

# Contrôle des matériaux

Version du 2015-08-18

## 1. Introduction

Parmi les nombreux procédés utilisés pour détecter les anomalies dans la structure et la composition des matériaux, les essais par ultrasons et par courants induits sont probablement les plus répandus. Les deux technologies n'ont pas encore atteint leur maturité et leur développement se poursuit activement. Elles sont d'ailleurs souvent complémentaires car les ultrasons donnent des renseignements sur l'espace intérieur d'un matériau mais sont mal adaptés à l'examen près des surfaces tandis que les courants induits permettent précisément le contraire.

## 2. Théorie

### 2.1 Méthode par ultrasons

Les ultrasons offrent un moyen efficace d'aller "voir" à l'intérieur des matériaux car ils se propagent assez bien dans la plupart des milieux. Bien que ce procédé soit utilisé depuis plusieurs dizaines d'années, il est encore loin d'avoir atteint sa maturité car l'objectif ultime serait de fournir à l'utilisateur une image complète et détaillée de l'intérieur d'un espace matériel quelconque. Dans l'état actuel de la technologie, ceci n'est possible que dans certains cas particuliers. Par exemple, l'imagerie médicale permet de "voir" la plupart des organes internes mais avec une finesse de détails, c'est-à-dire une "résolution" qui laisse encore à désirer. De même, le sonar permet aux sous-marins d'examiner un espace de quelques kilomètres autour du navire et d'en reproduire une certaine image en trois dimensions.

Dans la plupart des applications, au lieu d'essayer de créer des images, on se contente de mesures ponctuelles; elles sont beaucoup plus simples et souvent plus précises.

#### 2.1.1 Propagation, réflexion, réfraction, absorption

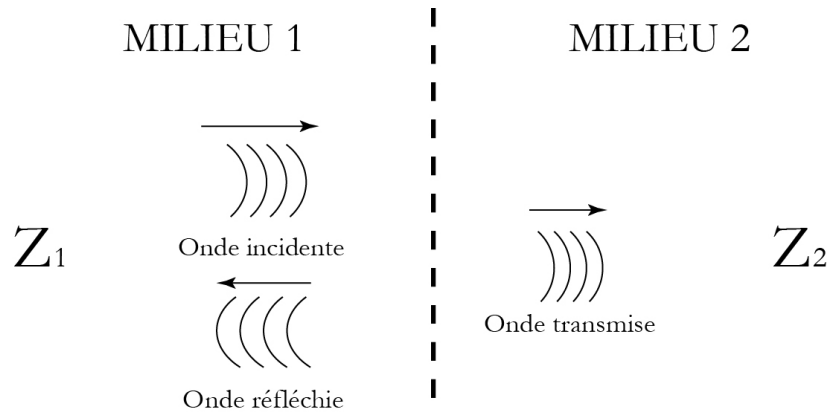
Tout comme les ondes optiques, les vibrations élastiques subissent des phénomènes de réflexion, de réfraction et d'atténuation. La notion d' "impédance acoustique"  $Z$  est très utile pour aider à décrire ces phénomènes. Par définition :

$$Z = \frac{\text{Pression dans le matériau, en un point}}{\text{Vitesse des particules, au même point}}$$

Pour un matériau donné, ce rapport est une constante; il peut donc servir à le caractériser.

## Matériaux – 4.2

Le terme “impédance” n’est pas le fruit du hasard, et sa définition non plus. En effet, les équations d’ondes, lorsqu’elles sont écrites au moyen de ce “Z”, deviennent formellement identiques à celles qui servent à décrire la propagation des ondes électromagnétique.



L’étude de la propagation des ondes nous enseigne que lorsqu’une vibration se propageant dans un milieu 1 arrive à une interface avec un milieu 2 d’impédance différente, il apparaît une onde réfléchi qui retourne en sens inverse. On peut alors définir un coefficient de réflexion qui sert à comparer l’amplitude de l’onde réfléchi avec celle de l’onde incidente :

$$\rho = \frac{\vec{A}}{\vec{A}}$$

L’algèbre des ondes indique ensuite que ce coefficient ne dépend que des matériaux et il est donné par :

$$\rho = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

La réflexion et les échos qu’elle produit constituent le principal outil pour l’examen des matériaux.

L’énergie qui n’a pas été réfléchi à l’interface continue et se propage normalement dans le milieu 2. Si l’angle d’incidence n’est pas de 90°, il pourra y avoir réflexion ou réfraction. Cette dernière est généralement considérée comme une nuisance car les changements de direction qu’elle provoque rendent plus difficile l’interprétation des observations. Le phénomène est quand même utilisé avantageusement dans certains cas afin de diriger un faisceau ultrasonore vers un endroit qui serait inaccessible autrement.

Finalement, il se produit une certaine atténuation du faisceau pendant la propagation. C’est un phénomène évidemment nuisible car il limite la distance à laquelle le faisceau peut produire un écho détectable. Toutefois, l’atténuation mérite d’être étudiée pour elle-même car, dans

### Matériaux – 4.3

certaines matériaux à structure granulaire, sa mesure peut donner des renseignements importants sur la grosseur et la forme des grains.

Pendant un déplacement  $\Delta x$  d'une onde acoustique, l'absorption par divers mécanismes fait que la perte de pression est proportionnelle à la pression. On peut donc écrire :

$$\frac{\Delta P}{\Delta x} = -\alpha P ,$$

où  $\alpha$ , une constante, est le “coefficient d'atténuation”. Par simple intégration, on arrive rapidement à la loi :

$$P(x) = P_0 e^{-\alpha x}$$

où  $P_0$  est la pression à la position  $x=0$ .

#### Unités du coefficient d'atténuation $\alpha$

Les unités de  $\alpha$  sont évidemment (distance)<sup>-1</sup>.

Cependant, l'usage a démontré qu'il est souvent avantageux d'utiliser une échelle logarithmique pour comparer  $P$  à  $P_0$ . C'est une pratique universelle dans l'industrie.

