

**UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA**

**Faculté des sciences de l'ingénieur**  
Département de Génie Mécanique

# **MEMOIRE DE MAGISTER**

Spécialité : Energetique

## **ETUDE COMPARATIVE DE DEUX METHODES DE CONTROLE NON DESTRUCTIF**

Ultrasons et radiographie

Par

**Nesrine Hatraf**

Devant le jury composé de :

M. HADJI	Professeur, U. de Blida	Président
M. OUALI	Professeur, U. de Blida	Examineur
M. O. SICHAIB	Maître de conférences, U. de Boumerdes	Examineur
A. BADIDI BOUDA	Maître de recherche, C S C. Cheraga	Rapporteur
Y. BENKEDDA	Maître de conférences, U. de Blida	Rapporteur

Blida, Novembre 2005

## **RESUME**

Le présent travail consiste à comparer deux différentes méthodes de contrôle non destructif, les ultrasons et la radiographie appliquées pour des pièces soudées.

La détection de défauts par ultrasons par contact nécessite d'envoyer une onde ultrasonore longitudinale ou transversale suivant le type de la soudure, et recevoir une réponse sous forme d'écho dans le cas où elle rencontre une discontinuité et par une analyse d'écho, on détermine les différentes caractéristiques du défaut.

Le principe d'émission reste le même par immersion mais il faut savoir que l'orientation du palpeur influe beaucoup sur le calcul de la profondeur du défaut ainsi que sur sa nature d'une part et complique énormément la compréhension des échos obtenus d'autre part.

La radiographie est une méthode de détection de défauts par visualisation, c'est partir d'une source radiographique, et par le principe de différence de noircissement, l'image est interceptée par un cliché radiographique ou sur un écran amplificateur (radioscopie).

## **ABSTRACT**

The present work consists to compare two different methods of non destructive testing ultrasonic wave and radiographic one applying to weld.

There are two technical used to detect fault: contact and immersion, the first one necessit to transmit longitudinal or transversal wave, according to the type of weld, and receive the answer from defect.

Theroically the principle of the control by immersion remain the same as by contact , but the direction of the transducer modify the method , which get the depth of the defect so if the transducer will be directed by an angle obtained from Snell-Descarte' law ; the understanding of the echo become difficult.

Radiographic is a visual method, from radiate source and negative or BIX, we receive the image from object with details, we also discover the defect if it contains.



## **REMERCIEMENTS**

Je formule en ces lignes l'expression de mes vifs remerciements et ma profonde gratitude et reconnaissance à mon directeur de mémoire Monsieur BADIDI BOUDA ALI pour son aide précieuse, sa coopération et ses conseils fructueux durant l'élaboration de ce travail.

Je tient aussi à remercier mon co-directeur de mémoire Monsieur BENKHEDDA YOUNES pour sa compréhension son aide qui n'a pas cessé de m'apporter.

Je remercie vivement Monsieur M. HADJI pour l'honneur qu'il a bien voulu accepter de présider le jury.

Mes remerciements vont aussi aux membres de jury Monsieur M. OUALI et Monsieur M. O. SICHAIB d'avoir accepté d'honorer le jury ainsi que de juger la qualité de ce travail.

Mes remerciements s'adressent aussi à toute l'équipe de chercheurs du LCI Pour leurs gentillesse, leurs soutient moral, en particulier Messieurs Halimi Rafik, Hadj Djillali Lamine et Mebtouche Ahmed.

## TABLE DES MATIERES

RESUME

REMERCIEMENTS

TABLE DES MATIERES

LISTE DES ILLUSTRATIONS ET GRAPHIQUES ET TABLEAUX

INTRODUCTION	09
1. CONTROLE NON DESTRUCTIF	11
1.1. Introduction	11
1.2. Généralisation du principe aux différentes techniques	11
.2.1. Le contrôle visuel	12
.2.2. Le ressuage	12
.2.3 La magnétoscopie	13
.2.4 Courants induits ou courants de FOUCAULT	14
.2.5 Les ultrasons	15
.2.6 La radiographie	16
2. THEORIE DES ULTRASONS	17
2.1 Introduction	17
2.2. Propagation des ondes ultrasonores	17
2.3 Théorie de l'élasticité	19
2.4 Passage d'une interface entre deux milieux	26
2.5 Contrôle par contact	30
2.6 Contrôle par immersion	33
2.7 Appareil à ultrasons	35
2.8 Chaîne de contrôle	39
2.9 Procédés de contrôle	41
3. RADIOGRAPHIE	43
3.1 Introduction	43
3.2 Principe	43
3.3 Qualité de l'image du film	44
3.4 Sensibilité radiographie	44
3.5 Principales propriétés des rayons X	44
3.6 Rayons gamma	45
3.7 Source de rayon X	45
3.8 Types de générateurs	46
3.9 Foyer thermique	47

