

*Projet de Physique P6*  
*STPI/P6/2018 – 015*

Définition d'un protocole de mesure de  
contraintes résiduelles dans les aciers par  
ondes ultrasonores

**Etudiants :**

**Louis GERMAIN**

**Alison LECOINTRE**

**Quentin TURQUETIL**

**Céline GROSGEORGE**

**Valentyna PONOMARENKO**

**Emilie YHUEL**

---

**Enseignant-responsable du projet :**

**Clément KELLER**



Date de remise du rapport : **18/06/2018**

Référence du projet : **STPI/P6/2018 – 015**

Intitulé du projet : ***Définition d'un protocole de mesure de contraintes résiduelles dans les aciers par ondes ultrasonores***

Type de projet : ***Expérimental***

Objectifs du projet :

***Le but de ce projet est de pouvoir mesurer la vitesse de propagation des ondes ultrasonores longitudinales dans n'importe quelle pièce en acier inoxydable et d'en déduire les contraintes résiduelles présentes dans la pièce.***

Mots-clefs du projet :

***contraintes résiduelles***

***ondes ultrasonores***

***aciers***

Si existant, n° cahier de laboratoire associé : ***non existant***

## TABLE DES MATIERES

1. Introduction.....	5
2. Méthodologie / Organisation du travail.....	5
3. Généralités.....	6
3.1. Définition d'une contrainte résiduelle.....	6
3.2. Méthode des ondes ultrasonores.....	7
4. Étude expérimentale.....	8
4.1. Mesure de la vitesse de propagation des ondes longitudinales et transversales dans plusieurs métaux.....	8
4.1.1. Présentation de l'expérience.....	8
4.1.2. Résultats.....	9
4.1.3. Analyse des résultats.....	10
4.2. Mesures en traction dans le domaine élastique.....	10
4.2.1. Utilisation de la machine de tractions.....	10
4.2.2. Partie expérimentale et résultats.....	12
4.2.3. Analyse des résultats.....	13
4.3. Conception de deux pièces.....	14
4.4. Expérience finale.....	16
4.4.1. Description du protocole.....	16
4.4.2. Modification du connecteur coaxial.....	16
4.4.3. Résultats.....	17
5. Conclusion.....	19
6. Bibliographie.....	21
7. Annexes.....	23
7.1. Tableau de l'organisation du groupe.....	23
7.2. Plan du guide d'ondes.....	24
7.3. Plan du support du capteur.....	25

## 1. INTRODUCTION

Dans ce projet, nous nous sommes intéressés aux contraintes résiduelles dans les métaux, et plus précisément dans l'acier 316L. Une contrainte résiduelle est une contrainte présente dans un matériau en l'absence de sollicitations extérieures. Toutes les pièces en métal présentent des contraintes résiduelles puisqu'elles apparaissent quelque soit le procédé de fabrication. Cependant, ces contraintes peuvent être à l'origine de fissures voire de ruptures. C'est pourquoi il est indispensable de pouvoir les mesurer.

Pour cela, nous avons utilisé la méthode des ondes ultrasonores. Cette méthode présente l'avantage d'être non destructive, c'est-à-dire qu'elle n'endommage pas la pièce.

Le but de ce projet est de pouvoir mesurer la vitesse de propagation des ondes ultrasonores longitudinales dans n'importe quelle pièce en acier inoxydable et d'en déduire les contraintes résiduelles présentes dans la pièce. Pour cela, nous allons réaliser un étalonnage grâce à une machine de traction. Nous allons appliquer différentes valeurs d'efforts sur une éprouvette et mesurer la vitesse de propagation des ondes longitudinales. Ainsi, en mesurant la vitesse de propagation des ondes longitudinales dans une autre pièce, nous serons capables d'en déduire les contraintes résiduelles présentes dans la pièce.

Tout d'abord, nous allons nous intéresser à l'organisation du travail au sein du groupe. Ensuite, nous expliquerons ce qu'est une contrainte résiduelle et le principe de la méthode des ondes ultrasonores. Enfin, nous détaillerons les différentes expériences que nous avons menées.

## 2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Nous avons privilégié le travail en groupe et avons ainsi travaillé de manière collaborative pour la partie expérimentale. En effet, tous les étudiants du groupe étaient intéressés à l'idée de manipuler et d'apprendre à se servir du matériel mis à disposition. Cela nous a également permis d'utiliser les compétences de chacun. Le travail collaboratif a favorisé l'échange et la communication.

Nous avons surtout travaillé lors des créneaux horaires dédiés à la P6, car notre projet nécessitait de nombreuses manipulations. Lorsque les manipulations

étaient stoppées étant donné que certaines pièces ne nous étaient pas encore parvenues, nous avons avancé l'écriture du rapport où chaque membre du groupe s'est investi.

A chaque fin de séance de projet, nous avons fait un bilan complet des tâches réalisées pendant la séance afin de n'oublier aucun détail et de savoir ce que nous avons fait.

Qui plus est, afin que chaque membre du groupe ait accès aux nombreux documents, manipulations, photos ainsi qu'au rapport et puisse partager d'autres documents, nous avons décidé de créer un drive.

Pour le rapport, nous avons procédé de manière coopérative. En effet, pour le bon déroulement du projet, nous nous sommes réparti le travail en fonction des compétences et l'envie de chacun, tout en maintenant une bonne communication, ce qui nous a permis d'avancer plus rapidement. Nous nous sommes répartis les tâches de la sorte : Emilie et Céline se sont intéressées à la mesure de la vitesse de propagation des ondes longitudinales et transversales dans plusieurs métaux et aux généralités. Alison et Valentyna ont souhaité travailler sur les mesures en traction dans le domaine élastique. Et enfin Louis et Quentin se sont intéressés à la conception des deux pièces ainsi que les généralités.

Le tableau en annexe résume les tâches effectuées par chaque membre du groupe.

### **3. GÉNÉRALITÉS**

#### **3.1. Définition d'une contrainte résiduelle**

Une contrainte résiduelle est une contrainte présente dans un matériau en l'absence de sollicitations extérieures. Ces contraintes peuvent avoir des effets néfastes sur le matériau en étant à l'origine de fissures ou de ruptures. Cependant, si on connaît l'état de contrainte dans un matériau, on peut en tirer des avantages. En effet, elles peuvent permettre d'augmenter la durée de vie d'un matériau puisqu'elles donnent au matériau une plus grande résistance aux sollicitations exercées dessus. Le matériau a ainsi un meilleur comportement en fatigue, en rupture mais aussi en corrosion.