Si l'on choisit la base népérienne, alors l'atténuation ( $\alpha x$ ) s'exprime en nepers :

$$(-\alpha x) \text{ en nepers} = \ln \frac{P}{P_0}$$

Le terme “atténuation” et le signe (-) ayant la même signification, il n'est pas nécessaire d'indiquer ce dernier.

$$\alpha \text{ (en nepers / mètre)} \times x \text{ (mètres)} = \ln \frac{P}{P_0}$$

$$\alpha \text{ (nepers / m)} = \frac{1}{x} \ln \frac{P}{P_0} .$$

Si l'on choisit l'échelle logarithmique en décibels, alors il faut comparer les puissances. Ces dernières étant proportionnelles à la pression au carré, on obtient :

$$(\alpha x) \text{ en dB} = 10 \log_{10} \frac{P^2}{P_0^2} = 20 \log_{10} \frac{P}{P_0}$$

$$\alpha (\text{en dB / mètre}) \times x (\text{mètres}) = 20 \log_{10} \frac{P}{P_0}$$

$$\alpha (\text{dB / m}) = \frac{1}{x} 20 \log_{10} \frac{P}{P_0}$$

Le passage d'une unité à l'autre correspond à un simple changement de base logarithmique.

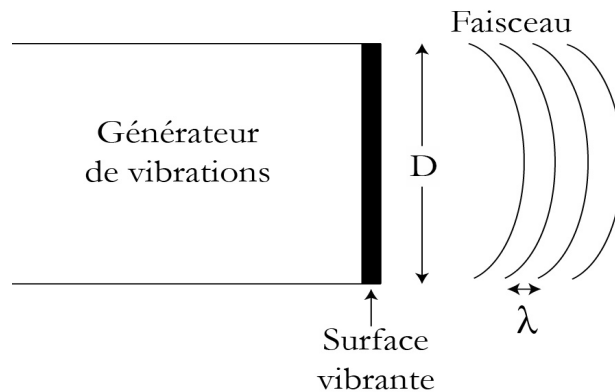
$$\frac{P}{P_0} = e^{-\alpha (\text{nepers / mètre}) x} \rightarrow (20 \log_{10} \frac{P}{P_0})_{dB} = 20 \log_{10} e^{-\alpha x} = \frac{20 \log_e e^{-\alpha x}}{\log_e 10} = \frac{20 (-\alpha x)}{2.302}$$

$$(20 \log_{10} \frac{P}{P_0})_{dB} = \underbrace{8.69}_{\text{En dB / mètre}} (-\alpha (\text{en nepers / mètre}) x)$$

Donc :  $8.69 \alpha \text{ Np / m} = \alpha \text{ dB / m}$

### Choix de la longueur d'onde

Pourquoi travailler avec des ultrasons plutôt que des sons ou même des infrasons? C'est une question de longueur d'onde.

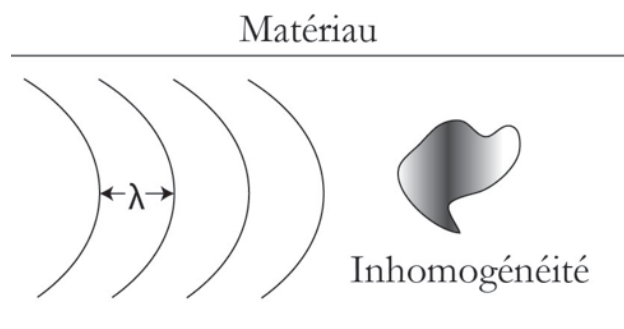


En effet, on produit des vibrations acoustiques (presque toujours longitudinales) en faisant vibrer une surface à la fréquence désirée. Ces vibrations se transmettent dans le milieu avoisinant en formant un faisceau d'autant plus directionnel (c'est-à-dire étroit) que la

## Matériaux – 4.5

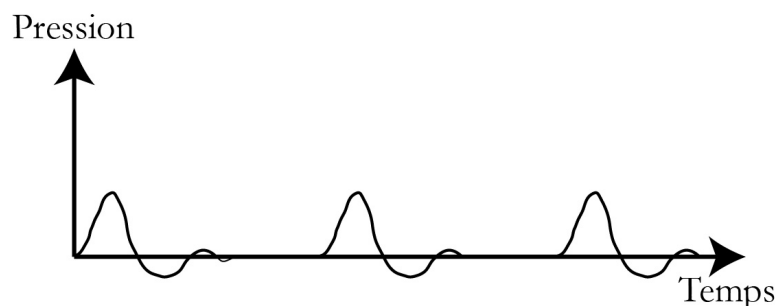
longueur d'onde  $\lambda$  est petite par rapport à la dimension  $D$ . Il faut donc utiliser des longueurs d'onde courtes afin de conserver des dimensions acceptables pour le générateur.

Une autre raison réside dans le phénomène de réflexion qui, faut-il le rappeler, est le plus important pour l'étude des matériaux. Il est possible de démontrer que lorsqu'une inhomogénéité a des dimensions comparables ou plus petites que la longueur d'onde, l'écho devient très faible et indétectable. Il y a donc avantage à utiliser des longueurs d'onde aussi courtes que possible afin de pouvoir détecter de petites imperfections. Par contre, l'atténuation augmente rapidement avec la fréquence; il y a donc un compromis à faire entre la résolution et l'atténuation. Avec l'équipement commercial présentement disponible, l'utilisateur peut choisir une fréquence comprise entre 0.5 MHz et environ 20 MHz. Pour les métaux usuels, ceci correspond à une longueur d'onde comprise entre 0.25 et 10 mm.



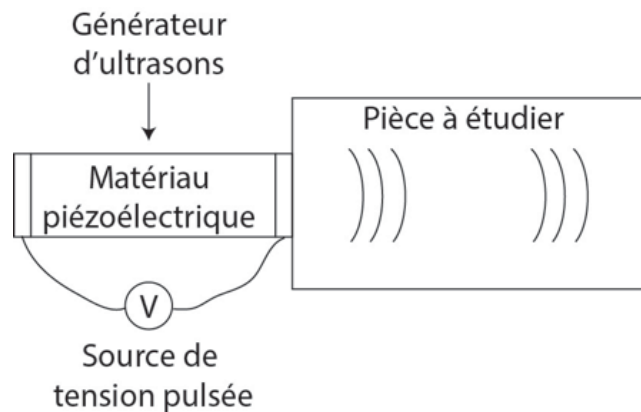
### 2.1.2 Production des ultrasons

Mis à part les systèmes d'imagerie, on utilise toujours des faisceaux pulsés, comme indiqué sur le graphique ci-dessous. L'intervalle de temps qui sépare deux "paquets" d'ondes n'a pas beaucoup d'importance; il suffit qu'il soit assez long pour que tous les échos que pourrait produire le premier aient été reçus et observés avant que le paquet suivant ne soit émis.



