

*Projet de Physique P6  
STPI/P6/2022 – 041*

**Capteur ultrason, métrologie d'utilisation et  
applications**



**Etudiants :**

**Alexandre BARRAY**

**Théo COENS**

**Vincent DUBREUIL**

**Emilie DUFLOS**

**Théo KYBURZ**

**Enseignant-responsable du projet :**

**Nabil MOKRANI**

---

*Cette page est laissée intentionnellement vierge.*

---

Date de remise du rapport : **11/06/2022**

Référence du projet : **STPI/P6/2022 – 041**

Intitulé du projet : **Capteur ultrason, métrologie d'utilisation et applications**

Type de projet : **Bibliographie et expérimental (arduino)**

Objectifs du projet :

**L'objectif fondamental du projet est d'identifier l'impact de plusieurs grandeurs d'influence sur la vitesse du son. Pour cela il nous faudra se renseigner sur les caractéristiques et applications des ondes ultrasonores ainsi que le fonctionnement des capteurs, par des recherches documentaires. La partie expérimentale nous permettra de mettre en place des chaînes de mesures et de nous familiariser avec le logiciel Arduino.**

Mots-clefs du projet : **ondes, capteur, ultrasons, métrologie**

## TABLE DES MATIERES

1. Introduction.....	5
2. Méthodologie / Organisation du travail.....	5
3. Travail réalisé et résultats.....	7
3.1. Les ondes sonores.....	7
3.1.1. Historique.....	7
3.1.2. Définitions.....	9
3.2. Principe des capteurs ultrasonores.....	12
3.2.1. Fonctionnement d'un capteur.....	12
3.2.2. Principe de la piézoélectricité.....	15
3.2.3. Mesures et limites des capteurs ultrasonores.....	17
3.3. Domaines d'application.....	19
3.3.1. Applications industrielles.....	19
3.3.2. Applications médicales.....	24
3.4. Expérimentations.....	27
3.4.1. Erreur sur la mesure des distances.....	27
3.4.2. Visualisation du signal sur oscilloscope.....	29
3.4.3. Impact des grandeurs d'influence.....	30
3.4.4. Chaînes de mesures.....	38
4. Conclusions et perspectives.....	41
5. Bibliographie.....	43
6. Annexes.....	47
6.1. Documentation technique.....	47
6.2. Listings des programmes réalisés.....	48

## 1. INTRODUCTION

Nous connaissons tous la valeur de 340m/s pour la vitesse du son. L'utilisation d'un capteur ultrasonore peut permettre de retrouver cette valeur. Il faut simplement connaître la distance entre le capteur et l'obstacle, et le temps entre l'émission et la réception de l'onde. Atteindre cette valeur précise de 340m/s requiert certes, des conditions très précises de température, de pression, ou d'humidité ambiante, mais celles-ci doivent surtout être stables. Que se passerait-il si ces paramètres physiques venaient à varier ? Une augmentation de température ferait-elle diminuer ou augmenter cette vitesse ? L'objectif de notre projet est de lever le voile sur ces différentes questions.

Un objectif sous-jacent est de mieux comprendre ce que sont les ondes ultrasonores, et la façon dont fonctionnent les capteurs. Après cela, les expérimentations nous conduiront à réaliser des chaînes de mesures et ainsi comprendre ce que différentes grandeurs d'influence ont comme impact sur la vitesse du son dans l'air.

## 2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Durant les premières séances, nous avons découvert le projet grâce à des recherches sur Internet. Elles ont permis de cibler les éléments clés à aborder dans la bibliographie et de les séparer entre nous. Nous avons précisé nos recherches et rédigé le rapport durant les séances suivantes. A partir du 25 mars, nous nous sommes consacrés à l'utilisation du capteur ultrason pour la partie expérimentale du projet.

Concernant la bibliographie, la répartition du travail s'est opérée ainsi :

DUFLOS Emilie : 3.1. Les ondes sonores – 3.1.1. Historique

BARRAY Alexandre : 3.1. Les ondes sonores – 3.1.2. Définitions

DUBREUIL Vincent : 3.2. Principe des capteurs ultrasonores

KYBURZ Théo : 3.3. Domaines d'application - 3.3.1. Applications industrielles

COENS Théo : 3.3. Domaines d'application - 3.3.2. Applications médicales

Les expérimentations se sont réparties ainsi :

DUFLOS Emilie : Impact de la température et de l'humidité – Observations à l'oscilloscope

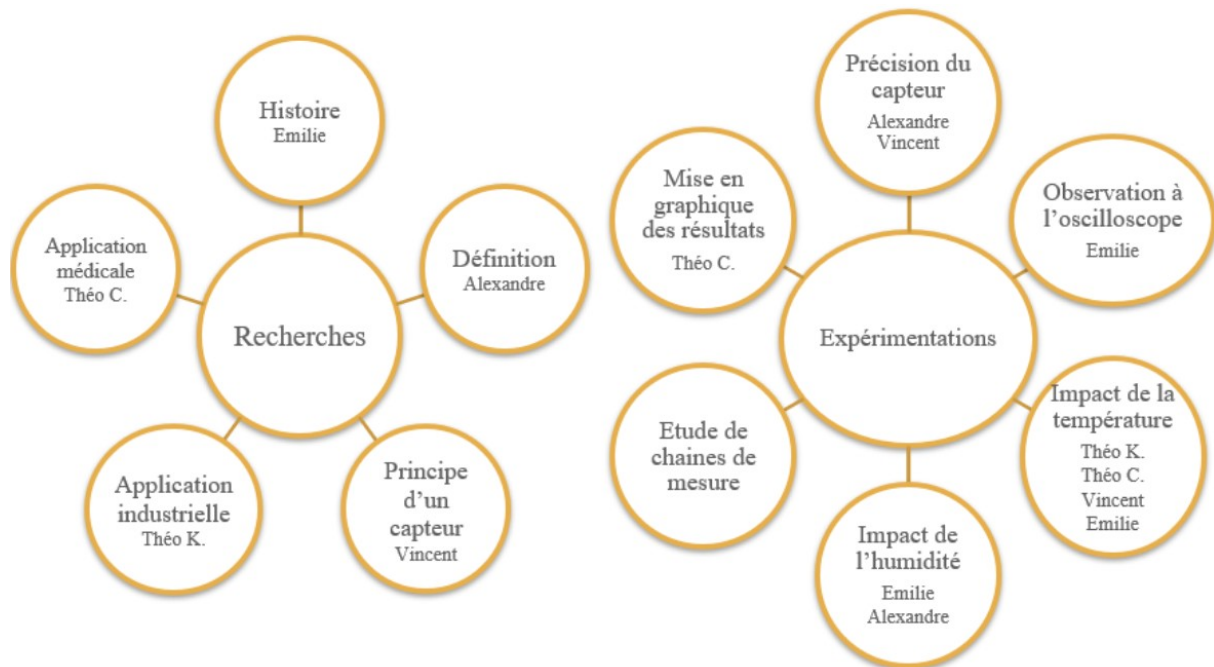
BARRAY Alexandre : Mesure de la précision du capteur – Impact de l'humidité

DUBREUIL Vincent : Mesure de la précision du capteur – Impact de la température

KYBURZ Théo : Impact de la température

COENS Théo : Impact de la température – Réalisation des graphiques

La répartition du travail est résumée dans les diagrammes ci-dessous :



### 3. TRAVAIL RÉALISÉ ET RÉSULTATS

#### 3.1. Les ondes sonores

##### 3.1.1. *Historique*

Dans un premier temps, nous verrons comment a évolué la science du son, ou plutôt l'acoustique, à travers les siècles. Puis dans une seconde partie, nous aborderons les ultrasons et en particulier leurs premières utilisations.

Le domaine de l'acoustique [1] comprend toutes les ondes mécaniques, de toutes fréquences : des infrasons aux ultrasons en passant par les sons audibles. On attribue à Pythagore l'origine de cette science. C'est en effet au VI<sup>ème</sup> siècle avant J.-C. qu'il se pencha sur l'étude du fonctionnement des cordes vibratoires.

Par la suite, de nombreux scientifiques se sont penchés sur le phénomène sonore et ont énoncé la théorie selon laquelle le son est un phénomène ondulatoire. Au IV<sup>ème</sup> siècle avant J.-C., Aristote décrit le phénomène par une source "poussant vers l'avant l'air contigu de telle manière que le son voyage" [2]. Le philosophe grec Chrysippe, au III<sup>ème</sup> siècle avant J.-C., ainsi que l'ingénieur romain Vitruve, 25 ans avant J.-C., arrivèrent à une conclusion similaire, suite à l'observation de la propagation des ondes sur l'eau.

Marin Mersenne évalue pour la première fois la vitesse de propagation du son à environ 448 m/s en 1635 et Gassendi démontra que les sons graves et aigus se propagent à la même vitesse.

Le premier résultat expérimental sur la nature des sons est ainsi apparu au XVII<sup>ème</sup> siècle expliquant que le mouvement de l'air généré par un corps vibrant est aussi un mouvement vibratoire et sa fréquence est identique à celle de vibration du corps vibratoire. Cette découverte, à l'origine de Marin Mersenne et Galilée [3], permet ainsi de détacher l'acoustique de l'art pour que cela devienne une véritable science des phénomènes sonores et de la mécanique.

La théorie de la propagation sonore fut développée par la suite, notamment par Isaac Newton (1642-1727) puis par Euler, Lagrange et D'Alembert. Grâce à ces recherches, la connaissance de l'acoustique a nettement évolué, permettant d'introduire les fondements de l'acoustique physique que nous connaissons aujourd'hui, et son développement.

En 1822, la vitesse de propagation du son est mesurée par Arago et Prony, grâce à des chronomètres plus précis, par l'intermédiaire de coups de canons croisés tirés en même temps. Ils mesurent une vitesse de 341 m/s à 15,9°C [4].

Parmi l'étude des sons se trouve l'étude des ultrasons. En 1794, le biologiste italien Spallanzani émet la théorie de l'existence des ultrasons après l'observation de chauves-souris [5]. Ce phénomène est réellement découvert en 1883 par Galton. Alors qu'il émet des sons de très hautes fréquences à l'aide d'un sifflet à ultrasons, il s'aperçoit que l'Homme n'entend rien, au contraire des animaux.

La première découverte qui contribue au développement des techniques d'utilisation des ultrasons est celle de l'effet piézoélectrique sur des cristaux par Pierre et Jacques Curie en 1880 [6]. Ils observèrent que les cristaux se polarisent électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique, l'effet inverse étant déduit par Lippmann l'année suivante. Les quartz piézo-électriques se révélèrent ainsi être de très bons émetteurs et détecteurs d'ultrasons.

Les premiers SONAR (Sound Navigation And Ranging) furent ensuite élaborés. Fessenden développa un premier système de détection d'icebergs suite au naufrage de Titanic en 1912. Au cours de la Première Guerre mondiale, pour détecter les sous-marins ennemis, Paul Langevin, avec Constantin Chilowsky [7], mis au point l'ASDIC (Anti Submarine Detection Investigation Committee), ancêtre du SONAR. Il excita des lames de quartz avec un signal électrique, créant ainsi des ultrasons se réfléchissant sur les objets. L'invention de Langevin fut développée et améliorée et en décembre 1923, Langevin et Florisson déposèrent un brevet pour le premier sondeur ultrasonore qui sera mis en service par la Marine l'année suivante. Cela consistait en un ensemble de lames de quartz collées au milieu de deux plaques d'acier. Très rapidement, la plupart des sous-marins furent équipés de systèmes de détection sous-marine similaires.



*Figure 1: Le sondeur Florisson-Langevin à l'ESPCI (Ecole Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de la ville de Paris)*

Par la suite, les ultrasons commencèrent à être utilisés dans le domaine de la médecine, tout d'abord de manière thérapeutique, puis diagnostique. Dans les années 1940, H. Gohr et Th. Wedekind publièrent *Der Ultraschall in Der Medizin*, proposant l'idée que les ultrasons permettraient de détecter les tumeurs ou abcès, sans pouvoir cependant le prouver expérimentalement.

Karl Theo Dussik [8] est considéré comme le premier à avoir effectué un diagnostic à l'aide d'ultrasons, pour détecter des ventricules cérébraux : c'est le premier scanner humain. Il se basa sur une technique de transmission avec un émetteur et un récepteur, placés de part et d'autre de la tête. Il obtint un résultat en plongeant la tête du patient dans un bain d'eau et en enregistrant les variations d'intensité des ondes ultrasoniques. En 1948, Dussik et Keidel publièrent donc le premier papier présentant l'utilisation des ultrasons comme un outil diagnostique, et non thérapeutique.



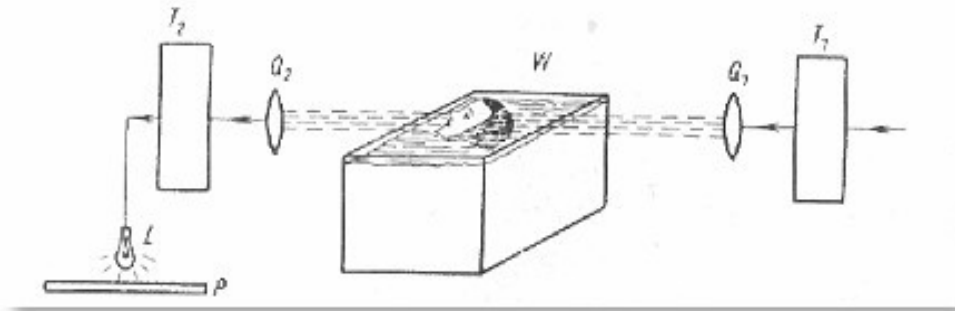


Figure 2: Schéma de l'installation de Karl Theo Dussik

T1 : Générateur d'ultrasons  
T2 : Convertisseur amplificateur  
Q1 : Transmetteur  
Q2 : Récepteur  
W : Bain d'eau

Les recherches autour de l'utilisation des ultrasons continuèrent partout dans le monde et en 1960 fut industrialisé le premier échographe. Les ondes ultrasonores furent ensuite utilisées dans divers domaines comme en automobile. A partir de 1993, par exemple, avec la mise au point du système Blackhawk Shark ou banc de mesures à ultrasons utilisé pour le diagnostic et la réparation.

### 3.1.2. Définitions

#### 1 Propriétés

Une onde est une perturbation qui se propage de proche en proche dans un milieu. Cette perturbation résulte d'une variation des propriétés mécaniques de ce milieu. Il est qualifié de matériel s'il est non vide, quel que soit son état: eau liquide, vapeur d'eau, plastique ou encore plasma.

L'onde est mécanique lorsqu'elle se propage sans transporter de matière, dans ces milieux. Celui-ci se déforme au passage de l'onde, et se replace à son état initial lorsque l'onde a disparu : il est élastique. [9]

Une onde peut se déplacer de deux façons différentes: longitudinales ou transversales. Dans le premier cas, la direction de la propagation et de la perturbation se dirigent dans la même direction. Elles sont au contraire perpendiculaires pour les ondes transversales. [10]

Une onde sonore est une onde mécanique longitudinale. Une variation de pression en est l'origine. Elle peut osciller entre 20  $\mu\text{Pa}$  (seuil d'audibilité) et 20 Pa (seuil de douleur) [11] dans le domaine audible, notion que nous allons expliciter. La vitesse de l'onde dépend de la pression et d'autres caractéristiques physiques du milieu : son humidité, sa température et son état par exemple. Celles-ci sont appelées grandeurs d'influence.

## 2 Grandeurs physiques associées

Plusieurs grandeurs physiques permettent de caractériser une onde sonore : la période, la fréquence, la longueur d'onde et l'amplitude en font partie.

**La période** (s) d'une onde est le temps nécessaire à ce que sa vibration redevienne identique. Pour une onde sinusoïdale, cela peut être la durée pour passer d'un maximum à l'autre. Si l'onde oscille de façon sinusoïdale, alors le son est qualifié de pur.

