chirurgie non-invasive. Les ultrasons sont aussi utilisés dans la recherche médicale puisqu'on peut les retrouver dans des petits capteurs permettant d'analyser comment se comporte le corps humain en temps réel. Ces systèmes sont dédiés à trois grands domaines de la médecine : les applications en diagnostic du cancer, les applications en cardio-vasculaire et les applications en neurosciences.

Les ultrasons présentent de nombreux avantages dans le domaine médical, puisque ce sont des ondes sans danger pour l'être humain, elles peuvent être mises en œuvre grâce à des appareils peu volumineux et peu coûteux et enfin elles nous permettent d'obtenir des images que l'on peut observer et interpréter lors d'un examen.

Par rapport à l'échographie à but diagnostique, les ultrasons thérapeutiques utilisent des ondes de plus haute intensité, qui sont continuellement délivrées à des points spécifiques du tissu. Elles vont générer de la chaleur et produire des modifications locales (bulle de gaz, nécrose, coagulation) qui

vont participer à l'effet thérapeutique recherché. Par conséquent, les ultrasons sont ainsi utilisés pour détruire des lésions bénignes ou malignes (tumeurs, calcifications, calculs...).

Voici la liste des différents types de thérapie employés à l'aide les ultrasons :

- Les ultrasons focalisés de haute intensité (HIFU) : contrairement à la radiofréquence ou à la thérapie, les HIFU permettent de répéter le traitement sans risque de limitation de dose comme avec la thérapie par ionisation, et d'atteindre des organes plus profonds sans nécessiter une incision. Cependant, certains tissus sont moins accessibles que d'autres, selon la nature de ceux qui doivent être préalablement franchis (os notamment). Actuellement, les HIFU sont principalement utilisés pour traiter certains cancers (cancer du foie, de la prostate) et des fibromes utérins. Avec l'aide de l'IRM pour surveiller les changements de température locaux, ils sont combinés avec une surveillance précise en temps réel de la destruction des tissus.
- La lithotripsie : il s'agit d'une technique basée sur l'utilisation des ultrasons pour briser les calculs rénaux ou biliaires, des ondes de choc à intervalles réguliers vont générer localement des bulles de gaz, qui vont s'accumuler à la surface du calcul (phénomène de cavitation⁵). Elles le décomposent progressivement en fragments minuscules, puis les éliminent ensuite par les voies naturelles.
- La pharmaco-émulsification : selon le même principe, elle permet de détruire le cristallin opaque dans le traitement de la cataracte. Les fragments sont ensuite retirés à l'aide d'un système d'irrigation-aspiration.

⁵ On appelle cavitation la naissance et l'oscillation radiale de bulles de gaz ou de vapeur dans un liquide soumis à une dépression. Wikipédia : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Cavitation>

Voici un schéma résumant l'utilisation thérapeutiques des ultrasons :



Figure 16 : Utilisation thérapeutique des ultrasons⁶

3.2.3 - Enjeux de la recherche dans le domaine des ultrasons

L'avancée technologique dans le milieu des ondes a permis l'obtention d'images de plus en plus précises et plus qualitatives pour le cas de l'imagerie. Ces progrès permettent aussi de se tourner vers de nouvelles applications pour les diagnostics. En effet, les innovations se sont d'abord concentrées sur la rapidité d'acquisition et de traitement de l'information et grâce à un nouveau principe de transmission des ondes ultrasonores, les images peuvent être acquises à un rythme bien plus élevé qu'avant (de 50 à 10 000 images par seconde). C'est l'imagerie ultrasonore ultrarapide. Elle permet non seulement d'obtenir les informations habituelles de l'échographie, mais aussi d'apporter d'autres informations comme la dureté des tissus par exemple.

Cette méthode, appelée élastographie, peut déjà améliorer le diagnostic ou l'évaluation des maladies du foie ou de la thyroïde de manière non-invasive. En effet, en raison des progrès technologiques réguliers, la place des ultrasons dans l'imagerie est constamment redéfinie. Par conséquent, ces méthodes sont en cours d'évaluation dans de nouveaux domaines, tels que l'évaluation de la rigidité des tumeurs à visée pronostique.

⁶ Figure 16 : <https://www.inserm.fr/information-en-sante/dossiers-information/ultrasons-biomedicaux>

La raideur du tissu cardiaque constitue un autre domaine de recherche : la rigidité cardiaque est un paramètre jusqu'à présent inaccessible par d'autres techniques d'évaluation. Cependant, sa mesure permettrait de diagnostiquer l'insuffisance cardiaque chez près de la moitié des personnes touchées.

Pour ne pas trop complexifier notre étude, voici un schéma proposant de nouvelles applications pour les diagnostics.

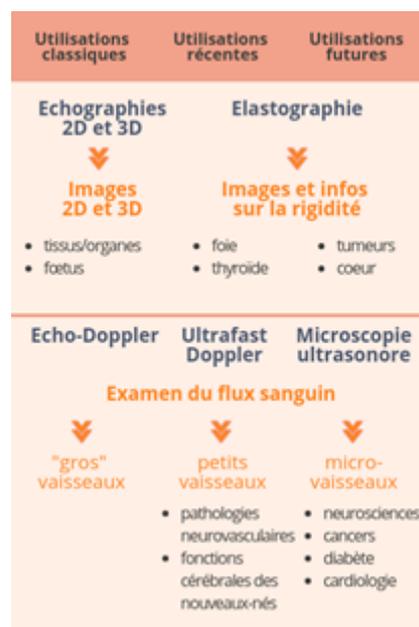


Figure 17 : Futures Utilisations diagnostiques des ultrasons⁷

Le progrès technologique permet également de se diriger vers de nouveaux moyens de traitement. En effet, plusieurs approches thérapeutiques sont en développement mettant en œuvre l'utilisation de différents types d'ondes ultrasonores.