3 .10 Débit des rayons X	47
3 .11 Structure d'un film radiographique	48
3 .12 Développement	48
3 .13 Types de film	48
3 .14 Visibilité des défauts	49
3.15 Indicateurs de qualité d'image	49
3 .16 Traitement des films radiographiques industriels	49
3 .17 Applications de la radiographie	50
3 .18 Radioscopie	50
4._PARTIE EXPERIMENTALLE	52
4. 1 Introduction	52
4. 2 Description des échantillons	52
4. 3 Contrôle des pièces par ultrasons	53
5. CONTROLE PAR CONTACT	61
5.1 Introduction	61
5 .2 Pièce n°1	61
5 .3 Pièce n°2	66
5 .4 Pièce n°3	70
5 .5 Pièce n°4	73
5 .6 Pièce n°5	77
5.7 Pièce n°6	80
5 .8 Pièce n°7	84
6. CONTROLE PAR IMMERSION	88
6 .1 Introduction	88
6 .2 Mode opératoire	89
6 .3 Contrôle de toutes les pièces	90
7. CONTROLE PAR RADIOSCOPIE	120
7 .1 Introduction	120
7.2 Description du dispositif expérimental	120
7 .2 Mode opératoire	120
7 .3 Les paramètres d'exposition	121
7 .4 Caractéristiques du générateur	122
7 .5 Quelques exemples de manipulation	122
7 .6 Résultats expérimentaux	124
CONCLUSION	137
REFERENCES	141

## LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure 1.	Principe du ressuage	13
Figure 2.	Principe de la magnétoscopie	14
Figure 3.	Principe du procédé courants de Foucault	15
Figure 4.	Principe du contrôle des ultrasons	16
Figure 5.	Ondes longitudinales	20
Figure 6.	Ondes transversales	20
Figure 7.	Contraintes exercées sur un élément de volume	22
Figure 8.	Réflexion et réfraction d'une onde ultrasonore	28
Figure 9.	Transformation d'une onde	29
Figure 10.	Variation de la pression en fonction de la distance	31
Figure 11.	Principe de contrôle par contact	32
Figure 12.	Champ acoustique théorique d'un traducteur	33
Figure 13.	Principe du contrôle par immersion	35
Figure 14.	Emission sinusoïdale entretenue	38
Figure 15.	Emission sinusoïdale amortie	39
Figure 16.	Emission choc	39
Figure 17.	Emission brève	40
Figure 18.	Schéma de la chaîne de contrôle	42
Figure 19.	Technique d'écho mode	44
Figure 20.	Technique de transparence	44
Figure 21.	Principe de la radiographie	46
Figure 22.	Source de rayon X	48
Figure 23.	Source à tube panoramique	49
Figure 24.	Source à anode longue	49
Figure 25.	Image radiante et image sur film	50
Figure 26.	Structure d'un film radiographique	51
Figure 27.	Radioscopie	54
Figure 28.	Amplificateur de luminance	54
Figure 29.	Chaîne de contrôle à ultrasons par « contact »	58
Figure 30.	Chaîne de mesure de l'impédance	59

Figure 31. Chaîne de mesure de la tension écho	60
Figure 32. Echo de la sonde MB 5M	61
Figure 33. Spectre de l'écho	61
Figure 34. Point d'émergence	62
Figure 35. Calcul de la profondeur des défauts avec un palpeur droit	63
Figure 36. Calcul de la profondeur du défaut par un palpeur à angle	64
Figure 37. Présentation du contrôle	64
Figure 38. Control de la pièce n°1	65
Figure 39. Présentation du contrôle	67
Figure 40. Pièce n°1 avec défaut fissure	68
Figure 41. Pièce n° 1 avec défaut	69
Figure 42. Pièce n°1 avec défaut inclusion	70
Figure 43. Pièce n°1 avec les trois défauts	71
Tableau 1 Vitesse des ondes longitudinales et transversales	27
Tableau 2 Les paramètres d'exposition	54
Tableau 3 Description des échantillons	56
Tableau 4 Les entrées du logiciel	59
Tableau 5 Résultats de la pièce 1	71
Tableau 6 Résultats de la pièce 2	74
Tableau 7 Résultats de la pièce 3	78
Tableau 8 Résultats de la pièce 4	81
Tableau 9 Résultats de la pièce 5	85
Tableau 10 Résultats de la pièce 6	88
Tableau 11 Résultats de la pièce 7	92
Tableau 12 Les paramètres d'exposition	125
Tableau 12 Exposition des différents résultats	141

