



HAUTE ÉCOLE
D'INGÉNIERIE ET DE GESTION
DU CANTON DE VAUD
www.heig-vd.ch

HEIG-VD

Rapport de Physique sur Les Ondes Acoustiques (Solides)

Réalisé par

Pitteloud Célien, Rivera Evan, Roeslin Olivier

Sous la supervision de

Gravier Laurent, Khaoula Hanin

25 octobre 2023

Table des matières

1	Introduction	5
1.1	Contexte	5
1.1.1	Le cadre	5
1.1.2	Etat de l'art (SOTA)	5
1.1.3	Domaines d'applications	7
1.2	Objectifs	8
1.2.1	Objectifs spécifiques et listes de tâches	8
2	Manipulation 1 "Mesurer la vitesse de propagation du son dans des barreaux solides par méthode de résonance en mode continu."	9
2.1	Approches / Méthodes	9
2.1.1	Les Rappels Théoriques	9
2.1.2	Protocole expérimental	12
3	Manipulation 2 "La vitesse de propagation du son dans des barreaux solides d'au moins 3 matériaux différents."	14
3.1	Approches / Méthodes	14
3.2	Les Rappels Théoriques	14
3.2.1	Introduction	14
3.2.2	Equations physiques	14
3.2.3	Liste des paramètres	14
3.2.4	Calculs d'incertitudes	14
3.3	Protocole expérimental	14
3.3.1	Présentation du montage	14
3.3.2	Liste du matériel	14
3.3.3	Méthode de mesure	15
4	Manipulation 3 "Déterminer expérimentalement le module de Young d'au moins 3 matériaux."	16
4.1	Approches / Méthodes	16
4.2	Les Rappels Théoriques	16
4.2.1	Introduction	16
4.2.2	Equations physiques	16
4.2.3	Liste des paramètres	16
4.2.4	Calculs d'incertitudes	16
4.3	Protocole expérimental	16
4.3.1	Présentation du montage	16
4.3.2	Liste du matériel	16
4.3.3	Méthode de mesure	17
5	Manipulation 4 "Déterminer expérimentalement l'évolution du module de Young en fonction de la longueur des barreaux pour au moins un matériau."	18
5.1	Approches / Méthodes	18
5.2	Les Rappels Théoriques	18

5.2.1	Introduction	18
5.2.2	Equations physiques	18
5.2.3	Liste des paramètres	18
5.2.4	Calculs d'incertitudes	18
5.3	Protocole expérimental	18
5.3.1	Présentation du montage	18
5.3.2	Liste du matériel	18
5.3.3	Méthode de mesure	19
6	Manipulation 5 "Déterminer expérimentalement l'évolution du module de Young en fonction de la température pour au moins un matériau."	20
6.1	Approches / Méthodes	20
6.2	Les Rappels Théoriques	20
6.2.1	Introduction	20
6.2.2	Equations physiques	20
6.2.3	Liste des paramètres	20
6.2.4	Calculs d'incertitudes	20
6.3	Protocole expérimental	20
6.3.1	Présentation du montage	20
6.3.2	Liste du matériel	20
6.3.3	Méthode de mesure	21
	Bibliographie	23

Table des figures

1	Onde progressive à une dimension. [10]	9
2	Montage expérimental. [13]	12
3	Légende de la première figure	22

Liste des tableaux

1	Titre de votre tableau	22
---	----------------------------------	----

1 Introduction

1.1 Contexte

1.1.1 Le cadre

Le présent projet de laboratoire est réalisé dans le cadre de notre formation de bachelor d'ingénieur microtechnicien dans le module Phy3. Il se déroulera tout au long du semestre d'automne 2023, à une fréquence de quatre périodes toutes les deux semaines. Nous allons le réaliser à trois avec Rivera Evan, Roeslin Olivier et Pitteloud Célien. Nous sommes encadrés par M. Gravier, maître d'enseignement et Mme Hanin, assistante HES.

Le but de ce projet est l'étude des ondes acoustiques dans la matière solide. Ce travail nous permet, en plus de nous familiariser avec les exigences de rigueur lors des expérimentations et de la rédaction d'un rapport de laboratoire, de faire le lien avec des notions vues dans différents cours. En effet, les phénomènes ondulatoires sont au programme du module de Phy3 dans lequel a lieu ce laboratoire. Le module de Young est une notion étudiée et utilisée dans les cours de ResMatMT et Matx1MT.