Ces contraintes peuvent avoir différentes origines, toutes liées au procédé de fabrication de la pièce :

- origine mécanique qui peut être liée à l'usinage d'une pièce par exemple.
- origine thermique : lorsqu'un matériau est fondu, des contraintes résiduelles peuvent

apparaître. Elles sont dues à la rétractation des métaux suite à la baisse de température.

-origine métallurgique (par exemple lors du soudage)<sup>1</sup>

Il existe trois classes de contraintes :

- Échelle microscopique d'ordre III (réseaux cristallins)
- Échelle microscopique d'ordre II ( échelle du grain)
- Échelle macroscopique d'ordre I ( sur quelques millimètres)

Dans ce projet nous nous intéresserons plus particulièrement aux contraintes d'ordre I puisque notre matériel nous permet de les mesurer.

### 3.2. Méthode des ondes ultrasonores

La méthode des ondes ultrasonores est basée sur la variation de la vitesse de propagation des ultrasons dans le matériau en fonction de son état de contrainte.

Cette méthode s'applique dans de nombreux domaines tels que l'aéronautique, l'automobile, le bâtiment, l'énergie, le ferroviaire, le nucléaire, la pétrochimie... En effet, son principal avantage est qu'elle est non destructive, c'est-à-dire qu'elle permet de détecter les contraintes résiduelles sans endommager le matériau, contrairement à d'autres méthodes qui peuvent être destructives ou semi-destructives comme la méthode par diffraction des rayons X, ou encore la méthode du trou par perçage incrémental. De plus, la méthode par ultrasons est moins coûteuse que les autres méthodes, c'est un dispositif de mesure portable et rapide.

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques qui représentent un déplacement de particules. Ces ondes se propagent dans les milieux fluides ou solides, mais elles ne peuvent pas être transmises dans le vide.

La méthode des ondes ultrasonores permet de mesurer des contraintes sur une épaisseur de 0.1 à 2 mm environ pour les métaux. Il existe deux types d'ondes ultrasonores:

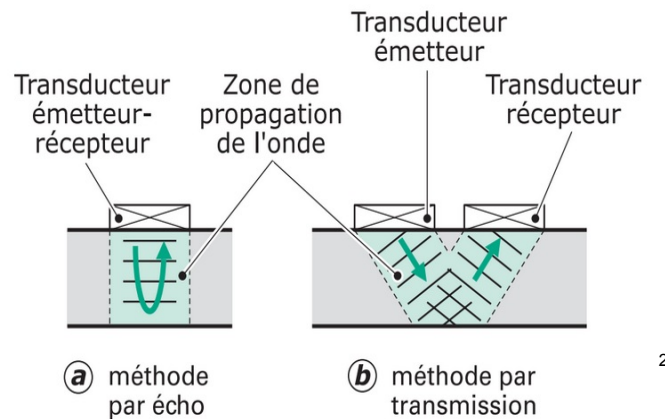
- les ondes longitudinales, qui se propagent dans la longueur de l'éprouvette
- les ondes transversales qui se propagent dans son épaisseur

Pour appliquer cette méthode, nous disposons d'un appareil de mesure de vitesses d'ondes ultrasonores. Un matériau piézoélectrique se trouve au bout du capteur. Celui-ci émet une onde ultrasonore. Cette onde se propage dans le matériau étudié et revient vers le capteur. Grâce à ce capteur, nous obtenons des mesures d'amplitude en fonction du temps. Ceci nous permet de déterminer

<sup>1</sup> SHAMSHIRSAZ Mahnaz. "Contraintes résiduelles dues à l'élaboration dans des plaques métalliques minces multicouches"

l'épaisseur ou les vitesses transversales/longitudinales si l'on connaît au préalable une de ces deux grandeurs.

Les capteurs que nous avons à disposition sont à la fois émetteurs et récepteurs d'ondes. Cependant, il est possible de réaliser un montage avec deux capteurs, où l'un est émetteur et l'autre récepteur.



*Illustration 1: principe de la méthode des ondes ultrasonores*

## 4. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

### 4.1. Mesure de la vitesse de propagation des ondes longitudinales et transversales dans plusieurs métaux

#### 4.1.1. Présentation de l'expérience

Dans cette partie, l'objectif était de vérifier le bon fonctionnement de la méthode des ondes ultrasonores. Pour cela, nous avons mesuré la vitesse de propagation des ondes longitudinales et transversales dans plusieurs métaux. A partir de ces vitesses nous avons déterminé le module d'Young et le coefficient de Poisson afin de comparer avec les valeurs théoriques.

$$\nu = \frac{V_L^2 - 2V_T^2}{2V_L^2 - 2V_T^2} \quad E = 2 \rho (1 + \nu) V_T^2$$



$V_L$  étant la vitesse de propagation des ondes longitudinales en m/s

$V_T$  étant la vitesse de propagation des ondes transversales en m/s

$\nu$  étant le coefficient de Poisson sans unité

$\rho$  étant la masse volumique en kg/m<sup>3</sup>

$E$  étant le module d'Young en Pa

#### 4.1.2. Résultats

Le tableau ci-après regroupe les valeurs expérimentales et théoriques déterminées à partir de la mesure de la vitesse de propagation des ondes longitudinales et transversales dans plusieurs métaux.

**Tableau de mesures :**

	Cuivre	Aluminium	Nickel	Acier 304L	Acier 316L (éprouvette)	Fe <sub>3</sub> Si
$V_L$ (m/s)	4830	9785	11450	5860	5780	7550
$V_T$ (m/s)	2250	4500	6000	3170	3030	4200
épaisseur (mm)	6	3	1	3.8	2	1
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	8.67	2.63	8.95	7.89	7.80	7.49
$\rho_{théorique}$ (g/cm <sup>3</sup> )	8.920	2.700	8.900	7.850		7.220
$\nu$ coefficient de Poisson	0.3614	0.3659	0.3107	0.2932	0.3105	0.2759
$\nu_{théorique}$	0.33	0.24 à 0,33	0.31	0.24 à 0,30		0.305
$E$ module d'Young (GPa)	119.51	145.49	844.62	205.06	187.69	337.15
$E_{théorique}$ (GPa)	128	62	207	210		212.7

456

3 **Université Lyon 1.** "TP4 : Mesure de modules d'élasticité par ultrasons"

4 **Simulationmatériaux.com.** "Liste des masses volumiques, modules de Young et coefficients de Poisson des matériaux courants"

5 **Springer Materials.** "Fe<sub>3</sub>Si Crystal Structure"

6 **LE NEINDRE Bernard.** "Constantes mécaniques"

Les valeurs en rouge dans le tableau renvoient aux valeurs expérimentales qui présentent d'importants écarts avec les valeurs théoriques.