## INTRODUCTION

Les matériaux sont à la source de la technologie et du monde industriel. La réussite technique et le succès commercial d'un produit fabriqué dépendent en grande partie du ou des matériaux choisis, sélectionner un matériau n'est généralement pas une opération simple compte tenu de la grande variété proposée. Le choix dépend autant du prix que des qualités propres des matériaux et du procédé de fabrication retenu pour la réalisation.

Le soudage affaiblit considérablement la résistance des assemblages avec lesquels sont réalisés les équipements et crée à l'intérieur d'eux des discontinuités (défauts) qu'il est non seulement indispensable de détecter mais également de pouvoir les dimensionner, afin de décider de leurs acceptation ou de leurs rejet, selon les codes et les normes en vigueur.

Les différentes méthodes de contrôle non destructif assurent le contrôle des pièces sans les détruire. Le choix d'une méthode dépend essentiellement de la géométrie de ces pièces d'une part, et des caractéristiques du défaut (nature, dimension, profondeur) d'autre part.

Notre travail consiste à contrôler des pièces soudées étalons contenant des défauts réels introduits volontairement, de nature et de dimension variées par deux méthodes de contrôle non destructif : les ultrasons (contact, immersion) et par radioscopie. Les résultats obtenus seront analysés et comparés en cernant les limites de chaque méthode.

Le premier chapitre est consacré aux différentes méthodes de contrôle non destructif les plus couramment utilisées, leurs mises en œuvre, les avantages et les inconvénients que possède chaque méthode.

Dans le chapitre 2, nous nous proposons de rappeler les principes théoriques de la propagation du faisceau ultrasonore, de son atténuation, sa conversion de mode plus particulièrement la loi de Snell –Descartes et le contrôle par ultrasons (contact, immersion).

Une autre méthode de contrôle qui utilise le principe de l'interaction des rayonnements ionisants avec la matière ; la radioscopie fait l'objet du chapitre 3.

Le chapitre 4, résume la pratique des ultrasons et la radioscopie, les techniques utilisées pour l'évaluation de la profondeur et aussi la dimension des défauts détectés.

La partie expérimentale s'est orientée sur trois axes suivant la méthode de contrôle.

Le chapitre 5 fait appel au contrôles par contact des différentes pièces, la détection des défauts et la dimension de ces derniers.

Le chapitre 6 se base principalement sur l'immersion et les résultats obtenus par cette technique de contrôle.

Le chapitre 7 est consacré à la radioscopie et les résultats obtenus sous forme d'images.

Enfin une conclusion générale qui récapitule les résultats des différentes techniques en limitant chaque technique.

## **CHAPITRE 1 CONTROLE NON DESTRUCTIF**

### 1.1. Introduction

Dans l'industrie on est souvent contraint de soumettre beaucoup de pièces à un contrôle pour une raison de sécurité et de coût. La présence d'une fissure aussi infime soit elle, présente un risque permanent pouvant provoquer de graves dégâts corporels et matériels.

Lors d'un contrôle d'une installation industrielle, il est nécessaire de procéder au contrôle des assemblages soudés car ce sont des parties vulnérables du fait des différents traitements thermiques et mécaniques qu'a subi le matériau au niveau des soudures.

Il existe deux types de contrôle pour les pièces mécaniques :

- Le contrôle destructif tel que les essais de traction, flexion, résilience, torsion.
- Le contrôle non destructif dont le principal avantage est de restituer la pièce contrôlée telle qu'elle était avant le contrôle.

Différentes techniques sont utilisées dans le contrôle non destructif (CND) des soudures :

le visuel, le ressuage, la magnétoscopie, la radiographie et les ultrasons.

### 1.2. Généralisation du principe aux différentes techniques

Les techniques de contrôles non destructifs les plus couramment employées actuellement peuvent être classées en deux familles principales, étroitement liées à la localisation de l'anomalie sur la pièce en cours d'examen [1].