1.1.2 Etat de l'art (SOTA)

Une onde est la propagation d'une perturbation produisant sur son passage une variation réversible des propriétés physiques locales du milieu. Elle se déplace avec une vitesse déterminée qui dépend des caractéristiques du milieu de propagation. Il existe trois principaux types d'ondes : les ondes mécaniques, les ondes électromagnétiques et les ondes gravitationnelles. Ces trois types varient en longueur d'onde et comprennent, pour les ondes mécaniques, les infrasons, les sons et les ultrasons. [1]

Dans ce rapport, nous allons nous concentrer sur l'étude de la propagation des ondes acoustiques dans les solides, autrement dit les ondes mécaniques progressives.

Ce phénomène physique repose sur l'oscillation des particules d'un milieu et de la transmission de ces oscillations. Cette oscillation peut avoir plusieurs directions par rapport à la direction de propagation d'une onde. Par exemple, si l'on jette un caillou dans un étang, et que l'on regarde les ondes créées autour du point d'impact. L'oscillation est dite transversale, elle est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde, un mouvement de cisaillement.

Par opposition, si nous prenons un ressort très long avec de nombreuses spires auxquelles nous agitions un bout du ressort, que l'on regarde le déplacement et l'oscillation des spires en fonction de la propagation de l'onde. La propagation de l'onde va être dans la même direction que l'oscillation des particules. On dira que ce type d'onde est une onde longitudinale, une suite de compressions et de dilatations. [2]

Chaque molécule qui constitue le ressort va osciller autour d'une position d'équilibre, car il n'y a pas de transport de matière. Cette perturbation va se propager le long du ressort. Cette alternance de zone comprimée et de zone dilatée, va se retrouver dans les ondes sonores. [3]

En résumé, le principe sous-jacent à la propagation d'une onde dans un solide repose sur trois principes physiques fondamentaux :

1. La compression et la dilatation :

Lorsqu'une onde se propage dans un solide, les particules du matériau subissent une alternance de compression (rapprochement des particules) et de dilatation (écartement des particules). Cette variation périodique crée une série de régions plus denses (compression) et moins denses (dilatation) à mesure que l'onde se propage.

2. Le transfert d'énergie :

Les particules du matériau ne se déplacent pas de manière significative, mais elles transmettent leur énergie cinétique les unes aux autres. C'est ce transfert d'énergie qui permet à l'onde de se propager à travers le solide. Les particules vibrent autour de leur position d'équilibre, transmettant l'énergie de proche en proche.

3. La propagation ondulatoire :

Les perturbations de compression et de dilatation se propagent sous forme d'ondes mécaniques à travers le matériau. Ces ondes peuvent être longitudinales ou transversales. La vitesse de propagation dépend des propriétés du matériau, telles que sa densité, sa rigidité et sa cohésion.

Le module de Young ou module d'élasticité est une caractéristique propre à chaque matériau. Ce module définit un rapport entre une contrainte et la déformation d'un matériau. Cette caractéristique modifie la vitesse de propagation des ondes acoustiques dans le solide. Tout solide possède une fréquence naturelle qui dépend de l'élasticité de l'objet et donc de son module de Young à laquelle il vibre avec la plus grande amplitude possible. Lorsqu'un objet est exposé à des vibrations de sa fréquence naturelle, il se met à vibrer aussi. Ce phénomène s'appelle la résonance. [4]

De plus, lorsqu'un matériau est exposé à une variation de température, son module de Young va varier en raison de la modification de la nature des liaisons interatomiques assurant la cohésion du matériau.