## Matériaux – 4.6

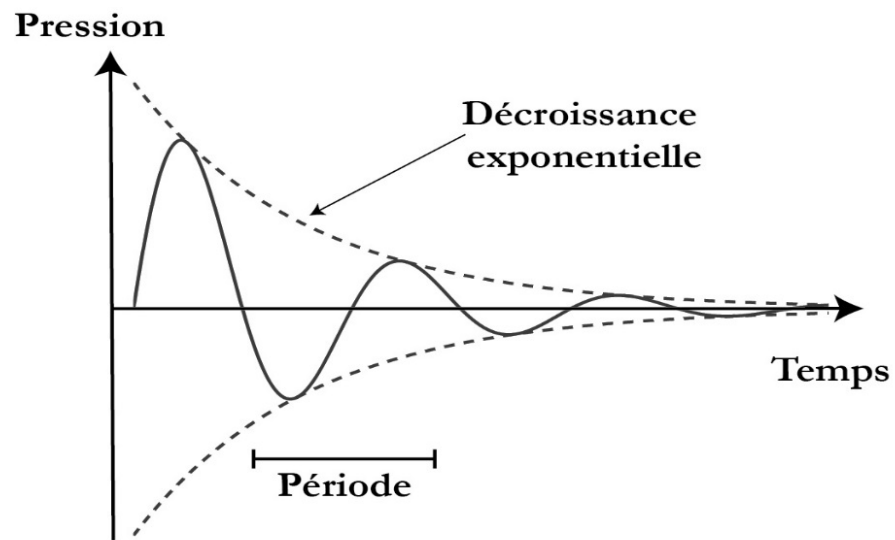
Actuellement, la meilleure façon de générer un paquet d'ondes de ce type est d'exciter un morceau de matériau piézoélectrique en appliquant brusquement une différence de potentiel entre deux faces opposées. L'effet d'une telle différence de potentiel sur ce type de matériau est de provoquer une déformation, ce qui a pour effet que le morceau se trouve momentanément comprimé pendant la présence de la tension. Lorsque cette dernière disparaît, il se "décomprime" et il reprend son épaisseur originale après avoir produit quelques oscillations transitoires dont la forme dépend de son élasticité, sa masse, etc.



Dans l'équipement présentement utilisé au laboratoire, la tension d'excitation est d'environ 300 volts, avec une durée de 70 ns. Le taux de répétition est d'environ 1000 par seconde.

Il faut apporter une certaine attention à la forme de l'impulsion acoustique car l'utilisateur doit être en mesure d'effectuer un choix parmi plusieurs possibilités. En effet, en ajustant les dimensions de l'élément piézoélectrique, les fabricants peuvent produire un transducteur ayant une fréquence de désexcitation bien déterminée, mais quelqu'un doit leur indiquer cette fréquence. Il en est de même pour le temps de décroissance. En plaçant certains matériaux absorbants sur une des faces du transducteur, l'oscillation transitoire peut s'amortir en moins d'un cycle ou, au contraire, durer des dizaines de cycles. Il appartient à l'utilisateur de faire le bon choix selon les matériaux qu'il veut examiner et selon le compromis qu'il est prêt à faire entre la résolution et la profondeur de pénétration.

Les transducteurs utilisés au laboratoire ont une fréquence de désexcitation d'environ 3.5 MHz et elle dure pendant 3 à 4 cycles.



### 2.1.3 Détection des ultrasons

La détection d'une vibration acoustique peut être faite avec exactement le même type de transducteur qui a servi à la produire. On utilise alors l'effet piézoélectrique inverse, c'est-à-dire un matériau piézoélectrique subissant une déformation fait apparaître lui-même des charges électriques sur ses faces. Ces charges peuvent être transformées en différence de potentiel et produire un signal facilement observable à l'oscilloscope (voir les renseignements sur les accéléromètres, dans l'expérience sur les vibrations).

Très souvent, et ce sera le cas dans la présente expérience, le même transducteur est utilisé comme transmetteur puis comme récepteur. Le passage d'un mode à l'autre est instantané et n'exige pas d'intervention humaine ni électronique; après la transmission d'une impulsion, dès que la désexcitation est terminée, le transducteur est prêt à réagir à une vibration.

### 3.1.4. Mesure d'épaisseurs à l'aide d'ultrasons

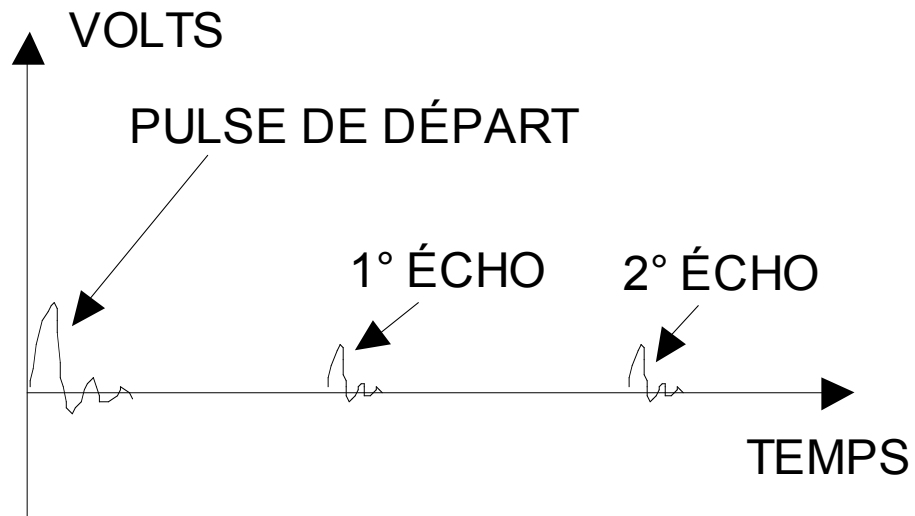
On a souvent besoin de connaître l'épaisseur d'une pièce ou d'une paroi alors qu'une des deux faces n'est pas accessible (par exemple pour mesurer l'importance de la corrosion interne sur les parois d'une chaudière à vapeur). Les ultrasons permettent une telle mesure facilement. Avec certaines précautions, la précision est meilleure que  $\pm 0.1$  mm.