**La fréquence** (Hz) représente le nombre d'oscillations qui se produisent en une seconde. Plus la fréquence est faible, plus le son est grave.

**La longueur d'onde** (m) correspond à sa périodicité spatiale, soit la distance parcourue par l'onde au cours d'une période temporelle.

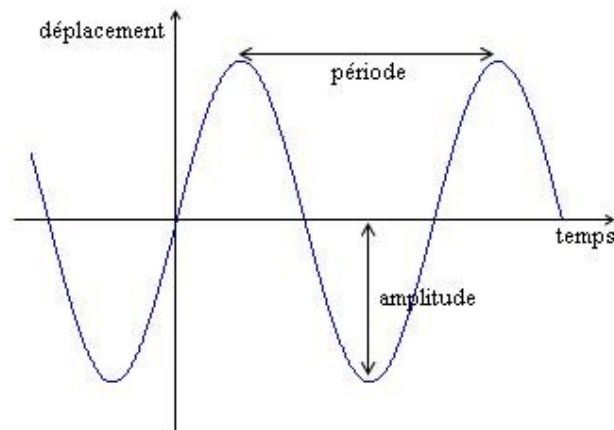


Figure 3. Onde sinusoïdale

Enfin, **l'amplitude** du son traduit le fait qu'il soit perçu comme plus "fort" ou plus "faible". Il est directement lié à la pression acoustique, qui évolue selon la variation rapide de la pression atmosphérique, et s'exprime donc en Pascal (Pa). Une fois le graphe de l'onde obtenu, on la détermine en mesurant la distance entre l'axe temporel et le point le plus haut de la courbe du profil de l'onde.

Parmi ces grandeurs physiques, c'est la fréquence qui nous permet de différencier une onde ultrasonore d'une onde audible.

## 3 Ondes ultrasonores

Un son est entendu par l'Homme lorsque son oscillation fait entrer le tympan en vibration. L'onde est ensuite transmise à la cochlée, où de petits cils se contractent pour

capter le son. Enfin, la cochlée traduit les sons en signaux nerveux que le cerveau peut comprendre, grâce au processus de transduction mécano-électrique. Ce phénomène ne se déroule pas si la fréquence de l'onde ne fait pas vibrer le tympan.

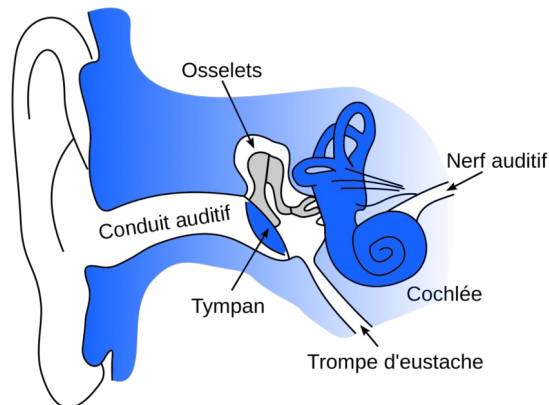


Figure 4. Schéma du système auditif humain [12]

Seules les ondes sonores dont la fréquence varie entre 20Hz et 20kHz sont audibles par l'Homme:

- De 0 à 20 Hz, ces ondes sont appelées infrasons.
- Entre 20 kHz et plusieurs centaines de MHz, ce sont des ultrasons.
- Au-dessus du GigaHertz se trouve la gamme des hypersons.

Hormis la fréquence, ces sons ont la même nature physique que les ondes audibles.

Il est à noter que la notion d'audibilité varie d'un individu à l'autre. Certaines personnes du même âge entendent sans difficultés des fréquences dépassant les 20 kHz tandis que d'autres peinent à dépasser les 10 kHz. Aussi, le vieillissement est une cause majeure de la perte d'acuité auditive. Celle-ci se fait principalement sur les sons aigus, car les cils permettant de les capter sont en bas de la cochlée, et donc plus vulnérables. [13]

C'est pour cela qu'on retiendra l'intervalle 20 Hz - 20 kHz en tant que gamme de fréquence audible par la plupart des Hommes.

### Les fréquences sonores



Figure 5. Champ auditif humain [14]

Cet intervalle est conditionné par la forme même de notre système auditif. Plus sa cochlée est longue, plus la gamme de fréquences que peut entendre une espèce est élevée. Ainsi, le chien, dont le système auditif est proportionnellement plus grand que le nôtre, peut capter les ultrasons. [15] C'est le cas d'autres animaux comme le dauphin ou la chauve-souris qui utilisent l'écholocation pour repérer leurs proies.

### 3.2. Principe des capteurs ultrasonores

#### 3.2.1. Fonctionnement d'un capteur

Nous allons tout d'abord expliquer le principe de fonctionnement d'un capteur à ultrasons, résultant d'un phénomène physique que nous étudierons par la suite plus en détails.

Un capteur à ultrasons émet des ondes de hautes fréquences à intervalles réguliers. Les impulsions émises se propagent à la vitesse du son dans le milieu, par exemple 340 m/s dans l'air ou bien même 1480 m/s dans l'eau. [16]

Célérité du son au sein de différents matériaux : [11]

Matériau	Air	Eau	Glace	Verre	Acier
Célérité du son (m/s)	340	1480	3200	5300	5750

Quand celles-ci rencontrent un objet, elles sont réfléchies et renvoyées sous forme d'écho au capteur. On peut donc connaître la vitesse de l'onde, par la connaissance de la distance séparant le capteur de la cible et du temps entre l'émission et la réception de l'onde. Il faut toutefois connaître la composition d'un capteur à ultrasons afin de mieux comprendre le phénomène physique lié à la mesure des ondes.

Les capteurs ultrasonores sont composés de différentes parties. On peut en dénombrer trois distinctes dans ceux que l'on a utilisés. En premier, nous retrouvons un diaphragme fabriqué dans un matériau facilement déformable, fin et souple. Nous retrouvons également un cristal piézoélectrique situé juste derrière le diaphragme et reposant sur une base fixe afin de maintenir l'ensemble stable.

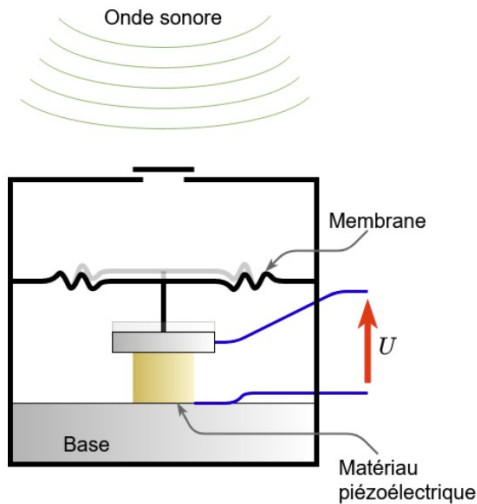


Figure 6: Schéma montrant la composition d'un capteur à ultrasons [17]

Voyons maintenant ce qu'il se passe au sein même de l'émetteur à ultrasons. Une onde ultrasonore est émise par un transducteur en céramique, et ensuite réfléchié par un obstacle. L'onde réfléchié arrive sur le détecteur faisant vibrer le diaphragme qui, lui-même, transmet une action mécanique à l'élément piézoélectrique du capteur. De par les propriétés du cristal piézoélectrique, l'action mécanique engendrée par le diaphragme sur le cristal est convertie en une tension. Cette tension peut ainsi être amplifiée par un montage à base d'amplificateur opérationnel, puis convertie pour être interprétée par un ordinateur. On peut brancher un oscilloscope sur le capteur afin de visualiser la courbe représentant l'onde émise et la courbe représentant l'onde reçue. [18]

Il ne faut cependant pas oublier qu'il faut, pour un capteur à ultrasons, une fréquence de référence afin d'effectuer la mesure. Il doit aussi être alimenté pour pouvoir faire fonctionner le montage à base d'un amplificateur opérationnel.

Nous avons fait un résumé illustré d'un schéma afin de mieux visualiser le principe de fonctionnement d'un capteur à ultrasons :

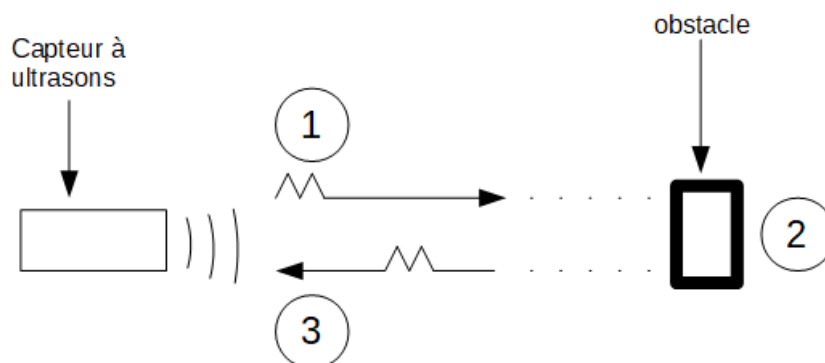


Figure 7: Principe de fonctionnement d'un capteur à ultrasons [19]

Le schéma ci-dessus repose sur le principe des capteurs ultrasonores utilisés lors des expériences. Ce capteur fait office d'émetteur et de récepteur, nous pouvons dénoter trois phénomènes distincts lors de la mise en fonctionnement de celui-ci :

- 1 : Le capteur émet à intervalles réguliers de courtes impulsions à haute fréquences sous forme de rafales, celles-ci sont appelées « chirp » (23 kHz - 40 kHz).
- 2 : Lors de la rencontre avec un objet/obstacle, les ondes se réfléchissent dessus.
- 3 : Les ondes reviennent sous forme d'échos jusqu'au capteur.

En réalité, le fonctionnement même du dispositif à ultrasons est plus complexe que cela. On parle en effet de capteur composite, que l'on retrouve aussi bien au niveau du récepteur, que de l'émetteur. Celui-ci est composé d'un corps d'épreuve et d'un capteur. C'est le corps d'épreuve qui est directement soumis aux ondes ultrasonores (la membrane vue sur la figure 6), celui exerce sur le capteur une force de pression (récepteur piézoélectrique vu sur la figure 6) appelé mesurande secondaire. Ce dernier est une grandeur physique mécanique transmise au capteur, qui la traduit en une grandeur électrique. Ainsi nous avons comme réponse un signal électrique correspondant à une image du mesurande.

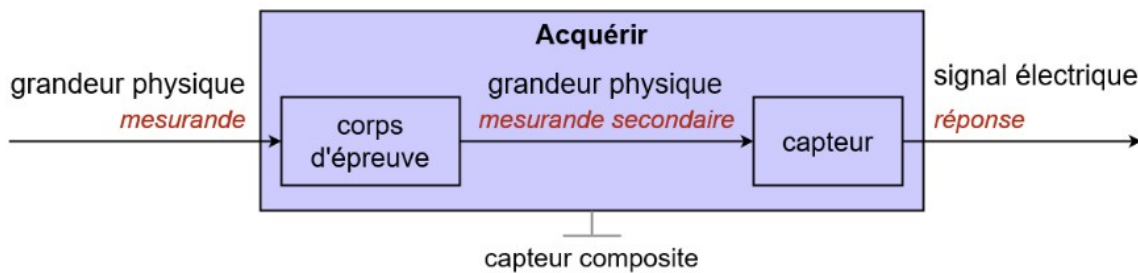


Figure 8: Principe de l'acquisition [17]

Ainsi nous pouvons calculer la distance d'un obstacle avec la formule suivante :

$$d = 0,5 * t * v$$

Les unités sont :

- d : distance (mètres)
- t : temps entre l'émission et la réception de l'onde (mètres)
- v : vitesse de l'ultrason dans le milieu (mètres par seconde)
- 0,5 correspond à l'aller-retour de l'onde émise

### 3.2.2. Principe de la piézoélectricité

Les capteurs à ultrasons utilisés lors de nos expériences comportent des matériaux piézoélectriques. Nous allons expliciter leurs propriétés.

L'effet piézoélectrique, découvert par les frères Pierre et Jacques Curie en 1880, peut se traduire par la faculté de certains corps solides à pouvoir se polariser électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique. Une tension se crée lorsque la force modifie la structure microscopique du corps. On peut observer le phénomène inverse en appliquant une tension sur les matériaux piézoélectriques, qui peuvent se déformer élastiquement. L'effet inverse est tout de même identifiable, une oscillation mécanique aux abords de la plaque de métal résulte en une différence de tension au borne de la plaque piézoélectrique. [20]

L'effet piézoélectrique fonctionne donc lorsqu'une action mécanique est exercée sur le cristal. Cela provoque une déformation de ce dernier, ce qui implique que les barycentres des charges le constituant (positives et négatives) ne soient plus confondus. On observe donc une polarisation du cristal qui entraîne une différence de potentiel entre les électrodes placées à ses extrémités. [21]

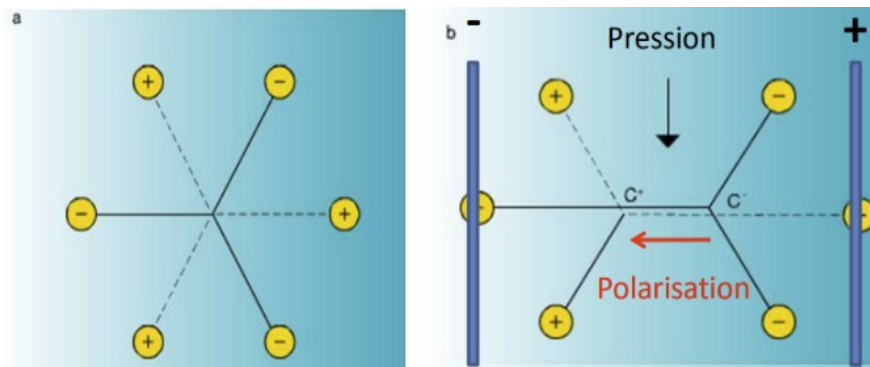


Figure 9: Principe de l'effet piézoélectrique avec pression (cas b) ou sans pression (cas a) [22]

Pour permettre de mieux visualiser cela, prenons l'exemple concret du quartz :

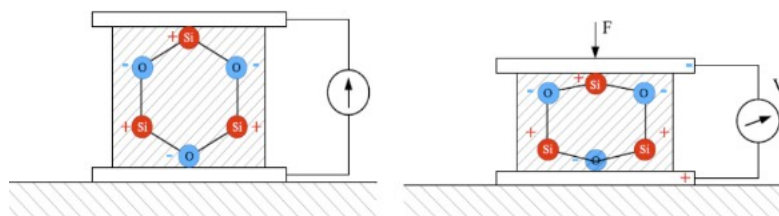


Figure 10: Cas sans pression (à gauche) et avec pression (à droite) pour le quartz

On dénombre une multitude d'éléments piézoélectriques (composants ou matériaux) permettant de mettre en œuvre toutes les applications souhaitées. Certains cristaux piézoélectriques sont d'origine naturelle comme les cristaux de tourmaline et de quartz. Le plus commun est le cristal de quartz ( $SiO_2$ ), couramment utilisé dans l'horlogerie. Dans l'industrie, les matériaux piézoélectriques les plus utilisés sont des céramiques et des alliages de titane. Parmi ces alliages le PZT (Titano-Zirconate de Plomb) est la céramique synthétique principalement utilisée en industrie. Un alliage de plomb, zirconium et de titane, est très efficace pour des applications de type actionneur. [23] Les propriétés piézoélectriques sont modifiées selon le matériau, comme le suggère le tableau ci-dessous : [24]

Matériau	Coefficient piézoélectrique $d_{33}$ (10-12 m/V)
Quartz	2,3
BaTiO <sub>3</sub> (céramique)	190
PbTiO <sub>3</sub>	120
PZT (45/55)	140
PZN-9PT	2500
LiNbO <sub>3</sub>	6

Il existe toutefois d'autres phénomènes physiques utilisés dans le fonctionnement de capteurs à ultrasons comme les émetteurs magnétostrictifs. Ceux-ci sont constitués de corps ferromagnétiques que l'on plonge dans un champ magnétique variable, ce qui engendre une oscillation mécanique transmise aux molécules d'air, créant des ondes ultrasonores. Ces émetteurs sont robustes mais ne peuvent émettre des ultrasons de fréquences supérieures à 50 kHz. Il y a aussi les émetteurs électrostrictifs. Le principe est le même que pour les émetteurs magnétostrictifs. Seuls les corps utilisés, des céramiques placées dans un champ électrique variable, sont différents.