1.1.3 Domaines d'applications

L'étude de la propagation d'ondes est utilisée dans beaucoup de secteurs pour inspecter ce que l'on ne peut pas voir à l'intérieur d'un matériau solide. Voici quelques exemples d'utilisation de ce principe physique :

- Secteur médical : les ondes électromagnétiques sont beaucoup utilisées pour l'imagerie médicale. Elles sont envoyées dans le corps des patients et leur comportement est modifié en fonction du solide qu'elles traversent, ce qui permet d'obtenir des images de l'intérieur du corps des patients. Ces ondes peuvent avoir des fréquences et longueur d'ondes différentes pour des utilisations différentes (les rayons X pour les radiographies, les micro-ondes pour les échographies, les ondes radio pour les IRM). [5]

- Secteur de la sismologie : à la suite d'un séisme, des vibrations sont transmises à la terre. Celles-ci se déplacent à des vitesses différentes en fonction du type de matières qu'elles traversent. Ces ondes sont mesurées à l'aide d'un sismographe. Ces mesures permettent de comprendre la structure du sol et de plus ou moins prévoir les futurs séismes. [6]

- Secteur industriel : la technologie d'imagerie par échographie est aussi utilisée en industrie. En effet, en étant envoyées à travers une soudure ou une tôle de métal, les ultrasons vont se déplacer différemment dans la matière, si le solide est de bonne ou mauvaise qualité, par exemple.

- Secteur minier : à la manière de la sismologie, les ondes sismiques peuvent être utilisées pour détecter des gisements minéraux, comprendre la structure géologique du sol. Des ondes peuvent être émises dans le sol par des activités humaines (camion vibreur, explosif, canon à air, etc.). [7]

1.2 Objectifs

Au travers de nos différents objectifs, le but de ce projet est de valider expérimentalement les modules de Young de différents matériaux et de mesurer les vitesses de propagation du son dans des solides en variant leurs géométries et leurs températures.

1. Concevoir et réaliser un montage expérimental permettant de mesurer par méthode de résonance en mode continu la vitesse de propagation du son dans des barreaux solides.
2. Mesurer la vitesse de propagation du son dans des barreaux solides d'au moins 3 matériaux différents.
3. Déterminer expérimentalement le module de Young d'au moins 3 matériaux.
4. Déterminer expérimentalement l'évolution du module de Young en fonction de la longueur des barreaux pour au moins un matériau.
5. Déterminer expérimentalement l'évolution du module de Young en fonction de la température pour au moins un matériau.

1.2.1 Objectifs spécifiques et listes de tâches

Tous les objectifs listés si-haut ont été fixé suivant la méthode SMART (Spécifiques, Mesurables, Atteignables, Réalistes et Temporels) en accord avec M. Gravier. Ils seront effectués dans l'ordre dans lequel ils sont listés et le numéro 5 est un objectif complémentaire que l'on effectuera si nous prenons suffisamment d'avance sur les objectifs 1 à 4.

Les taches s'organiseront comme suit :

1. Conception de notre montage expérimental
2. Commande du matériel manquant
3. Réalisation et vérification de notre montage

Pour chacun des objectifs suivants, la séquence sera la même, soit :

1. Établissement des lois et équations physiques
2. Réalisation des mesures avec leur incertitude
3. Réduction et analyse des résultats
4. Rédaction du chapitre lié à l'objectif

2 Manipulation 1 "Mesurer la vitesse de propagation du son dans des barreaux solides par méthode de résonance en mode continu."

2.1 Approches / Méthodes

2.1.1 Les Rappels Théoriques

2.1.1.1 Introduction

De manière générale, une onde se propage dans toutes les directions qui lui sont offertes à partir de sa source. ((Si nous prenons l'exemple, d'une personne qui parle cela représente une onde progressive à trois dimensions. Si l'on imagine une fine feuille de métal, que l'on vient frapper avec un marteau, les ondes générées au point d'impact vont se propager que dans le plan, on aura une onde progressive à deux dimensions.)) Dans ce rapport, nous allons nous limiter à la propagation unidimensionnelle.

Illustrons ceci avec l'exemple d'une corde tendue, le long de laquelle une onde se propage. Cette onde n'a qu'une direction qui lui est offerte. Nous allons nous restreindre à une onde dite progressive, la perturbation ne se déforme pas lors de sa propagation. [8] Cette onde est dépendant d'une variable de position et d'une variable de temps. [9] (voir Figure 1)

La direction de propagation de la perturbation se trouve dans la direction de l'axe des abscisses, nommée " x ", la fonction est décrite selon deux variables qui donnent le profile de l'onde, en fonction de la position et du temps, soit $y(x;t)$. C'est donc sur un modèle similaire que nous allons effectuer nos mesures.