Pour faire ces mesures, on utilise le principe de réflexion des ondes lorsqu'il y a un changement d'impédance, décrite par :

$$\rho = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad \text{où} \quad \begin{array}{l} Z_1 = \text{impédance de l'aluminium;} \\ Z_2 = \text{impédance de l'air.} \end{array}$$

À la surface inférieure du cylindre,  $Z_2 \ll Z_1$ , il y a réflexion presque totale d'une impulsion envoyée et l'écho revient vers la face supérieure et est capté par le transducteur. À cet endroit, l'écho subit à nouveau une réflexion puisque, en général,  $Z_2 \neq Z_1$ . On obtient alors une suite d'écho à l'oscilloscope, comme illustré à la figure suivante :

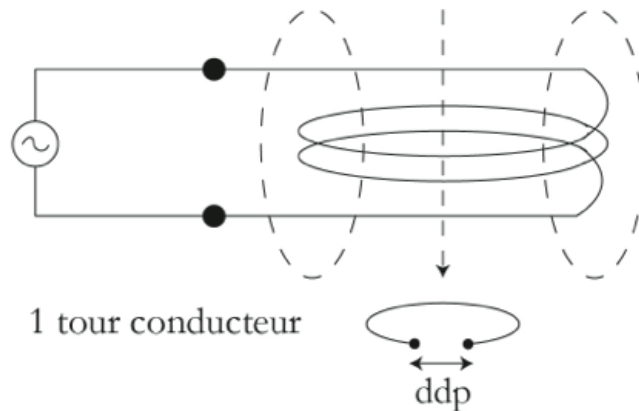




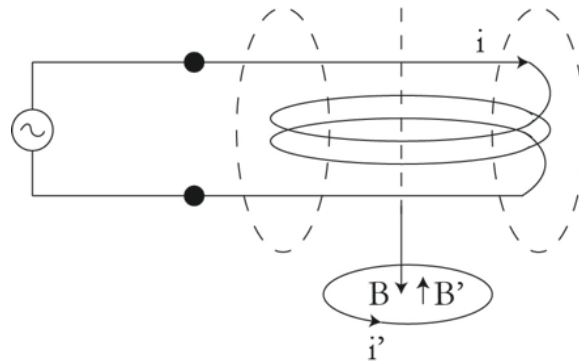
La trace à l'oscilloscope apparaît donc comme une succession de signaux dont les amplitudes vont en décroissant à cause de l'atténuation et à cause du fait que la réflexion sous le transducteur n'est pas de 100%.

## 2.2 Méthode par courants de Foucault

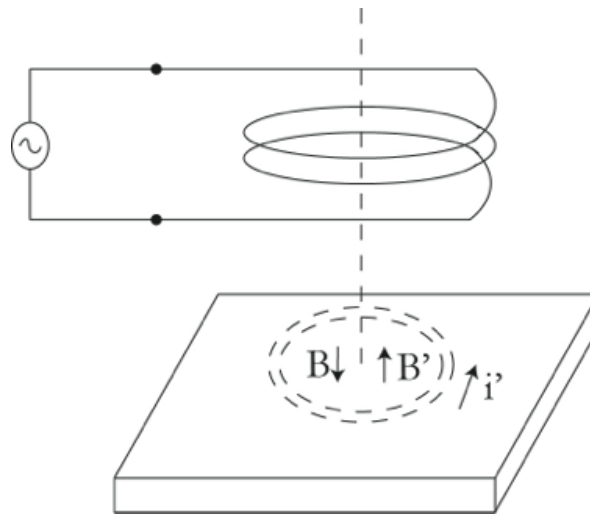
On sait qu'une bobine parcourue par un courant alternatif produit un champ magnétique variable qui peut induire une différence de potentiel (ddp) dans un circuit conducteur voisin. Par exemple, s'il s'agit d'un tour de fil, la ddp apparaît entre les deux extrémités. Si le tour est fermé, la ddp fait circuler un courant déterminé par la résistance du parcours.



Selon la loi de Lenz, le courant induit  $i'$  circule dans le sens contraire du courant inducteur  $i$  et il produit à son tour un champ magnétique  $B'$  opposé au champ initial  $B$ . Il s'ensuit une diminution du flux total, et cet effet est perceptible partout dans l'espace. Ainsi, l'inductance de la bobine se trouve diminuée.



Si le tour de fil est remplacé par une pièce métallique solide, le même phénomène se produit mais le courant induit n'est plus limité à un seul parcours : ce sont les "courants de Foucault" (ou courant de Eddy). En principe, tout ce qui peut affecter la distribution ou l'intensité de ces courants peut être étudié en observant le changement d'impédance de la bobine.



Par exemple, dans les alliages, il est possible de déceler des changements dans la composition ou la structure cristalline. De même, toute fissure, même microscopique, perturbe la distribution des courants induits sous la bobine et devient de ce fait décelable. Le procédé est d'ailleurs utilisé sur une grande échelle pour détecter les fissures autour des rivets dans les fuselages et les ailes d'avion; il suffit de balayer la surface avec une bobine tout en surveillant d'éventuels changements d'impédance.

Si le matériau est non seulement conducteur mais aussi ferromagnétique, il faut considérer cet effet en plus, c'est-à-dire l'alignement alternatif des domaines magnétiques dans le sens du champ  $\vec{B}$ . Le résultat est évidemment une augmentation du flux. L'effet est donc contraire à celui des courants induits. Il n'en demeure pas moins que tout changement dans les propriétés du matériau se traduit par un changement dans l'impédance de la bobine.