Durant notre projet, ce sont ces capteurs à ultrasons piézoélectriques que nous avons utilisés, mais l'un de ces autres capteurs aurait pu aussi l'être. [25]



### 3.2.3. *Mesures et limites des capteurs ultrasonores*

Les capteurs ultrasonores sont des appareils de mesures complexes. C'est pourquoi leur utilisation nécessite quelques précautions. Afin d'utiliser précisément un capteur à ultrasons, il faut le mettre en configuration où il sera au maximum de ses capacités. Pour cela il suffit que les objets à détecter soient orientés parfaitement dans l'axe du capteur. Afin que l'on détecte au mieux un objet il faut qu'il soit parallèle au front d'onde émis ou bien perpendiculaire à la direction de propagation. [26]

Un point important lors de l'utilisation de différents capteurs pour une mesure, est l'appariement du récepteur et de l'émetteur. En effet, il est nécessaire d'avoir des fréquences de résonance identiques dans le but d'obtenir le meilleur signal possible. Les capteurs proposés dans le commerce ne correspondent pas nécessairement à ce cahier des charges.

La gamme de fréquence des ultrasons se situe entre 16 kHz et 10 MHz. Cependant, lors de nos recherches sur les capteurs ultrasonores, nous avons pu observer que ceux vendus en commerce ont une mesure de fréquence aux alentours de 40 kHz. Il existe tout de même des capteurs avec une meilleure gamme de précision et des fréquences plus élevées. Ils peuvent mesurer de 150 kHz à 450 kHz, mais restent malgré tout beaucoup plus chers.



*Figure 11: Différents capteurs ultrasonores vendus dans le commerce [27]*

On peut également relever un certain inconvénient au sujet des capteurs à ultrasons. Il existe une zone morte, ou aveugle, devant le capteur, ne permettant pas d'effectuer de mesures. Cette zone dépend du capteur utilisé, c'est-à-dire de sa précision, de sa distance de mesure mais également de sa puissance. Cette zone est issue du fait que la distance parcourue par l'impulsion émise est trop courte pour que le capteur puisse se mettre en mode réception du signal avant que l'onde revienne. [28]

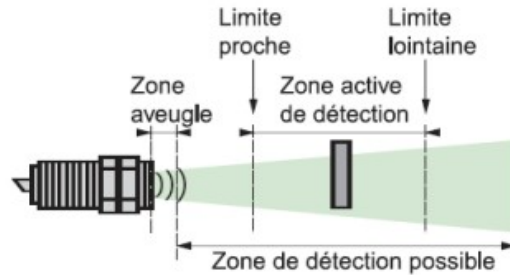


Figure 12: Limites d'emploi d'un capteur à ultrasons [29]

On peut également dénombrer deux autres zones pour les capteurs à ultrasons : la zone de travail typique et la zone de travail maximale.

La zone de travail typique est une zone où le capteur à ultrason peut détecter les objets fins. Il faut savoir que les objets fins sont difficilement détectables parce que ceux-ci réfléchissent, de par leur taille, une petite partie de l'onde reçue du capteur.

La zone de travail maximale est la zone où le capteur est au maximum de ses capacités de détection. C'est l'emplacement où il ne peut détecter qu'un objet large, réfléchissant une grande partie de l'onde reçue par le capteur.

Il faut savoir que plus l'onde propagée s'éloigne, plus elle va couvrir de surface à l'arrivée pour détecter un obstacle. On parle souvent de largeur de faisceau ou d'angle de faisceau plutôt que de surface standard pour un capteur à ultrasons. [30]

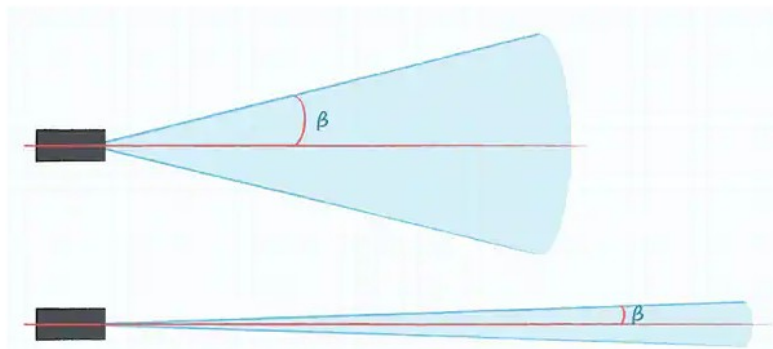


Figure 13: Propagation d'ondes ultrasonores en fonction de différents angles de faisceau [30]

Les capteurs ultrasons ont d'autres limites : [31]

- Échos parasites pouvant biaiser les mesures
- Fonctionnement impossible dans le vide
- Présence d'une zone morte
- Les capteurs à ultrasons n'indiquent pas l'emplacement d'un objet et ne fournissent aucune information sur sa forme ou sa couleur

➤ Les capteurs sont vulnérables aux conditions difficiles comme de fortes températures ou une forte humidité, ce qui nuit à leur performance, pouvant même les rendre inutilisables.

### 3.3. Domaines d'application

#### 3.3.1. Applications industrielles

Les applications industrielles des capteurs à ultrasons sont variées. De manière générale, tout besoin industriel nécessitant une mesure de distance peut être répondu grâce à un capteur à ultrasons. Nous en verrons ici quelques exemples plus précis.

#### Mesure de niveau par capteur à ultrasons :

Dans de nombreux domaines industriels, que ce soit agro-alimentaire, chimique, pétrochimique, ou même minier, on est amené à stocker une quantité de produit dans un réservoir tel qu'une cuve [32]. Mais du point de vue de l'optimisation des ressources, mais aussi de sécurité en fonction du produit, il est extrêmement important de connaître en temps réel le niveau de remplissage du réservoir [33]. Dans ce type de cas, les capteurs ultrasonores se trouvent être une très bonne solution. Voyons comment ils sont utilisés pour résoudre ce problème.

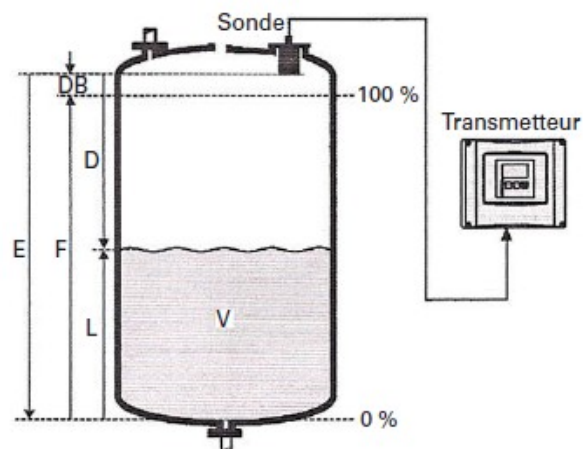


Figure 14: Capteur de niveau à ultrasons [34]

Si la section du réservoir est la même sur toute la hauteur, ce qui est le cas pour les réservoirs cylindriques ou prismatiques qui représentent la majorité des réservoirs, le volume de produit contenu dépend uniquement de la hauteur du produit dans le réservoir [34]. C'est donc cette hauteur que l'on cherche à mesurer et qui nous sera utile pour savoir le niveau de remplissage. Toutefois, cela est valable seulement si la surface haute de la quantité de produit est relativement plane pour que l'on puisse considérer que cette hauteur soit constante peu importe le point de mesure.

Il est donc très souvent utilisé le capteur à ultrasons pour faire cette mesure. En effet, en plaçant le capteur que l'on peut aussi appeler sonde en haut du réservoir, il nous

retournera alors la distance entre le haut du réservoir et la surface haute de la quantité de produit. On peut ainsi déduire la hauteur du produit en soustrayant la distance mesurée à la hauteur du réservoir qui est une donnée connue. Puis, il nous suffit de diviser cette hauteur de produit par la hauteur du réservoir pour obtenir le niveau en pourcentage. Il faut cependant faire attention lorsque le niveau de produit est proche de 100 % car la plupart des capteurs à ultrasons utilisés pour cette application possèdent une distance de portée minimale. Si la surface haute du produit est trop proche du capteur, les résultats risquent donc d'être erronés. C'est pourquoi il faut prévoir une marge de sécurité et définir le niveau 100 % un peu en dessous de la capacité maximale réelle du réservoir. [34]

Grâce à ce dispositif simple, on peut connaître en temps réel et de manière fiable le niveau de produit dans le réservoir. C'est donc une solution que l'on va privilégier dans de nombreux domaines industriels. Mais il présente tout de même quelques inconvénients qui le rendent inutilisable dans certains cas.

Le premier cas où il n'est pas utilisable est celui de produits où la surface haute n'est pas plane, par exemple des produits solides de taille non négligeable par rapport à la largeur du réservoir. Mais dans ce cas c'est plutôt la méthode de mesure de niveau choisie qui n'est pas adaptée car le volume ne dépend pas uniquement de la hauteur mesurée et le capteur à ultrasons permet seulement de mesurer une distance. Ainsi, le capteur à ultrasons n'est utilisable que pour les produits liquides, visqueux, pâteux et les petits solides en vrac qui couvrent déjà une grande partie de ce qui est généralement stocké dans un réservoir. [35]

Le deuxième cas où il est inutilisable est la cas où le produit est moussant où s'il dégage des poussières. En effet une mousse ou poussière importante peut changer les propriétés de l'air où se propagent les ondes ultrasonores. Il faudrait donc réaliser une étude pour notamment déterminer la vitesse du son dans ce milieu et adapter les résultats en fonction de cela, ou alors préférer une autre solution qu'un capteur à ultrasons.

Enfin, puisque le capteur à ultrasons se base sur la vitesse du son pour réaliser sa mesure et que celle-ci dépend de la température et de la pression, il devient inutilisable dans les cas où la température est fortement variable et les cas où la température et la pression sont extrêmes. [36]

Pourtant, le capteur à ultrasons est privilégié dans de nombreux domaines car il présente des avantages non négligeables. L'un de ses avantages les plus importants est le fait que sa mesure se fasse sans contact direct avec le produit. Cela est très recherché dans les domaines où les règles d'hygiène sont strictes et où les produits ne doivent pas être infectés comme l'alimentaire ou le pharmaceutique mais aussi dans les cas où le produit est par exemple corrosif ou abrasif et pourrait donc endommager le capteur s'il n'était pas sans contact. [35]

Un autre avantage est son faible besoin d'entretien qui est une chose appréciée des industriels. Il demande effectivement peu ou pas d'entretien car les vibrations produites permettent notamment de combattre le dépôt de poussière. [36]

Un dernier avantage est sa simplicité d'installation due à son principe de fonctionnement [37]. C'est cet avantage qui explique son omniprésence et sa répartition

dans de très nombreux domaines car il représente une solution simple à mettre en place et qui donnera presque toujours des résultats fiables.

### Détection de fissures :

Par rapport aux capteurs laser ou aux capteurs infrarouge, les capteurs à ultrasons ont la particularité d'avoir besoin de matière pour fonctionner. Cela empêche leur utilisation dans certains cas comme dans le vide ou lorsque la distance de mesure est trop grande. Mais cela est aussi une caractéristique qui les rend très utiles. Ce sont même les seuls capteurs utiles dans d'autres cas où c'est bien la matière qu'il s'agit d'étudier. Nous verrons ici l'exemple de la détection de fissures par capteurs ultrasons.

La fibre de verre est un matériau utilisé dans la production de coques de bateaux, de réservoirs, ou encore de pales d'éoliennes. Cependant, elle reste un matériau assez fragile et des fissures peuvent se former. Or, de par la structure de la fibre de verre, les fissures ont le plus souvent tendance à se former de manière parallèle à la surface et à l'intérieur du matériau [38]. C'est pourquoi les capteurs à ultrasons sont indispensables, car les ondes ultrasonores qu'ils envoient peuvent traverser la matière et nous permettent donc d'étudier ce qui se passe à l'intérieur. Examinons comment cela est fait.

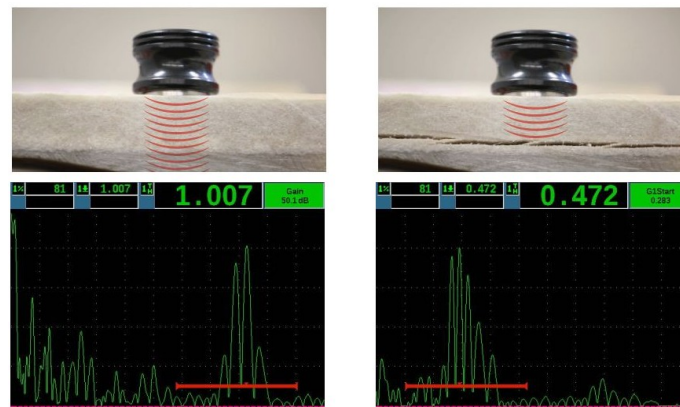


Figure 15: Illustration de détection de fissures par ultrasons [38]

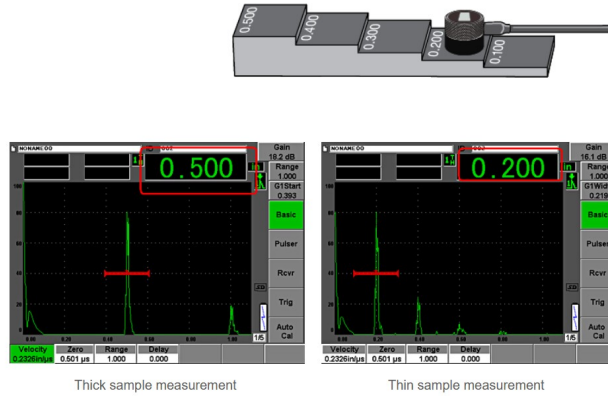
Le processus de détection de fissures se déroule de la manière suivante. Il faut tout d'abord connaître l'épaisseur de la fibre de verre étudiée. Cette information est généralement connue dans toutes les applications industrielles avant même de se soucier des fissures, lors de la conception du produit. On place ensuite la fibre de verre sous le capteur à ultrasons qui envoie des ondes ultrasonores. Puisque l'on place le capteur en contact de la fibre de verre, les ondes sont directement envoyées à l'intérieur du matériau. S'il n'y a pas de fissures, comme dans le cas de gauche dans l'image ci-dessus, les ondes traversent toute l'épaisseur de la fibre et lorsqu'elles atteignent la surface inférieure de l'autre côté, elles sont réfléchies. Cela est normal car : de la même manière que lorsqu'on envoie des ondes ultrasonores dans l'air, elles rebondissent contre la surface d'un mur, lorsqu'on les envoie directement dans la matière, elles rebondissent à la surface avec l'air. C'est d'ailleurs sur ce phénomène que repose la détection de fissures. Les ondes réfléchies reviennent donc en direction du capteur et y sont détectées. On peut donc tracer un graphique du signal reçu en fonction de la distance. En connaissant la vitesse du son dans la fibre de verre et en mesurant le temps

entre l'émission de l'onde et la réception des échos, on peut savoir à quelle distance du capteur les ondes ont été réfléchies. Sans fissures, cette distance correspond donc à l'épaisseur de la fibre, comme à gauche sur l'image ci-dessus, où le signal correspondant aux ondes réfléchies est positionné sur l'axe à une distance égale à l'épaisseur de la fibre. Mais si, comme à droite sur l'image ci-dessus, la fibre de verre présente une fissure interne, la distance de l'interface matière/air par rapport au capteur est plus petite que l'épaisseur. Donc les ondes sont réfléchies plus tôt et le signal montre alors que la distance est plus courte comme sur le graphique à droite de l'image [38]. On peut donc directement détecter sur le graphique la présence d'éventuelles fissures à l'intérieur de la fibre de verre.

