

## **1. Introduction**

Comme toutes les techniques de contrôle non destructif, depuis une vingtaine d'années, les méthodes ultrasonores ont montré leur efficacité dans la caractérisation de différentes propriétés macroscopiques de matériaux et dans la détection de défauts [9]. Les tests par ultrasons représentent environ le tiers des essais non destructifs de matériaux ou de structures en tout genre, et dans des secteurs d'applications très diversifiés (Aéronautique, industries des transports, de l'énergie, Génie Civil, etc...). Parmi ces tests, on peut distinguer les contrôles non destructifs (CND). Ils concernent la détection, la localisation voire la résistance et le dimensionnement d'inhomogénéités (craques, fissures, délaminages, etc...) pouvant constituer des défauts préjudiciables ou pas, selon certains critères d'acceptabilité et de tolérance aux dommages. [10]

La caractérisation des bétons par propagation d'ondes ultrasonores est une voie usuelle pour évaluer la résistance potentielle d'un ouvrage. L'utilisation de techniques éprouvées telle que la transmission, le pulse écho ou les ondes de surfaces permettent de repérer des zones à faibles caractéristiques mécaniques, voire à détecter la résistance des structures. De fait, la plupart des méthodes de CND nécessitent une bonne connaissance de la physique du matériau et de son endommagement pour détecter et caractériser les défauts, la connaissance fine de la propagation des ondes dans le béton et les avantages qu'elle pourra apporter sur le point de vue théorique deviennent essentiels pour envisager des contrôles sur site et faire des choix de procédures ou de paramètres de contrôle. [11]

Ce chapitre présente les bases physiques de certaines techniques de contrôle non destructif du point de vue principe de contrôle, avantages et inconvénients de chaque technique. Une grande partie du chapitre est consacrée à la technique des ultrasons en décrivant les différents types d'ondes générées par les transducteurs, les modes et méthodes de contrôle. Par la suite, on étudie le phénomène de propagation des ondes élastiques dans les matériaux en définissant les équations qui lient les vitesses de propagation aux constantes élastiques.

## **2. Le contrôle non destructif**

### **2.1. Les objectifs du CND**

Le contrôle non destructif a pour objectif, comme son nom l'indique, de contrôler l'état des pièces industrielles sans pour autant que les examens correspondants ne puissent nuire à leur utilisation future. Ceci peut correspondre à deux types de contrôles : l'estimation d'un paramètre constitutif de la pièce comme par exemple l'épaisseur d'une paroi, la distance à un objet, les propriétés électromagnétiques constitutives du matériau ; la recherche d'une rupture de ces paramètres. Dans le deuxième cas, il s'agit en général de défauts, qui peuvent être par exemple des fissures, des inclusions, des porosités, des effets de la corrosion ou de la fatigue mécanique. Cette procédure de contrôle se produit souvent plusieurs fois au cours de la vie d'une pièce et doit satisfaire au mieux les critères suivants [1]:

- **la rapidité d'exécution**

Il faut que le contrôle soit rapide pour qu'il ne soit pas trop pénalisant à la fois en termes d'immobilisation physique de chaque pièce, mais aussi au niveau des coûts que sont le temps de travail de la main-d'œuvre ou les frais de fonctionnement de l'usine.

- **le coût**

Le contrôle qualité représente sur les pièces complexes un coût non négligeable et qui doit être minimisé dans la mesure du possible.

- **la reproductibilité**

La mesure ne doit pas souffrir des circonstances extérieures : une même pièce contrôlée plusieurs fois doit toujours donner le même résultat.

- **la fiabilité**

Le contrôle doit remplir son cahier des charges, et par exemple détecter tous les défauts qu'il est censé être capable de détecter, indépendamment des conditions d'inspection.

- **la sensibilité**

La sensibilité est le rapport des variations de la mesure et du mesurande. Plus la sensibilité est grande, plus les petites variations du mesurande sont détectables, comme par exemple les défauts de faibles dimensions.

- **la résolution**

La résolution est la plus petite variation de signal pouvant être détecté, par exemple la dimension du plus petit défaut. Usuellement est défini le pouvoir de résolution, ici la dimension du plus petit défaut visible. Le pouvoir de résolution est fort si cette dimension est petite.

Parmi ces six critères, il est naturel de penser que la rapidité, la reproductibilité et la sensibilité sont respectivement fortement liées au coût, à la fiabilité et à la résolution. Il est très souvent nécessaire de consentir à des compromis entre les trois groupes ainsi définis.

## **2.2. Les différentes techniques du CND**

Les techniques de CND sont nombreuses, Citons à titre d'exemple [3]:

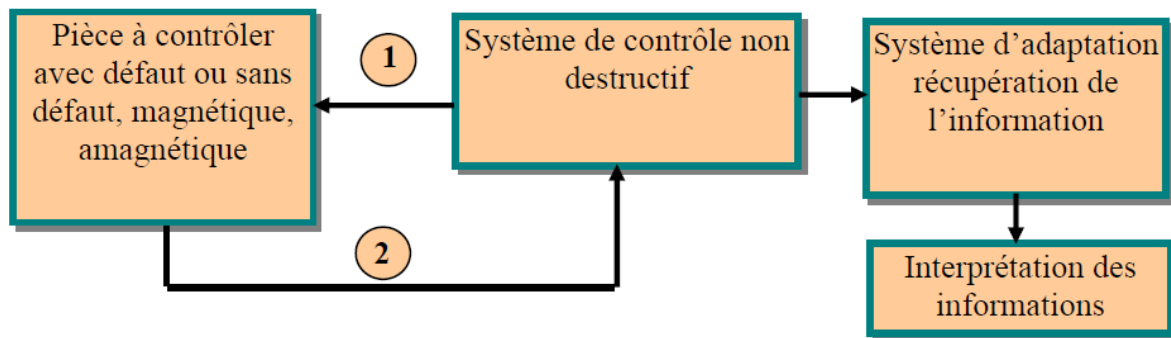
- L'examen visuel.
- Le ressuage.
- La magnétoscopie.
- Les ultrasons.
- La radiographie.
- La thermographie
- Les courants de Foucault.

Le contrôle non destructif permet de caractériser l'état d'intégrité des structures industrielles, sans les dégrader, soit au cours de la production (les pièces qui sortent des fonderies ne sont jamais exemptes de défaut), soit en cours d'utilisation (apparition de défaut). Il faut donc déterminer, à la casse et de façon empirique, quelle taille de défaut est acceptable et ensuite pouvoir les détecter, sans casser la pièce et la remplacer si besoin, ces techniques sont très utilisées dans :

- L'industrie automobile (contrôle des blocs moteurs)
- L'industrie navale (contrôle des coques des bateaux)
- L'aéronautique (poutres, ailes d'avion)

## **2.3. Principes généraux**

Quelque soit la technique adoptée, on peut représenter la mise en œuvre d'un système CND selon le synoptique de la (*Figure II-1*).