Les courants de Foucault peuvent être étudiés mathématiquement dans le cas d'un champ produit par une bobine de géométrie simple. Le résultat est une distribution de courant ayant un maximum à la surface avec une décroissance exponentielle en fonction de la profondeur. On définit la "distance de pénétration" comme étant la profondeur à laquelle l'intensité du courant diminue à  $1/e$  de son intensité à la surface. Cette distance  $\delta$  est calculable à partir des propriétés du matériau :

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$$

où

- $f$  = la fréquence du champ  $B$
- $\mu$  = la perméabilité magnétique
- $\sigma$  = la conductivité électrique

## Matériaux – 4.12

La “distance de pénétration” ne signifie aucunement que l’on ne peut détecter une anomalie située à une plus grande profondeur. Certains appareils peuvent déceler une fissure localisée à dix fois cette distance.

La formule précédente a une certaine importance pratique car la personne qui effectue des essais de ce type doit choisir la fréquence  $f$ . À prime abord, il peut sembler avantageux d’utiliser une fréquence très basse afin d’avoir accès à une grande profondeur. Il ne faut cependant pas oublier que la quantité que l’on doit détecter avant tout est un petit changement d’impédance et ceci est d’autant plus difficile que la fréquence est basse.

On utilise des fréquences comprises entre 100 Hz et 10 MHz. Dans la présente expérience, la fréquence est d’environ 10 kHz et le métal un alliage d’aluminium de type 6061-T6. La pénétration calculée est 1.3 mm.

### 2.2.1 Équipement de mesure

#### La bobine d’exploration

Il en existe une grande variété de formes et de dimensions. Certaines ont un diamètre aussi petit que 2 mm alors que d’autres mesurent plusieurs centaines de mm. La forme est généralement circulaire mais il y a de nombreuses situations où une géométrie différente résulte en une plus grande sensibilité. Il n’existe pas de règle précise à cet égard; c’est un domaine empirique. En fait, certains ingénieurs qui mettent en place des systèmes d’inspection par courants de Foucault estiment que la plus grande partie du travail consiste précisément à déterminer le meilleur type de bobine à utiliser.

Celles mises à votre disposition au laboratoire sont circulaires, avec un diamètre de 14 mm. Elles comportent 60 tours de fil et leur inductance, en l’absence de métal, est 79  $\mu\text{H}$ .

#### Impédancemètre

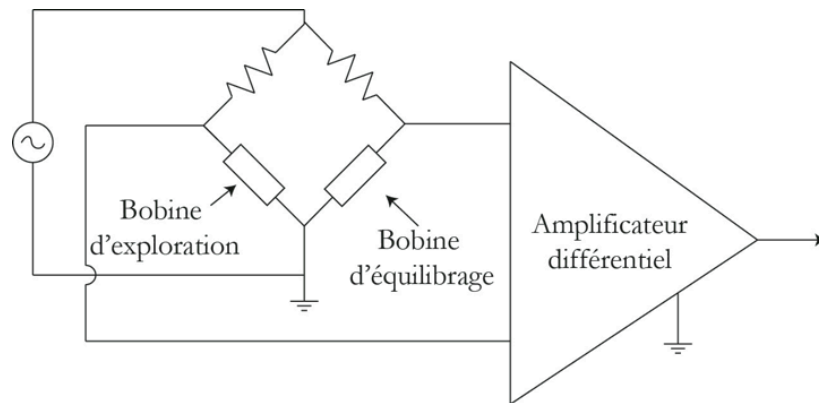
Ceci constitue la partie la plus délicate de tout le processus car les variations d’impédance dont il est question sont minimales; généralement inférieures à 1%. Un impédancemètre conventionnel n’est d’aucune utilité.

La façon habituelle de résoudre le problème consiste à inclure la bobine dans un pont d’impédance (comme un pont de Wheatstone) afin d’équilibrer son impédance originale et ne détecter que les variations. Le pont est initialement équilibré en plaçant les deux bobines identiques sur le métal à contrôler et à des endroits où il n’y a pas d’anomalies; dans ces

conditions, la tension de sortie du pont est nulle (idéalement). Par la suite, l’une des bobines est utilisée pour balayer la surface. Le passage près d’une anomalie fait apparaître une tension

### Matériaux – 4.13

de déséquilibre généralement très faible mais qui peut ensuite être amplifiée presque sans limite. On arrive ainsi à déceler les plus infimes changements d'impédance.



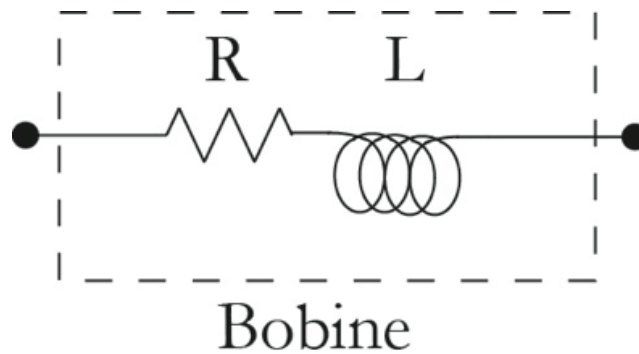
#### Affichage du résultat

L'impédance de la bobine comporte une partie résistive et une partie réactive :

$$Z = R + j\omega L$$

Elle peut évidemment s'écrire aussi sous la forme d'un module et d'un argument :

$$Z = |Z| \angle \theta$$



Les courants induits n'étant pas en phase avec le courant dans la bobine, ils affectent à la fois  $R$  et  $L$  (ou  $|Z|$  et  $\theta$ ). Dans de nombreuses situations, il suffit de pouvoir détecter un changement dans le module  $|Z|$  pour conclure à la présence d'une anomalie. Par contre, pour des mesures plus détaillées, l'expérience a démontré qu'il est souvent utile de connaître séparément les changements dans les deux composantes de l'impédance, c'est-à-dire  $\Delta|Z|$  et  $\Delta\theta$  ou  $\Delta R$  et  $\Delta L$ . La mesure de  $\Delta\theta$  n'étant pas facile, les appareils commerciaux affichent plutôt  $\Delta R$  et  $\Delta L$ .