L'avantage de la détection de fissures par ultrasons est qu'elle fait partie des méthodes de Contrôle Non Destructif ou CND. Comme leur nom l'indique, ces méthodes ont pour avantage de ne pas endommager le matériau étudié car elles ne nécessitent pas de le percer, découper ou d'en extraire un échantillon [39]. Cela rend leur utilisation très préférable dans un grand nombre de secteurs industriels de production. On comprend en effet assez vite la nécessité de contrôler ce qui est produit mais il serait contre-productif de l'endommager par la même occasion. C'est pour cela que les méthodes de CND telles que la détection de fissures par ultrasons ont été développées et sont utilisées dans l'exemple de la fibre de verre mais aussi les carrosserie de voitures, la tuyauterie servant au transport de substances ou les rails ferroviaires pour en citer quelques autres.

Ici, seules les ondes ultrasonores sont utilisées, qui sont inoffensives pour le matériau mais aussi plus sûres pour l'Homme si on les compare à des méthodes utilisant des produits chimiques ou la radiographie. De plus, la détection de fissures par ultrasons ne nécessite qu'une seule face d'accès au matériau puisque les ondes sont réfléchies. Elles peuvent donc être captées du même côté que celui où elles ont été émises. C'est un avantage car cela facilite la mise en place du dispositif en ayant moins de contraintes spatiales. [39]

Toutefois, la détection de fissures par ultrasons présente d'autres contraintes qu'il faut prendre en compte. La connaissance de la vitesse du son dans le matériau en est une. Le fait que les ondes ultrasonores se propagent dans la matière est ce qui rend le dispositif possible mais génère aussi ses contraintes. La vitesse des ondes ultrasonores dépend en effet du matériau dans lequel elles se propagent. Et comme nous l'avons vu précédemment, la vitesse du son dans le matériau est une donnée essentielle à connaître dans le processus de détection de fissures par ultrasons. C'est pourquoi il est hautement important d'effectuer un étalonnage de l'appareil pour chaque matériau et voire parfois pour un même matériau lorsque ses propriétés internes comme sa densité peuvent changer. Cela est typiquement fait en plaçant le capteur sur une pièce de ce matériau d'épaisseur précisément connue, et bien-sûr ne contenant pas de fissures, et en mesurant le temps nécessaire aux ondes pour traverser cette pièce [40]. On déduit alors de l'épaisseur, c'est-à-dire la distance, et du temps la vitesse du son dans le matériau. Pour un maximum de précision, il nous faut réaliser cette opération avec plusieurs épaisseurs connues comme montré sur la figure ci-dessous.



*Figure 16: Schéma étalonnage de l'appareil de mesure par ultrasons [40]*

Cette étape d'étalonnage peut constituer une réelle contrainte pour les applications industrielles car elle doit être effectuée pour chaque matériau. Elle nécessite donc d'avoir à disposition une pièce du matériau avec plusieurs épaisseurs précisément connues mais aussi un opérateur capable de réaliser l'étalonnage de l'appareil pour chaque matériau.

Malgré ces contraintes, la détection de fissures par capteurs ultrasons reste un dispositif vastement utilisé. Une fois l'étalonnage effectué, elle reste une méthode précise et fortement reproductible. Elle convient donc tout à fait aux applications industrielles comme notre exemple de la fibre de verre mais également dans d'autres domaines où ce système est performant une fois mis en place.

Au travers de ces deux exemples, nous avons vu que les capteurs à ultrasons peuvent être utilisés dans de nombreux cas et dans un large éventail de domaines industriels. La nature de leur fonctionnement apporte quelques défauts et contraintes mais est aussi à l'origine de leurs avantages qui expliquent leur abondante utilisation. C'est bien la nature des ondes ultrasonores mises en jeu par ces capteurs qui nous permet en effet de relever le niveau d'une cuve sans contact direct ou encore de détecter les fissures à l'intérieur de la fibre de verre. Mais nous avons aussi remarqué que les capteurs à ultrasons remplissent deux caractéristiques recherchées dans les applications industrielles. Ils sont simples d'installation et retournent des résultats fiables. Les capteurs à ultrasons sont donc très adaptés aux applications industrielles, mais ce n'est pas le seul domaine d'applications où ils sont utiles.



### 3.3.2. Applications médicales

L'utilisation des ultrasons dans le domaine médical remonte à plusieurs décennies mais c'est un secteur en évolution constante dans lequel la recherche est primordiale pour améliorer la capacité à traiter les maladies. Les ultrasons sont utilisés en médecine car il s'agit d'ondes non invasives et sans impacte néfaste pour le corps humain si l'utilisation est parfaitement contrôlée.

#### L'échographie

Le principe de l'échographie est d'émettre des ultrasons en direction des tissus ou organes à observer, puis de recueillir et d'analyser les échos obtenus. Ces échos sont caractérisés par la distance qu'ils ont parcourue et l'impédance (résistance électrique d'un matériau) des milieux sur lesquels ils ont rebondi. Si l'écho obtenu est faible, l'impédance du matériau est faible, celui-ci est alors représenté en noir. Un matériau de faible impédance correspond à un milieu liquide ou à un tissu mou. Si l'écho obtenu est fort alors l'impédance du matériau est forte et on l'observe en blanc. Un matériau de forte impédance correspond à un matériau solide comme les os. On utilise du gel lors d'échographie pour éviter les interférences avec l'air.



*Figure 17: Echographie d'un nouveau-né*

On a commencé à réaliser des échographies grâce à un balayage mécanique (1970). L'outil utilisé s'appelle un "palpeur" et correspond à une sonde émettrice-réceptrice d'ultrasons. Le résultat obtenu est une échographie en 2D. De nos jours, avec la médecine moderne, on utilise le balayage électronique : le palpeur est contrôlé par un moteur qui effectue un balayage angulaire, cela permet d'obtenir des images en temps réel avec 50 images/s.

De plus, on est maintenant capable de faire de l'échographie 3D : à l'aide de plusieurs sources, il est possible grâce à un traitement informatique de reconstituer un objet en 3 dimensions.





Figure 18:  
Echographe [41]



Figure 19: Sonde conexe [42]

Le futur de cette technologie nous amène à l'échographie 4D, qui consiste à observer une échographie 3D qui évolue au cours du temps. Cette technologie amènerait une précision et une vitesse d'acquisition sans précédent.

### L'échographie Doppler

L'échographie Doppler est utilisée dans un débitmètre, qui permet de réaliser des examens des vaisseaux sanguins. L'appareil détermine la vitesse et le sens des globules rouges dans le sang grâce à la mesure de la fréquence émise et réfléchi (permet d'obtenir une vitesse et un sens grâce à l'effet Doppler). En imagerie l'amplitude des signaux émis et de l'ordre de 1 MPa sur une période de une microseconde.

### Utilisation thérapeutique

L'utilisation des ultrasons à plus forte dose (1 MPa pendant plusieurs secondes) permet, sur une zone ciblée, de détruire des lésions bénignes (cellules non cancéreuses) ou malignes (cellules cancéreuses) grâce à un échauffement thermique.

Le traitement par ultrason classique s'appelle une HIFU (High Intensity Focalised Ultrasounds) et permet de détruire des cancers (foie et prostate), un fibrome utérin (tumeur bénigne) ou encore le glaucome (maladie de l'oeil résultante d'une élévation de la pression interne de l'oeil). L'avantage de la HIFU est qu'elle permet d'atteindre n'importe quel organe profond sans incision et sans dose limite. Cependant, elle ne permet pas d'atteindre certaines zones à cause de la présence des os qui bloquent les ondes ultrasonores.

Un deuxième traitement s'appelle la lithotripsie. Il est utilisé pour détruire des calculs rénaux (formation de pierre dans les reins dû à une accumulation de sel minéraux, leur taille peut aller jusqu'à plusieurs centimètres). Il consiste à émettre des ondes ultrasonores à intervalle régulier pour générer des bulles de gaz qui vont exploser à la surface du calcul. Ce dernier va ainsi se décomposer puis être évacué par voie naturelle.

Le dernier traitement est la phaco-émulsification. Elle utilise le même principe que la lithotripsie pour détruire le cristallin devenu opaque afin de traiter la cataracte.

## Enjeux

La médecine est un domaine d'étude en constante évolution. On essaye d'améliorer les performances des systèmes, les miniaturiser ou encore diminuer le coût des appareils. Les progrès technologiques permettront bientôt d'implanter des sondes ultrasonores pour avoir, en temps réel, des informations très précises sur notre corps. De plus, l'amélioration des techniques d'échographie permettra d'avoir jusqu'à 10 000 images par seconde et des informations sur la dureté des tissus.

Le perfectionnement de l'échographie Doppler, appelée ultrafast Doppler, permettra d'étudier des vaisseaux sanguins de plus en plus petits dans lesquels la technologie actuelle est inefficace pour obtenir des informations. De plus, elle permettra d'obtenir des informations sur les unités neurovasculaires (interface entre les artérioles (des petites artères) et les neurones) et ainsi détecter notamment chez les nouveau nés des maladies neurovasculaires.

Une nouvelle technologie émergente est la microscopie ultrasonore. Elle permet d'évaluer les capillaires sanguins qui sont d'une taille de l'ordre de quelque microns (10-6 mètres), et de détecter des bulles de gaz formé par les ultrasons pour cartographier les capillaires sanguins. Les ultrasons sont omniprésents dans la recherche, notamment en neurosciences, oncologie, pour lutter contre le diabète, et dans le domaine cardiovasculaire. Les ultrasons permettent d'identifier des maladies quand elles ne sont alors qu'au début dans les capillaires, avant qu'elles ne se propagent dans les gros vaisseaux.

## Nouvelles thérapies

Des recherches récentes essaient d'utiliser les ultrasons dans de nouveaux domaines. En psychiatrie, la neuromodulation ultrasonore est une alternative à la stimulation magnétique transcrânienne. Cette technique utilise des ondes électriques plus dangereuses que les ondes ultrasonores. Cela permettrait de traiter la dépression.

Les ultrasons pourraient aussi améliorer l'efficacité des médicaments. Après ingestion du médicament, le déclenchement d'ultrasons permet d'activer la capsule lorsqu'elle atteint l'organe ciblé. Cela serait très utile pour traiter le cancer.

La technologie ultrasonore sera omniprésente à l'avenir et permettra de réaliser 80% des examens médicaux.[43]

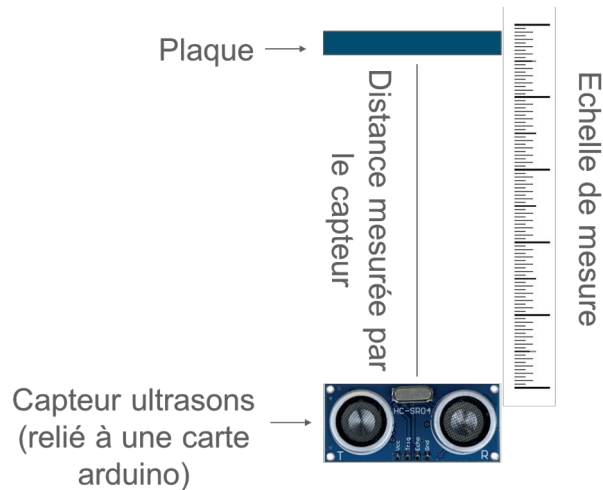
### 3.4. Expérimentations

L'objectif de cette partie est d'évaluer l'impact de la température et de l'humidité sur la vitesse du son dans l'air. Nous avons donc mis en place plusieurs expérimentations dans le but de comprendre le fonctionnement du capteur et pouvoir ensuite étudier l'impact des deux facteurs.

Pour chacune de nos expériences nous avons utilisé un capteur ultrason (Grove Ultrasonic Ranger V2.0) capable de détecter un obstacle dans un intervalle de 4 mètres avec une erreur de 1 centimètre. La fréquence ultrasonique de ce capteur est de 40 kHz (annexe 1).

#### 3.4.1. Erreur sur la mesure des distances

La première expérience que nous avons effectuée, a été de mesurer des distances connues avec le capteur (annexe 2) afin de pouvoir comparer la valeur de distance mesurée et la distance réelle. Pour ce faire, nous avons disposé un mètre pour placer le capteur à une distance connue. Nous reculons ensuite l'obstacle, en l'occurrence une plaque de bois, au départ tous les 5 cm puis tous les 20 cm une fois suffisamment éloigné du capteur.



*Figure 20: Schéma expérimental de la mesure de distance*

Ainsi, 21 distances, allant de 5cm à 360cm, ont été récupérées. Cette expérience a été répétée 5 fois afin de faire une moyenne. Sur le graphique ci-dessous, on peut visualiser l'écart obtenu pour chaque mesure :

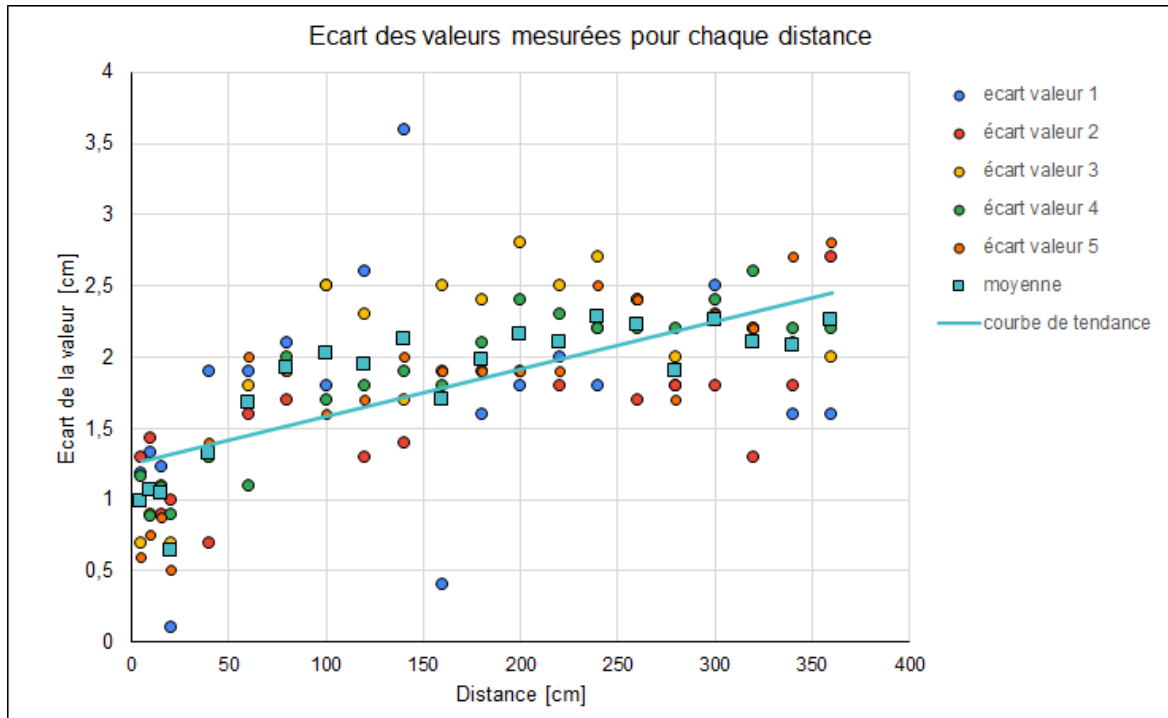


Figure 21: Ecart entre distance réelle et distance mesurée par le capteur

Il y a une assez grande différence entre la valeur exacte et celles obtenues. Toutefois, on remarque que le capteur est plus précis pour les courtes distances (de 5 à 50 cm). C'est pourquoi l'ensemble de nos expérimentations se feront dans cet intervalle. Cet écart peut être expliqué par plusieurs facteurs, le premier étant la valeur de l'erreur indiquée par le fabricant qui est de 1 cm à 2 cm. De surcroît, les prises de mesures ne sont pas les plus précises. Une enceinte hermétique ou encore une pièce vide auraient permis de diminuer les interférences potentielles. Enfin, le déplacement manuel du capteur et de la plaque a pu faire varier les valeurs obtenues.