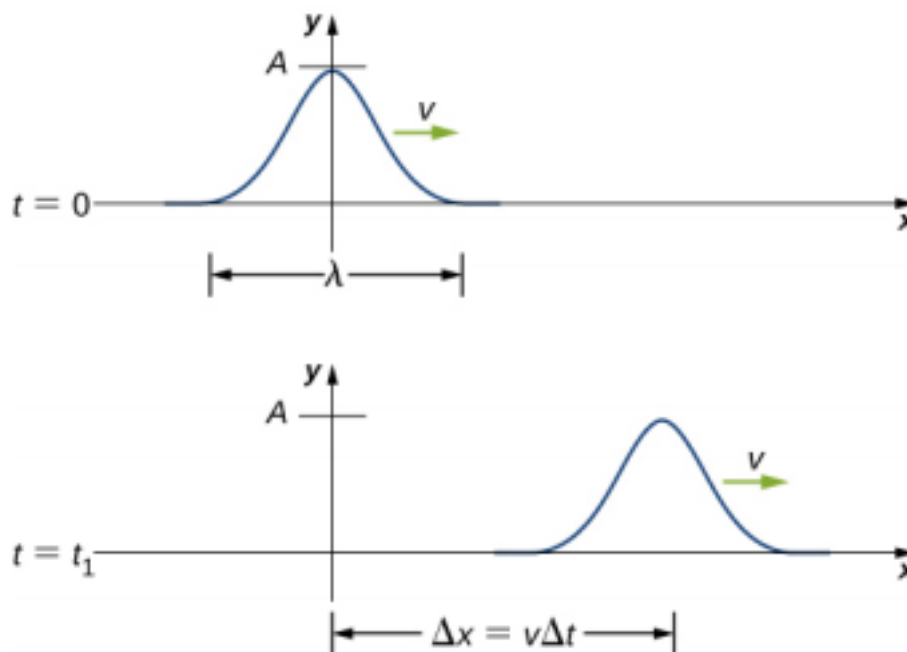


FIGURE 1 – Onde progressive à une dimension. [10]

La vitesse également appelée célérité est indépendante de l'intensité de l'onde. On note toutefois des exceptions lorsque la perturbation du milieu est violente, où les variations sont de l'ordre de la densité moyenne du milieu. [11]

Autrement dit, la célérité d'une onde ne dépend pas de l'amplitude de l'onde tant qu'elle reste "raisonnable". Dans ce cas la célérité est une caractéristique du milieu qui est dit linéaire. On considérera des milieux dans lesquels la célérité d'une onde est indépendante de la forme de celle-ci, on dit que le milieu est non-dispersif. La célérité d'une onde dépend de la nature de celle-ci, dans un même milieu une onde longitudinale ou transversale n'a pas même célérité. Dans le cas de l'acoustique, c'est une onde de pression qui se propage (une succession de surpression et de dépression) mais elle est également associée à une vitesse locale des particules composant le milieu de propagation.

La célérité de l'onde reste constante, tant que les caractéristiques du milieu de propagation ne changent pas ni en fonction du temps, ni en fonction de la position.

La vitesse ne dépend que des caractéristiques du milieu. Cette vitesse est proportionnelle entre la distance et le temps.

La célérité est homogène à une vitesse, mais on réservera le mot vitesse à un déplacement de matière et célérité à la vitesse de propagation d'une onde. D'après nos hypothèses, la célérité d'une onde est donc uniquement dépendant des caractéristiques, du milieu de propagation et éventuellement de la nature de l'onde.

Dans le cas d'une onde qui se propage, la perturbation du milieu dépend et de la position et du temps.

Une onde 1D se propageant s'écrit comme une fonction dépendante de la position x et du temps t : $s(x, t)$. Une onde ne se propage pas instantanément, elle a une célérité finie et il faut donc un certain temps pour qu'une perturbation atteigne un point donné de l'espace. La forme de la perturbation initiale, cette fonction se retrouve identique à elle même mais décalée dans l'espace à un instant $t > 0$. La question est, de combien est-elle décalée ? L'onde se propageant à la célérité c , après un temps t on retrouve la perturbation translatée d'une distance ct . [8]

2.1.1.2 Les équations physiques

La célérité d'une onde progressive s'écrit :

$$c = \frac{dx}{dt} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}$$

L'expression mathématique d'une onde progressive 1D se propageant le long de l'axe Ox dans le sens des x croissants et à la célérité c peut s'écrire :

$$\begin{aligned} s(x, t) &= f(x - ct) \\ &= f\left(x - \frac{x}{c}\right) \end{aligned}$$

N'importe quelle onde progressive peut se décomposer comme une somme d'ondes progressives harmoniques (ou sinusoïdales).