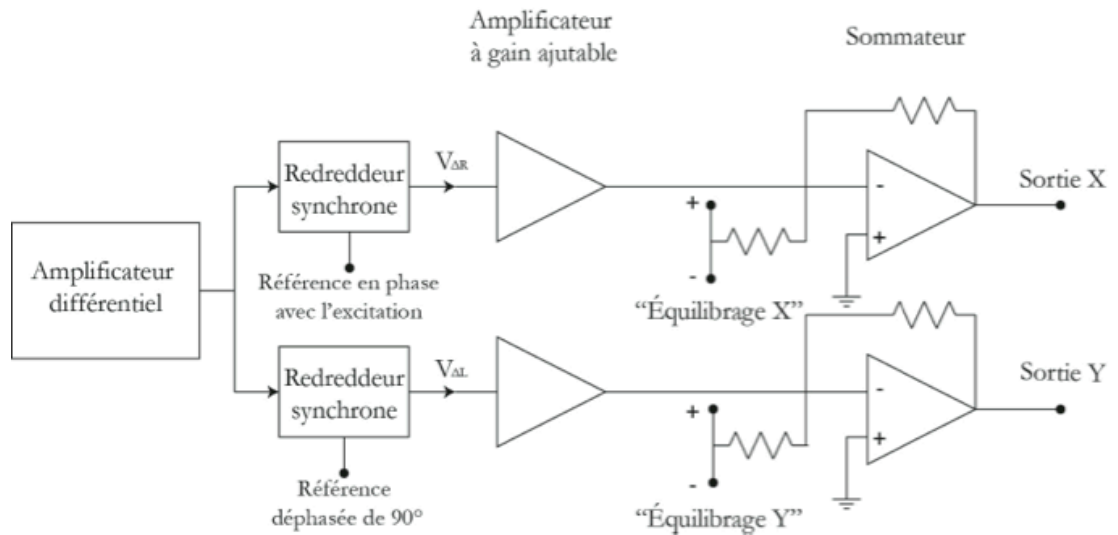
Cette information est tirée de la tension de déséquilibre du pont. Il suffit d'en extraire la composante en phase avec l'excitation (qui correspond au déséquilibre dû à  $\Delta R$ ) et la composante en quadrature (qui correspond au déséquilibre dû à  $\Delta L$ ). On obtient ainsi, au moyen de deux redresseurs synchrones, une paire de tensions continues,  $V \Delta_R$  et  $V \Delta_L$ , qui peuvent être affichées directement par des voltmètres ou visualisées sur un écran d'oscilloscope fonctionnant dans le mode XY.

### Notes

- 1- Il est souvent utile de faire passer  $V \Delta_R$  et  $V \Delta_L$  par des amplificateurs à gain ajustable afin de pouvoir contrôler la sensibilité de l'appareil.
- 2- Dans la plupart des cas, même avec des bobines aussi identiques que possible, le pont d'impédances n'est pas suffisamment bien équilibré au départ. Il faut améliorer l'équilibre en ajoutant une résistance et une réactance ajustables dans le pont lui-même

## Matériaux – 4.15

ou, le plus souvent, en superposant à  $V_{\Delta R}$  et  $V_{\Delta L}$  résiduels des tensions continues de polarités contraires afin de les annuler. C'est la raison d'être des modules de sommation sur les sorties X et Y dans le schéma ci-dessous.



Dans l'équipement que vous utilisez au laboratoire :

- 1- l'amplificateur différentiel a un gain de 200,
- 2- les redresseurs synchrones sont à simple alternance,
- 3- les amplificateurs ajustables ont un gain de 1 ou 10,
- 4- l'affichage se fait sur un oscilloscope XY.

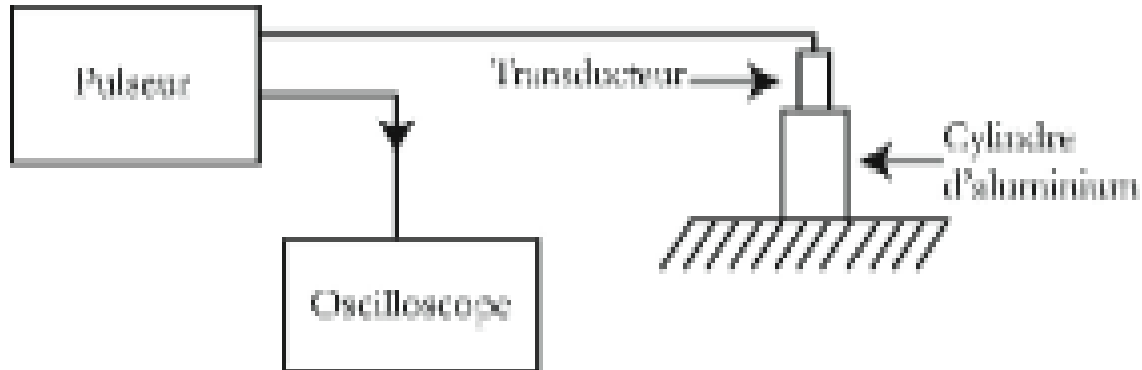
### 3. Manipulations

#### 3.1 Ultrasons

L'expérience est destinée à illustrer le phénomène des échos, et leurs applications, tout en faisant ressortir certaines précautions à prendre dans l'interprétation des observations. Un deuxième objectif est la mesure de l'atténuation afin d'illustrer le fait qu'elle peut varier énormément d'un matériau à un autre et que par conséquent tous les matériaux ne peuvent être inspectés avec la même facilité.