Le graphique ci-dessous montre aussi que les valeurs expérimentales pour de grandes distances sont davantage éloignées des valeurs réelles. Elles sont cependant assez proches entre elles car l'écart type reste faible.

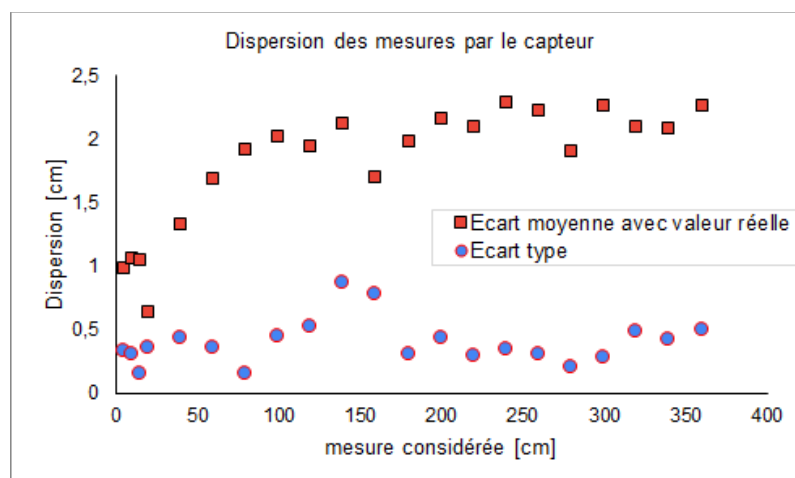


Figure 22: Dispersion des mesures par le capteur

### 3.4.2. Visualisation du signal sur oscilloscope

Par la suite nous avons effectué la chaîne de mesure suivante :

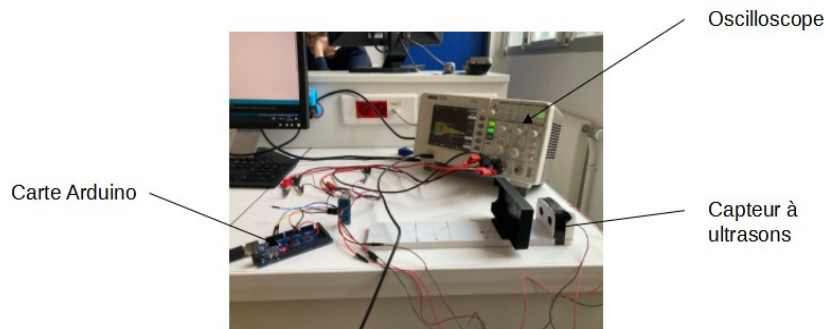


Figure 23: Photographie d'une chaîne de mesure

Le but de cette chaîne de mesure est d'étudier le principe d'émission et de réception des ondes ultrasonores par le biais d'un oscilloscope. Nous avons donc relié l'émetteur au channel 1 et le récepteur au channel 2 afin de visualiser les courbes respectives de l'onde sur l'écran. Après avoir récupéré les données transmises à l'oscilloscope grâce à l'aide de M. Mokrani, nous avons tracé ces courbes sur Excel :

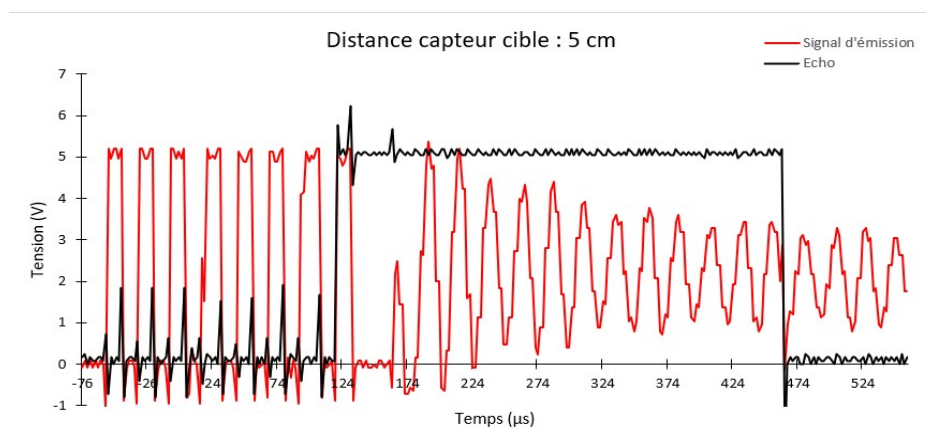


Figure 24: Emission et écho pour une distance de 5cm

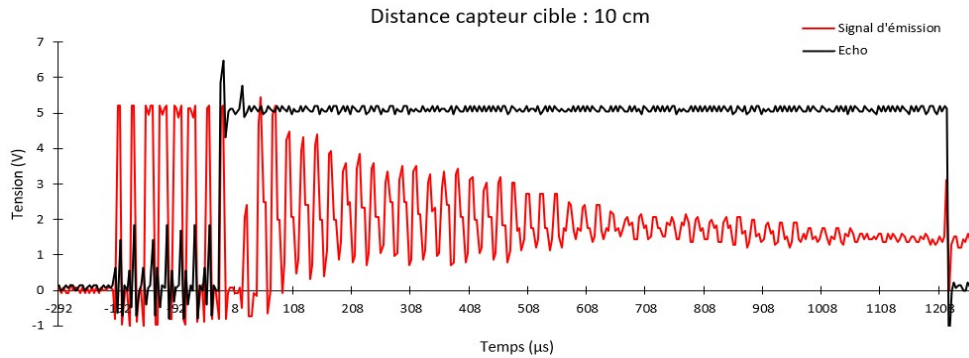


Figure 25: Emission et écho pour une distance de 10cm

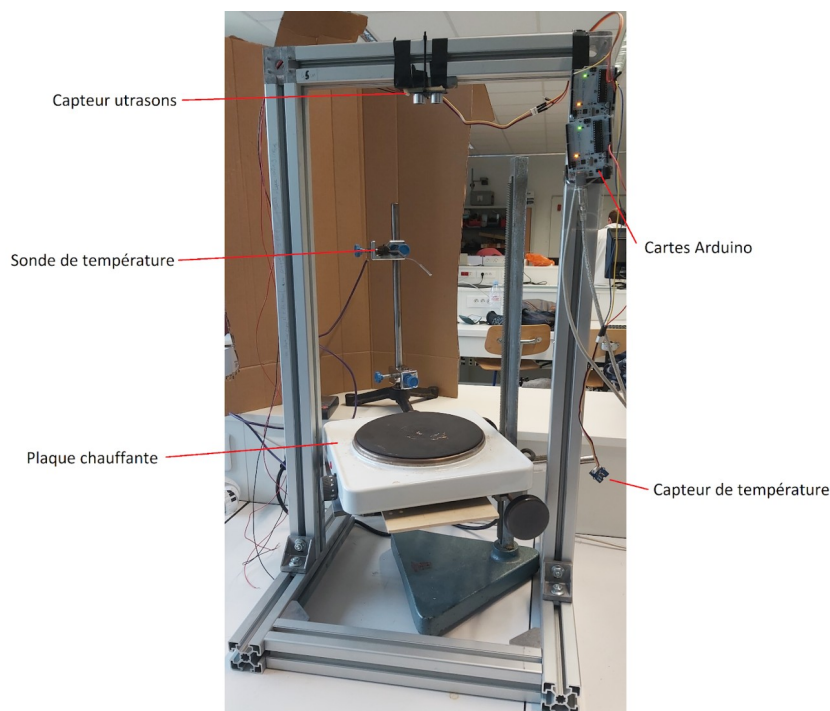
Le premier graphe représente les ultrasons émis par le capteur. On observe 8 “pics”, représentant les impulsions ultrasoniques de l’émetteur. Le deuxième graphe correspond à l’écho reçu, c’est-à-dire la durée que prend l’onde, à partir de son émission, pour atteindre le récepteur. [47] Nous avons par ailleurs observé qu’en modifiant la distance entre le capteur et le “mur” (plaque noire sur la photo sur laquelle l’onde se réfléchit), l’écho variait, ce qui est logique : plus la distance est grande plus l’onde mettra de temps à atteindre le récepteur. On peut ainsi mesurer le temps que l’onde met pour parcourir l’espace entre le capteur et l’obstacle rencontré.

### 3.4.3. Impact des grandeurs d’influence

Ces expériences nous ont donné les informations nécessaires à l’étude de l’impact de deux grandeurs d’influence sur la vitesse du son: la température et l’humidité. Pour mesurer une distance à l’aide de capteurs ultrasons, il faut utiliser la vitesse du son. Sa connaissance est primordiale lorsqu’il s’agit d’obtenir une mesure précise. Or, celle-ci dépend de plusieurs facteurs liés au milieu dans lequel se propagent les ondes sonores. Elle changera par exemple grandement entre un milieu solide, liquide ou gazeux. Les mesures étant réalisées dans l’air ambiant, nous nous intéresserons plus particulièrement à ce cas. Comme nous l’avons dit, la vitesse du son dans l’air dépend de plusieurs facteurs dont les plus notables sont la pression, la température et l’humidité. Puisque nous nous intéressons au cas de l’air ambiant, la pression de l’air peut être considérée comme constante et est proche de 1,013 Bar. On fera donc l’hypothèse que les changements de pressions influent peu sur la vitesse du son. Il aurait été intéressant de réaliser une expérience sur l’influence de la pression, mais l’utilisation d’une enceinte hermétique aurait été nécessaire. Nous allons donc mettre en évidence l’influence de la température sur la vitesse du son dans une première expérience, puis celle de l’humidité dans une seconde.

## Température

Notre expérience va consister à mettre en évidence l'influence de la température sur la vitesse du son dans l'air ambiant. Pour cela, nous avons mis en place le protocole suivant. Nous avons placé un capteur à ultrasons composé d'un émetteur et d'un récepteur à une hauteur fixe de 45 cm au-dessus d'une plaque chauffante à l'aide d'une structure métallique. Le montage réalisé est représenté sur la photo ci-dessous.



*Figure 26: Montage mettant en évidence l'influence de la température sur la vitesse du son*

Nous faisons ensuite monter la plaque à plusieurs niveaux de températures stables. Pour chaque niveau, nous mesurons grâce à une sonde de température la température de l'air au milieu du chemin que les ondes sonores parcourront, c'est-à-dire au milieu de la distance entre le capteur et la surface de la plaque. Juste après avoir mesuré la température, nous retirons la sonde de température du chemin et nous déclenchons le capteur à ultrasons. Comme montré dans l'annexe 3, nous l'avons programmé pour qu'il réalise 100 mesures du temps de parcours des ondes. Ce parcours est donc défini comme étant l'aller depuis l'émetteur jusqu'à la plaque, où les ondes sont renvoyées sous la forme d'écho jusqu'au récepteur, considéré comme le retour. Cela nous donne donc un aller-retour entre la plaque et le capteur. En divisant la distance parcourue, qui sera donc 90cm d'après cette définition, par le temps de parcours mesuré par le capteur, on obtient 100 mesures de la vitesse du son. Nous avons choisi dans notre programme de présenter les résultats d'une manière particulière pour faciliter leur exploitation par la suite. En effet, le programme fait en sorte d'afficher les 100 mesures de vitesse sur une même ligne et séparées par des point-virgules. Cela nous permet de placer les mesures dans un fichier de type CSV qui s'ouvre ensuite facilement sur tableur, où l'exploitation des mesures est simple.



Voici comment cette exploitation des mesures à été réalisée. Sur tableur, nous inscrivons sur chaque ligne la mesure de température que nous avons prise, puis les 100 mesures de vitesse qui ont été réalisées juste après. Nous calculons une valeur de vitesse mesurée en faisant la moyenne des 100 mesures de vitesse du son. C'est d'ailleurs pour cette raison que nous avons réalisé 100 mesures, car en prenant un grand nombre de mesures, la moyenne sera plus précise. Nous calculons aussi une valeur théorique de la vitesse du son en fonction de la température  $T$  par la formule  $v = \sqrt{\gamma \cdot R_s \cdot T}$ . Nous utilisons cette formule car il s'agit de la vitesse du son dans le cas où le milieu de propagation est un gaz parfait. Or dans notre cas, le milieu de propagation est l'air à la pression atmosphérique donc il peut être considéré comme un gaz parfait. De plus, on peut considérer que l'air est en majorité un mélange de diazote et de dioxygène qui sont des molécules diatomiques. L'air étant alors un gaz parfait diatomique, son coefficient de Laplace  $\gamma$  vaut 1,4. Nous pouvons aussi facilement trouver  $R_s$ , la constante spécifique d'un gaz parfait, en divisant la constante universelle des gaz parfaits  $R$  par la masse molaire du gaz. Pour l'air,  $R_s$  vaut donc toujours 287 Jkg-1K-1. Pour chaque température nous avons donc une valeur mesurée et une valeur théorique de la vitesse du son dans l'air. Nous pouvons les placer sur un graphique avec en abscisse la température et en ordonnée la vitesse pour pouvoir les comparer et étudier l'influence de la température sur la vitesse du son dans l'air.

Après avoir exploité les résultats de l'expérience sur tableur, nous obtenons le graphique suivant.

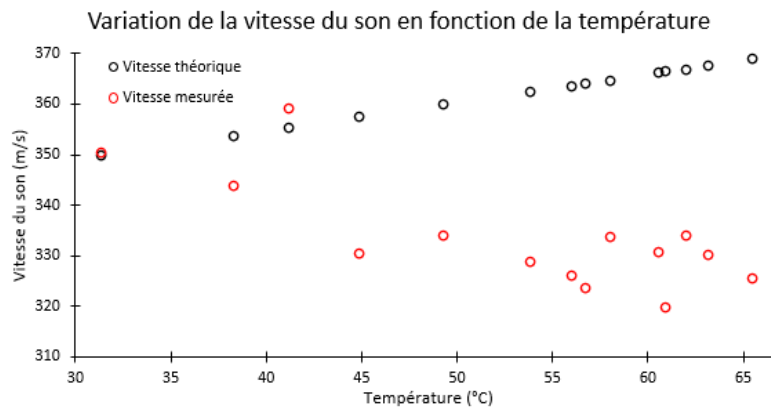


Figure 27: Vitesse du son en fonction de la température

Tâchons maintenant d'interpréter ces résultats. Nous pouvons tout d'abord remarquer que les valeurs théoriques et mesurées de la vitesse du son dans l'air sont du même ordre de grandeur avec un écart relatif autour des 10% pour les plus grands écarts, ce qui est rassurant quant à la cohérence entre la théorie et la réalité. On peut aussi constater que la vitesse mesurée ne reste pas constante et évolue lorsque la température est plus grande, montrant ainsi une réelle influence de la température sur la vitesse du son dans l'air. Cependant, nous remarquons que l'évolution de la vitesse du son en fonction de la température n'est pas du tout la même que celle que nous avons théoriquement calculée. Au lieu d'augmenter proportionnellement à la racine de la température, la vitesse mesurée semble diminuer pour les températures plus hautes, ce qui est contraire à la théorie. Plusieurs facteurs d'erreurs peuvent être responsables d'une telle différence. Nous les détaillerons par la suite. Mais nous pouvons déjà observer que l'écart entre la valeur



théorique et mesurée est plus grand pour les plus hautes températures, ce qui laisse supposer que ces facteurs d'erreurs s'aggravent pour des températures plus élevées.

L'interprétation de ces résultats nous a permis de nous rendre compte qu'ils n'étaient pas satisfaisants concernant l'évolution de la vitesse du son mesurée en fonction de la température. Nous avons donc décidé de réitérer l'expérience en utilisant un capteur à ultrasons différent dans l'objectif de potentiellement corriger un facteur d'erreurs dû au premier capteur à ultrasons et de comparer les résultats obtenus entre les deux capteurs. Le nouveau montage est représenté ci-dessous.