Dans le domaine de la psychiatrie, les ondes dont la puissance est à un niveau intermédiaire en imagerie et en traitement peuvent être utilisées pour la neuromodulation par ultrasons, en alternative à la stimulation magnétique transcrânienne (TMS) aujourd'hui utilisé pour le traitement de la dépression résistante aux médicaments. De plus, tout comme les traitements qui

⁷ Figure 17 : <https://www.inserm.fr/information-en-sante/dossiers-information/ultrasons-biomedicaux>

ont été réalisés avec la lithotripsie des calculs rénaux, l'association des ultrasons diagnostique et thérapeutiques à travers le même appareil est une méthode en cours de développement afin d'observer et de traiter les pathologies des valves cardiaques et les sténoses aortiques liées à leur calcification. Cette méthode permet de localiser les zones calcifiées et d'appliquer simultanément des ondes de choc permettant leur destruction. Elle pourrait devenir une alternative non-invasive simple à la chirurgie traditionnelle, délicate à mettre en œuvre chez des personnes plus fragiles. Enfin, il existe une dernière méthode encore en cours de développement : la Sonoporation. Il s'agit d'une nouvelle approche thérapeutique utilisant indirectement les ultrasons. En effet, des microgouttelettes transportant un médicament encapsulé sont administrés dans la circulation sanguine. Une fois, le tissu ciblé atteint par le produit, le phénomène de cavitation lié aux bulles de gaz créées par les ultrasons est utilisé pour déclencher la libération du médicament. Cette méthode pourrait être très utile notamment dans le domaine du traitement du cancer, où l'objectif est de limiter la toxicité associée au traitement sur les cellules saines, tout en optimisant son efficacité au niveau de la tumeur.

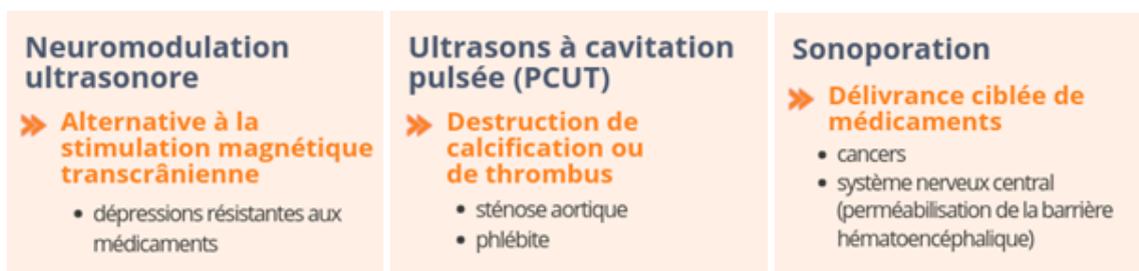


Figure 18 : Futures utilisations thérapeutiques des ultrasons.⁸

3.3 - Applications industrielles et commerciales

[47]

3.3.1- Introduction à leur utilisation

Les ultrasons ont de nombreuses applications dans l'industrie, le commerce, le secteur militaire et à la maison. Il existe suffisamment d'indices sur la nocivité de la surexposition aux ultrasons afin de justifier la prudence lors de leur utilisation. Les principes et les normes de limites d'exposition que je

⁸ Figure 18 : <https://www.inserm.fr/information-en-sante/dossiers-information/ultrasons-biomedicaux>

vais vous présenter ici sont conçus pour garantir une utilisation sûre des ultrasons dans l'industrie et le commerce. Le domaine est vaste : il existe de nombreuses applications des ultrasons et les techniques de production sont très diverses. Les effets physiques et biophysiques des ultrasons de haute puissance dépendent généralement des phénomènes complexes suivants provoqués par les vibrations des matériaux :

- Cavitation et production de micro-courant dans les liquides
- Instabilité superficielle aux interfaces liquide-liquide et liquide-gaz
- Réchauffement et production de fatigue dans les solides
- Réchauffement des milieux liquides

Dans les applications industrielles d'ultrasons à haute puissance, les objets ou les pièces doivent être exposés à une énergie de vibration suffisante pour obtenir des changements physiques permanents. Le principal danger pour l'utilisateur est une exposition accidentelle avec les ultrasons. Cependant, de nombreuses applications génèrent des niveaux de pression acoustique élevés dans l'air, dans la gamme de fréquences audibles et ultrasonores. Dans ce cas, il existe également un risque d'effets indésirables sur l'audition associé à la surexposition à ces ultrasons.

Voici un tableau récapitulatif des applications industrielles des ultrasons de puissance élevée :

Applications	Description	Fréquence (kHz)	Intensité (W/cm ²)
Nettoyage et dégraissage	Cavitation d'une solution pour nettoyer les pièces immergées	20-50	Environ 1-6 W/cm ²
Soudage et brasage	Déplacement d'une pellicule oxydée pour réaliser la soudure sans flux	Non renseigné	1-50 W/cm ²

Soudage des plastiques	Soudage des plastiques mous ou rigides	Environ 20	Environ 100 W/cm ² à la soudure (700W)
Soudage des métaux	Soudage des métaux semblables et non semblables	10-60	Environ 2000 W/cm ²
Usinage	Tournage, broyage des surfaces à l'aide de boues abrasives, perçage à l'aide d'une action vibratoire	En générale 20	Non renseigné
Extraction	Extraction d'essence, jus et produits chimiques de fleur, fruit et plantes	Environ 20	Environ 500W/cm ²

De nombreuses applications commerciales directes d'ultrasons aéroportés, telles que les dispositifs d'alarme antivol, les ouvres-portes automatiques et mise au point automatique en photographie, produisent également dans certains cas des niveaux de pressions acoustique relativement élevés dans la gamme de fréquences ultrasonores. De même, il existe un risque d'effet indésirable sur l'audition.