### **4.1.3. Analyse des résultats**

Certains modules d'Young étaient incorrects car le dispositif pour mesurer la masse volumique était erroné. Nous avons alors corrigé le dispositif et mesuré de nouveau la masse volumique. Cela nous a permis de recalculer le module d'Young pour les valeurs qui étaient incohérentes. Ainsi, presque tous les modules d'Young étaient cohérents avec les valeurs théoriques. Cependant, les valeurs expérimentales ne correspondaient pas aux valeurs théoriques pour l'aluminium et le nickel. Il est possible que cela puisse s'expliquer par des imprécisions dans les mesures d'épaisseur ou dans les mesures de la vitesse des ondes. Par contre, les valeurs expérimentales et théoriques coïncidaient pour les aciers. Comme notre projet s'intéresse aux aciers, nous avons validé la méthode des ondes ultrasonores pour les aciers.

## **4.2. Mesures en traction dans le domaine élastique**

### **4.2.1. Utilisation de la machine de tractions**

Une machine de traction est un appareil permettant de réaliser divers essais de traction sur des éprouvettes.

Un essai de traction permet de déterminer les caractéristiques d'un matériau, notamment :

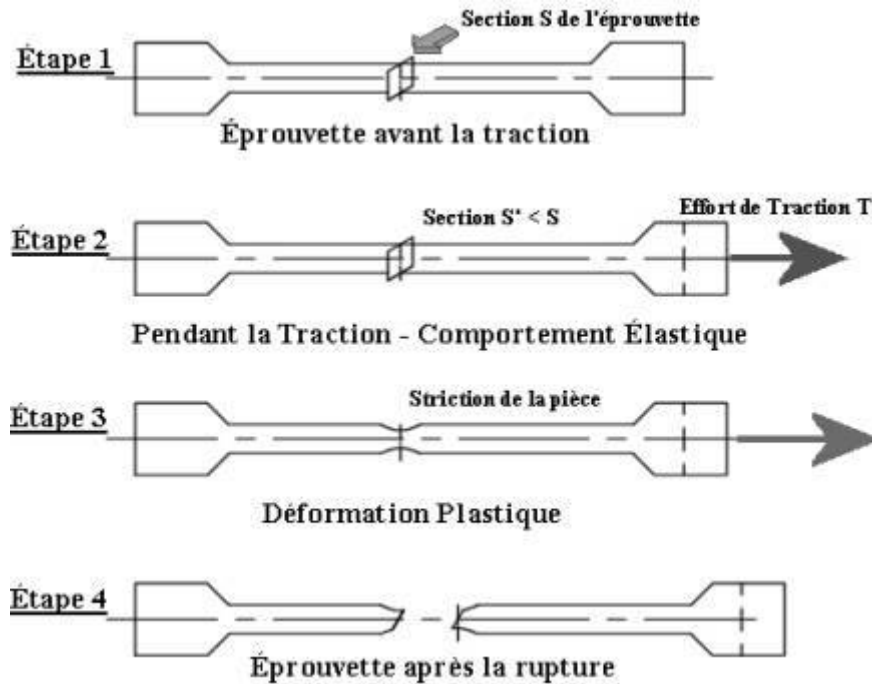
- le module d'Young  $E$ , exprimé en MPa.
- le coefficient de Poisson  $\nu$ .
- la limite élastique  $\sigma_E$ , exprimée en N.
- la limite à la rupture  $R_e$ , exprimée en N.

L'éprouvette est conçue de sorte que l'on puisse serrer l'échantillon avec les mors de la machine de traction sans endommager la partie de l'échantillon étudiée. Ainsi, seule la partie centrale est sollicitée par les efforts de tractions.

L'essai de traction contient quatre étapes:

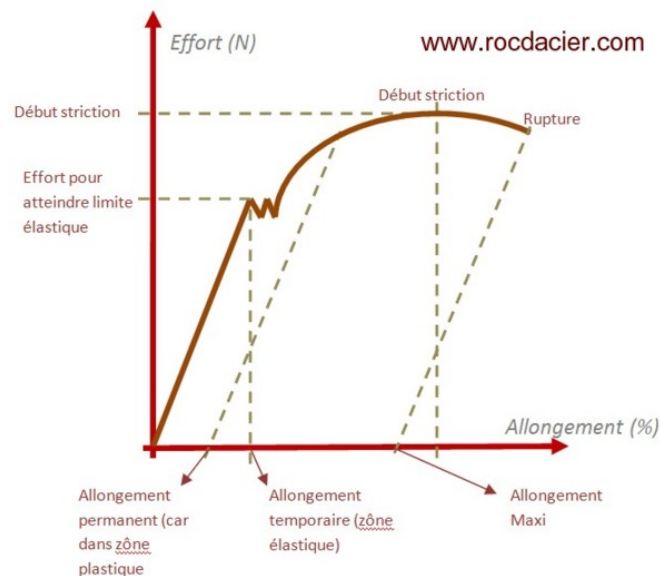
- étape 1 : on fixe l'éprouvette avant la traction.
- étape 2 : lorsque l'on commence l'essai de traction, le matériau a un comportement élastique.
- étape 3 : si on exerce une force supérieur à la limite élastique du matériau étudié, ce dernier subit une déformation plastique. On a une striction (c'est-à-dire une diminution de section) de la pièce étudiée. La contrainte à la limite élastique est notée  $R_e$ .

- étape 4 : Si on exerce une force supérieure à la limite à la rupture du matériau étudié, l'éprouvette subit une rupture.



*Illustration 2: Comportement de l'éprouvette en fonction de la traction exercée dessus*

La courbe de traction ci-dessous résume les étapes décrites ci-dessus :



*Illustration 3: courbe de traction*

Cette courbe permet de calculer la contrainte  $\sigma$  et la déformation  $\epsilon$  du matériau à l'aide des formules suivantes :

$\sigma = F/S$ , avec  $\sigma$  la contrainte en Pa; F l'effort appliqué en N; S la section en  $m^2$   
 $\varepsilon = \Delta l/l_0$ , avec  $\varepsilon$  la déformation (sans unité);  $\Delta l$  l'allongement en m;  $l_0$  la longueur initiale en m

La limite élastique et la limite à la rupture  $R_e$  peuvent être déterminées à l'aide du graphique.