2.1.1.3 Liste des paramètres

2.1.1.4 Calculs d'incertitudes

La propagation d'incertitude basé sur le cours IPH est calculé de la manière suivante : [12]

Relation :

$$\begin{aligned} g &= f(a) \\ \Delta g &= \left| \frac{\partial f}{\partial a} \right| \Delta a + \left| \frac{\partial f}{\partial b} \right| \Delta b + \left| \frac{\partial f}{\partial c} \right| \Delta c + \dots \end{aligned}$$

L'incertitude Δg est arrondi à 1 chiffre significatif selon le cours IPH.

a,b,c sont les grandeurs physiques mesurées de manière directe.

$\Delta a, \Delta b, \Delta c$ sont les incertitudes absolues des grandeurs a,b,c.

$\left| \frac{\partial f}{\partial a} \right|; \left| \frac{\partial f}{\partial b} \right|; \left| \frac{\partial f}{\partial c} \right|$ sont les dérivées partielles de B par rapport à a,b,c.

Dans notre cas,

2.1.2 Protocole expérimental

2.1.2.1 Présentation du montage

Le montage suivant permet de mettre en résonance continue un cylindre afin de mesurer sa célérité longitudinale. Il respectera la séquence suivante. Nous commencerons par déposer individuellement un cylindre et la sonde à microphone sur leur support respectif en caoutchouc afin d'isoler la propagation de la perturbation à l'intérieur du solide et de réduire les perturbations externes capter par le microphone. La sonde à microphone va être branché sur l'amplificateur à l'entrée A. Nous viendrons la positionner à une distance d'environ 1 millimètre de l'une des surfaces de contact de la tige. (voir Figure 2)

Respecter les instructions d'utilisation de l'amplificateur de microphone. Régler l'amplificateur de microphone sur l'amplification (gain) et signal maximum (commutateur position haute). Au moyen, du câble HF, relier la sortie de l'amplificateur de microphone au picoscope. Lors de la prise de mesure, les réglages pour la mesure se font automatiquement grâce au logiciel nommé "PicoScope 7 T&M" que nous allons utiliser. Pour générer une excitation continue du solide par des impulsions. Nous allons utiliser un Piézoélectrique. Celui-ci sera disposé à une des extrémités du cylindre. (voir Figure 2) Il est capable de générer une vibration mécanique sous l'effet d'une tension. Il va donc être branché à un générateur de fonction afin de pouvoir manipuler sa fréquence afin d'influencer sa vitesse de pulsation pour pouvoir mettre en résonance nos différentes tiges.