- ◆ La première famille concerne **les méthodes dites de surface** pour lesquelles l'anomalie est localisée en surface extérieure. Elle groupe les procédés suivants :
  - examen visuel
  - ressuage
  - magnétoscopie
  - courants induits ou courants de **Foucault**.

♦ La deuxième famille concerne **les méthodes dites volumiques** pour lesquelles l'anomalie est localisée dans le volume de la pièce. Elle regroupe les procédés suivants :

- Ultrasons.
- Rayonnements ionisants.

### 1.2.1. Le contrôle visuel

Il est efficace et ne nécessite pas d'équipements, il est généralement pratiqué par le soudeur lui-même : linéarité du cordon de soudure, absence de sur épaisseur ou de criques, de caniveaux (manque de fusion du métal sur les bords de la soudure), bonne pénétration du métal d'apport).

### 1.2.2. Le ressuage

Le procédé consiste à localiser des discontinuités débouchant à la surface de l'échantillon en appliquant sur la surface à contrôler, préalablement nettoyée et séchée, un liquide d'imprégnation coloré ou fluorescent .

L'excès de liquide est enlevé par lavage, la surface est séchée.

On applique alors sur l'échantillon un révélateur qui, attirant le liquide d'imprégnation retenu dans les défauts, donne une indication renforcée de ceux-ci.

L'examen est visuel, en lumière naturelle (liquide d'imprégnation fluorescent).

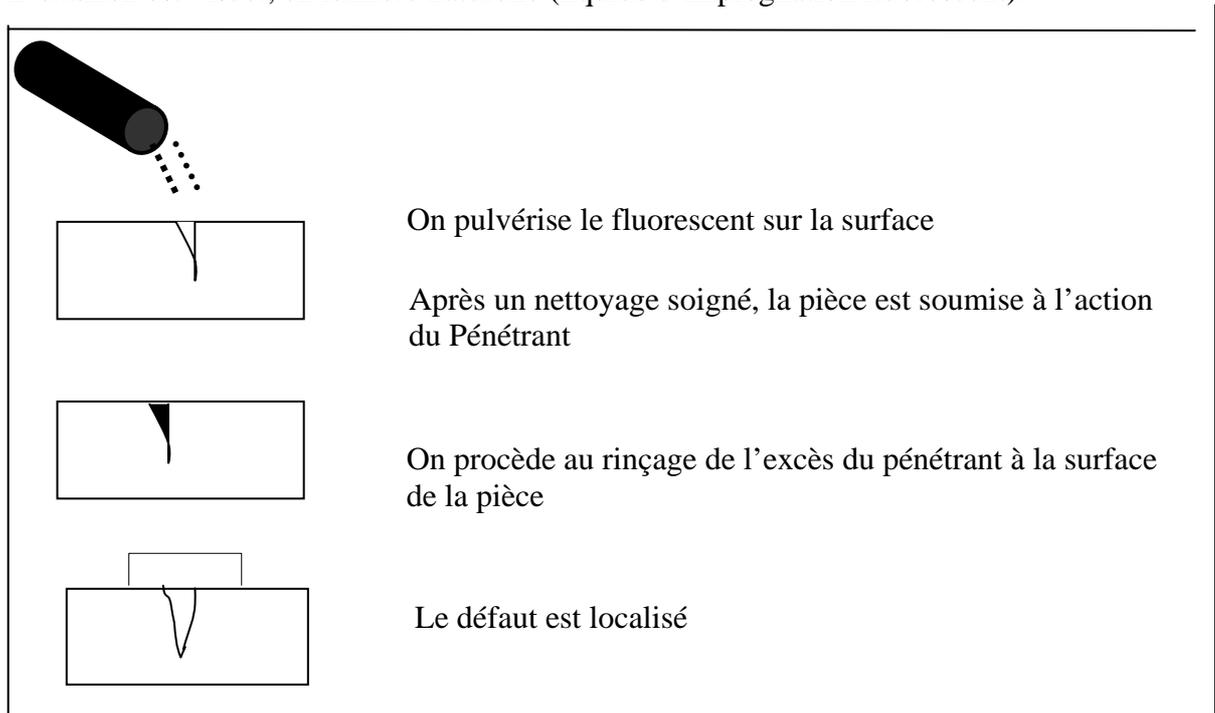


Figure 1.1: Principe du ressuage

### 1.2.2/a Avantages de la méthode

La méthode est très simple de mise en œuvre. Elle permet une localisation précise des défauts de surface et une appréciation de leurs longueurs. C'est la seule méthode globale en contrôle non destructif autorisant un examen de la totalité de la surface de la pièce sans influence notable de l'orientation du défaut par rapport à la direction du faisceau de la source utilisée pour l'excitation. Les différentes séquences de la mise en œuvre se prêtent à l'automatisation.