3.3.2- Effets sur la santé et principe de sécurité

On distingue 2 types d'exposition aux ultrasons : l'exposition par contact et l'exposition indirecte par des ultrasons transmis dans l'air.

Il y a une exposition par contact lorsqu'il n'y a pas de couche d'air entre le transducteur et le tissu. Cette exposition peut avoir lieu par contact direct ou par couplage liquide ou solide. Dans certains cas, une fois exposé, le transfert d'énergie du transducteur au tissu peut atteindre 100 %. En

revanche, l'existence d'une couche d'air peut réduire la transmission d'énergie ultrasonore, dont l'ordre de grandeur est une puissance de 10. Par exemple, si une personne plonge un doigt dans un bain d'humidificateur à ultrasons, l'énergie transférée à l'os lors d'une exposition directe est d'environ 65 % de l'énergie rayonné, en revanche, si une personne tient son doigt juste au-dessus de l'eau, l'énergie ultrasonore transmise au doigt sera réduite d'un million de fois.

Les appareils tels que les humidificateurs à ultrasons peuvent fonctionner à une fréquence de plusieurs mégahertz, ce qui peut endommager les tissus si et seulement s'il y a une exposition par contact. Certains incidents ont été signalés, et il est bien connu que lorsque l'humidificateur à ultrasons fonctionne à pleine puissance, le contact des doigts avec le faisceau ultrasonore peut provoquer une douleur intense en quelques secondes, qui peut être causée par une surchauffe des os. Aux fréquences inférieures aux MHz, les ultrasons à haute puissance constituent également un danger. Par exemple, des ondes ultrasonores de haute puissance sont utilisées dans les équipements de nettoyage et les désintégrateurs de cellules à ultrasons en raison de leurs effets destructeurs sévères.

Les équipements à ultrasons industriels doivent être conçus de manière à ce que les personnes qui utilisent de tels équipements ne soient pas exposées à des transducteurs qui émettent des faisceaux ultrasonores de haute puissance (ou haute intensité) directement ou par couplage liquide ou solide. Cependant, un contact direct suite à un accident ou à une négligence est toujours possible. Par conséquent, il est important de prendre toutes les précautions nécessaires pour éviter une exposition accidentelle.

Depuis 1976, un certain nombre de mesures des risques du rayonnement ultrasonore transmis dans l'air produit par des appareils commerciaux a été réalisé par le Bureau de la radioprotection et des instruments médicaux (BRPIM) au Canada et par le Center for Devices and Radiological Health (CDRH) de la Food and Drug Administration (FDA) aux États-Unis. Dans l'ensemble, l'exposition aux rayonnements des équipements à ultrasons industriels dépasse rarement 120 dB. L'exposition à des équipements commerciaux conçus pour émettre des ondes ultrasonores dépasse rarement 110 dB. Ces équipements peuvent émettre accidentellement des ondes ultrasonores, tels

que les terminaux à écran qui produisent des niveaux de pression acoustique inférieur à 70 dB sur les oreilles de l'opérateur.

Les appareils ultrasonores industriels produisent également un son audible. Lors de l'évaluation des dangers des équipements à ultrasons industriels, ces expositions à des fréquences audibles ne doivent pas être ignorées. Il existe des preuves suffisantes dans les études réalisées pour montrer que les fréquences audibles sont beaucoup plus dangereuses que les fréquences ultrasonores à des niveaux de pression acoustique équivalente.

L'exposition par contact à des ultrasons de puissance élevée doit être évitée à tout prix, c'est pourquoi certaines mesures sont recommandées, comme par exemple :

- Seuls les opérateurs habilités à utiliser du matériel à ultrasons de puissance élevée peuvent se trouver à l'intérieur de l'enceinte réservée aux matériaux pendant son fonctionnement.
- Le personnel utilisant ces appareils doit connaître les effets néfastes possibles ainsi que les mesures de protection nécessaires.
- Enfin, la mise en place de panneaux de mise en garde contre le rayonnement ultrasonore comme ci-dessous.



Figure 19 : panneau de mise en garde contre le rayonnement ultrasonore.⁹

⁹ Figure 19 :

<https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/sante-environnement-milieu-travail/rapports-publications/radiation/principes-utilisation-ultrasons-partie-applications-industrielles-commerciales-code-securite-24.html>