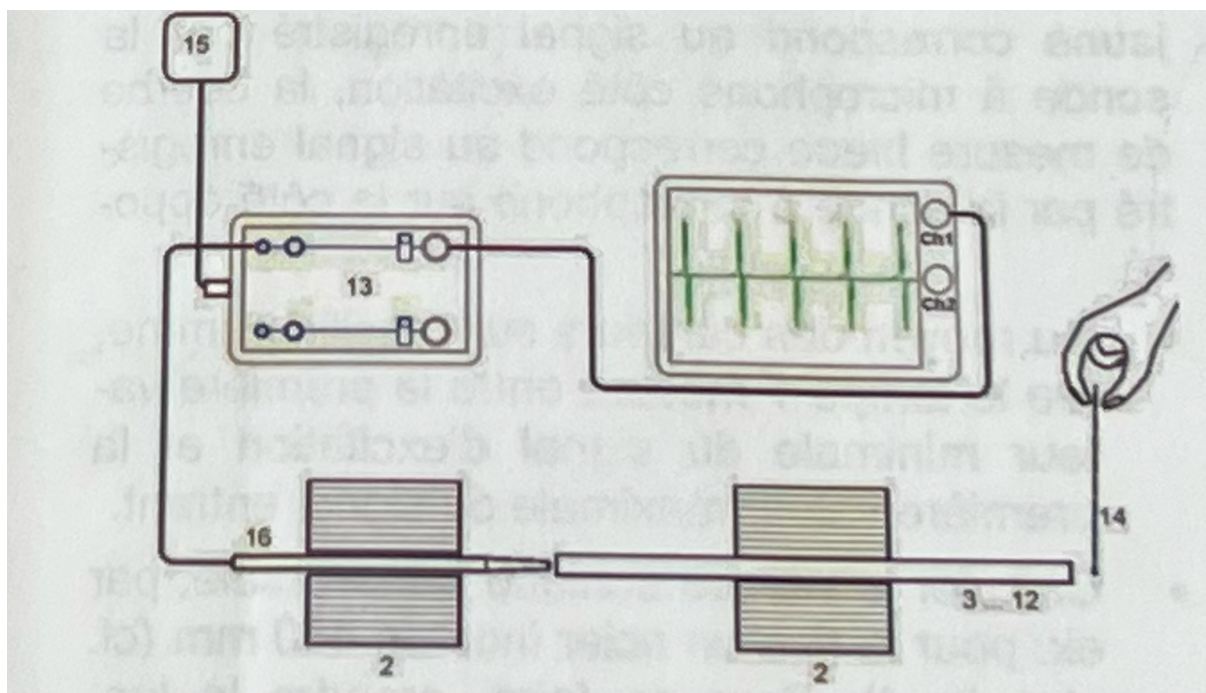


FIGURE 2 – Montage expérimental. [13]

2.1.2.2 Liste du matériel

- Un capteur Piézoélectrique :
crée des impulsions qui nous permettent de mettre le solide en résonance.
- Des supports en caoutchouc :
permet d'isoler la propagation de l'onde à l'intérieur du solide.
- Deux sondes à microphone :
permettent de mesurer une différence de pression créée par le déplacement de l'onde dans le solide.
- Amplificateur de microphone :
permettent de mesurer une différence de pression créée par le déplacement de l'onde dans le solide.
- Alimentation de secteur :
pour le fonctionnement de l'amplificateur.
- Un oscilloscope :
transmet l'information mesurée par les microphones sur l'ordinateur.
- Tige matériaux et longueurs avec un diamètre de 10 mm :
 - Acier inox 100, 200, 400 mm.
 - Aluminium 100, 200 mm.
 - Laiton 100 mm.
 - Cuivre 100 mm.
 - Bois dur 200 mm.
 - PVC 200 mm.
 - Verre 200 mm.
 - Verre acrylique 200 mm.

2.1.2.3 Méthode de mesure

Pour chacune de nos mesures, nous allons régler la bonne fréquence d'alimentation de notre Piézoélectrique afin de le faire pulser à la fréquence de résonance de notre matériau. A cette fréquence, l'amplitude de notre onde sera la plus grande. La stimulation continue nous permet de pouvoir prendre une mesure continue de notre onde sans que la perturbation ne se déforme lors de sa propagation. Cela nous permet de rester dans le domaine de l'onde progressive. Le signal capté par notre sonde à microphone, amplifié et transmis à l'aide du PicoScope dans notre ordinateur, nous permet d'afficher notre onde. Il nous faut relever la période mesurée, qui représente le parcours de l'onde sur un aller-retour de notre cylindre. Finalement, il nous faut mesurer la longueur de notre cylindre à l'aide d'un pied à coulisse. Ces valeurs nous permettent de compléter nos équations afin de trouver la célérité dans notre solide.

3 Manipulation 2 "La vitesse de propagation du son dans des barreaux solides d'au moins 3 matériaux différents."

3.1 Approches / Méthodes

3.2 Les Rappels Théoriques

3.2.1 Introduction

3.2.2 Equations physiques

3.2.3 Liste des paramètres

3.2.4 Calculs d'incertitudes

3.3 Protocole expérimental

3.3.1 Présentation du montage

3.3.2 Liste du matériel

- Une masse dure :
crée des impulsions qui nous permettent de mettre le solide en résonance.
- Des supports en caoutchouc :
permet d'isoler la propagation de l'onde à l'intérieur du solide.
- Deux sondes à microphone :
permettent de mesurer une différence de pression créée par le déplacement de l'onde dans le solide.
- Amplificateur de microphone :
permettent de mesurer une différence de pression créée par le déplacement de l'onde dans le solide.
- Alimentation de secteur :
pour le fonctionnement de l'amplificateur.
- Un picoscope :
transmet l'information mesurée par les microphones sur l'ordinateur.
- Tige matériaux et longueurs avec un diamètre de 10 mm :
 - Acier inox 100, 200, 400 mm.
 - Aluminium 100, 200 mm.
 - Laiton 100 mm.
 - Cuivre 100 mm.
 - Bois dur 200 mm.
 - PVC 200 mm.