*Figure II-1 : Schéma synoptique de CND*

Quelle que soit la nature de la cible (pièce à tester), magnétique ou amagnétique, elle se caractérise par un ensemble de paramètres ( $R$ ,  $\sigma$ ,...), que l'on va chercher à estimer afin de formuler un diagnostic d'intégrité.

Le système de contrôle non destructif représente la technique (ressuage, ultrason, magnétoscopie, contrôle par courants de Foucault.....) utilisée pour déterminer l'état de la cible, Le système d'adaptation et récupération de l'information est un système d'acquisition, dont le rôle est de concrétiser les résultats du contrôle. Les moyens utilisés dans cette étape diffèrent suivant le type de procédé utilisé, on peut trouver un impédance mètre, un microscope, un caméscope ou l'œil nu. [3]

### 3. Contrôle par ultrasons

#### 3.1. Historique

Un peu plus d'un siècle s'est écoulé depuis les premières expériences sur les ultrasons par le scientifique britannique F. Galton en 1883. Celui-ci, grâce à son sifflet, produisit des vibrations juste au-dessus des fréquences audibles. Pendant trente ans les ultrasons resteront une curiosité assez mal connue dont on n'imaginait pas d'autres applications que le sifflet à chien. L'intérêt pour ces vibrations a été éveillé par la catastrophe du Titanic en avril 1912. À cette occasion, L. F. Richardson entrevoit la possibilité d'utiliser une méthode d'écho ultrasonore pour la détection d'obstacles immergés comme les icebergs, les épaves, récifs et autres écueils océaniques. Cette idée prend corps durant la Première Guerre mondiale pour le repérage des sous-marins ennemis et un système de détection rudimentaire mais opérationnel, est mis au point par P. Langevin, utilisant le phénomène de la piézoélectricité. C'est l'ancêtre du sonar (Sound Navigation and Ranging), équivalent

au radar (Radio Detecting and Ranging) pour les déplacements en mer. Les ultrasons se développèrent par la suite en bénéficiant des progrès parallèles de l'électronique. En 1925, grâce à Pierce, les ultrasons atteignent des fréquences de quelques mégahertz. Puis en 1932, les équipes de Debye et Sears, d'une part, de Lucas et Biquard, d'autre part, travaillant indépendamment l'une de l'autre, réalisent les premières expériences de diffraction de la lumière par les ultrasons et vérifient les prévisions théoriques de L. Brillouin faites en 1922. La propagation des ultrasons, d'abord limitée aux fluides, s'étend ensuite aux solides. L'utilisation des ultrasons pour la détection des défauts d'homogénéité dans les matériaux denses remonte aux travaux de Sokolov en 1934, qui peuvent être considérés comme les premiers pas en contrôle non destructif (CND) (NDT Non Destructive Testing). Ces techniques se développeront beaucoup après la dernière guerre dans les domaines de l'industrie, des services et de la médecine. Des ultrasons de très hautes fréquences (on peut en produire jusqu'à 100 GHz) peuvent être excités à l'heure actuelle. Leur utilisation concerne la recherche physique de base et trouve également son application dans les télécommunications et les techniques modernes de calculateur. [12], [13], [16]

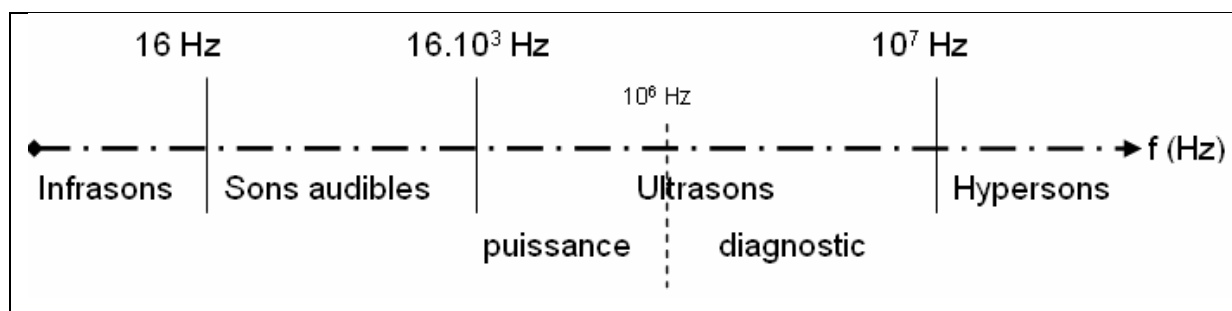
### 3.2. Définition

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques (ondes acoustiques sinusoïdales) qui se propagent dans tout support matériel (solide, liquide ou gaz) présentant une certaine élasticité. Ils correspondent à des fréquences oscillatoires supérieures à la limite d'audibilité de l'oreille humaine et s'étendant dans une large gamme allant de 16 kHz à plus de 100 MHz. L'onde ultrasonore subit plusieurs phénomènes tels que la réflexion, la réfraction, la diffusion et l'interférence. Elle est caractérisée par sa longueur d'onde, c'est-à-dire la distance parcourue par l'onde pendant une période. Une onde ultrasonore se propageant dans un milieu déterminé peut aussi être caractérisée d'une part par sa célérité, d'autre part par la perte d'énergie qu'elle subit par unité de longueur de milieu traversé, c'est-à-dire par un coefficient d'absorption. [15]

### 3.3. Principe

Le son est émis par des corps animés d'un mouvement vibratoire et se propage sous forme d'ondes mécaniques susceptibles de subir des réflexions (échos), des réfractions, et des interférences. Le son n'est pas transmis par le vide, contrairement aux rayonnements

électromagnétiques, il se propage dans tout milieu matériel : fluide, solide homogène ou inhomogène, isotrope ou anisotrope. Les molécules et les atomes du milieu traversé par le son subissent des phénomènes de compression et de raréfaction successifs et transmettent ces perturbations aux atomes et molécules voisins. Le son est audible dans une gamme de fréquence comprise entre 40 Hz et 16 kHz, variable selon les individus, intervalle qui diminue avec leur âge. En deçà, on a affaire aux infrasons et au-delà c'est le domaine des ultrasons que nous décrirons ici (voir Figure 4). Les ultrasons possèdent toutes les propriétés générales des ondes acoustiques (champ de pression,...). [12]



*Figure II-2 : Domaines de fréquence des sons*

### 3.4. Avantages Inconvénients

#### a) Avantages

- Détection précise de la position des défauts dans le volume de la pièce.
- Grande sensibilité surtout pour les défauts plans correctement orientés.
- Souplesse d'utilisation (Utilisation sur chantier aussi bien qu'en contrôle automatisé).