##### 3.1.1 Mesure d'une épaisseur

1. Réaliser le montage suivant :

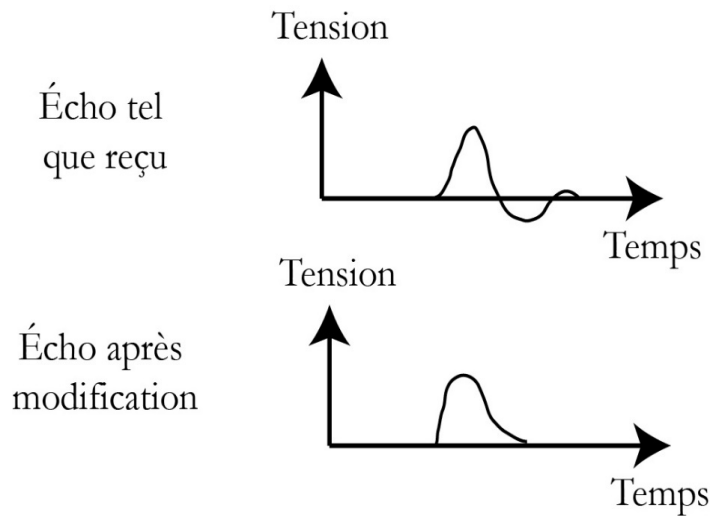


2. Placer un peu de substance visqueuse entre le transducteur et le cylindre d'aluminium. Quelle est l'utilité d'une telle substance?
3. Mesurer le temps entre les échos. Sachant que la vitesse des ultrasons dans l'aluminium est d'environ 6300 m/s, déterminer l'épaisseur du cylindre.
4. Mesurer l'épaisseur avec une règle et comparer les deux valeurs.
5. Répéter pour toutes les épaisseurs disponibles en laboratoire. Quelle est la plus petite épaisseur qu'il est disponible de mesurer avec cette méthode?



### Notes

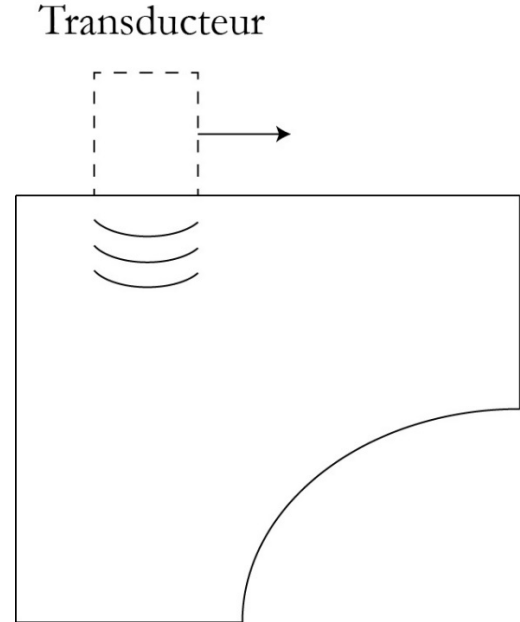
Certains appareils font subir au signal d'écho un traitement électronique qui reproduit la partie positive de l'enveloppe plutôt que les oscillations elles-mêmes. Ceci a pour effet de simplifier la trace d'oscilloscope mais en général, la précision en souffre. Vos appareils affichent un signal "naturel".



### 3.1.2 Réflexion sur une surface courbée

1. Placer le transducteur sur le bloc d'aluminium avec une surface courbée
2. Noter le temps qui s'écoule entre l'impulsion initiale et le premier écho et calculer l'épaisseur du bloc
3. Répéter cette mesure pour différentes positions du transducteur, jusqu'à la droite complètement.

Comment interprétez-vous ces mesures? Est-ce que cet effet peut venir biaiser vos mesures?



### 3.1.3 Détection d'une cavité

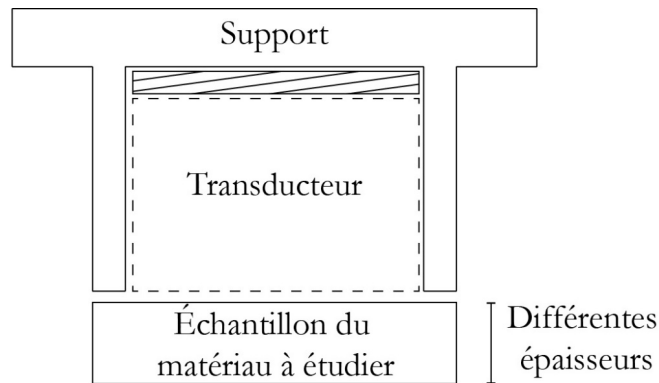
Vous avez un gros bloc d'aluminium comportant à l'intérieur une cavité typique des défauts que l'on rencontre quelquefois à l'intérieur des pièces fabriquées par moulage.

Sonder la pièce à l'aide du transducteur. Déterminer la forme de la cavité avec vos mesures prises. Ne pas oublier d'identifier dans votre rapport et votre cahier de laboratoire le bloc que vous avez utilisé.

Si la surface de la cavité n'avait pas été plane, auriez-vous réussi à déterminer la forme?

### 3.1.4 Atténuation

Le signal électrique produit par le transducteur étant proportionnel à la pression acoustique, il suffit en principe de mesurer l'intensité du signal correspondant à différentes épaisseurs du matériau pour en déduire son coefficient d'atténuation. La mesure exacte est difficile et exige de nombreuses précautions mais dans le cas présent, il suffira d'obtenir une valeur approximative.



Pour assurer une certaine précision, il faut que le transducteur s'appuie sur les différents échantillons avec la même force. Vous avez un support qui atteint cet objectif en comprimant une matière spongieuse d'une même quantité, quel que soit l'échantillon.

1-Mesurer les amplitudes des deux premiers pics pour chacun des échantillons de plastique acrylique. En déduire le coefficient d'absorption de ce matériau. Déterminer si c'est préférable de faire la mesure avec deux pics sur un même échantillon ou avec des amplitudes données par deux échantillons différents.

Présenter les explications qui justifient votre choix.

2-Répéter l'étape 1 avec les blocs d'aluminium.

D'après vos mesures, quelle est l'épaisseur maximale pouvant être mesurée pour l'acrylique? Et pour l'aluminium?

En vous rappelant les notions vues dans le cours *Matériaux pour ingénieurs*, pouvez-vous donner une explication pour la différence entre ces deux matériaux?

3-Calculer approximativement la vitesse du son dans l'acrylique.

## 3.2 Courants de Foucault

### 3.2.1 Buts de l'expérience

Se familiariser avec l'équipement et la procédure d'inspection par courants induits.