Le module de Young peut, lui aussi, être déterminé directement sur le graphique. En effet, il correspond à la pente de la courbe du domaine élastique. Cette valeur peut aussi être déterminée à l'aide de la loi de Hooke en traction :  
 $\sigma = E.\varepsilon$ .

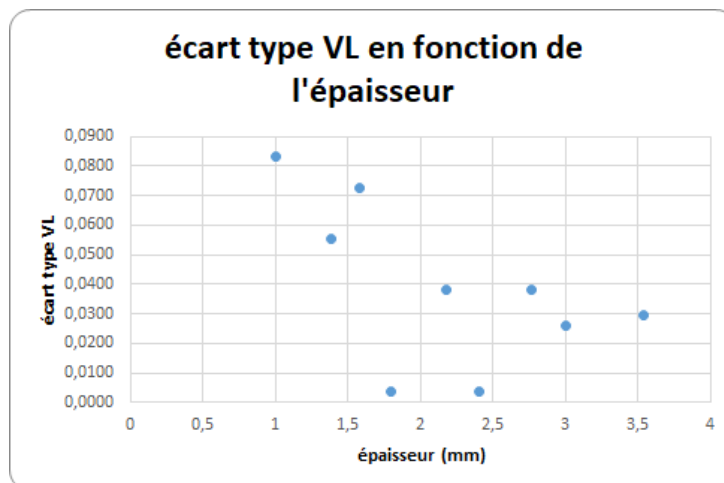
#### **4.2.2. Partie expérimentale et résultats**

En réalisant des mesures en traction sur un acier 316L dans le domaine élastique, nous avons constaté que les résultats obtenus étaient incohérents. En effet, nous avons mesuré les contraintes du matériau tout en restant dans le domaine élastique. Lorsque l'on augmentait la contrainte, les valeurs que prenaient la vitesse longitudinale et la vitesse transversale étaient quasiment équivalentes. On ne voyait pas d'évolution.

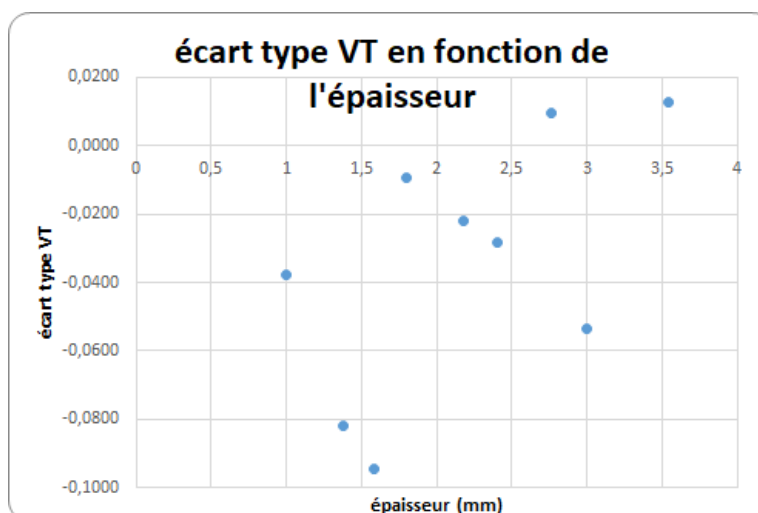
Ainsi nous avons mesuré la vitesse de propagation des ondes longitudinales et transversales dans des échantillons d'un acier 316L soumis à différentes contraintes de laminage<sup>7</sup> afin de voir s'il y a une évolution de la vitesse de propagation en fonction des contraintes. Nous avons obtenu des mesures de vitesse de propagation des ondes transversales incohérentes. Les mesures de la vitesse de propagation des ondes longitudinales étaient plus ou moins cohérentes. En effet, les contraintes présentes dans le matériau étaient dans le sens de la longueur puisque le matériau a été laminé. C'est pourquoi il est indispensable que les ondes se déplacent dans la même direction que les contraintes.

De plus, nous avons calculé l'écart type pour la vitesse de propagation des ondes longitudinales et transversales (c'est-à-dire la différence entre la valeur mesurée dans l'échantillon laminé et celle mesurée dans le matériau non laminé). Nous les avons tracé en fonction de l'épaisseur des échantillons.

<sup>7</sup> Passage d'un échantillon de métal entre deux cylindres tournant dans des sens opposés. source: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Laminage>



Sur ce graphique représentant l'écart type de la vitesse longitudinale en fonction de l'épaisseur du matériau, nous pouvons constater que plus le métal est laminé, plus l'écart type est grand. En effet, plus le métal est laminé, plus son épaisseur a tendance à diminuer. Ainsi, lorsque la contrainte de l'acier augmente, les ondes longitudinales se propagent rapidement. On peut cependant remarquer que cette constatation n'est pas correcte pour deux valeurs du graphique. Cela révèle des erreurs dans les mesures.



Sur ce graphique représentant l'écart type de la vitesse transversale en fonction de l'épaisseur du matériau, nous pouvons constater que les valeurs sont incohérentes étant donné que les contraintes sont longitudinales. Nous avons ainsi décidé d'abandonner le capteur d'ondes transversales.

### 4.2.3. Analyse des résultats

Afin d'améliorer nos mesures, il fallait modifier le capteur d'ondes longitudinales. En effet, le capteur était positionné perpendiculairement à

l'éprouvette. Les ondes ne se propageaient donc pas correctement dans la longueur du matériau.

Nous avons alors conçu un nouveau guide d'ondes ainsi qu'une pièce permettant de fixer le capteur sur l'éprouvette en traction à la verticale. Le guide d'onde a été conçu de sorte que le capteur-émetteur ait une inclinaison de 25 degrés avec l'éprouvette afin que le capteur envoie les ondes dans la longueur et non plus perpendiculairement.