#### b) Inconvénients

- Nécessité d'utiliser un milieu de couplage entre le palpeur et la pièce. Interprétation de la nature des défauts et de leur dimension délicate nécessitant un personnel qualifié.
- Mise en œuvre difficile sur certains matériaux (Fonte par exemple).
- Sensibilité fortement fonction de l'orientation du défaut vis à vis de la direction principale du faisceau acoustique. [16]

### 3.5. Physique des ultrasons

Les ondes ultrasonores, concentrées sous forme de faisceaux vont interagir avec la matière qu'elles traversent. L'amplitude de ces ondes décroît au cours de la propagation car les liaisons entre atomes ou entre molécules ne sont pas purement élastiques. Il se produit plusieurs phénomènes qui aboutissent à leur atténuation :

- Une absorption dans les milieux homogènes, lorsque l'onde ultrasonore se propage elle cède une partie de son énergie au milieu.
- Des réflexions, réfractions et diffusions aux changements de milieux (interface acoustique). [16]

#### 3.5.1. Propagation des ultrasons dans un milieu solide

La propagation d'ultrasons dans les milieux solides, dépendamment de la puissance du transducteur, peut produire un échauffement ou une vibration. Dans les solides cependant, non seulement les forces de compression sont transmises, mais aussi les forces de cisaillement. C'est pourquoi, en plus des ondes longitudinales, des ondes transversales et des ondes de torsion peuvent se propager. La nature des ondes existantes dans un milieu dépend beaucoup de la forme et des dimensions de ce milieu. [17]

#### 3.5.2. Différents types d'ondes

##### a) Onde longitudinale ou onde de compression

Si on s'intéresse à un solide de dimension finie, les ondes longitudinales ou de compressions sont caractérisées par le fait que la direction de la vibration des particules est parallèle à la direction de propagation de l'onde, tel qu'illustrée à la figure IV-2. La vitesse des ondes longitudinales est donnée par la formule suivante [17]:

$$v_L = \sqrt{\frac{E_Y}{\rho}} \dots\dots\dots (II.1)$$

où  $E$  est le module de Young en  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  et  $\rho$  la densité du milieu en  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

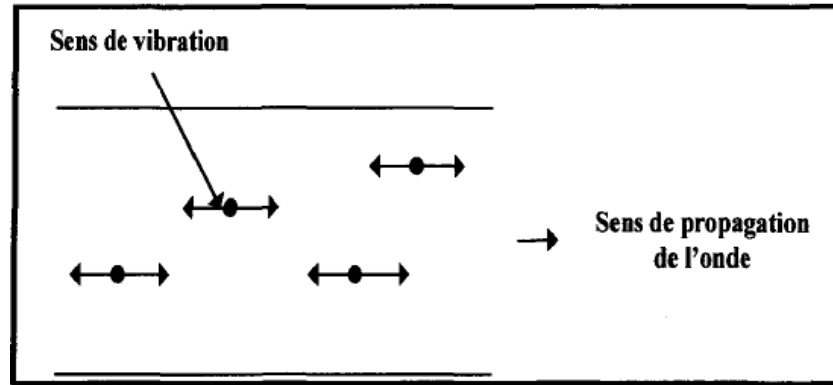


Figure II-3 : Propagation des ondes longitudinales dans un solide

### b) Ondes transversales ou onde de cisaillement

Par opposition, on peut distinguer les ondes transversales ou de cisaillement, lorsque la direction de vibration des particules est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde, comme illustré à la figure IV-3. La vitesse des ondes transversales est donnée par [17]:

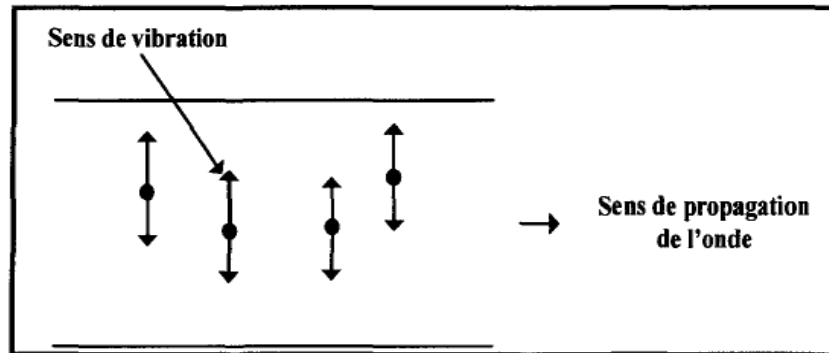
$$v_t = \sqrt{\frac{\mu_s}{\rho}} \dots\dots\dots (II.2)$$

Où:

-  $\mu_s$  est le module d'élasticité transverse.

Puisque  $E_Y = 2 \mu_s (1 + \nu)$ , avec  $\nu$  est le coefficient de Poisson, l'équation IV.6 peut s'écrire comme suit :

$$v_t = \sqrt{\frac{E_Y}{2\rho(1+\nu)}} \dots\dots\dots (II.3)$$



**Figure II-4 :** Propagation des ondes transversales dans un solide

Enfin, en plus des ondes longitudinales et transversales, des ondes de surface (ou de Rayleigh) peuvent se propager sous certaines conditions, le long de la surface d'un solide sans pénétrer dans le volume. De telles ondes sont une combinaison de déplacements longitudinaux et transversaux. La vitesse est donnée par l'expression ci-dessous [17]:

$$v_s = \frac{0,87+1,12\nu}{1+\nu} \sqrt{\frac{\mu_s}{\rho}} \dots\dots\dots (II.4)$$

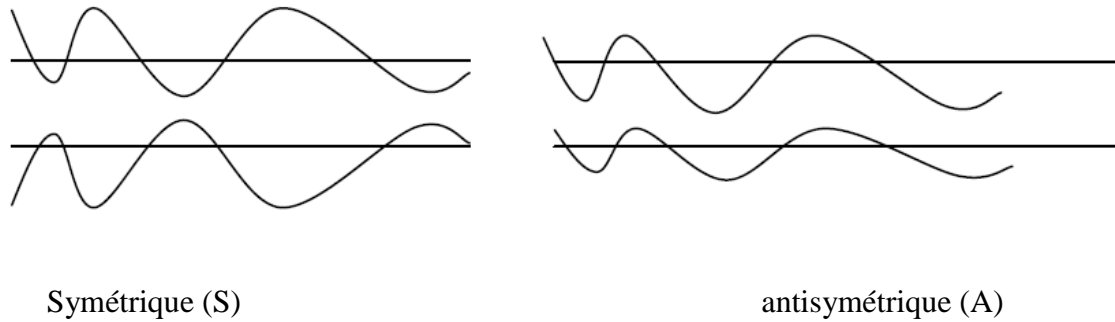
### c) Ondes de surfaces ou Rayleigh

A la surface des corps solides se propagent des ondes de surface qui sont des ondes composites constituées à la fois par des déplacements longitudinaux et transversaux, déphasés de  $\pi/2$ . [18]