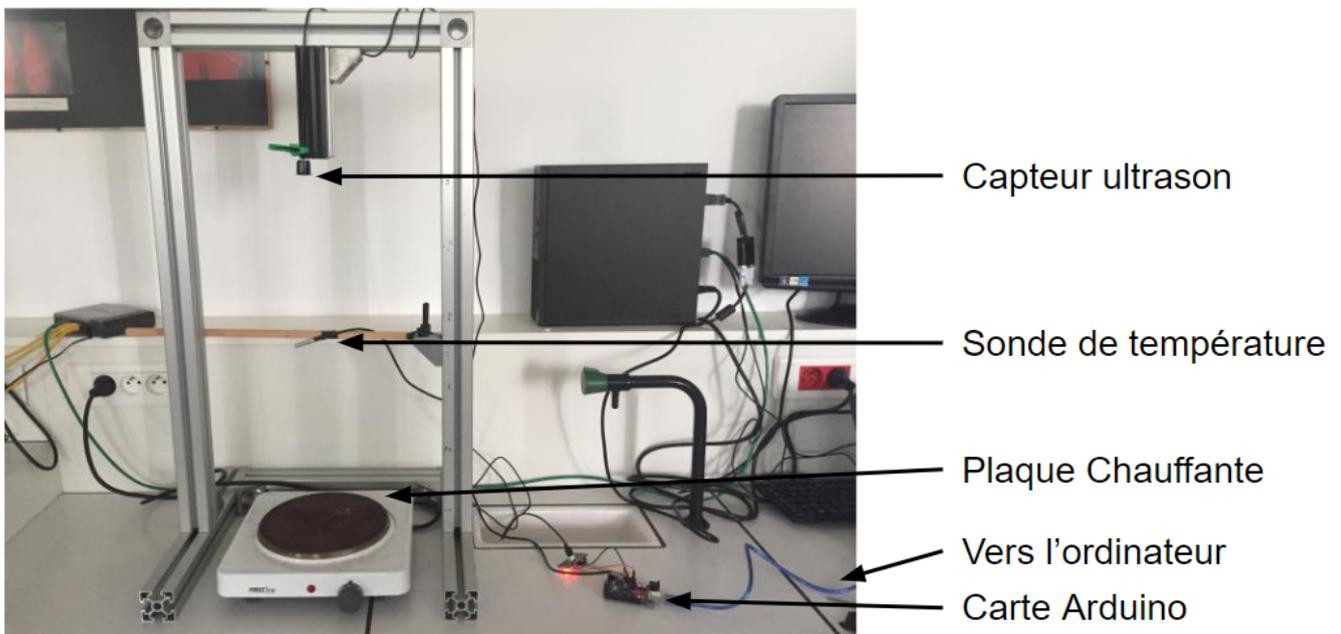
4- Partie expérimentale

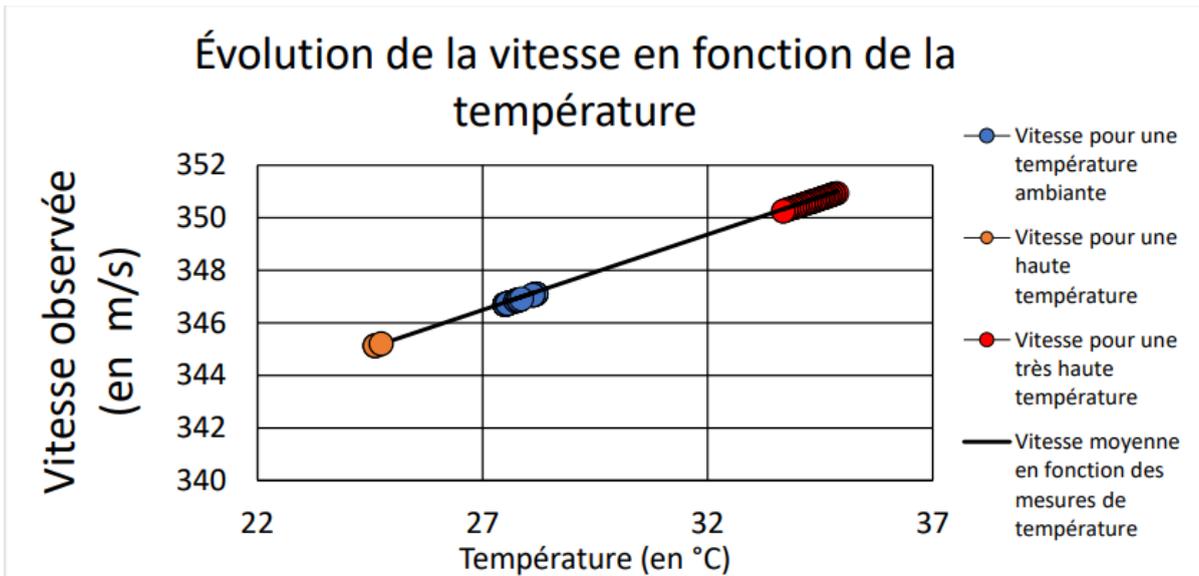
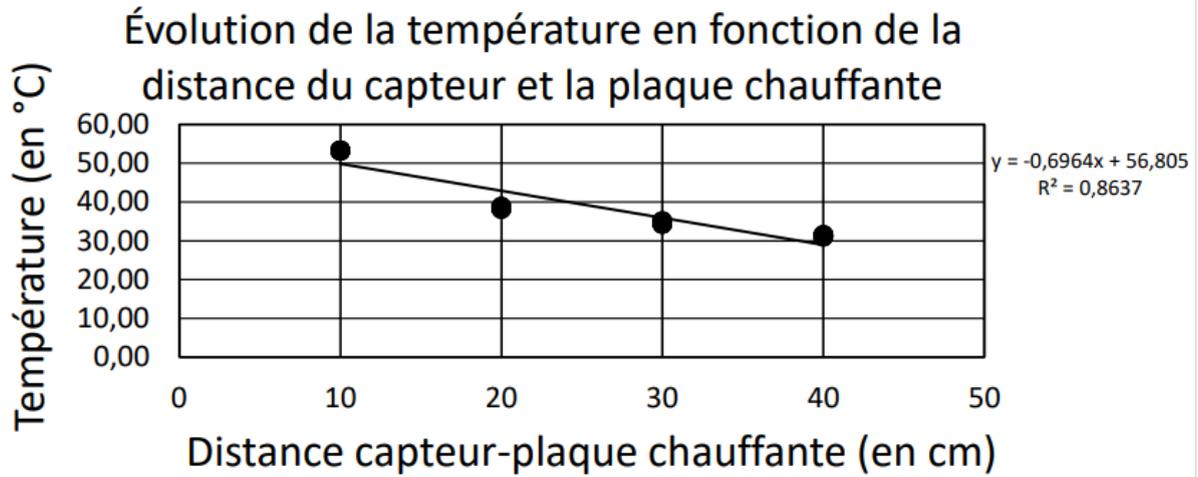
Objectif : mesurer la vitesse du son et voir l'influence de la température sur celle-ci.