Appliquer la méthode à deux cas particuliers :

- la détection d'une fissure invisible à l'œil nu;
- la mesure de l'épaisseur d'un revêtement sur une surface métallique.

### 3.2.2 Mise en marche des appareils

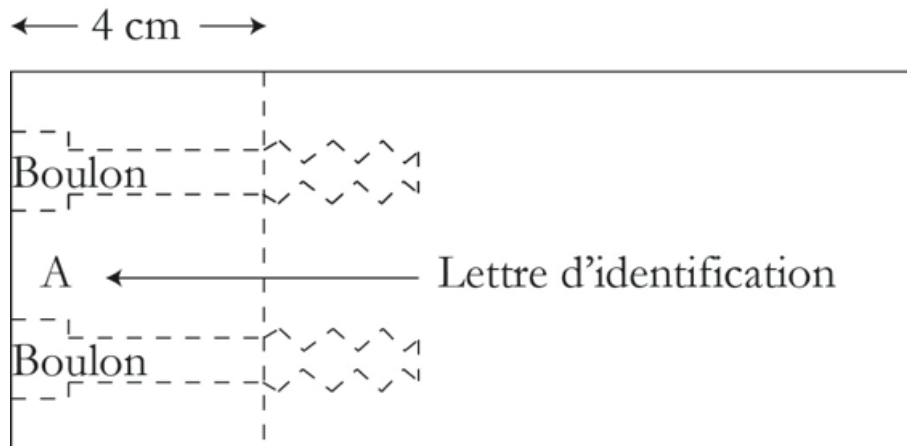
1. Sans rien brancher sur l'oscilloscope, mettre ce dernier dans le mode XY avec des couplages continus sur les entrées et une sensibilité de 100 mV par division.
2. En plaçant maintenant le faisceau au centre de l'écran, vous saurez plus tard que le pont sera parfaitement équilibré lorsque le point sera revenu à cet endroit.

L'oscilloscope n'est utilisé ici que pour sa capacité d'afficher deux tensions simultanément; les ajustements décrits ci-haut n'auront plus à être modifiés pendant toute la durée de l'expérience.

3. Relier l'appareil à courants de Foucault à l'oscilloscope.

### 3.2.3 Détection d'une fissure

Vous avez un bloc d'aluminium fait de deux pièces; le joint d'assemblage est à 4 cm à partir de la gauche et il est là afin que vous puissiez vous entraîner à le détecter.



1. Placer les deux bobines sur la partie gauche, assez loin l'une de l'autre pour éviter une interaction magnétique et assez loin des bords.
2. Équilibrer l'appareil.

Les boulons n'ont pas d'effet car les courants induits sont négligeables à cette profondeur. En déplaçant l'une des bobines, vous pourrez détecter facilement le joint.

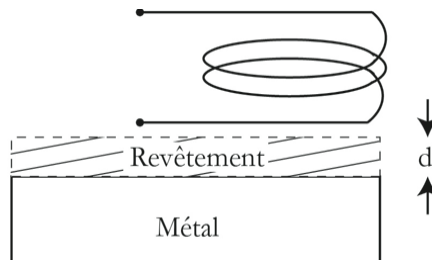
3. Finalement, comme la partie de droite du bloc comporte une fissure, détecter et de déterminer très approximativement son orientation et sa longueur.

Pour ce type d'alliage, est-ce  $V \Delta_R$  ou  $V \Delta_L$  qui est le meilleur indicateur pour une fissure?

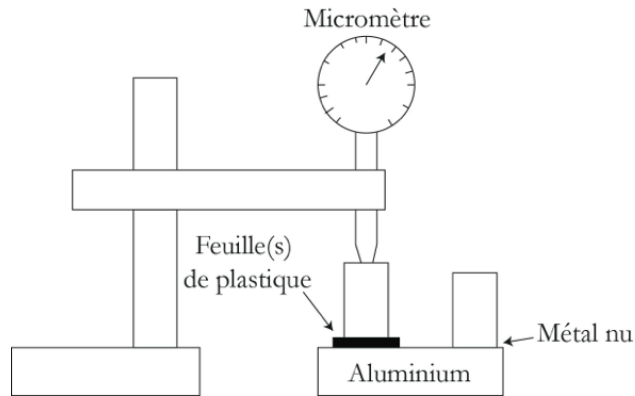
### 3.3 Mesure de l'épaisseur d'un revêtement

Il arrive fréquemment que l'on ait besoin de mesurer l'épaisseur d'un revêtement sur une surface métallique. Il peut s'agir de revêtements destinés à l'isolation électrique, ou à la protection contre la corrosion, ou de peinture décorative, etc.

Les courants de Foucault permettent de mesurer l'épaisseur de tels revêtements car l'impédance de la bobine change très rapidement avec la distance "d" qui la sépare du métal. Dans le cas présent, vous avez une plaque d'aluminium recouverte d'une couche de résine à l'époxy dont l'épaisseur n'est pas uniforme.



1. Étalonner l'appareil en commençant par un équilibrage avec les deux bobines sur le métal nu.
2. Introduisez ensuite, sous la sonde d'exploration, une mince feuille de plastique dont l'épaisseur peut être mesurée facilement au moyen d'un micromètre.
3. Notez alors le déséquilibre du pont (à vous de choisir entre le signal X ou Y). Vous pouvez mesurer en mV ou en nombre de divisions sur l'écran.



4. Continuez à noter le déséquilibre en empilant les feuilles de plastique jusqu'à une épaisseur d'environ 0.3 mm. Ceci vous permet de tracer une courbe d'étalonnage.
5. Balayer la plaque avec la sonde pour connaître l'épaisseur du dépôt en n'importe quel endroit.

Il faut obtenir le graphique de l'épaisseur de la couche de résine en fonction de la position, en suivant l'axe le plus long de la plaque. Il n'est pas nécessaire de rechercher une grande précision pour cette courbe, et une dizaine de points suffit. Par contre, il faut être capable de répondre aux deux questions suivantes :

- 1- Quelle est approximativement la précision sur l'épaisseur du dépôt?
- 2- Combien y a-t-il de couches avec une épaisseur différente le long de la plaque?