### d) Ondes de plaques ou ondes de Lamb

Lorsque le milieu est limité par deux plans parallèles d'épaisseur de l'ordre de la longueur d'onde, on obtient les ondes de Lamb, ces ondes peuvent être symétriques ou antisymétriques (**Figure II-4**). [18]

- Une onde quasi-longitudinale
- Une onde quasi-transversale

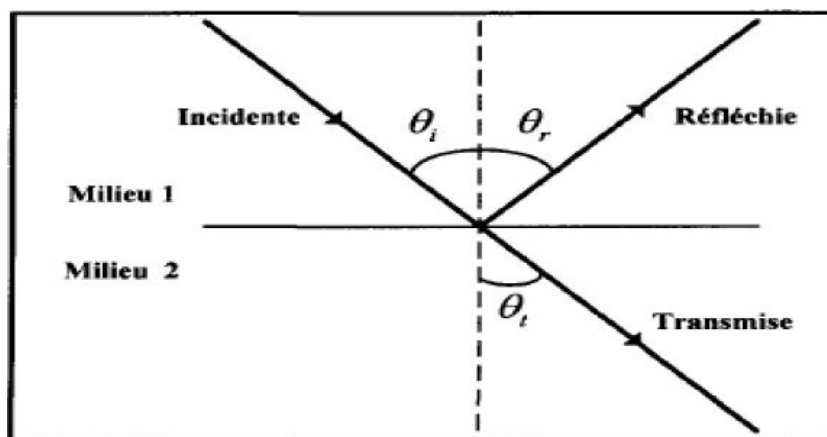


**Figure II-5:** Onde de Lamb.

### 3.5.3. Réflexion et réfraction de l'onde ultrasonore

Lors du passage d'une onde ultrasonore à travers une interface séparant deux milieux de caractéristiques acoustiques différentes, une partie de l'onde incidente est réfléchiée et une autre est réfractée. L'énergie contenue dans l'onde réfractée est égale à l'énergie de l'onde incidente diminuée de celle contenue dans l'onde réfléchiée. Le mécanisme de réflexion d'une onde ultrasonore est un point important dans l'étude de propagation d'ondes ultrasonores dans un milieu.

Soit une onde acoustique qui arrive, avec un angle d'incidence  $\theta_i$  par rapport à la verticale, l'interface séparant les milieux 1 et 2, tel qu'illustrée à la (Figure II.5). Cette dernière donne naissance à l'interface, à une onde réfléchiée et une onde transmise. Les directions de propagation de ces ondes font respectivement des angles  $\theta_r$  et  $\theta_t$ , avec la normale à l'interface [19].



**Figure II.6 :** Réflexion des ultrasons à une interface

### 3.5.4. Vitesse de propagation des ultrasons

On démontre par la théorie des milieux élastiques que les vitesses de propagations des ondes ultrasonores longitudinales ( $V_L$ ), transversale ( $V_T$ ) et de Rayleigh ( $V_R$ ), en m/s, sont liées aux caractéristiques du matériau par les relations suivantes :

$$V_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \dots\dots\dots(II.5)$$

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \dots\dots\dots(II.6)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \dots\dots\dots(II.7)$$

$$V_R = 0.9 V_T$$

Avec :

- E: module de Young (Pa).
- $\nu$ : Coefficient de poisson (sans dimension)
- $\rho$ : Masse volumique (  $kg / m^3$  )

Le tableau II.1 donne quelques exemples des vitesses moyennes  $V_L$  et  $V_T$  pour les matériaux couramment utilisés. Il s'agit de valeurs moyennes, car les paramètres élastiques des matériaux dépendent de l'état physique et chimique précis de ceux –ci (analyse et microstructure pour les métaux, par exemple). [20]

Vitesse et Impédance Acoustique (valeurs moyennes arrondies)			
Matériau	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	V <sub>L</sub> (m/s)	V <sub>T</sub> (m/s)
Aciers	7,8	5900	3250
Fonte	3,2	4600	2150
Aluminium	2,7	6300	3100
cuivre	8,9	4700	2250
plexiglas	1,2	2700	1100
verre	2,5	5650	4400
huile	0,8	1500	.
eau	1,0	1450	.
glycérine	1,3	1900	.

*Tableau II.1 : Représentation de la vitesse et l'impédance acoustique.*

### 3.5.5. Génération et détection de l'énergie ultrasonique

La production d'énergie dans la plupart des applications industrielles des ultrasons repose sur les transducteurs électriques. Transducteur est le terme généralement employé pour un système qui transforme une forme d'énergie en autre forme d'énergie. Les systèmes intéressant la transformation d'énergie électrique en énergie acoustique sont appelés électroacoustique et peuvent être classés en quatre catégories [20]:

- Électromagnétique (à noyau ou à armature mobile),
- Electrostatique (type condensateur),
- Magnétostrictifs,
- Piézoélectriques.

L'inspection ultrasonore nécessite des fréquences très élevées, supérieures à 500 kHz, pour la détection de très petits défauts, et les sondes piézoélectriques utilisés sont, en fait, les seuls susceptibles de permettre l'émission et la réception de la fréquence aussi élevée.

#### a) Effet piézoélectrique

La grande majorité des palpeurs ultrasonores utilisés en CND sont des transducteurs piézoélectriques. La réciprocité du phénomène (production d'une vibration mécanique à partir

d'une impulsion de tension électrique) fut mise en évidence à la même époque, ouvrant la voie à la réalisation d'un transducteur ultrasonore. On accroît notablement l'effet piézoélectrique vibratoire en excitant le cristal ou le polycristal sur son mode de résonance mécanique; en pratique, cela revient à utiliser une lame piézoélectrique d'épaisseur  $a$  telle que:

$$f_0 = v / 2a \quad \dots\dots\dots (II.8)$$

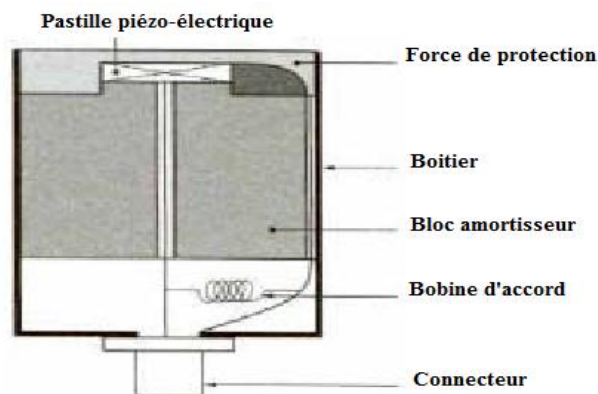
Où :

- $v$  : vitesse du son dans le matériau.
- $f$  : Fréquence fondamentale de vibration du transducteur.