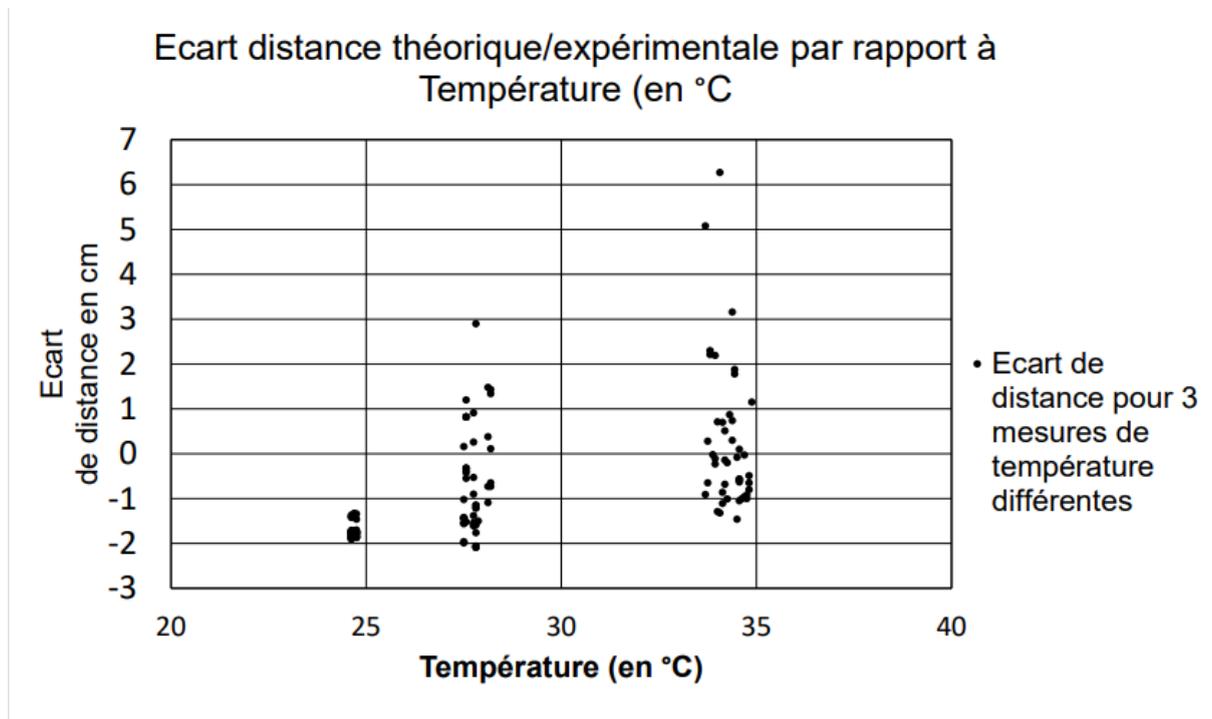
Matériel :

- Capteurs ultrason JSN-SR04T-2.0
- Carte Arduino Uno + bibliothèques arduino utilisées pour le programme : One Wire - Dallas temperature + un ordinateur pour l'acquisition des données
- Capteurs de température DS18B20 et sa résistance nécessaire au bon fonctionnement
- Plaque chauffante
- Potence permettant une hauteur de la sonde de température réglable

Montage expérimental :







Observations :

- Nous avons observé que plus la température était importante, plus la vitesse du son était importante.
- On observe que plus on s'éloigne de la plaque chauffante, plus la température diminue. En traçant l'évolution de la température en fonction de la distance à la plaque, nous constatons que les points obtenus ne peuvent pas être approximés comme une courbe linéaire. Le coefficient de corrélation avec une droite est trop faible.
- On s'aperçoit que avec le troisième graphe, que plus la température augmente, moins les mesures sont précises. Les points se dispersent avec l'augmentation de la température.

Analyse :

- La vitesse évolue dans le même sens que la température.
- Pour le gradient de température, nous nous attendions à ce que la courbe obtenue ne soit pas linéaire. En effet, nous avons réalisé l'expérience en laboratoire, c'est-à-dire dans une assez grande superficie avec des mouvements d'air, ce qui a eu comme conséquence une dispersion et une perte de chaleur.

- On se rend compte de l'importance du phénomène de convection avec le troisième graphique. En effet, quand la température augmente, le gradient de température entre l'air chauffé au-dessus de la plaque et l'air ambiant augmente aussi augmentant les échanges convectifs de chaleur. Ceci explique la dispersion des mesures lors de l'augmentation de la température. A moindre intensité, les effets de la chaleur sur les composants électroniques peuvent aussi causer des mesures moins précises.
- On remarque aussi que même à température ambiante quand les mesures sont précises, il existe un décalage entre la mesure par ultrason et la distance théorique mesurée manuellement. Cela vient des imprécisions de mesure lors de la mise en place de la distance entre le capteur et la plaque chauffante, il peut être aussi nécessaire d'étalonner le capteur ultrason.