Verre 200 mm.

Verre acrylique 200 mm.

3.3.3 Méthode de mesure

4 Manipulation 3 "Déterminer expérimentalement le module de Young d'au moins 3 matériaux."

4.1 Approches / Méthodes

4.2 Les Rappels Théoriques

4.2.1 Introduction

4.2.2 Equations physiques

4.2.3 Liste des paramètres

4.2.4 Calculs d'incertitudes

4.3 Protocole expérimental

4.3.1 Présentation du montage

4.3.2 Liste du matériel

- Un capteur Piézoélectrique :
crée des impulsions qui nous permettent de mettre le solide en résonance.
- Des supports en caoutchouc :
permet d'isoler la propagation de l'onde à l'intérieur du solide.
- Deux sondes à microphone :
permettent de mesurer une différence de pression créée par le déplacement de l'onde dans le solide.
- Amplificateur de microphone :
permettent de mesurer une différence de pression créée par le déplacement de l'onde dans le solide.
- Alimentation de secteur :
pour le fonctionnement de l'amplificateur.
- Un picoscope :
transmet l'information mesurée par les microphones sur l'ordinateur.
- Tige matériaux et longueurs avec un diamètre de 10 mm :
 - Acier inox 100, 200, 400 mm.
 - Aluminium 100, 200 mm.
 - Laiton 100 mm.
 - Cuivre 100 mm.
 - Bois dur 200 mm.
 - PVC 200 mm.
 - Verre 200 mm.
 - Verre acrylique 200 mm.

4.3.3 Méthode de mesure

5 Manipulation 4 "Déterminer expérimentalement l'évolution du module de Young en fonction de la longueur des barreaux pour au moins un matériau."

5.1 Approches / Méthodes

5.2 Les Rappels Théoriques

5.2.1 Introduction

5.2.2 Equations physiques

5.2.3 Liste des paramètres

5.2.4 Calculs d'incertitudes

5.3 Protocole expérimental

5.3.1 Présentation du montage

5.3.2 Liste du matériel

- Un capteur Piézoélectrique :
crée des impulsions qui nous permettent de mettre le solide en résonance.
- Des supports en caoutchouc :
permet d'isoler la propagation de l'onde à l'intérieur du solide.
- Deux sondes à microphone :
permettent de mesurer une différence de pression créée par le déplacement de l'onde dans le solide.
- Amplificateur de microphone :
permettent de mesurer une différence de pression créée par le déplacement de l'onde dans le solide.
- Alimentation de secteur :
pour le fonctionnement de l'amplificateur.
- Un picoscope :
transmet l'information mesurée par les microphones sur l'ordinateur.
- Tige matériaux et longueurs avec un diamètre de 10 mm :
 - Acier inox 100, 200, 400 mm.
 - Aluminium 100, 200 mm.
 - Laiton 100 mm.
 - Cuivre 100 mm.
 - Bois dur 200 mm.
 - PVC 200 mm.

Verre 200 mm.

Verre acrylique 200 mm.

5.3.3 Méthode de mesure

6 Manipulation 5 "Déterminer expérimentalement l'évolution du module de Young en fonction de la température pour au moins un matériau."

6.1 Approches / Méthodes

6.2 Les Rappels Théoriques

6.2.1 Introduction

6.2.2 Equations physiques

6.2.3 Liste des paramètres

6.2.4 Calculs d'incertitudes

6.3 Protocole expérimental

6.3.1 Présentation du montage

6.3.2 Liste du matériel

- Un capteur Piézoélectrique :
crée des impulsions qui nous permettent de mettre le solide en résonance.
- Des supports en caoutchouc :
permet d'isoler la propagation de l'onde à l'intérieur du solide.
- Deux sondes à microphone :
permettent de mesurer une différence de pression créée par le déplacement de l'onde dans le solide.
- Amplificateur de microphone :
permettent de mesurer une différence de pression créée par le déplacement de l'onde dans le solide.
- Alimentation de secteur :
pour le fonctionnement de l'amplificateur.
- Un picoscope :
transmet l'information mesurée par les microphones sur l'ordinateur.
- Tige matériaux et longueurs avec un diamètre de 10 mm :
 - Acier inox 100, 200, 400 mm.
 - Aluminium 100, 200 mm.
 - Laiton 100 mm.
 - Cuivre 100 mm.
 - Bois dur 200 mm.
 - PVC 200 mm.