Les films polymères piézoélectriques, constituent une nouvelle famille de matériaux piézoélectriques aptes à avoir des applications pratiques dans le domaine des ultrasons.

### b) Palpeurs piézoélectriques

De façon générale, un palpeur ultrasonore comporte, outre la pastille céramique dont les faces sont métallisées et raccordées à un connecteur électrique, une face avant de protection et de couplage et un bloc amortisseur arrière pour, à la fois, dissiper l'énergie rayonnant vers l'arrière et moduler le spectre ultrasonore par amortissement de la résonance mécanique de la pastille .[18]



**Figure II.7 :** Structure d'un palpeur ultrasonore.

Une bobine électrique d'accord ou un transformateur adaptateur d'impédance peut être inclus dans le boîtier, constituant l'ensemble du palpeur qui est généralement utilisé en émetteur-récepteur [17].

Il existe plusieurs familles de palpeurs piézoélectriques adaptées aux différents modes d'utilisation : contrôle par contact ou en immersion, nature du produit à sonder, des défauts,...etc. Les 4 types de palpeurs les plus utilisés dans l'industrie sont les suivants: palpeur droit cylindrique, palpeur d'angle à sabot, palpeur droit focalisé, palpeur droit double avec émission et réception séparées (palpeurs SE). On caractérise un palpeur ultrasonore par les 2 paramètres à la base des lois de propagation rappelées précédemment : sa fréquence d'oscillation et son diamètre.

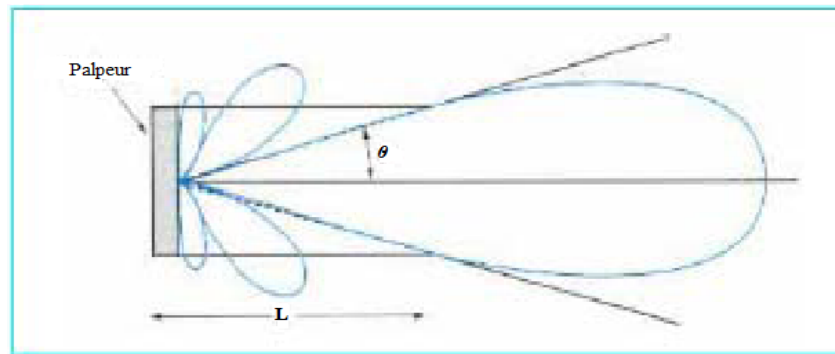
### 3.5.6. Description du faisceau émis par un transducteur

La longueur d'onde  $\lambda$  d'un train d'onde ultrasonore se déduit de la vitesse de propagation par la relation simple suivante : [20]

$$\lambda = v / f \dots\dots\dots (II.9)$$

Où  $f$  est la fréquence de la vibration.

Cette longueur d'onde  $\lambda$  est à prendre en considération dans la propagation des ondes, en particulier vis-à-vis de l'étalement où  $f$  est la fréquence de la vibration et du faisceau ultrasonore (directivité) et de l'atténuation de l'onde par le milieu. Nous avons vu que les ultrasons utilisés en CND se situent dans la gamme des fréquences 1 à 10 MHz, ce qui correspond, dans l'acier par exemple, à des longueurs d'onde de 6 à 0,6 mm en mode longitudinal. A ces courtes longueurs d'onde, les ultrasons se propagent essentiellement en ligne droite selon un faisceau plus ou moins étalé, constitué d'un lobe principal dans lequel la plus grande partie de l'énergie est concentrée (**Figure II.7**). C'est cette propriété qui les rend utiles pour localiser les défauts.



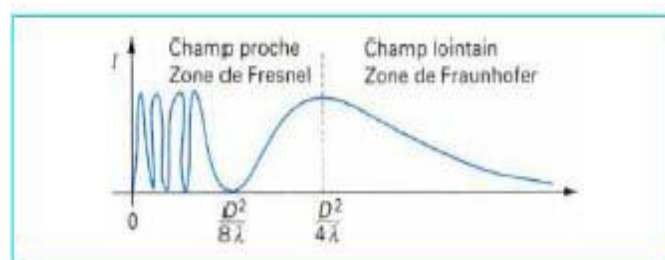
**Figure II.8 : Divergence du faisceau d'ultrasons.**

Près de la source ultrasonore, le faisceau est l'objet d'interactions vibratoires assez complexes donnant lieu à des maximums et des minimums d'énergie sur l'axe de propagation (figure II.8 et figure II.9); il s'agit du **champ proche** ou **zone de Fresnel** dont la longueur  $L$  est donnée par la relation: [17]

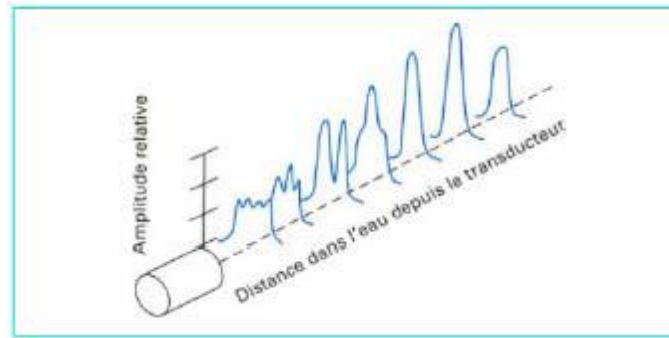
$$L = \frac{D^2}{4\lambda} \dots\dots\dots (II.10)$$

Où  $D$  étant le diamètre de l'élément sensible.

Ensuite, l'énergie devient monotone et le faisceau diverge selon un angle d'étalement ( $2\theta$ ) tel que :  $\theta \approx 1,22\lambda / D$  Il s'agit du **champ lointain** ou **zone de Fraunhofer**, située en pratique à quelques centimètres du transducteur et donnant lieu à un étalement en général inférieur à quelques dizaines de degrés d'angle. L'énergie dans l'axe décroît régulièrement à cause de l'**étalement du faisceau**, mais aussi à cause de l'**atténuation de l'onde** par le milieu.



**Figure II.9 : Intensité acoustique sur l'axe du faisceau.**



**Figure II.10 :** Distribution de l'amplitude perpendiculairement à l'axe du faisceau ultrasonore, en différents points de l'axe.

### 3.5.7. Atténuation des ultrasons

Lors de la traversée des matériaux, le faisceau est affaibli par trois phénomènes qui se superposent [19]:

- L'absorption qui est la conversion directe en chaleur à cause des frottements internes du matériau.
- La diffusion qui est une atténuation de l'onde due aux hétérogénéités (phases, joints de grains,...) qui se comportent comme de minis milieux de propagation entraînant des pertes dans la transmission des ondes. Ce qui implique un choix correct de la longueur d'onde et donc du palpeur.
- La forme divergente du faisceau ultrasonore.