Conclusion : La vitesse du son dépend de facteurs extérieurs comme la température. Cette dépendance que nous avons donc mesurée expérimentalement correspond à la formule théorique, en effet nos points expérimentaux sont proches de la courbe théorique.

Conclusion

En définitive, après avoir étudié le contexte historique, nous avons pu comprendre comment fonctionnaient les ondes sonores qui nous entouraient ainsi que découvrir leurs différents domaines d'applications. Nous avons d'abord défini les ondes sonores puis nous avons vu ce qui les caractérise. Nous avons également pu comprendre qu'il existait différents types d'ondes sonores : les ondes audibles, les ultrasons et les infrasons. Chacune de ces ondes a des comportements différents selon le milieu où elle se trouve : dans l'eau, dans l'air ou dans le vide par exemple.

Par la suite, nous avons pu étudier le fonctionnement des capteurs ultrason en mettant un phénomène physique en avant : la piézoélectricité. Puis, les notions telles que les zones de détection et les gammes de fréquence des ultrasons ont pu être abordées avant de voir les différents moyens d'isolation acoustique et phonique. Enfin, nous avons pu découvrir les différentes applications liées aux ultrasons dans notre vie quotidienne et dans le milieu scientifique et industriel.

Ce projet nous a permis d'acquérir des connaissances sur le fonctionnement global des ondes sonores ainsi que les différents risques associés à leur milieu de propagation. Nous avons été amenés à rechercher des informations via différents moyens tels que des revues scientifiques, des thèses ou des ouvrages afin d'en faire une synthèse avant de pouvoir mettre nos recherches en commun afin de rédiger notre rapport. Ce projet, nous a donc permis de renforcer notre travail collectif ainsi que d'acquérir une solide base de connaissances scientifique sur le sujet étudié. Ce projet nous a également permis de nous familiariser avec le domaine de l'instrumentation.

Perspectives

Ce projet, quoique très complet et très instructif, ouvre la voie à d'autres idées de perspectives tout aussi intéressantes. Nous pouvons étudier par exemple l'influence de la pression, de l'humidité sur la vitesse du son, mais aussi l'impact du milieu de propagation sur les mesures, on peut facilement imaginer des mesures dans l'eau, dans différents gaz. La mesure de la vitesse du son pourrait alors permettre d'autres applications telles que des mesures de densité de liquides, de concentration, de niveau d'eau, des reliefs dans la mer ou de composition d'un bi-gaz.

Bibliographie

- [1] Le son à travers l'Histoire. Le son : caractéristiques, transmission, propagation.
<http://tpe-les-ondes-sonores.e-monsite.com/pages/son-et-histoire.html> [consulté le 12 février 2021].
- [2] Alain Boudet. (31 août 2017). Histoire de la notion de fréquence sonore. Spiritualité, Science et Développement.
https://www.spirit-science.fr/doc_musique/histoire-frequences.html [consulté le 12 février].
- [3] Chapitre 1 : Brève histoire de l'acoustique. <http://www.claudegabriel.be/Acoustique%20chapitre%201.pdf>
[consulté le 19 février 2021]
- [4] SIU. (2009). Imagerie et ultrasons au 20^{ème} siècle.
http://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwi295n38ePuAhWBzoUKHfrUBRoQFjADegQIAhAC&url=http%3A%2F%2Ffrontgen.sfrnet.org%2Fsite_web_sfr%2Fsocietes_dorganes%2FpostersPDF%2FposterSIU.pdf&usq=AOvVaw1ONCHUJhRDVbSq-lXXVeQt [consulté le 12 mars 2021].
- [5] Elsa Angelini. (11 octobre 2007). Imagerie ultrasonore. Microsoft PowerPoint - Cours
ACIMED_ultrasound_2007.ppt (telecom-paristech.fr) [consulté le 12 mars 2021].
- [6] Elsevier Masson (2010). Historique. Historique - EM consulte (em-consulte.com) [consulté le 16 mars 2021].
- [7] Louis Salama, Paul-Antoine Topa, Inès Nguyen. (2016, 26 janvier). Repérage d'obstacles.
<https://tpeultrasons.wordpress.com/category/production-et-industrialisation/> [consulté le 5 mars 2021].
- [8] Verbex. (2021, 26 janvier). Sonar. Wikipédia. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Sonar> [consulté le 19 mars].
- [9] Guillaume Josse, G.J (s.d). Sonar. Futura Sciences.
<https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-sonar-17449/> [consulté le 19 mars 2021].
- [10] (2020) Aide au stationnement à ultrasons – Park Distance Control (PDC). Hella.
<https://www.hella.com/techworld/fr/Technique/Electricite/Electronique/Aide-au-stationnement-a-ultrasons%C2%A00-Park-Distance-Control-PDC-56199/> [consulté le 19 février 2021].
- [11] Beijing Ultrasonic. Comment fonctionnent les capteurs à ultrasons.
<https://www.bjultrasonic.com/fr/how-do-ultrasonic-sensors-work/> [consulté 11 février 2021].
- [12] Boubenia (2019). Générateurs piézoélectriques à base de nanofils piézo-semiconducteurs : Modélisation, fabrication et caractérisation [Theses, Université de Tours]. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-02975514>
- [13] Capteur de distance à Ultrasons – Arduino : L'essentiel.
<https://arduino.blaiseascal.fr/capteur-de-distance-a-ultrasons/> [consulté le 18 février 2021].
- [14] Capteur piézoélectrique fonctionnement. <http://izhyantar.ru/capteur-piezoelectrique-fonctionnement/> [consulté le 11 février 2021].
- [15] Chapitre 2 : Piezoélectricité. <http://docinsa.insa-lyon.fr/these/2002/malhis/chapitre2.pdf> [consulté le 15 avril 2021].