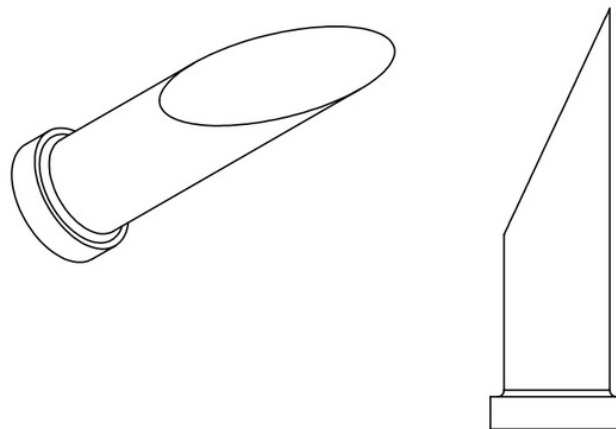
Nous avons allongé le guide d'ondes afin d'augmenter la surface de contact et son inclinaison avec l'éprouvette.

Un deuxième capteur(plus ancien) sera utilisé comme récepteur.

### 4.3. Conception de deux pièces

Pour mesurer la vitesse de propagation des ondes longitudinales dans une éprouvette placée en traction, nous avons besoin d'un nouveau guide d'ondes et d'un support pour le capteur.

Le nouveau guide d'ondes sert envoyer les ondes longitudinales dans la longueur de l'éprouvette. Il présente un angle de 25 degrés avec l'éprouvette. Cette pièce est en plexiglas et permet de diriger les ondes émises par le capteur.

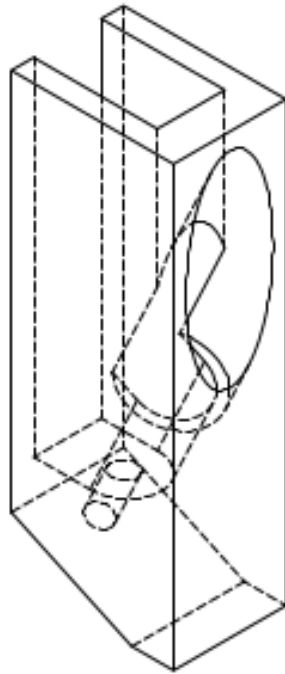


*Illustration 4: schéma du guide d'ondes*

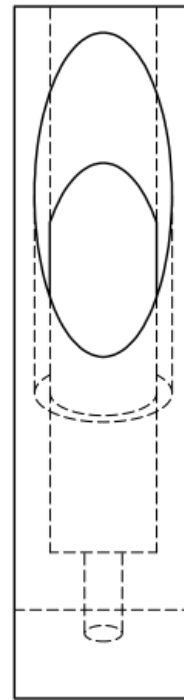
Comme l'éprouvette est placée verticalement sur la machine de traction, nous devons concevoir notre propre support pour le capteur. La fonction principale de la pièce est de maintenir le guide d'ondes à plat sur l'éprouvette, sachant que le guide d'ondes a un angle de 25 degrés avec l'éprouvette.

Les deux conditions qui devaient être remplies étaient donc:

- avoir une surface plane
- avoir une fixation solide
- avoir les dimensions les plus petites possible
- pouvoir ajuster la position du capteur



*Illustration 5: vue isométrique dessus*



*Illustration 6: vue de*

En quoi cette pièce consiste-t-elle ?

C'est une pièce pleine en aluminium dans laquelle deux alésages successifs ont été réalisés, un premier de 12 mm de diamètre et un second plus grand 15,5 mm de diamètre. Ainsi cette différence permet d'avoir une butée sur laquelle le capteur viendra s'appuyer. Sur le dessus de la pièce, une rainure a été réalisée afin de faire passer la connectique du capteur ainsi que le câble.

Pour finir, un filetage à l'arrière de la pièce a été réalisé pour pouvoir placer une vis permettant de régler la position du capteur. Ceci permet un alignement parfait entre la pièce et le guide d'ondes.

Au début, nous avons commencé à concevoir la pièce sur Google SketchUp mais nous l'avons finalement terminée sur SolidWorks parce que ce dernier était plus adapté à nos besoins. En effet, l'ensemble du groupe avait appris à utiliser SolidWorks en CTI 3. De plus, ce logiciel permet de faire une mise en plan. En effet, l'usinage n'acceptait pas les modèles 3D et demandait des plans des pièces à usiner.

Dans un premier temps nous avons réalisé un prototype de cette pièce en impression 3D pour valider le design.

L'impression 3D est une technique de fabrication de pièce en volume par agglomérat de matière (ici du fil de plastique fondu). Une fois le modèle 3D conçu, un logiciel vient découper la pièce couche par couche et calculer le déplacement de la tête d'impression.

Cependant, l'impression 3D n'étant pas une méthode très précise, quelques retouches (à la lime) et quelques modifications de mesures (diminution de la longueur du guide d'ondes et agrandissement du premier alésage) ont dues être effectuées.

Par la suite nous avons commandé à l'usinage le support pour le capteur en aluminium. Celle-ci a été usinée par fraisage, perçage et par une découpe. Nous avons également commandé à l'usinage le guide d'ondes en plexiglas.

#### **4.4. Expérience finale**

##### **4.4.1. Description du protocole**

Nous disposons d'un morceau de matériau dont nous n'avons pas encore connaissance des contraintes résiduelles. Tout d'abord, nous devons calibrer le couple de capteurs, c'est-à-dire déterminer la distance entre l'émetteur et le récepteur. Pour cela, nous avons besoin de connaître la vitesse des ultrasons traversant ce matériau.

Ensuite, nous effectuerons des essais de traction dessus afin de connaître l'expression de la vitesse des ultrasons en fonction de la contrainte appliquée.

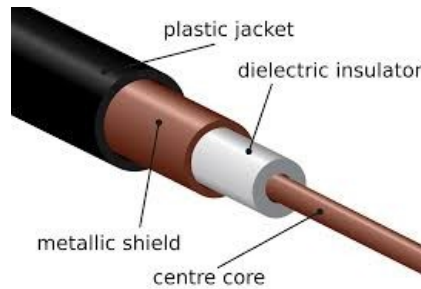
Pour finir, nous mesurerons plusieurs fois (pour diminuer l'incertitude) la vitesse dans l'échantillon de contraintes inconnues, puis nous utiliserons la relation précédente pour calculer les contraintes résiduelles dans le sens de propagation de l'onde.

##### **4.4.2. Modification du connecteur coaxial**

Afin de pouvoir effectuer nos mesures, nous avons besoin d'un support pour notre émetteur, que nous avons décrit précédemment, mais aussi d'un connecteur coaxial pour connecter le récepteur au reste de l'équipement. Celui-ci a alors été commandé et nous l'avons soudé à l'autre extrémité du fil.