Dans le cas d'une onde plane l'amplitude de la vibration décroît exponentielle en fonction du trajet parcouru.

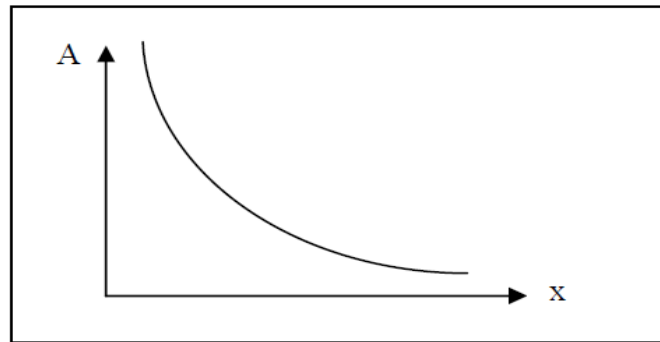
$$A = A_0 \exp(-\alpha \cdot x) \dots\dots\dots (II.11)$$

Où :

$A_0$  : amplitude initiale.

$A$  : amplitude après un parcours  $x$ .

$\alpha$  : coefficient d'atténuation.



*Figure II.11 : Variation de la pression en fonction de la distance.*

## 4. Technique et modes de contrôle ultrasonore

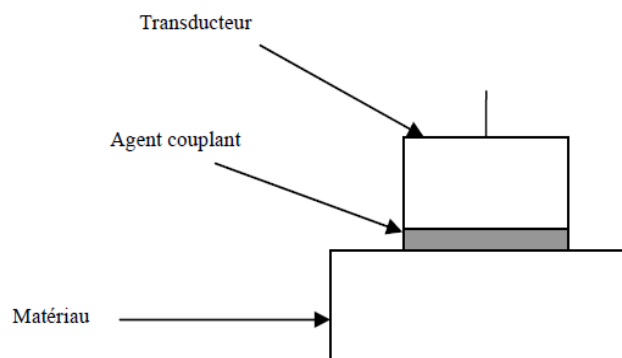
### 4.1. Techniques de contrôle

Les ultrasons, aux fréquences utilisées de 1 à 10 Mhz, ne se propagent pas dans l'air. Pour assurer le passage des ultrasons entre le transducteur et la pièce à contrôler, il faut placer entre les deux, un milieu dit le couplage. Deux techniques existant pour assurer ce couplage :

Le contrôle par **contact** et le contrôle par **immersion**.

#### 4.1.1. Contrôle par contact

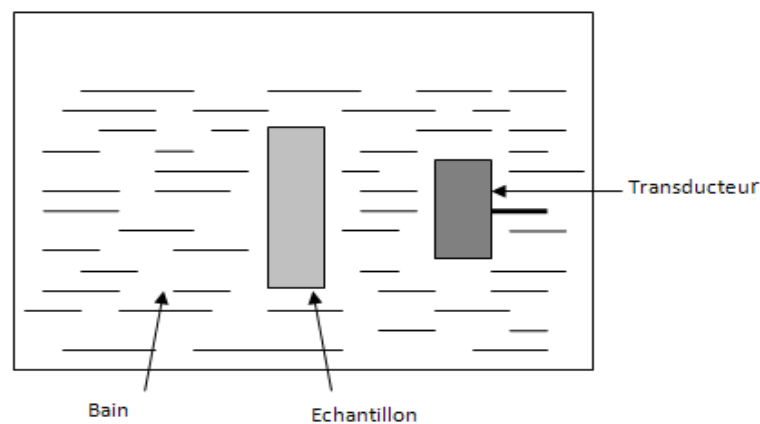
Le transducteur est directement placé sur la pièce à contrôler. La liaison acoustique est assurée par un film d'agent de couplage qui est généralement soit une graisse ou une huile, soit de la colle cellulosique, ou des gels spéciaux. L'épaisseur des films de couplages est de l'ordre du dixième du millimètre. Cette technique de contrôle est surtout employée lors de contrôle manuels. [21]



*Figure II.12 : Méthode de contrôle par contact.*

### 4.1.2. Contrôle en immersion

Comparée à la méthode de mesure ultrasonore par contact, la méthode en immersion (*Figure II.12*) présente plusieurs avantages. Le fait de pouvoir changer l'angle d'incidence rend les dispositifs en immersion d'une grande importance. Aussi, la reproductibilité de l'interface liquide – solide, se prête mieux aux mesures d'amplitude et d'atténuation que les méthodes par contact, quel que soit le soin apporté au couplage transducteur - matériau.



*Figure II.13 : Méthode de contrôle en immersion.*

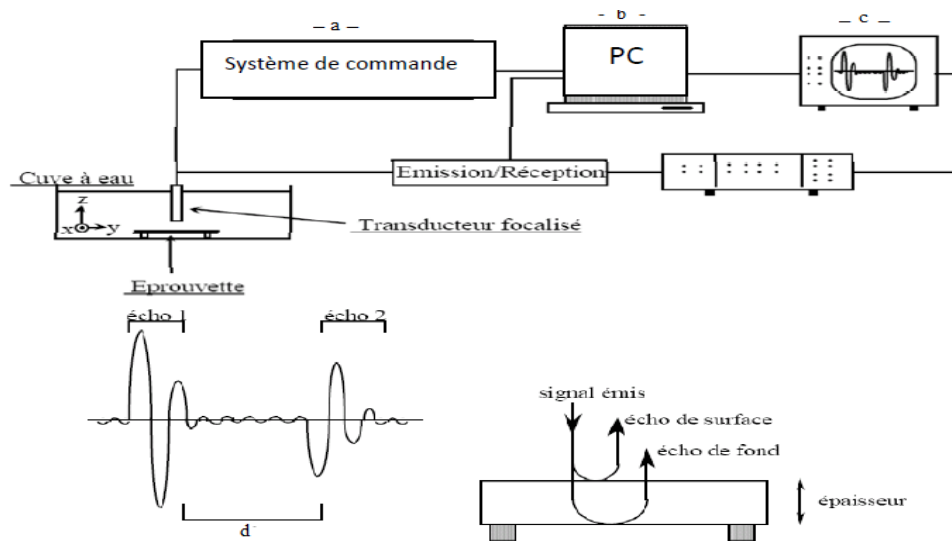
## 4.2. Les modes de contrôle

Selon la nature des travaux à effectuer, on peut distinguer deux modes de contrôle ultrasonore :

### 4.2.1. Mode par écho

Son principe, très simple, est celui du radar : on envoie, dans la zone à inspecter, de brèves impulsions ultrasonores et l'on recueille en retour des échos renvoyés par les diverses hétérogénéités susceptibles de créer des ruptures d'impédance acoustique, en utilisant un seul transducteur ou deux transducteurs sur la même face de la pièce (*Figure. II.13*). La distance entre échos correspond à des temps de propagation allé et retour de l'onde et permet donc de localiser les défauts en profondeur dans la pièce examinée. L'amplitude relative des échos d'émission, de défauts et de fond permet d'avoir une estimation de l'importance du défaut. Il faut toutefois ici être prudent, même lorsque l'on applique des calculs de correction d'atténuation de propagation. Le parcours mis en œuvre pour essayer d'obtenir des échos de