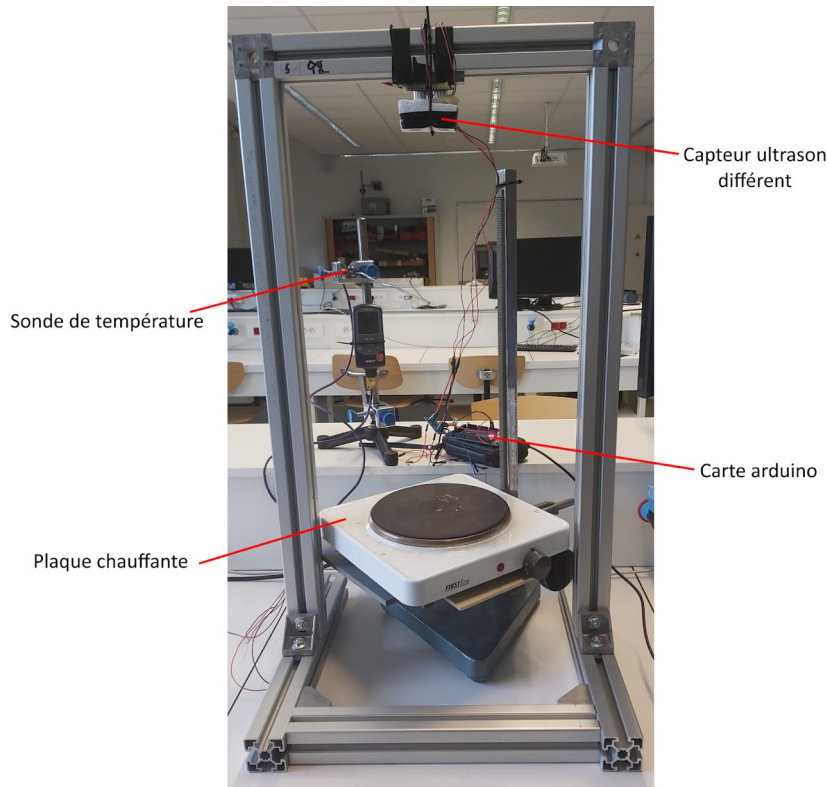


Figure 28: Montage mettant en évidence l'influence de la température sur la vitesse du son avec un autre capteur

Ce montage est semblable au précédent avec comme seule différence le nouveau capteur à ultrasons. Nous avons donc recommencé l'expérience en suivant le même protocole suivi de la même exploitation des données. La graphique obtenu est le suivant.

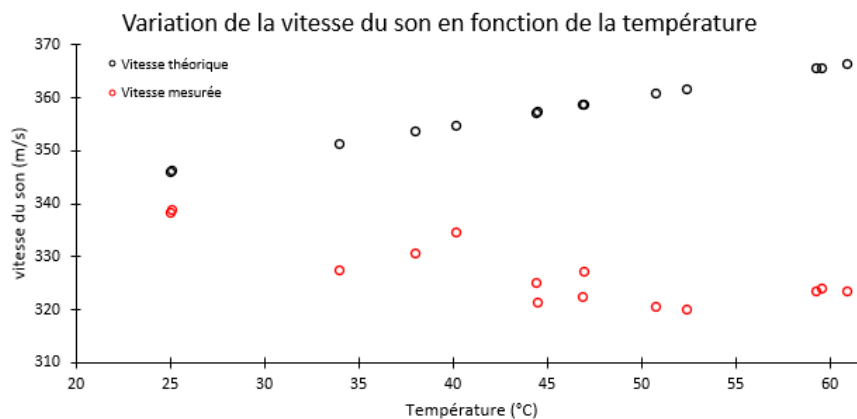


Figure 29: Vitesse du son en fonction de la température avec un nouveau capteur

Malheureusement, cette seconde expérience n'a pas réussi non plus à faire concorder l'évolution de la vitesse du son théorique et mesurée en fonction de la température. En comparant avec les résultats précédents, on peut noter quelques légères améliorations. La plus petite vitesse mesurée du son est par exemple plus haute que pour l'expérience précédente, ce qui est une amélioration étant donné que nos vitesses mesurées ont tendance à être trop basses. Et le plus grand écart relatif entre une valeur mesurée et sa valeur théorique est aussi plus petit mais reste autour des 10%. Nous observons pourtant encore une vitesse du son mesurée qui semble être plus basse pour une température plus haute, ce qui est en contradiction avec l'évolution théorique. Cela est gênant car la concordance entre la théorie et l'expérience est ce sur quoi se base la science. Nous devons alors nous pencher sur les facteurs d'erreurs responsables de cette différence.

En effet, de nombreux facteurs peuvent être la cause d'erreurs sur les prises de mesures expérimentales. Ainsi, pendant notre expérience visant à déterminer l'influence de la température, nous en avons pu en dénoter un certain nombre. On peut ainsi trouver une erreur sur le matériel utilisé. Par exemple les capteurs utilisés ont une erreur donnée par le fabricant et nous avons même pu observer une erreur sur l'installation de ceux-ci dans notre montage expérimentale. On peut aussi relever l'erreur sur la plaque chauffante utilisée, celle-ci ne chauffe pas uniformément en tous ses points et sa variation de température en fonction des niveaux de chauffage est assez disparate entre eux. Nous avons constaté une dernière erreur sur le matériel lié au capteur et à la prise de mesure de la température. La sonde de température, tout comme les capteurs, a une erreur d'indication de la température. De plus, la valeur obtenue au début de l'acquisition varie au cours du temps. Or les prises de mesures se font sur 10 secondes, pouvant ainsi indiquer une autre température à la fin de l'acquisition.

On ne peut négliger les erreurs liées aux expérimentateurs, ce qui peut faire varier les résultats, comme par exemple la mesure de distance avec un mètre ou bien encore le placement du capteur à la bonne inclinaison vers la plaque. Nous avons pu constater d'autres erreurs, telles que la formule utilisée ou bien même les branchements. En effet, nous utilisons dans notre programme une formule calculant la vitesse du son, or celle-ci est donnée pour un gaz parfait mais nous travaillons au sein de l'air ambiant dont nous avons seulement fait l'hypothèse qu'il était un gaz parfait. Nous avons donc une erreur sur les valeurs obtenues calculées par l'ordinateur, ce qui nous amène sur une nouvelle source d'erreurs qui est celle de la machine utilisée pour effectuer les calculs. Aucune machine n'est infaillible, et celles-ci présentent toujours des erreurs liées aux nombres machines ou même aux applications utilisées. Ainsi, comme dit précédemment, les branchements ont aussi une influence sur nos prises de mesures. Nous avons pu constater qu'un branchement mal connecté ou un peu tordu pouvait donner des valeurs aberrantes par la suite. Nous étions donc obligés de vérifier l'ensemble de ces paramètres à chaque mesure, afin que l'on soit dans des conditions optimales pour effectuer nos mesures, en minimisant les sources d'erreurs. Une autre source d'erreur que nous avons pu détecter au cours de cette expérience, est que les composants électroniques chauffent durant la prise de mesure, altérant ainsi leur fonctionnalité et pouvant créer des variations dans les résultats.

Nous avons notamment observé que l'augmentation de la température engendrait une augmentation de l'effet résistif du capteur, influant ainsi sur les mesures. On peut par exemple remarquer sur les graphiques suivants que les mesures de vitesse du son ont tendance à être plus écartées de la valeur théorique et plus basses, lorsque la température est plus importante.

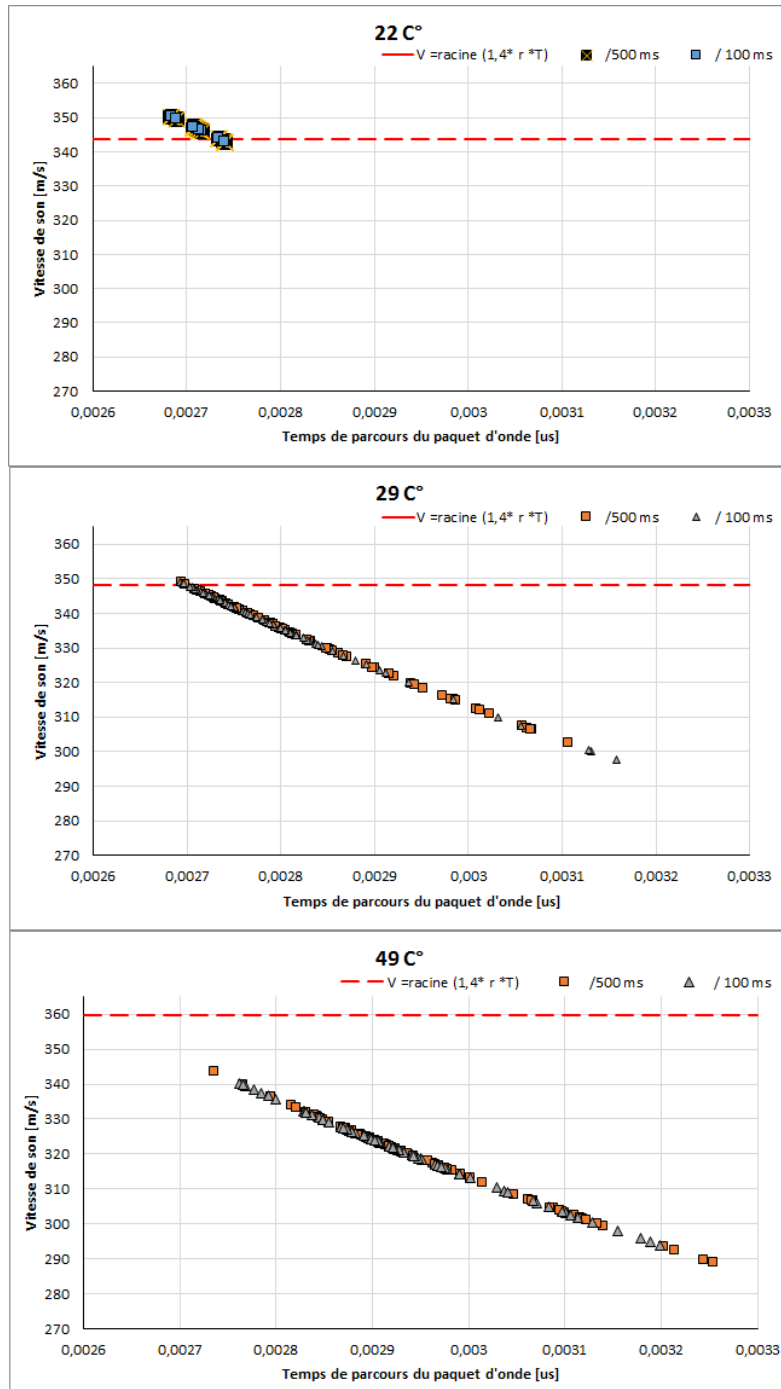


Figure 30: Effet de la température sur l'erreur du capteur

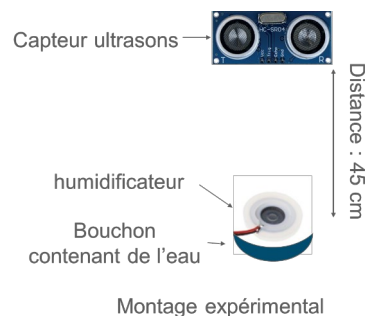
Toutefois la plus grande erreur à laquelle nous avons été confrontée au cours de l'expérience sur l'effet de la température est le problème des courants d'air. En effet, le moindre petit courant d'air faussait toute une prise de mesure. Nous avons pu détecter plusieurs sources de courants d'air, comme l'effet convectif de la plaque qui chauffe. Cet effet était attendu mais il rend instable la prise de mesure car la répartition n'est pas uniforme : les masses d'air chaud qui montent ne sont pas forcément les mêmes tout le long de l'acquisition. De même, nous créons des courants d'air lorsque nous nous déplaçons, et cela avait une influence notable sur la vitesse et la température. La température chutait en effet drastiquement lorsque nous effectuons des mouvements brusques, et variait lors de petits mouvements. Nous avons donc dû faire attention à ce facteur lors des prises de mesures, en limitant nos mouvements, et en essayant d'isoler le dispositif avec du carton pour empêcher les courants d'air de l'atteindre. Il était placé de sorte qu'il ne perturbe pas le parcours des ondes ultrasonores. Il en a été de même avec les courants d'air créés par l'environnement autour de nous : la ventilation, les jointures de fenêtres et de portes, ...

Nous avons donc découvert plusieurs sources d'erreurs pouvant altérer notre précision et nos résultats. C'est pourquoi nous avons parfois dû refaire les mesures expérimentales afin de pouvoir obtenir des valeurs expérimentales exploitables.

Au travers de cette expérience, nous avons donc mis en évidence l'existence de l'influence de la température sur la vitesse du son. Les résultats que nous avons obtenus n'étaient cependant pas en accord avec la formule théorique. Nous avons alors dû chercher à expliquer ces résultats en s'intéressant aux divers facteurs d'erreurs, ce qui constitue aussi une partie importante de la métrologie.

### Humidité:

Nous avons ensuite testé l'influence de l'humidité sur la vitesse des ondes ultrasonores. Pour cela, nous avons utilisé un capteur à ultrasons ainsi qu'un humidificateur composé d'un disque piézoélectrique. L'émission des ultrasons par ce disque fait entrer en vibration une lame métallique à une fréquence de résonance d'environ 1,65 MHz [48]. Sous cette plaque se trouve une coupelle contenant de l'eau, qui éclate en petites gouttes à ces vibrations[49]. Un nuage d'eau se forme donc au-dessus de l'injecteur. L'humidité en un point de ce nuage est stationnaire, la fréquence de résonance étant atteinte par la lame après un temps très court devant la durée de l'expérience. Nous avons effectué le montage sur le schéma ci-dessous en plaçant l'humidificateur sous le capteur:



Montage expérimental

**Figure 31: Schéma expérimental de l'impact de l'humidité**

Nous avons ainsi activé l'humidificateur afin de voir les variations de la vitesse des ultrasons, obtenue avec Arduino en calculant la distance, connue, divisée par le temps (annexe 4). Afin de comprendre ces variations, l'humidité et la température à plusieurs distances de l'humidificateur ont été prises.

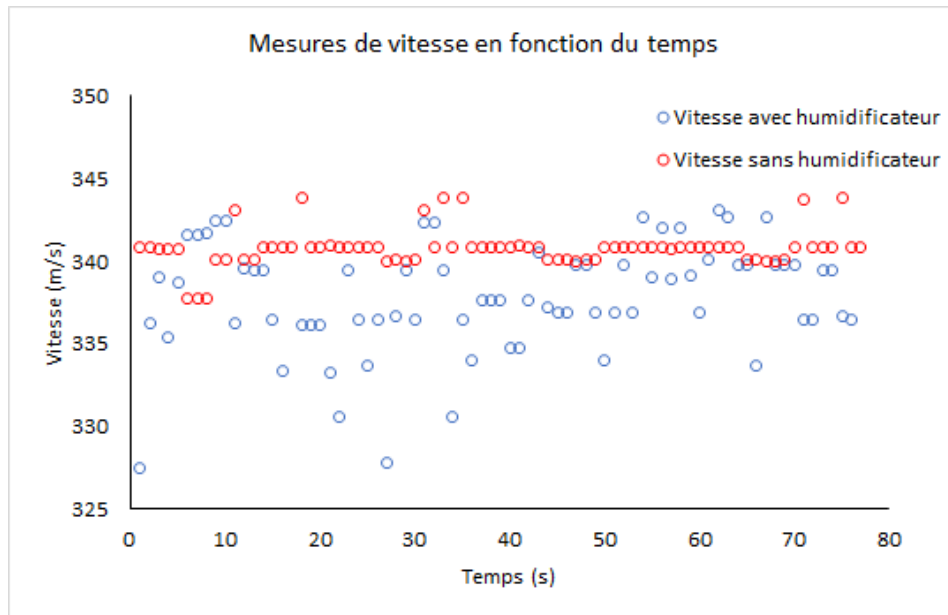


Figure 32: Mesure de la vitesse avec et sans humidificateur

Nous avons pris 80 mesures de vitesse avec l'humidificateur allumé et sans, nous remarquons une plus grande dispersion lorsqu'il est activé. Nous nous attendions à voir une augmentation de la vitesse dans l'air humide mais au contraire, celle-ci tend à diminuer. Pour mieux comprendre ce phénomène, l'humidité et la température à plusieurs distances de l'humidificateur ont été relevées.