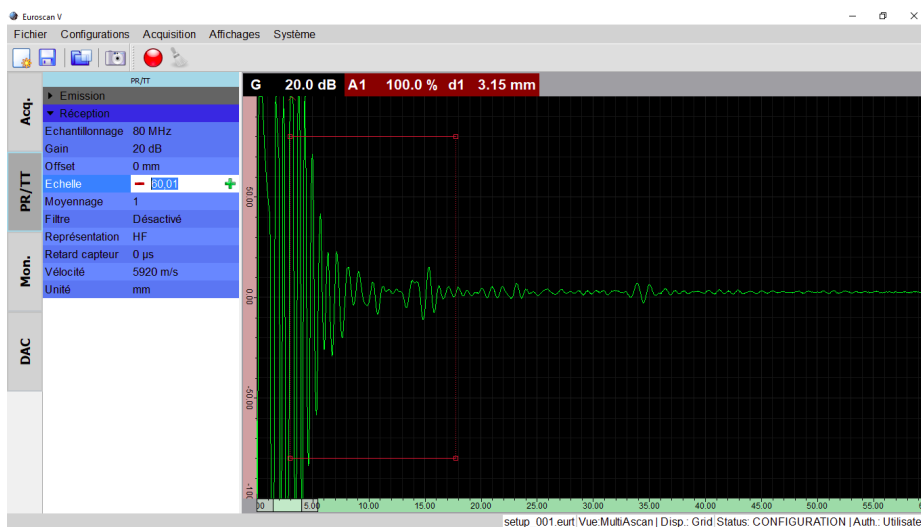


Un câble coaxial consiste comme sur le schéma ci-dessous d'un fil entouré d'une gaine isolante, qui elle-même est recouverte d'une gaine conductrice, le tout recouvert d'isolant. Son intérêt est d'avoir sur un seul fil le signal et la masse.



*Illustration 7: schéma d'un câble coaxial*

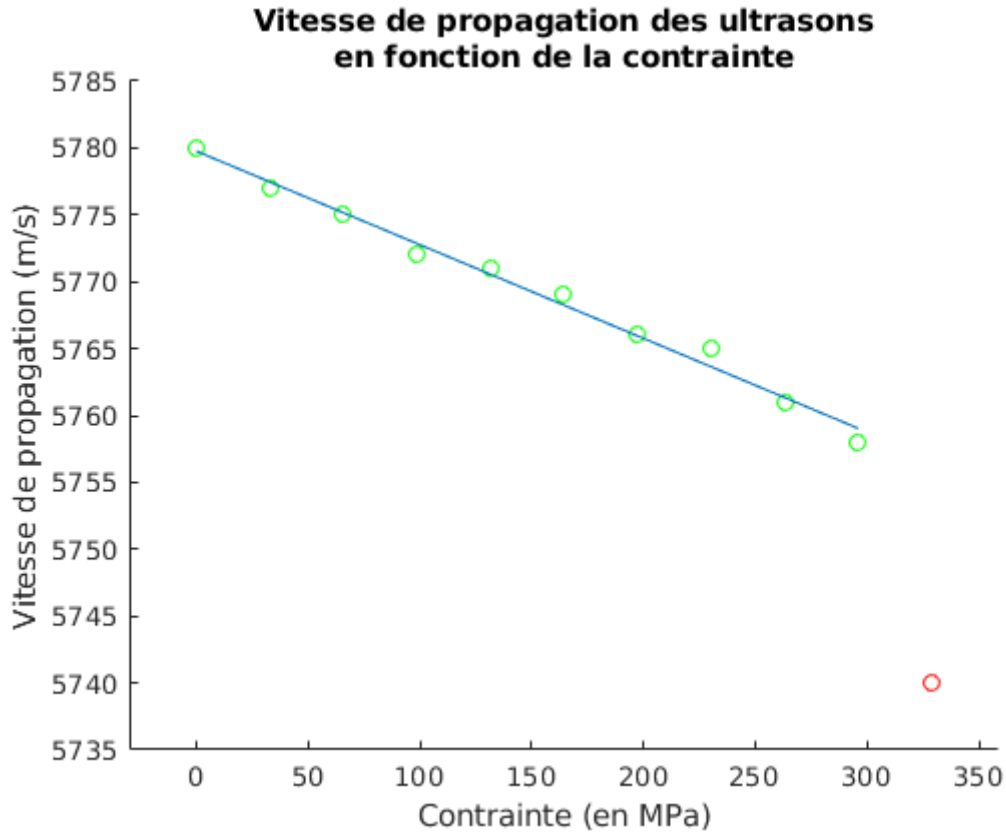
Comme cité ci-dessus, le but de la calibration est de mesurer la distance entre l'émetteur et le récepteur. Pour cela, nous positionnons les deux capteurs sur la pièce et connaissant la distance réelle entre les deux capteurs, nous spécifions la vitesse sur le logiciel. Ainsi, les signaux sont traités, et grâce à la durée de propagation, la distance est calculée.



*Illustration 8: logiciel EuroScanV*

### 4.4.3. Résultats

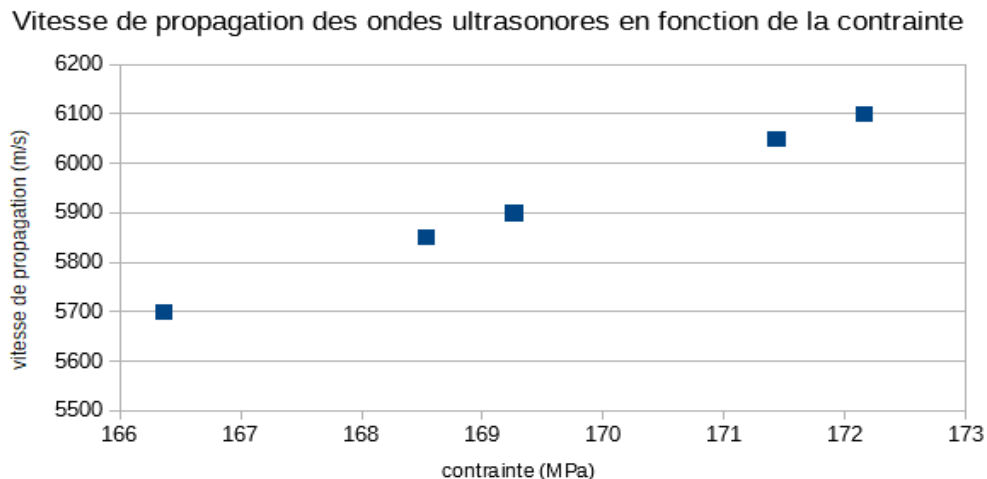
Nous avons placé une éprouvette d'acier 316L en traction et nous avons mesuré la vitesse de propagation des ondes ultrasonores pour différents efforts. Nous en avons déduit la vitesse de propagation des ultrasons en fonction de la contrainte (voir graphique ci-dessous).