### 1.2.2/b Inconvénients de la méthode

La méthode autorise uniquement la mise en évidence des défauts débouchant à la surface de la pièce sur des matériaux non absorbants. L'appréciation de la profondeur des défauts n'est pas possible et l'interprétation dans la phase de révélation reste délicate, en particulier pour l'automatisation.

### 1.2.3 La magnétoscopie

Le procédé consiste à soumettre l'échantillon à contrôler à un champ magnétique, de manière à créer des fuites magnétiques particulièrement intenses sur les défauts jouant le rôle d'entrefer.

La détection de ces fuites se fait au moyen d'une liqueur magnétique (oxyde de fer magnétique en suspension dans l'huile ou dans l'eau) en contact immédiat avec la surface de la pièce.

L'examen est visuel (avec la lumière ultraviolette si la liqueur est fluorescente). Il permet la localisation dans les métaux ferromagnétiques des défauts de surface ou sous-jacents (quelques mm).

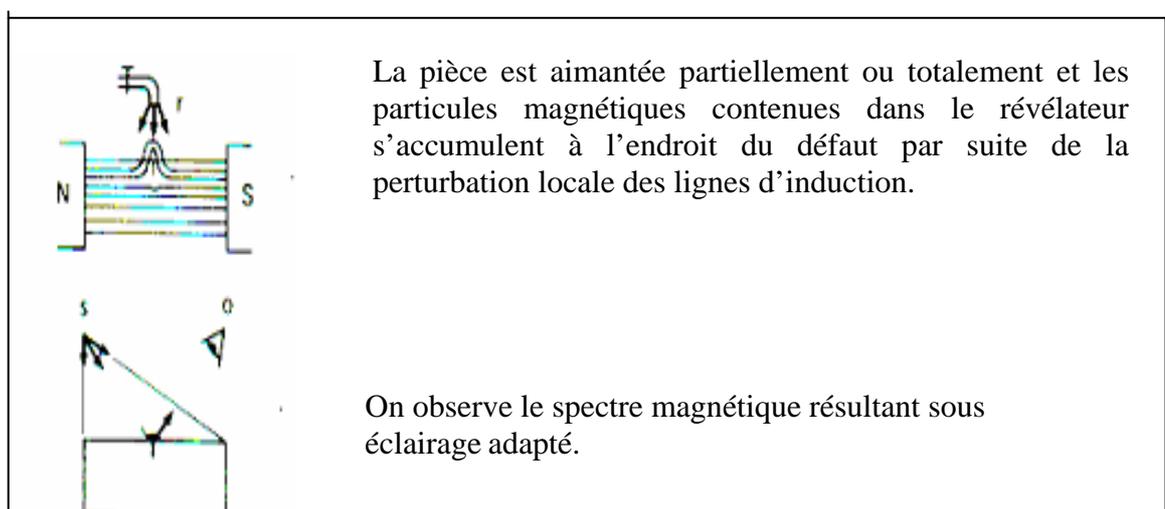


Figure 1.2 : Principe de la magnétoscopie

### 1.2.3/a Avantages de la méthode

La méthode est relativement simple de mise en œuvre, elle permet une localisation précise des défauts de surface ou légèrement sous-jacents et une appréciation de leur longueur.

Les différentes séquences de la mise en œuvre se prêtent à l'automatisation.

### 1.2.3/b Inconvénients de la méthode

La méthode ne s'applique qu'à des matériaux ferromagnétiques et la sensibilité est dépendante de l'orientation du défaut par rapport à la direction générale des lignes d'induction.

Elle ne permet pas une appréciation de la profondeur et l'interprétation dans la phase de révélation reste parfois très délicate.

L'automatisation de cette dernière phase n'a pas encore vraiment débouché industriellement. Une désaimantation des pièces après contrôle est nécessaire.