- [16] Cours : Capteur et Actionneurs.
<http://classes2010-2011.e-monsite.com/medias/files/cours-capteurs-2020-part1-2.pdf> [consulté le 11 février 2021].
- [17] Détecteur d'obstacles et distance avec Ultrason. Technologie Pro.
<https://www.technologiepro.com/montages-electroniques/capteur-distance-ultrason-21.html> [consulté le 18 février 2021].
- [18] Explication d'une technologie—Les capteurs piézoélectrique. <https://vimeo.com/336528897> [consulté le 12 février 2021].
- [19] Expose-capteurs-piezo.pdf. <http://mstmav.e-monsite.com/medias/files/expose-capteurs-piezo.pdf> [consulté le 12 février 2021].
- [20] Guide sur les détecteurs de mouvement : IR, MW et US. (2018, avril 25). Planète-Domotique : Le Blog
<https://www.planete-domotique.com/blog/2018/04/25/les-detecteurs-de-mouvement-ir-mw-us>
- [21] HBM. Comment fonctionne un capteur de force piézoélectrique ?
<https://www.hbm.com/fr/7318/comment-fonctionne-un-capteur-de-force-piezo-electrique/> [consulté le 12 février 2021].
- [22] Isolation phonique. (2021). In Wikipédia.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Isolation_phonique&oldid=178733205
- [23] Kistler. Effet piézoélectrique | Kistler. <https://www.kistler.com/fr/glossaire/terme/effet-piezo-electrique/>
[consulté le 11 février 2021]
- [24] La Transduction Piézoélectrique. http://electroacoustique.univ-lemans.fr/cours/pdf/grain_34.pdf [consulté le 19 février 2021].
- [25] Le b.a-ba des capteurs à ultrasons : Questions fréquentes.
<https://www.bannerengineering.com/fr/fr/company/expert-insights/ultrasonic-sensors-101.html/> [consulté le 18 février 2021]
- [26] Le capteur ultrasonique. https://cira-descartes.etab.ac-lyon.fr/spip/IMG/pdf/Capteur_ultrasonique_Li2oc.pdf
[consulté le 15 avril 2021].
- [27] Microsonic. Capteurs à ultrasons / Les modes de fonctionnement.
<https://www.microsonic.de/fr/support/capteurs-%c3%a0-ultrasons/les-modes-de-fonctionnement.htm> [consulté le 18 février 2021].
- [28] Microsonic. Capteurs à ultrasons / Principe.
<https://www.microsonic.de/fr/support/capteurs-à-ultrasons/principe.htm> [consulté le 11 février 2021].
- [29] Microsonic. Capteurs à ultrasons / Zones de détection.
<https://www.microsonic.de/fr/support/capteurs-%c3%a0-ultrasons/zones-de-detection.htm> [consulté le 18 février 2021].
- [30] Mr PiGG. Mesure de la vitesse du son avec Arduino. <http://edu.mrpigg.ca/son.html> [consulté le 11 février 2021].

- [31] Piezo Technologies. <https://piezotechnologies.com/francais/> [consulté le 11 février 2021]
- [32] Py-Renaudie, A.. Propriétés piézoélectriques des alliages d'oxyde de zinc : Étude ab-initio. 88. Qu'est-ce que l'effet Piézoélectrique. https://pcbpiezotronics.fr/wp-content/uploads/2016/07/Note_technique_effet_piezoelctrique.pdf [consulté le 15 avril 2021].
- [33] Renard, D., Gasnier, J., Guillon, A., & Multon, M. (1987). Vélométrie et débitmétrie : Méthodes basées sur les ultrasons. La Houille Blanche, 4-5, 305-312. <https://doi.org/10.1051/lhb/1987025>
- [34] SAS, P. F. Piezoelectric Materials. <https://www.pifrance.fr/fr/technologie/technologie-piezo/materiaux-piezoelectriques/> [consulté le 11 mars 2021].
- [35] Utilisation des capteurs, des détecteurs, des codeurs. - Les détecteurs à ultrasons. http://silanus.fr/bts/activites/Maugenet/co/Les_dectecteurs_a_ultrasons.html [consulté le 18 février 2021].
- [36] Wikipédia. Débitmètre à ultrasons. https://fr.wikipedia.org/wiki/Débitmètre_à_ultrasons [consulté 11 février 2021].
- [37] Wikipédia. (2021). Piézoélectricité. In Wikipédia. <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Pi%C3%A9zo%C3%A9lectricit%C3%A9&oldid=178966730>
- [38] Inserm. <https://www.inserm.fr/information-en-sante/dossiers-information/ultrasons-biomedicaux> [consulté le 11 février].
- [39] Allodocteur. https://www.allodocteurs.fr/se-soigner/examens-medicaux/echographie/soigner-grace-aux-ultrasons_18517.html#:~:text=Les%20ultrasons%20sont%20%C3%A9galement%20utilis%C3%A9s,d'assouplir%20les%20tissus%20articulaires [consulté le 18 février 2021].
- [40] PDF supplémentaires pour comprendre les phénomènes. https://cache.media.eduscol.education.fr/file/Signal/41/3/RA16_C4_PHCH_TelemetreUltrasons_849413.pdf [consulté le 18 février 2021].
- [41] Les ondes sonores, édité le 19 janvier 2018 (prospection du son et acoustique). <https://tpeson449825257.wordpress.com/2018/01/19/les-ondes-sonores-3/> [consulté le 18 février 2021].
- [42] Physique, acoustiques : les ondes sonores, édité le 9 juin 2017. <http://webphysique.fr/onde-sonore/> [consulté le 3 mars 2021].
- [43] Tout savoir sur les ondes sonores et les ultrasons, édité le 23 janvier 2018 (prospection du son et acoustique). <https://www.superprof.fr/ressources/scolaire/physique-chimie/terminale-s/ondes-periodiques/sonultrason.html> [consulté le 20 mars 2021].
- [44] Chapitre 8 : son et ultrason, édité par Dr A. Ouchtati. https://fac.umc.edu.dz/vet/documents/Cours%20et%20Td/Sons_Ultrasons.pdf [consulté le 25 mars 2021].
- [45] DallasTemperature - Arduino Libraries
- [46] OneWire - Arduino Libraries