On a  $v = -69 \cdot \sigma + 5779$  d'après le graphique ci-dessus.

Ainsi, grâce à cet étalonnage, nous pouvons désormais déduire la contrainte présente dans l'éprouvette si on connaît la vitesse de propagation des ondes ultrasonores. En effet, on a la formule :  $\sigma = (5779 - v) / 69$ .

Pour valider cela, nous avons laminé plusieurs fois notre éprouvette. Après chaque passage dans le laminage, nous avons mesuré la vitesse de propagation des ondes ultrasonores. Nous en avons alors déduit la contrainte. Nous obtenons donc le graphique ci-dessous.



Sur ce graphique, on peut constater que plus la contrainte augmente, plus les ondes se propagent vite. Cependant, lorsque nous avons placé notre éprouvette en traction, la vitesse de propagation diminuait avec l'augmentation de la contrainte. Les résultats obtenus par laminage ne sont donc pas cohérents avec ceux obtenus en traction. Cette différence peut s'expliquer par le fait que l'éprouvette ne subit pas les mêmes contraintes en traction qu'en laminage. En effet, le laminage exerce des contraintes en compression sur l'éprouvette. Cependant, lors de l'essai de traction, nous sommes entrés dans la zone plastique de l'éprouvette. L'éprouvette a donc gardé des déformations permanentes avant d'être laminée. Il est donc possible que les contraintes de compression aient annulé les contraintes de traction. Cela expliquerait que plus l'éprouvette est laminée, plus la vitesse de propagation augmente.

## 5. CONCLUSION

Pour faire le bilan de nos manipulations, nous avons tout d'abord validé la méthode des ondes ultrasonores dans différents métaux et en particulier dans les aciers. Ensuite, nous avons mesuré la vitesse de propagation des ondes longitudinales dans plusieurs échantillons d'acier 316L laminés. Nous nous sommes alors aperçus qu'il fallait que les ondes ultrasonores se propagent dans la même direction que les contraintes présentes dans le matériau. Nous avons donc conçu un nouveau guide d'ondes ainsi qu'un support pour maintenir le capteur en contact avec l'éprouvette lorsque l'éprouvette est sur la machine de traction. Enfin, nous avons mesuré la vitesse de propagation des ondes longitudinales dans l'éprouvette placée en traction et soumise à différentes contraintes, puis dans l'éprouvette laminée.

Ce projet P6 a été très enrichissant pour l'ensemble du groupe. En effet, comme ce projet était constitué en grande partie d'un travail expérimental, nous avons pu apprendre à nous servir de différentes machines et du logiciel EuroScanV. De plus, ce projet nous a permis d'avoir un aperçu de ce qu'est le travail de recherche. Ainsi, tout au long du projet, nous avons mené des expériences, nous nous sommes rendus compte de ce qui fonctionnait bien et des pistes à abandonner, et cela nous a amenés à faire d'autres expériences.

D'autre part, ce projet s'inscrit dans notre formation d'ingénieurs. En effet, en tant que futurs ingénieurs, il est essentiel d'apprendre à travailler en groupe. Cela nous permettra par la suite de mieux appréhender le travail d'équipe en entreprise. De plus, il faut souligner qu'avant ce projet, nous n'avions jamais travaillé dans un groupe de six personnes puisque les groupes étaient toujours constitués au maximum de trois ou quatre personnes. Cela implique plus d'organisation et de communication, ce qui est très instructif.

Au terme de ce projet et si tout marche bien, il sera possible de connaître les contraintes résiduelles présentes dans n'importe quelle pièce en acier inoxydable en mesurant la vitesse de propagation des ondes ultrasonores longitudinales dans la pièce.

De plus, si cette méthode fonctionne pour l'acier 316L, elle pourra être appliquée pour d'autres matériaux. Elle sera donc utilisable dans de nombreux domaines, notamment pour faire des TP à l'INSA, ou encore pour des contrôles de qualité en industrie.

## 6. BIBLIOGRAPHIE

### Articles de presse

**BELAHCENE Farid.** “Détermination des contraintes résiduelles par méthode ultrasonore”. *Techniques de l'Ingénieur*, 10 octobre 2015 [consulté le 6 février 2018].

### Ouvrages

**LE NEINDRE Bernard.** “Constantes mécaniques”. *Techniques de l'Ingénieur*, [consulté le 9 juin 2018].

[https://books.google.fr/books?id=ildcsGY5-RsC&pg=PA19&lpg=PA19&dq=Fe3Si+module+d%27Young&source=bl&ots=L0-Bijm-2s&sig=mRgMCYuZekF3M3Ddoq-eyiaXfi8&hl=fr&sa=X&ved=2ahUKEwjFt5-wsK\\_aAhWEvBQKHwB6D0cQ6AEwBHoECAAQXA#v=onepage&q=Fe3Si%20module%20d'Young&f=false](https://books.google.fr/books?id=ildcsGY5-RsC&pg=PA19&lpg=PA19&dq=Fe3Si+module+d%27Young&source=bl&ots=L0-Bijm-2s&sig=mRgMCYuZekF3M3Ddoq-eyiaXfi8&hl=fr&sa=X&ved=2ahUKEwjFt5-wsK_aAhWEvBQKHwB6D0cQ6AEwBHoECAAQXA#v=onepage&q=Fe3Si%20module%20d'Young&f=false)

### Thèses

**SHAMSHIRSAZ Mahnaz.** “Contraintes résiduelles dues à l'élaboration dans des plaques métalliques minces multicouches”, juin 1995 [consulté le 9 juin 2018]. <https://ori-nuxeo.univ-lille1.fr/nuxeo/site/esupversions/96dfc571-d9b2-458a-ae09-4092caa09593>

### Supports de cours

**Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.** “Matériaux II – travaux pratiques : Détermination des contraintes résiduelles dans un assemblage soudé”. février 2015 [consulté le 9 juin 2018].