Verre 200 mm.

Verre acrylique 200 mm.

6.3.3 Méthode de mesure

FIGURE 3 – Légende de la première figure

TABLE 1 – Titre de votre tableau

Colonne 1	Colonne 2d	Colonne 3
Valeur 1	Valeur 2	Valeur 3
Valeur 4	Valeur 5	Valeur 6

Bibliographie

- [1] WIKIPÉDIA. *Onde* — *Wikipédia, l'encyclopédie libre*. 2023. URL : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Onde> (visité le 04/10/2023) (cf. p. 5).
- [2] Daniel ROYER et Eugene DIEULESAINT. *Acoustique - Propagation dans un solide* — *Techniques de l'ingénieur*. 2019. URL : <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/sciences-fondamentales-th8/applications-en-mecanique-physique-42643210/acoustique-af3814/> (visité le 14/10/2023) (cf. p. 5).
- [3] Révisions BAC. *Ondes transversales et longitudinales* — *Youtube*. 2015. URL : https://www.youtube.com/watch?v=l1V4_SPfhLM (visité le 14/10/2023) (cf. p. 5).
- [4] Professeur KHATTABI. *Résonance* — *DSFM*. 2011. URL : <https://web.dsfm.mb.ca/ecoles/clr/profs/fkhattabi/M3L2.pdf> (visité le 14/10/2023) (cf. p. 6).
- [5] CEA. *Le fonctionnement d'un scanner X* — *CEA, De la recherche à l'industrie*. 2014. URL : <https://www.cea.fr/multimedia/pages/videos/culture-scientifique/sante-sciences-du-vivant/fonctionnement-scanner-x.aspx> (visité le 15/10/2023) (cf. p. 7).
- [6] WIKIPÉDIA. *Échographie* — *Wikipédia, l'encyclopédie libre*. 2023. URL : <https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89chographie> (visité le 15/10/2023) (cf. p. 7).
- [7] WIKIPÉDIA. *Imagerie sismique* — *Wikipédia, l'encyclopédie libre*. 2023. URL : https://fr.wikipedia.org/wiki/Imagerie_sismique (visité le 15/10/2023) (cf. p. 7).
- [8] Alexandre ALLES. *Propagation d'une onde* — *Lycée Lalande*. 2020. URL : <https://cahier-de-prepa.fr/pcsi-lalande/download?id=7> (visité le 23/10/2023) (cf. p. 9, 10).
- [9] Révisions BAC. *Onde progressive à une dimension* — *Youtube*. 2015. URL : <https://www.youtube.com/watch?v=JVeXFEBBo1c> (visité le 23/10/2023) (cf. p. 9).
- [10] O. OPENSTAX. *16.3 : Mathématiques des ondes* — *Libretexts*. 2022. URL : <https://query.libretexts.org/@go/page/191241> (visité le 23/10/2023) (cf. p. 9).
- [11] Luc PASTUR. *Ondes et Acoustiques dans les Fluides* — *Université Paris-Saclay*. Consulté le 17.10.2023. 2017. URL : https://perso.limsi.fr/pastur/meca/M1MFL_oaf.pdf (visité le 17/10/2023) (cf. p. 10).
- [12] Laurent GRAVIER. *Formulaire IPH*. Numéro de l'Édition (le cas échéant). Lieu de Publication (généralement la ville) : Nom de la Maison d'Édition, Année de Publication. URL : URL%20du%20Livre%20(si%20disponible) (cf. p. 11).
- [13] Auteur(s) du RAPPORT. *Titre de Votre Rapport*. HEIG, Année de Publication. URL : URL%20de%20Votre%20Rapport%20(si%20disponible) (cf. p. 12).