### 1.2.4 Courants induits ou courants de Foucault

Lorsqu'un matériau conducteur est soumis à un champ magnétique externe de type sinusoïdal produit par une bobine située à proximité, il se crée au sein du volume concerné des courants induits appelés courants de Foucault.

Si un défaut vient perturber la circulation des courants de Foucault une variation d'impédance de la bobine surgit.

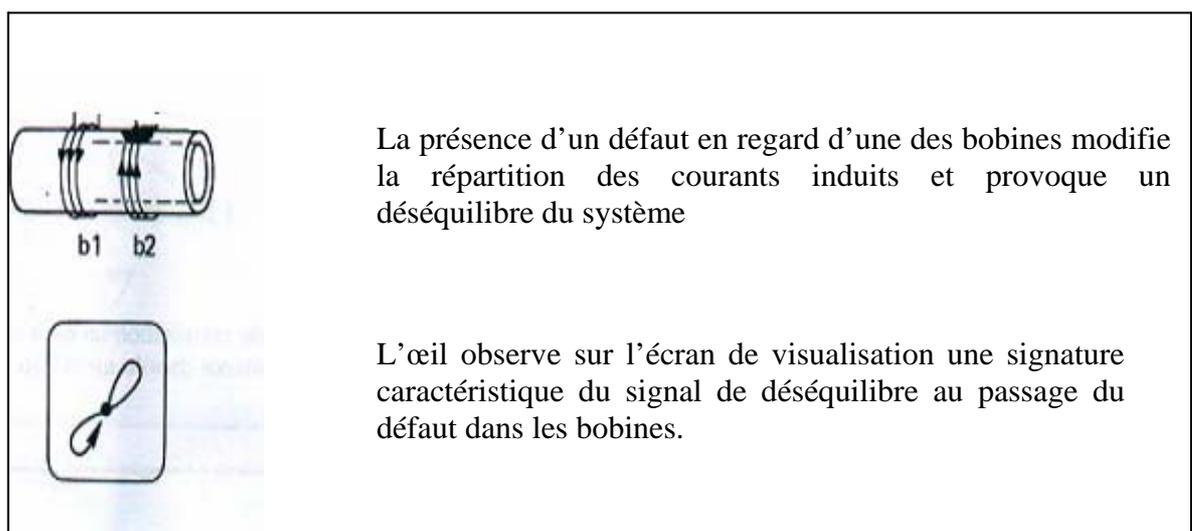


Figure 1.3 : Principe du procédé courants de Foucault

#### 1.2.4/a Avantages de la méthode

La méthode permet la détection des petits défauts (jusqu'à quelques dizaines de microns) et donne les informations sur la dimension du défaut.

Les bobines ne sont pas nécessairement en contact avec le produit.

#### 1.2.4/b Inconvénients de la méthode

La méthode ne s'applique qu'aux matériaux conducteurs de l'électricité. La profondeur d'investigation sous la surface est limitée par l'effet des courants induits. La mise en œuvre est délicate pour les pièces de forme complexe. La sensibilité est influencée par l'entrefer existant entre bobine et produit. L'interprétation des signaux est délicate.

#### 1.2.5 Les ultrasons

Le procédé consiste à envoyer dans l'objet à examiner une onde ultrasonore générée par une sonde (palpeur ou traducteur) afin de localiser des défauts dans les matériaux solides [2].

Les défauts tels que le manque de matière ou hétérogénéité (appelés communément interfaces) renvoient une partie du faisceau ultrasonore vers le palpeur qui est également récepteur.

Le positionnement du défaut est connu avec précision grâce à la connaissance de la vitesse des ultrasons dans la matière considérée et le temps correspondant à l'aller-retour de l'onde ultrasonore : surface de la pièce → défaut → surface de la pièce.