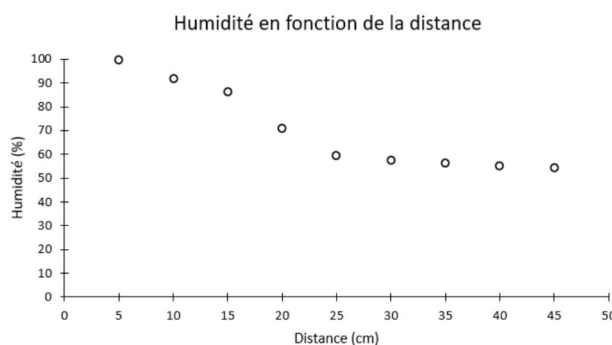


Figure 33: Humidité en fonction de la distance

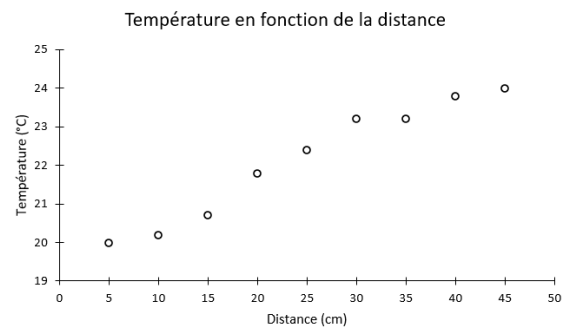


Figure 34: Température en fonction de la distance

On remarque donc qu'en s'approchant de l'humidificateur, le taux d'humidité est plus élevé et la température plus basse. Nous pouvons donc expliquer les variations de vitesse par l'influence de la température qui diminue au niveau de l'humidificateur et donc fait diminuer la vitesse de propagation des ultrasons. Ainsi, le milieu est très instable de par la présence d'humidité et la vitesse mesurée l'est donc aussi.

### 3.4.4. Chaînes de mesures

Dans chacune de nos expériences, nous avons mis en place une chaîne de mesures. C'est ce qui nous a permis d'obtenir des mesures à partir de capteurs. Nous avons ainsi pu apprivoiser la construction d'une chaîne de mesure, notamment utilisant une carte Arduino, au cours de notre projet. Cette partie résume ce que nous avons pu apprendre autour de quelques aspects.

Le principe général d'une chaîne de mesures est le suivant. Pour obtenir une mesure, il ne suffit pas d'alimenter un capteur. Il faut le contrôler. C'est là le rôle de la carte Arduino. En effet, la carte Arduino est chargée d'un programme qui lui décrit comment communiquer avec le capteur pour pouvoir en tirer des mesures. C'est donc bien la carte Arduino qui exécute le programme et non pas l'ordinateur auquel elle est branchée. Nous avons ainsi pu brancher la carte Arduino au port USB d'un oscilloscope uniquement pour l'alimentation et elle continuait d'exécuter son programme comme dans la figure suivante.



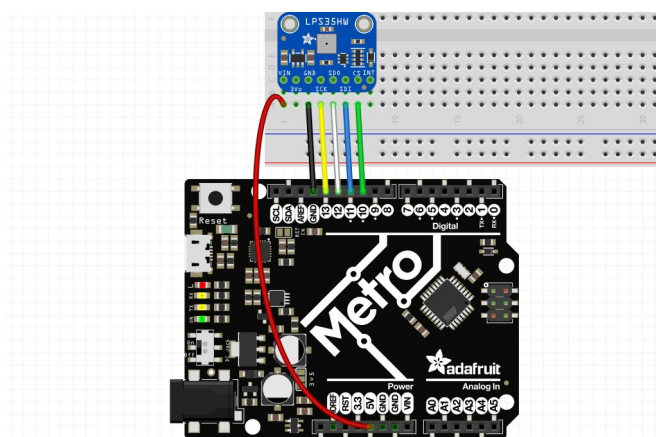
Figure 35: Chaîne de mesure de l'expérience de l'oscilloscope

En quoi brancher la carte Arduino à un ordinateur est-il alors utile ? En plus de pouvoir alimenter la carte, l'ordinateur a 2 autres fonctions. Il est premièrement le support sur lequel on rédige le fameux programme. Le logiciel Arduino nous permet de programmer dans un langage similaire au C/C++ puis de téléverser le programme compilé sur la carte. La particularité des programmes Arduino est qu'ils sont composés d'une partie ne s'exécutant qu'une fois au début, pratique pour initialiser le programme, et d'une partie s'exécutant en boucle pour pouvoir réaliser l'acquisition des mesures en temps direct. Nous avons donc appris à utiliser ce langage mais aussi à utiliser et télécharger depuis le catalogue des bibliothèques quand le capteur le requiert. La deuxième fonction de l'ordinateur est aussi de pouvoir afficher et récupérer les mesures du capteur grâce au Moniteur série présent sur le logiciel. Mais il est tout à fait possible de récupérer des résultats sans brancher la carte sur un ordinateur comme c'est le cas sur la figure ci-dessus où l'oscilloscope récupère la tension sur des fils soudés au capteur.



Il nous faut maintenant parler des branchements à réaliser sur une chaîne de mesures. Pour la carte, nous pouvons utiliser un câble USB pour l'alimenter et communiquer avec l'ordinateur si besoin, mais nous pouvons aussi l'alimenter en utilisant le connecteur Jack sur la carte. Pour le capteur, nous devons le relier à la carte Arduino en utilisant plusieurs fils. Les capteurs sont généralement munis d'une connectique où brancher les fils qui ont chacun un rôle. La carte est munie d'une multitude de "pins" ayant chacun un rôle et un nom (par exemple A0). Notre but est alors de savoir quel fil brancher sur quel pin. 2 de ces fils sont forcément dédiés à l'alimentation du capteur : 1 pour apporter la tension donc à brancher sur le pin 5V ou 3,3V selon la spécification du capteur, et 1 à relier à la masse correspondant à un pin GND sur la carte. Les autres fils peuvent servir à commander le capteur ou à recevoir son signal. Par exemple, pour un capteur à ultrasons, il est important de le commander pour lui ordonner d'envoyer une courte impulsion. Pour cela nous utilisons généralement un fil branché sur un pin "digital" que l'on définit dans le programme comme "output" et nous pouvons alors lui appliquer une tension haute ou basse pour communiquer l'ordre d'actionner ou d'éteindre l'émetteur à ultrasons. Les fils servant à recevoir le signal du capteur sont à brancher sur un pin digital ou analogique défini comme "input". Le signal reçu de la part du capteur est en fait sous forme de tension. Si on utilise un pin digital, elle sera convertie en une série de 0 et de 1 par un Convertisseur Analogique-Numérique, tandis que les pin analogiques récupèrent directement cette tension. Dans tous les cas, cette tension est ensuite convertie en la grandeur mesurée dans le programme grâce à la documentation du capteur.

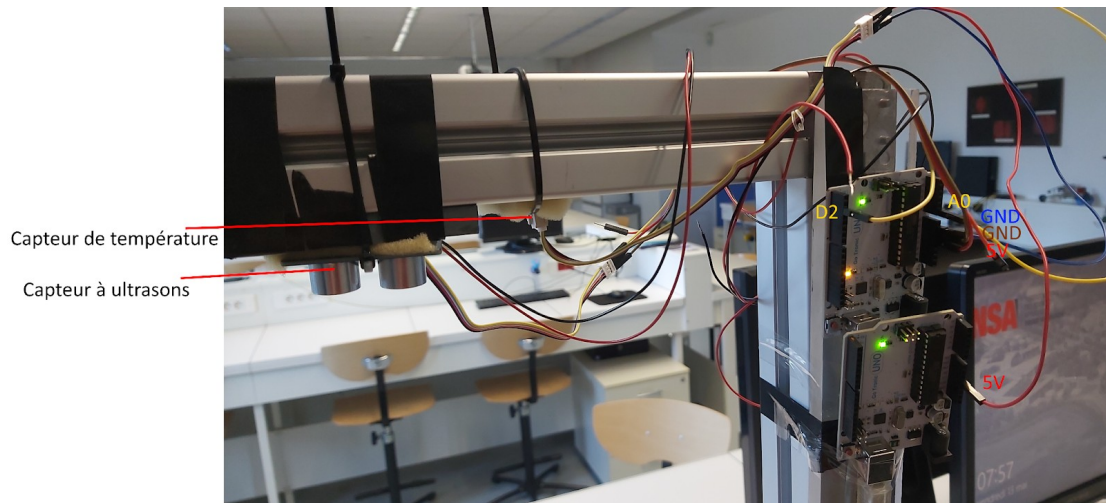
En utilisant ce principe que nous avons maintenant compris, nous avons construit d'autres chaînes de mesures que nous n'avons finalement pas utilisées dans nos expériences. La figure suivante montre l'une d'entre elles.



*Figure 36: Branchements entre le capteur de pression et l'arduino [50]*

Cette chaîne de mesures utilise un capteur de pression et de température combiné. Elle est intéressante à commenter car ses branchements sont liés à un protocole de communication avec la carte Arduino. La documentation du capteur nous a en effet indiqué de télécharger sur le catalogue Arduino une bibliothèque spécifique au capteur qui utilise un protocole de communication appelé SPI.

Une dernière chaîne de mesures que nous avons réalisée est représentée ci-dessous.



*Figure 37: Montage à double carte arduino, capteur de température et ultrasonore*

Cette chaîne est assez conséquente car elle comprend 2 capteurs et 2 cartes Arduino. Ici nous utilisons le pin D2 pour commander et recevoir le signal du capteur à ultrasons en le définissant comme output puis input dans le programme. Le signal du capteur de température est reçu sur le pin A0. Nous utilisons 2 cartes pour alimenter les 2 capteurs en 5V mais seule la carte du haut exécute un programme. C'est sur cette carte que sont reçues les mesures des 2 capteurs donc nous pouvons avoir accès aux 2 mesures en temps réel avec 1 seul programme. Puisque le signal est une tension, il faut aussi faire attention à ce que la masse des capteurs soient sur la même carte que les pins de signal pour avoir une mesure précise car une tension est une différence de potentiels et le potentiel de la masse d'une carte peut-être différent de celui de l'autre donc il faut faire la différence de potentiels sur la même carte.

En nous documentant et en expérimentant, ce projet a donc été aussi pour nous l'occasion d'apprendre et de se familiariser avec les notions et la construction d'une chaîne de mesure utilisant une carte Arduino.



#### 4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Après avoir étudié et découvert l'histoire des ondes sonores, nous avons pu comprendre leur fonctionnement, et les nombreux domaines d'applications de ces dernières. Nous avons ainsi pu observer et caractériser les différentes ondes sonores après les avoir définies, nous permettant ainsi de mieux saisir différents types d'ondes sonores comme les infrasons, les ultrasons ou bien même les ondes audibles. Nous avons constaté que le fonctionnement des ondes sonores pouvait différer en fonction du milieu dans lequel elles-ci sont transmises : dans le vide, dans un gaz ou bien même dans un liquide par exemple.

Dans un second temps nous avons pu étudier le principe de fonctionnement des capteurs à ultrasons ainsi qu'un des phénomènes physiques lié à son activité : la piézoélectricité. De nombreuses notions ont été découvertes comme les différentes zones de travail, les milieux de propagations ou bien encore les différentes zones de détection. Cela nous a permis de bien comprendre l'effet piézoélectrique qui se cachait derrière le bon fonctionnement des capteurs à ultrasons. Nous avons ainsi découvert la composition d'un capteur à ultrasons ( matériau piézoélectrique, diaphragme capteur composite, ...).

Par ailleurs, nous avons étudié différents domaines d'applications des ultrasons au sein de la vie de tous les jours, que ce soit dans le domaine de l'industrie ou le domaine médical, nous permettant d'avoir des exemples concrets sur l'utilisation des ondes ultrasonores. Nous apportant des notions que nous avons pu mettre en œuvre dans nos expériences effectuées par la suite dans le but d'obtenir la vitesse du son.

Nous avons également pu approfondir nos expériences en faisant varier les différents facteurs environnementaux nous entourant : la température, l'humidité et nous avons envisagé de faire varier la pression. Finalement, on a pu mettre en évidence l'impact de la température et de l'humidité sur la vitesse du son, malgré une différence entre l'évolution théorique et celle que nous avons obtenue expérimentalement. Cela nous a permis d'étudier les causes de cette différence, facteur primordial de la métrologie.

Ce projet nous a permis tout d'abord, en tant que futurs ingénieurs, d'effectuer un travail de groupe, se déroulant d'une bonne manière par une répartition précise des tâches au sein de l'équipe, renforçant notre travail collectif. Nous avons pu assimiler de nombreuses connaissances sur le sujet des ondes sonores et ultrasonores, et sur le fonctionnement des capteurs à ultrasons. Tout cela s'est fait par des recherches effectuées dans des revues scientifiques et des sites internet. Ce projet nous a aussi apporté une maîtrise de l'outil informatique par le biais des différentes expériences opérées. Durant le projet, nous nous sommes familiarisés avec la métrologie, nous permettant d'obtenir de bonnes bases expérimentales.

Dans une perspective future, le projet ouvre de nombreuses expériences que nous n'avons pas pu traiter par manque de temps. Une multitude de domaines de transmission des ondes pourraient être étudiés comme différents gaz ou bien même des liquides. Il aurait été intéressant d'effectuer nos expériences dans une chambre anéchoïque. Un grand nombre de ces facteurs seraient à étudier afin de déterminer leur influence sur la propagation des ondes ultrasonores. On peut retenir la pression, la composition des

matériaux ou encore leur densité. Ce sont autant de possibilités d'ouverture et d'approfondissement de notre projet.

## 5. BIBLIOGRAPHIE

- [1] « Acoustique ». *Wikipédia*, <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Acoustique&oldid=190759193>. [Consulté le 18 mars 2022]
- [2] BRUNEAU, Michel. *SONS Production et propagation des sons*. <http://www.universalis-edu.com/authentification/>. [Consulté le 25 février 2022]
- [3] Baskevitch, François. « Summary ». *Revue d'histoire des sciences*, vol. 60, no 2, 2007, p.387-418. [www.cairn.info](http://www.cairn.info), <https://www.cairn.info/revue-d-histoire-des-sciences-2007-2-page-387.htm>.
- [4] « Vitesse du son ». *Wikipédia*, [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Vitesse\\_du\\_son&oldid=191656344](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Vitesse_du_son&oldid=191656344). [Consulté le 18 mars 2022]
- [5] Imagerie et ultrasons au 20e siècle. (2009). *Journée Française de Radiologie*. [http://rontgen.sfrnet.org/Site\\_Web\\_SFR/Societes\\_dOrganes/PostersPDF/PosterSIU.pdf](http://rontgen.sfrnet.org/Site_Web_SFR/Societes_dOrganes/PostersPDF/PosterSIU.pdf)
- [6] Woo, J. (2008). *A short History of the development of Ultrasound in Obstetrics and Gynecology*. <http://www.cfef.org/archives/bricabrac/histoiredesultrasons.pdf>
- [7] Bok, J., & Kounelis, C. (2006). Paul Langevin (1872-1946) - De la butte Montmartre au Panthéon : parcours d'un physicien d'exception. *Reflets de La Physique*, 1, 14–16. <https://doi.org/10.1051/refdp/2006007>
- [8] *Karl Dussik, pioneer in Ultrasound*. <https://www.ob-ultrasound.net/dussikbio.html>. [Consulté le 10 mars 2022.]
- [9] Dufour, T. (2019). *LES ONDES SONORES*. [https://www.lpp.polytechnique.fr/IMG/pdf/1.\\_ondes\\_acoustiques\\_new.pdf](https://www.lpp.polytechnique.fr/IMG/pdf/1._ondes_acoustiques_new.pdf)
- [10] Leluc, C. (n.d.). *LES ONDES*. Retrieved June 1, 2022, from [http://dpnc.unige.ch/ams/leluc/pgb/pdf/pgb0405\\_11.pdf](http://dpnc.unige.ch/ams/leluc/pgb/pdf/pgb0405_11.pdf)
- [11] Ouchtati, A. (n.d.). *Sons et Ultrasons, Applications - échographie et Doppler*. [https://fac.umc.edu.dz/vet/documents/Cours%20et%20Td/Sons\\_Ultrasons.pdf](https://fac.umc.edu.dz/vet/documents/Cours%20et%20Td/Sons_Ultrasons.pdf)
- [12] *L'Oxygénothérapie HyperBare – Les amis du centre de médecine hyperbare de Toulouse*. <http://www.amhyperbare.fr/wordpress/loxygenotherapie-hyperbare/>. [Consulté le 2 juin 2022.]
- [13] « Le fonctionnement de votre oreille ». Unisson, <https://www.laboratoires-unisson.com/fonctionnement-systeme-auditif.html>. [Consulté le 02 juin 2022.]