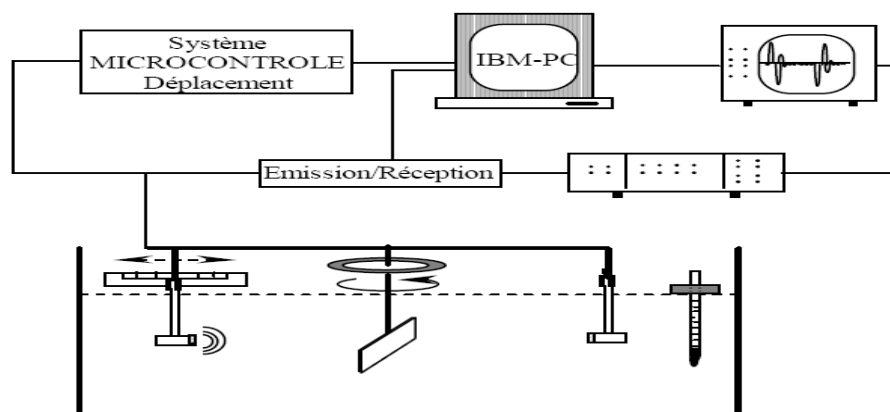
défaut peut être complexe et comporter des réflexions multiples, comme dans le cas du contrôle des soudures avec palpeur d'angle et ondes transversales par exemple.



**Figure II.14:** Mode de contrôle par écho (a) Dispositif de contrôle (b) Signal reçu (c) Réflexion du faisceau ultrasonore sur les faces de la pièce.

#### 4.2.2. Mode en transmission

Elle met en œuvre un faisceau ultrasonore reliant deux palpeurs disposés de part et d'autre de la pièce sondée (**Figure II.15**). Bien que décrite dans tous les manuels, son emploi a pratiquement moins par rapport au mode en écho, sauf dans quelques cas particuliers où l'atténuation ultrasonore est extrêmement forte et interdit l'utilisation de la méthode par échos. Son inconvénient majeur est en effet le risque qu'il y a à attribuer l'atténuation du signal à la présence d'un défaut alors que la cause peut être tout autre : rupture du couplage entre les palpeurs et la pièce, mauvais alignement, etc.



**Figure II.15 :** Mode de contrôle en transmission.

## 5. Changement de milieu de propagation

Les ondes ultrasonores se propagent en ligne droite. Lorsqu'il y a un changement de milieu de propagation, on observe, comme en optique, des phénomènes de réfraction et de réflexion. [16]

### 5.1. Caractérisation des milieux acoustiques

On caractérise les milieux traversés par leur impédance acoustique  $Z$  qui est égale au produit de leur masse volumique  $\rho$  par la vitesse de l'onde utilisée  $v$ . Par exemple pour l'acier et avec une onde longitudinale, l'impédance vaut :

Nous avons :  $\rho = 7830 \text{ kg/m}^3$ ,  $v = 5920 \text{ m/s}$  donc:  $Z = 46472000 \text{ kg/m}^2\text{s}$

### 5.2. Cas de l'incidence normale

On constate une division de l'onde incidente en une onde réfléchie et une onde transmise. On définit un coefficient de transmission  $\alpha_t$  et un coefficient de réflexion  $\alpha_r$  par :

$$\alpha_t = \frac{\text{Energie transmise}}{\text{Energie incidence}} = \frac{4z_1 z_2}{(z_1 + z_2)^2} \dots\dots\dots (II.12)$$

$$\text{et} \quad \alpha_r = \frac{\text{Energie réfléchie}}{\text{Energie incidence}} = \left( \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} \right)^2 \dots\dots\dots (II.13)$$

Avec :

$z_1$  : Impédance du matériau 1

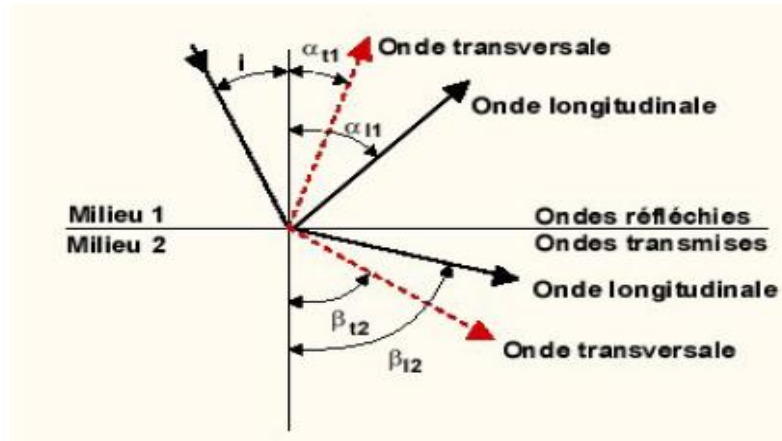
$z_2$  : Impédance du matériau 2

### 5.3. Cas de l'incidence oblique

Dans ce cas, les ondes restent dans le plan défini par la normale à l'interface et l'onde incidente. Il faut noter qu'à l'interface les ondes changent de type (Une onde longitudinale

pouvant donner naissance à une onde transversale). La direction des ondes réfléchies et transmises est donnée par la loi de Snell Descartes (**Figure II.16**) :

$$\frac{\sin i}{V_i} = \frac{\sin \alpha_{l1}}{V_{L1}} = \frac{\sin \alpha_{t1}}{V_{T1}} = \frac{\sin \beta_{l2}}{V_{L2}} = \frac{\sin \beta_{t2}}{V_{T2}} \dots\dots\dots (II.14)$$



**Figure II.16 :** Propagation de l'onde selon la loi de Snell Descartes.

## 6. Champ d'application du contrôle ultrasonore

### 6.1. Détection des défauts internes

La détection de défauts internes par ultrasons est très utilisée en contrôle de fabrication en surveillance de structure en service et en maintenance. La remarquable sensibilité de l'échographie ultrasonore à la moindre discontinuité ou hétérogénéité interne dans les matériaux, en fait une méthode de choix, concurrente ou parfois complémentaire de la radiographie. [16]

### 6.2. Localisation des défauts en profondeur

La localisation de défauts en profondeur est aisée lorsqu'on travaille en échographie. Il existe toutefois une zone sous la surface de couplage pour laquelle l'écho de défaut peut être noyé dans l'écho d'émission ou d'interface, ce qui peut rendre à la fois la détection et la

localisation aléatoires. La localisation en plan se fera en relation avec le relevé manuel de la position du palpeur. [16]