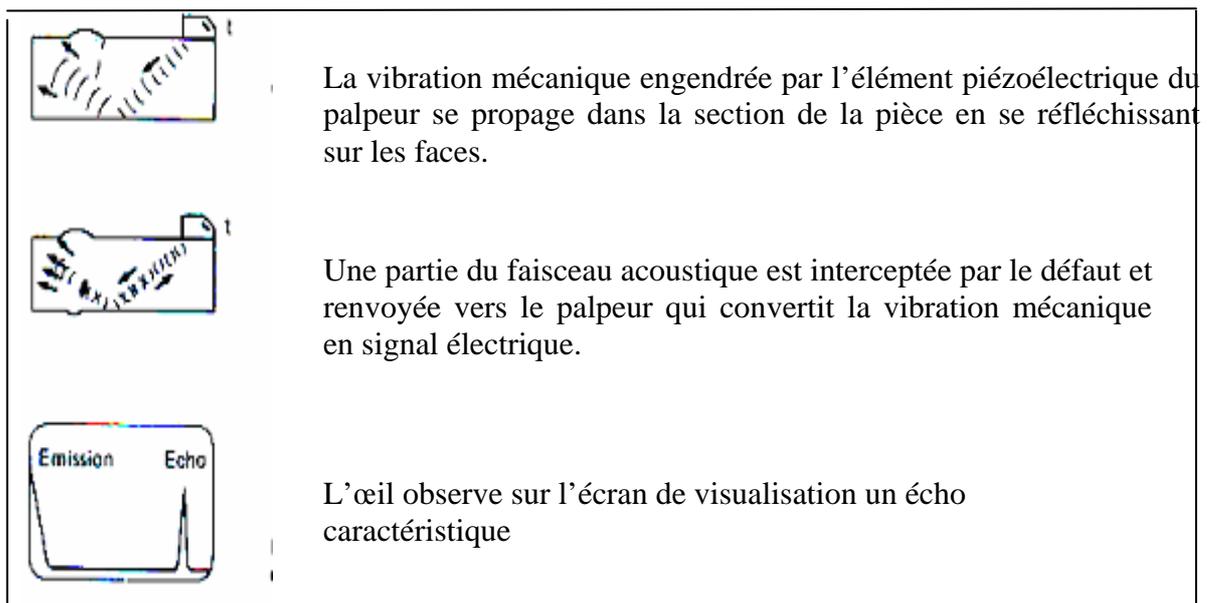


Figure 1.4 : Principe du contrôle par ultrasons

#### 1.2.5/a Avantages de la méthode

La méthode permet la détection des défauts localisés dans le volume de la pièce et présente une grande sensibilité, notamment pour la recherche des défauts plans. Elle peut être utilisée indifféremment sur chantier ou en atelier et se prête aisément à l'automatisation. Elle est très appréciée pour le calcul de la profondeur de pénétration dans les matériaux solides (quelques mètres).

#### 1.2.5/b Inconvénients de la méthode

La sensibilité de la méthode est fortement influencée par l'orientation de la surface du défaut vis-à-vis de la direction principale du faisceau acoustique. Il est nécessaire d'interposer un milieu de couplage intermédiaire entre le traducteur et la pièce pour assurer la continuité de la propagation.

L'interprétation de la nature des défauts et de leurs dimensions nécessite du personnel qualifié ayant une grande expérience. La mise en œuvre est difficile sur certains matériaux. Nous reviendrons sur cette méthode.

#### 1.2.6 la radiographie

Le procédé consiste à exposer la pièce à contrôler à une intensité de rayonnement et de tirer des clichés (radiographie) ou des images en temps réel (radioscopie).

La visualisation des résultats tient en compte les différences de noircissement.

Nous reviendrons sur cette méthode en détails.

#### 1.2.5/a Avantages de la méthode

- Possibilité de détecter des défauts internes sur des profondeurs pouvant aller jusqu'à 100mm.
- Large gamme de matériaux.
- Possibilité d'archivage.
- Contrôle reproductible.
- Automatisation (radioscopie).

#### 1.2.5/b Inconvénients de la méthode

- Prix revient élevé.
- Accès sur deux faces.
- Protection due au danger.
- Méthode film assez lente.

## **CHAPITRE 2**

### **THEORIE DES ULTRASONS**

#### 2.1 Introduction

Les sons dont la fréquence est supérieure à celle de la limite des sons audibles (16 à 20) kHz sont appelés les ultrasons. Les recherches physiques ont amené à réaliser des méthodes permettant de produire des ultrasons de 100 millions et plus de périodes par seconde.

Les applications des ultrasons sont si étendues qu'il serait fastidieux de les énumérer toutes.

Une des premières applications réside dans les techniques de repérage de cibles, dans les activités sous marines.

Depuis la première guerre mondiale, les ultrasons ont été de plus en plus utilisés dans la détection de défauts (fissures, bulles, inhomogénéité de densité ou d'épaisseur). Avec le développement de l'électronique, les ultrasons sont utilisées en médecine avec une efficacité croissante dans les diagnostics et la première application est due à Dussik en 1942 [3].