[14] *Les sons : fréquence, intensité et perception - Cours de 2nde.* <https://www.schoolmouv.fr/cours/les-sons-frequence-intensite-et-perception/fiche-de-cours>.

[Consulté le 2 juin 2022.]

[15] « L'audition chez le chien ». *Animaux Santé*, <https://www.animauxsante.com/conseil/soins-et-hygiene-l-audition-chez-le-chien/>. [Consulté le 20 mai 2022.]

[16] « Vitesse du son : définition et explications ». *Techno-Science.net*, <https://www.techno-science.net/definition/1282.html> [Consulté le 19 mai 2022]

[17] : cfaury. *Les capteurs – Sciences de l'Ingénieur*. <https://si.blaise-pascal.fr/1t-les-capteurs/>. [Consulté le 10 mai 2022]

[18] : *Capteurs à ultrasons / Principe / microsonic - Capteur à ultrason.* <https://www.microsonic.de/fr/support/capteurs-%C3%A0-ultrasons/principe.htm>. [Consulté le 11 mars 2022]

[19] Création personnelle de Vincent Dubreuil, inspiré par le site de microsonic - <https://www.microsonic.de/fr/support/capteurs-%C3%A0-ultrasons/principe.htm>

[20] *Effet piézoélectrique.* <https://www.kistler.com/fr/glossaire/terme/effet-piezoelectrique/>. [Consulté le 25 mars 2022]

[21] *Bases technologiques de la céramique piézoélectrique.* <https://www.ceramtec.fr/materiaux-ceramiques/ceramique-piezoelectrique/bases/>. [Consulté le 11 mai 2022]

[22] *Les matériaux piézoélectriques constitution propriétés et applications*, Guy Feuillard, cours à l'INSA Centre Val de Loire [Consulté le 11 mai 2022]

[23] *PZT.* <http://www.physique-et-matiere.com/pzt.php>. [Consulté le 25 mars 2022]

[24] *Piézoélectricité*, <http://www.physique-et-matiere.com/piezoelectricite.php> [Consulté le 25 mars 2022]

[25] « Ultrason ». *Wikipédia*, 5 novembre 2021. *Wikipedia*, <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Ultrason&oldid=187746297>. [Consulté le 25 mars 2022]

[26] *Capteurs à ultrasons / Consignes de montage / microsonic - Capteur à ultrason.* <https://www.microsonic.de/fr/support/capteurs-%c3%a0-ultrasons/consignes-de-montage.htm> [Consulté le 20 mars 2022]

[27] TRONIC, GO. « Télémètre à ultrasons Grove 101020010 ». *GO TRONIC*, <https://www.gotronic.fr/art-telemetre-a-ultrasons-grove-101020010-18976.htm> [Consulté le 11 mars 2022]

- [28] « Capteurs à ultrasons : Questions fréquentes (FAQ) ». *Banner Engineering*, <https://www.bannerengineering.com/fr/fr/company/expert-insights/ultrasonic-sensors-101.html> [Consulté le 11 mars 2022]
- [29] Lycée Robert Garnier. (2011). *Les capteurs*. [http://lgt.garnier.free.fr/espace\\_ee\\_fichiers/capteurs/capteurs.pdf](http://lgt.garnier.free.fr/espace_ee_fichiers/capteurs/capteurs.pdf) [Consulté le 19 mai 2022]
- [30] *Dynamique du front d'onde* | Olympus IMS. <https://www.olympus-ims.com/fr/ndt-tutorials/transducers/wave-front/>. [Consulté le 19 mai 2022]
- [31] *Comprendre les capteurs à ultrasons*, Digi-Key, par Jeff Smoot. <https://www.digikey.fr/fr/articles/understanding-ultrasonic-sensors> [Consulté le 18 mars 2022]
- [32] « *Faits intéressants / Applications / microsonic* » - *Capteur à ultrason*. <https://www.microsonic.de/fr/support/faits-interessants/applications.htm>. Consulté le 10 mai 2022.
- [33] SICK. (2013). *Capteurs à ultrasons mesure polyvalente et précise avec les Capteurs à ultrasons de sick*. [https://www.tecnoland.fr/wp-content/uploads/2017/05/CapteurDistance\\_UM30\\_UM18\\_UM12\\_UC30\\_UC12\\_UC4.pdf](https://www.tecnoland.fr/wp-content/uploads/2017/05/CapteurDistance_UM30_UM18_UM12_UC30_UC12_UC4.pdf)
- [34] Parmantier, Y., & Kratz, F. (2009). *Capteurs-Principes de constitution*. <https://www.techniques-ingenieur.fr/>
- [35] « *Méthodes de mesure de niveau et avantages* » - Bürkert. <https://www.burkert.fr/fr/Services-et-Assistance/Assistance/Glossaire/Mesure-de-niveau>. [Consulté le 10 mai 2022.]
- [36] « *Bien choisir un capteur de niveau* ». *Guides d'achat DirectIndustry*, 29 août 2019, <https://guide.directindustry.com/fr/bien-choisir-un-capteur-de-niveau/>.
- [37] *Capteurs à ultrasons / Principe / microsonic - Capteur à ultrason*. <https://www.microsonic.de/fr/support/capteurs-%C3%A0-ultrasons/principe.htm>. [Consulté le 10 mai 2022.]
- [38] *Détection des fissures laminaires dans la fibre de verre à l'aide des ultrasons conventionnels*. <https://www.olympus-ims.com/fr/laminar-cracking-in-fiberglass-1/>. [Consulté le 10 mai 2022.]
- [39] *Foire aux questions sur le contrôle non destructif par ultrasons*. <https://www.olympus-ims.com/fr/ultrasonic-testing-faqs/>. [Consulté le 10 mai 2022.]
- [40] *4.2 Procédure de configuration typique pour l'inspection avec une sonde de contact droite* | Olympus IMS. <https://www.olympus-ims.com/fr/ndt-tutorials/flaw-detection/straight-beam-contact/>. [Consulté le 10 mai 2022.]
- [41] <https://www.eloi-echographie.com/wp-content/uploads/2018/04/Appareil-dEchographie-Siemens-Image-Biplan.jpg>

[42] Pourcelot, L. (2003). *STENT DE LA CAROTIDE INTERNE*. <http://e2phy.in2p3.fr/2002/presentations/pourcelot.pdf>

[43] « Ultrasons biomédicaux · Inserm, La science pour la santé ». *Inserm*, <https://www.inserm.fr/dossier/ultrasons-biomedicaux/>. [Consulté le 6 mai 2022.]

[44] *La révolution ultrasonore*. *www.youtube.com*, <https://www.youtube.com/watch?v=8vvimRV6PNE>. [Consulté le 6 mai 2022.]

[45] « Ultrason ». *Wikipédia*, 5 novembre 2021. *Wikipedia*, <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Ultrason&oldid=187746297>.

[46] *[Comment ça marche] Qu'est-ce que l'effet Doppler?* *www.youtube.com*, <https://www.youtube.com/watch?v=V2cyYa07j4I>. [Consulté le 6 mai 2022.]

[47] *Mesurer la célérité d'un son (première générale) — Documentation Microcontrôleurs & Sciences physiques*. [https://physique-microcontrôleurs.readthedocs.io/fr/latest/4\\_lycee/3\\_premiere\\_vitesse\\_son.html](https://physique-microcontrôleurs.readthedocs.io/fr/latest/4_lycee/3_premiere_vitesse_son.html). [Consulté le 8 juin 2022.]

[48] *Nébulisateur piézoélectrique*. <https://forums.futura-sciences.com/electronique/661712-nebulisateur-piezoelectrique.html>. [Consulté le 8 juin 2022.]

[49] Dutille, Marion. « Comment fonctionne un humidificateur d'air et pourquoi est-il utile ? » *Les Dénicheurs*, 15 juillet 2018, <https://lesdenicheurs.net/blog/fonctionnement-humidificateur-dair/>.

[50] « Adafruit LPS33/LPS35 Water Resistant Pressure Sensor ». *Adafruit Learning System*, <https://learn.adafruit.com/lps35hw-water-resistant-pressure-sensor/arduino>. [Consulté le 9 juin 2022.]

[51] *Grove - Ultrasonic Ranger - Seeed Wiki*. [https://wiki.seeedstudio.com/Grove-Ultrasonic\\_Ranger/](https://wiki.seeedstudio.com/Grove-Ultrasonic_Ranger/). [Consulté le 9 juin 2022.]

## 6. ANNEXES

### 6.1. Documentation technique

Parameter	Value/Range
Operating voltage	3.2~5.2V
Operating current	8mA
Ultrasonic frequency	40kHz
Measuring range	2-350cm
Resolution	1cm
Output	PWM
Size	50mm X 25mm X 16mm
Weight	13g
Measurement angle	15 degree
Working temperature	-10~60 degree C
Trigger signal	10uS TTL
Echo signal	TTL

*Annexe 1: Spécifications du capteur ultrasonore [51]*

## 6.2. Listings des programmes réalisés

```
int pingPin = 2;
float v=331.5+0.6*20; // m/s //

void setup()
{
  Serial.begin(115200);
}

float distanceCm(){
  // send sound pulse
  pinMode(pingPin, OUTPUT); //
  digitalWrite(pingPin, LOW);
  delayMicroseconds(3); //
  digitalWrite(pingPin, HIGH);
  delayMicroseconds(5); //
  digitalWrite(pingPin, LOW);

  // listen for echo
  pinMode(pingPin, INPUT);
  float tUs = pulseIn(pingPin, HIGH); // microseconds //
  float t = tUs / 1000.0 / 1000.0 / 2; // s //
  float d = t*v; // m //
  return d*100; // cm
}

void loop()
{
  float d=distanceCm(); //
  Serial.println(d, DEC); //

  delay(200); // ms //
}
```

*Annexe 2: Programme de mesure de distances*



```

/*
 * Ultrasonic Sensor HC-SR04
 *
 * Ultrasonic sensor Pins:
 * VCC: +5VDC
 * Trig : Trigger (INPUT) - Pin30
 * Echo: Echo (OUTPUT) - Pin 31
 * GND: GND
 */

int trigPin = 30;    // Trigger
int echoPin = 31;   // Echo
long duration, cm;

int i; // ENTIER utilisé dans la boucle pour réaliser 100 mesures

void setup() {
  //delayMicroseconds(50);
  //Serial Port begin
  Serial.begin (115200);
  //Define inputs and outputs
  pinMode(trigPin, OUTPUT);
  pinMode(echoPin, INPUT);

  //}
  //void loop() {
  // On effectue TOUT le programme dans la fonction SETUP car on veut 1 seule fois 100 mesures

  for(i=0; i<100; i++){
    // The sensor is triggered by a HIGH pulse of 10 or more microseconds.
    // Give a short LOW pulse beforehand to ensure a clean HIGH pulse:
    digitalWrite(trigPin, LOW);
    delayMicroseconds(5); //NORMALEMENT 5
    digitalWrite(trigPin, HIGH);
    delayMicroseconds(10); //NORMALEMENT 10
    digitalWrite(trigPin, LOW);
    // Read the signal from the sensor: a HIGH pulse whose
    // duration is the time (in microseconds) from the sending
    // of the ping to the reception of its echo off of an object.
    pinMode(echoPin, INPUT);
    long duration = pulseIn(echoPin, HIGH);

    // Convert the time into a distance //PAS NECESSAIRE car la formule utilise une vitesse constante
    //double cm = ((duration) / 29.186);    // Divide by 29.1 or multiply by 0.0343

    //CALCUL de la VITESSE (en m/s) à partir du temps de parcours
    double vitesse = 0.90*1000000/duration;

    //CALCUL de la TEMPERATURE par la formule  $\sqrt{r*Rs*T}$ . PAS NECESSAIRE car on la mesure à la sonde de temperature
    //long TEMPERATURE = (pow(vitesse,2)/(287*1.4))-273.15;

    //AFFICHAGE pour vérification en direct
    /*Serial.print(duration);
    Serial.print(" us, ");

    Serial.print(cm);
    Serial.print(" cm, ");

    Serial.print(vitesse);
    Serial.print(" m/S, ");

    Serial.print(TEMPERATURE );
    Serial.print(" C°, ");
    */
    //AFFICHAGE pour exploitation CSV
    Serial.print(vitesse);
    Serial.print(";");

    delay(100);
  } //FIN de la boucle FOR
  Serial.println();

  delay(250);
}

void loop() {}

```

### Annexe 3: Programme expérience influence de la température

```

/*
 * Ultrasonic Sensor HC-SR04
 *
 *   Ultrasonic sensor Pins:
 *   VCC: +5VDC
 *   Trig : Trigger (INPUT) - Pin30
 *   Echo: Echo (OUTPUT) - Pin 31
 *   GND: GND
 */

int trigPin = 11;    // Trigger
int echoPin = 13;   // Echo
long duration, cm;

void setup() {
  //delayMicroseconds(50);
  //Serial Port begin
  Serial.begin (115200);
  //Define inputs and outputs
  pinMode(trigPin, OUTPUT);
  pinMode(echoPin, INPUT);
}

void loop() {
  // The sensor is triggered by a HIGH pulse of 10 or more microseconds.
  // Give a short LOW pulse beforehand to ensure a clean HIGH pulse:
  digitalWrite(trigPin, LOW);
  delayMicroseconds(5); //NORMALEMENT 5
  digitalWrite(trigPin, HIGH);
  delayMicroseconds(10); //NORMALEMENT 10
  digitalWrite(trigPin, LOW);

  // Read the signal from the sensor: a HIGH pulse whose
  // duration is the time (in microseconds) from the sending
  // of the ping to the reception of its echo off of an object.
  pinMode(echoPin, INPUT);
  long duration = pulseIn(echoPin, HIGH);

  // Convert the time into a distance

  double cm = ((duration) / 29.186)/2;    // Divide by 29.1 or multiply by 0.0343
  //mesure inverce

  double vitesse = 0.2433*1000000/duration;

  long TEMPERATURE = (pow(vitesse,2)/(287*1.4))-273.15;

  Serial.print(duration);
  Serial.print(" us, ");

  Serial.print(cm);
  Serial.print(" cm, ");

  Serial.print(vitesse);
  Serial.print(" m/S, ");

  //Serial.print(TEMPERATURE );
  //Serial.print(" C° , ");

  Serial.println();

  delay(250);
}

```

*Annexe 4: Programme de mesure de la vitesse du son pour l'expérience de l'humidité, fourni par M. Mokrani*