### 6.3. Dimensionnement des défauts

Deux cas se présentent en théorie, selon que le champ du palpeur est censé être supérieur ou inférieur à la dimension moyenne du défaut. Dans le premier cas, tout le défaut est éclairé par le faisceau et l'on peut relier l'amplitude de l'écho de retour à la dimension du défaut à l'aide de diagrammes qui prennent en compte l'ensemble des paramètres ultrasonores du sondage. Lorsque le défaut est plus grand que le faisceau, ce que l'on peut parfois volontairement obtenir en utilisant l'étroit champ d'un palpeur focalisé, on trace son contour apparent, soit en repérant et en quantifiant le basculement entre écho de fond et écho de défaut, soit en utilisant la règle «des - 6dB » qui prend en compte un rapport 1/2 entre l'amplitude maximale de l'écho de défaut et celle obtenue lorsque les bords du défaut occultent environ à moitié la section du faisceau ultrasonore. [16]

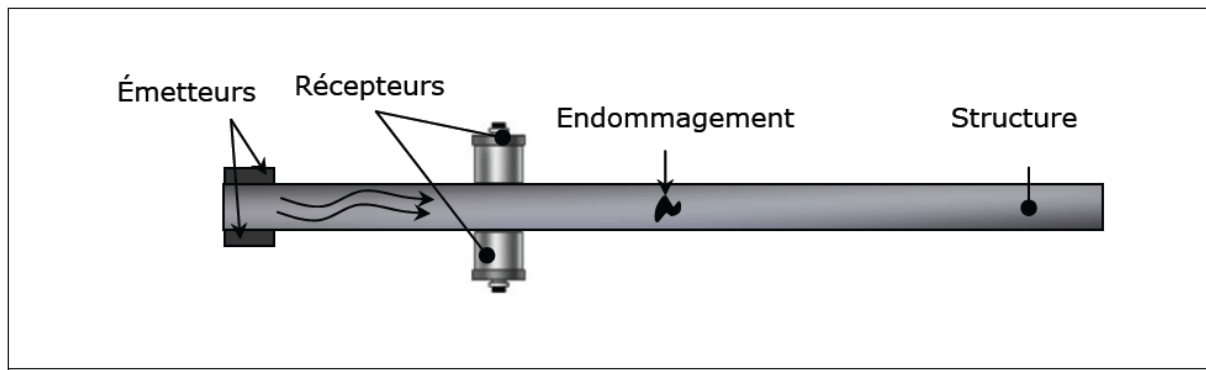
## 7. Choix du système de contrôle non destructif

Dans un premier temps, nous allons discuter dans cette partie des différents systèmes de contrôle santé intégré c'est-à-dire le contrôle en transmission et le contrôle en réflexion. [21]

### 7.1. Système en réflexion

Le système de contrôle en réflexion consiste à prélever les signaux avant l'endommagement (voir *Figure II-17*), c'est-à-dire les signaux réfléchis par celui-ci. Un avantage indéniable de ce système est qu'il permet en même temps la mesure du signal incident et réfléchi, donc, les rapports des amplitudes ainsi que les coefficients de réflexion peuvent être déterminés en une seule mesure.

L'inconvénient majeur est que lorsque l'endommagement est suffisamment près de l'émetteur, il n'est plus possible de discerner l'onde incidente de l'onde réfléchie. De plus, les transducteurs situés entre l'émetteur et le récepteur perturbent le signal réfléchi. En effet, les transducteurs Panametrics sont vus par l'onde incidente comme une hétérogénéité. Enfin, pour certains types d'endommagement, la réflexion est trop faible pour être analysée.

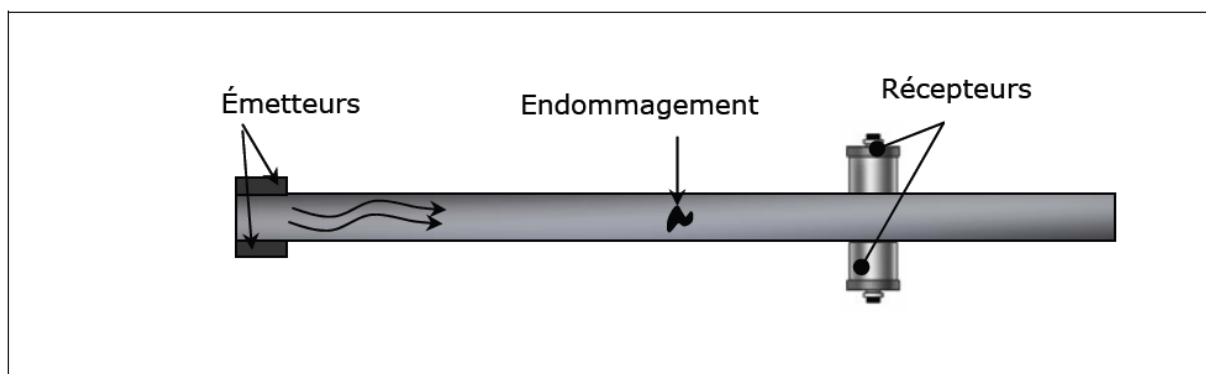


*Figure II-17 : Système de CND en réflexion.*

## 7.2. Système en transmission

Le système de contrôle en transmission consiste à prélever les signaux après l'endommagement (voir *Figure II-18*). L'avantage de ce système est qu'il permet de détecter la moindre anomalie dans la structure. De plus, le choix d'une distance adaptée entre l'émetteur et le récepteur permet de séparer les modes qui se propagent avec différentes vitesses. Donc, on peut identifier chaque paquet d'onde seulement avec un seul signal temporel mesuré à la surface de la plaque. En outre, le signal incident n'est pas perturbé par un transducteur placé entre l'émetteur et l'endommagement.

L'inconvénient majeur de ce système est qu'il faut d'abord caractériser la structure pour avoir un signal de référence afin de calculer les coefficients de transmission. De plus, les signaux réfléchis par le bord droit de la structure peuvent donc, dans certaines conditions, se chevaucher avec les signaux transmis.



*Figure II-18 : Système de CND en transmission.*

## **8. Conclusion**

Le contrôle par ultrasons consiste à émettre une onde ultrasonore dans un matériau par l'intermédiaire d'un milieu de couplage (tel que : eau, graisse, gel, ...). L'onde ultrasonore subit par la suite des transmissions, des réflexions et des diffusions à chaque changement de milieu. L'analyse des échos réfléchis permet de déduire la nature des milieux rencontrés. Ce contrôle non destructif par ultrasons peut être appliqué à la caractérisation, à la détection de la qualité de béton.

Enfin, il faut mentionner que le développement d'un capteur de force logiciel à base de réseaux neuromimétiques est une tâche délicate et qui nécessite beaucoup d'expérience.