[47]<https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/sante-environnement-milieu-travail/rapports-publications/radiation/principes-utilisation-ultrasons-partie-applications-industrielles-commerciales-code-securite-24.html>

Annexes

Annexe 1 : le programme (code) en Arduino

```
ultrason
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

#define ONE_WIRE_BUS 2
OneWire onewire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&onewire);

// Définition des numéros de port
const int trigPin = 10; // Trigger (émission)
const int echoPin = 9; // Echo (réception)
// Variables utiles
float duree; // durée de l'écho
float vitesse;
float distance; // distance
void setup() {
  pinMode(trigPin, OUTPUT); // Configuration du port du Trigger comme une SORTIE
  pinMode(echoPin, INPUT); // Configuration du port de l'Echo comme une ENTREE
  sensors.begin();
  Serial.begin(9600); // Démarrage de la communication série
}
void loop() {
  // Émission d'un signal de durée 10 microsecondes
  digitalWrite(trigPin, LOW);
  delayMicroseconds(5);
  digitalWrite(trigPin, HIGH);
  delayMicroseconds(20);
  digitalWrite(trigPin, LOW);
  // Écoute de l'écho
  duree = pulseIn(echoPin, HIGH);
  // Calcul de la distance
  sensors.requestTemperatures();
  vitesse = 20*sqrt(sensors.getTempCByIndex(0)+273);
  distance = duree*vitesse/10000/2;
```

```
// Affichage de la distance dans le Moniteur Série
Serial.print("Distance : ");
Serial.print(distance);
Serial.println("cm");
Serial.print ("temperature: ");
Serial.print(sensors.getTempCByIndex(0));
Serial.println("°");
Serial.print("vitesse : ");
Serial.print(vitesse);
Serial.println("m/s");
Serial.println(" ");
}
```

Explication du code:

Les deux premières lignes consistent en la déclaration des bibliothèques arduino utilisées, nous avons utilisé Dallas température pour simplifier l'utilisation du capteur de température cette bibliothèque utilise elle même la bibliothèque onewire qui est donc aussi déclarée.

On déclare ensuite le bus de communication et le capteur de température comme préconisé par les bibliothèques.

Vient ensuite la partie de déclaration des variables et de définition des ports sur lesquels sont branchées les bornes des capteurs. On utilise des variables de type float pour avoir une bonne approximation des nombres réels, on perdrait en précision en utilisant des type entier tels que integer. On définit aussi les bornes du capteur ultrason en entrée et sortie.

On initialise l'acquisition avec sensors.begin et la communication sur port serie avec serial.begin.

On commence ensuite la boucle qui se répète indéfiniment et on émet une impulsion avec le capteur ultrason en mettant la borne d'émission au niveau haut. A noter qu'on prend soin de la mettre au niveau bas juste avant pour que le signal soit bien propre. On le remet à bas après l'émission et on commence l'écoute sur la broche echo.

Grâce à la bibliothèque, on récupère directement la température mesurée par le capteur, viennent ensuite les calculs de vitesse du son et de distance.

Enfin on affiche toutes les données sur le port série à noter que sensors.GetTempCByIndex(0) correspond à la requête de la température selon les appellations de la bibliothèque. Les données peuvent ensuite être lues sur le port série ou enregistrées dans un fichier texte ou csv.

Annexe 2 : résultats obtenus expérimentalement - courbes

Résultats obtenus sous fichier texte

Distance : 120.54cm
temperature: 34.88°
vitesse : 350.93m/s

Distance : 52.15cm
temperature: 34.88°
vitesse : 350.93m/s

Distance : 50.35cm
temperature: 34.81°
vitesse : 350.89m/s

Distance : 50.20cm
temperature: 34.81°
vitesse : 350.89m/s

Distance : 60.20cm
temperature: 34.81°
vitesse : 350.89m/s

Distance : 50.51cm
temperature: 34.81°
vitesse : 350.89m/s

Résultats obtenus en tableur

Distance (en cm)	Température (en °C)	Vitesse (m/s)
52,15	34,88	350,93
50,35	34,81	350,89
50,2	34,81	350,89
60,2	34,81	350,89
50,51	34,81	350,89
50	34,75	350,86
50,08	34,75	350,86
50,97	34,69	350,82
50,04	34,69	350,82
61,44	34,63	350,78
50	34,63	350,78
49,95	34,56	350,75
50,44	34,56	350,75
50,42	34,56	350,75
50,37	34,56	350,75
51,1	34,56	350,75
49,54	34,5	350,71
50,92	34,5	350,71
52,78	34,44	350,68
52,88	34,44	350,68