<https://lmc.epfl.ch/files/content/users/184559/files/TP%20M%C3%A9taux2%20Contraintes%20r%C3%A9siduelles.pdf>

**Université Lyon 1.** “TP4 : Mesure de modules d'élasticité par ultrasons”. [consulté le 9 juin 2018].

<http://spiralconnect.univ-lyon1.fr/spiral-files/download?mode=inline&data=1851693>

### Sites associatifs

**Simulationmatériaux.com.** “Liste des masses volumiques, modules de Young et coefficients de Poisson des matériaux courants”, [consulté le 9 juin 2018].

[https://www.simulationmatériaux.com/ComportementMecanique/comportement\\_mecanique\\_Liste\\_modules\\_de\\_Young.php](https://www.simulationmatériaux.com/ComportementMecanique/comportement_mecanique_Liste_modules_de_Young.php)

**Springer Materials.** “Fe<sub>3</sub>Si Crystal Structure”, 2016 [consulté le 9 juin 2018].

[https://materials.springer.com/isp/crystallographic/docs/sd\\_0381953](https://materials.springer.com/isp/crystallographic/docs/sd_0381953)

**RocdAcier.** “Essai de traction”, 14 août 2017, [consulté le 9 juin 2018].

<https://www.rocdacier.com/essai-de-traction-2/>

**Mecapratique.** “Les caractéristiques des matériaux”, [consulté le 9 juin 2018].

<http://www.mecapratique.fr/meca/rdm02.htm>

### Encyclopédie en ligne

**Wikipédia.** “Laminage”, mai 2018, [consulté le 9 juin 2018].

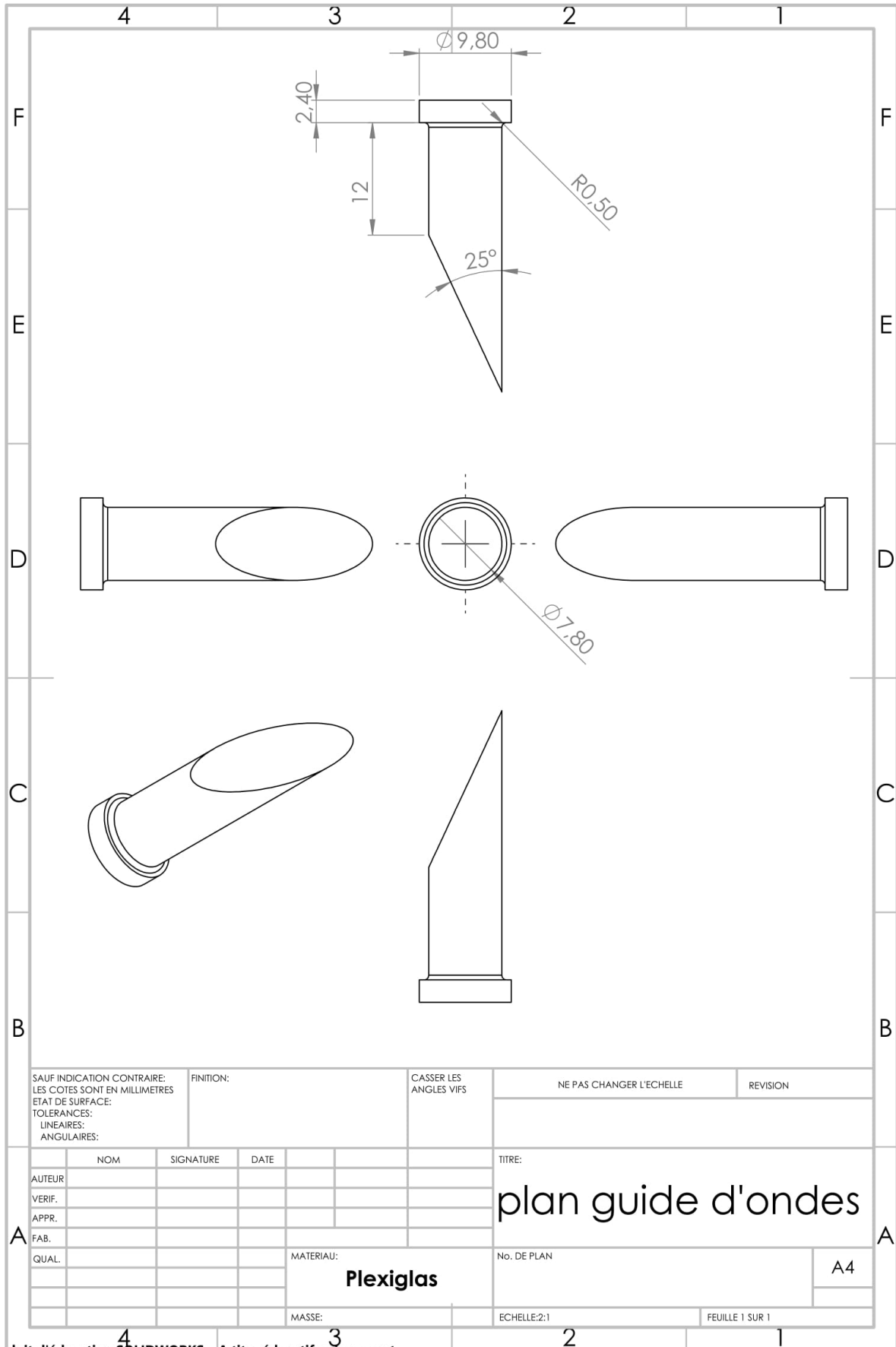
<https://fr.wikipedia.org/wiki/Laminage>

## 7. ANNEXES

### 7.1. Tableau de l'organisation du groupe

	expériences	modélisations	rapport								poster	soutenance et diapo		
			introduction	organisation	généralités	Mesure de la vitesse de propagation des ondes longitudinales et transversales dans plusieurs métaux	Mesure en traction dans le domaine élastique	Conception des deux pièces	Expérience finale	conclusion			mise en page	
Louis		Sketchup												
Céline		mise en plan												
Alison		conception												
Quentin		Sketchup												
Valentina		conception												
Emilie		Solidworks												

**7.2. Plan du guide d'ondes**





**7.3. Plan du support du capteur**