#### 2.2. Propagation des ondes ultrasonores

Un corps qui possède une certaine élasticité, peut se déformer sous l'action de forces extérieures et reprendre sa forme initiale lorsque celles – ci sont supprimées. Une variation acoustique correspond à un ébranlement de ces particules de matière. Chaque particule oscille et transmet à ses voisines le mouvement, produisant ainsi une déformation du matériau sans transfert de matière. Dans le cas particulier d'un déplacement rapide des particules par rapport à leurs positions d'équilibre, l'onde est dite ultrasonore.

Dans le domaine du contrôle non destructif, le domaine de fréquence utilisé pour les ondes ultrasonores s'étend en général de 1MHz à 10 MHz.

Les ondes ultrasonores peuvent être longitudinales, transversales, de surfaces ou de Lamb.

### 2.2.1 Ondes longitudinales

Une onde longitudinale ou de compression est une onde ultrasonore dont la direction de vibration des particules est parallèle à la direction de propagation de l'onde.

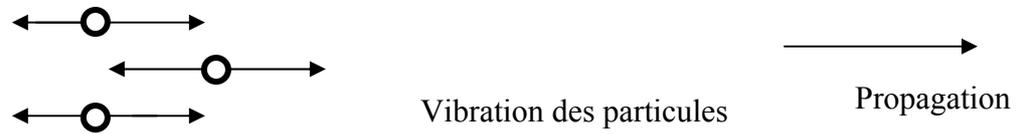


Figure 2.1 : Ondes longitudinales

Les ondes acoustiques longitudinales se propagent dans les solides, et les liquides. Cela est dû au fait que les fréquences des ondes ultrasonores sont très élevées et que l'atténuation de l'onde est extrêmement élevée dans les gaz pour ce domaine de fréquence.

### 2.2.2 Ondes transversales

Une onde ultrasonore est dite transversale ou de cisaillement lorsque la direction de vibration des particules est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde.

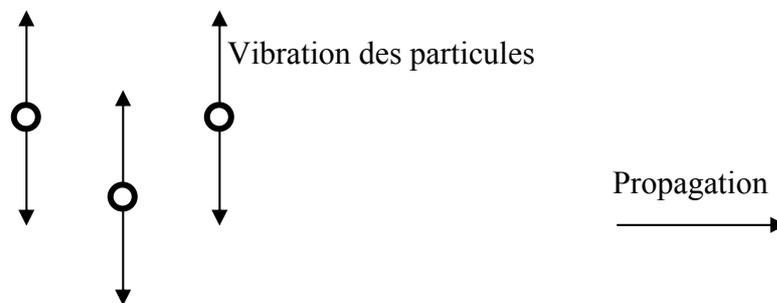


Figure 2.2 : Ondes transversales

Les ondes ultrasonores transversales ou de cisaillement ne se propagent que dans les solides. Il faut cependant remarquer que ces dernières peuvent se propager dans les liquides très visqueux.

### 2.2.3 Ondes de surfaces

Ce sont des ondes qui se propagent à la surface des matériaux, généralement sur une épaisseur correspondante à une longueur d'onde.

Les ondes de Rayleigh sont des ondes de surface, se propagent à la surface des solides, pour lesquelles le mouvement des particules est elliptique.

### 2.2. 3 Ondes de Lamb

Lorsque le matériau à contrôler a une épaisseur faible de l'ordre de quelques longueurs d'onde, les ondes de surface se transforment en onde de plaque ou de Lamb. En général :

$$V_S \approx 0,9V_T.$$

$V_S$  : la vitesse de l'onde de surface.

$V_T$  : la vitesse de l'onde transversale.

Pour les ondes de Lamb, la vitesse de propagation dépend non seulement des caractéristiques du matériau mais aussi de son épaisseur comparée à la longueur d'onde.

La théorie de l'élasticité [4] permet de déterminer les vitesses de propagation des différents types d'onde à partir du module d'Young  $E$ , du coefficient de Poisson  $\sigma$  et de la masse volumique.

## 2.3 Théorie de l'élasticité

### 2.3.1 Introduction

Un développement relatif au comportement des ondes ultrasonores était établi à partir des équations de l'élasticité d'un milieu anisotrope et suite à des hypothèses simplificatrices, on détermine les vitesses longitudinales et transversales.

### 2.3.2 Relation entre déformations et contraintes dans un milieu anisotrope

Considérons un parallélépipède d'arrêtes  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$

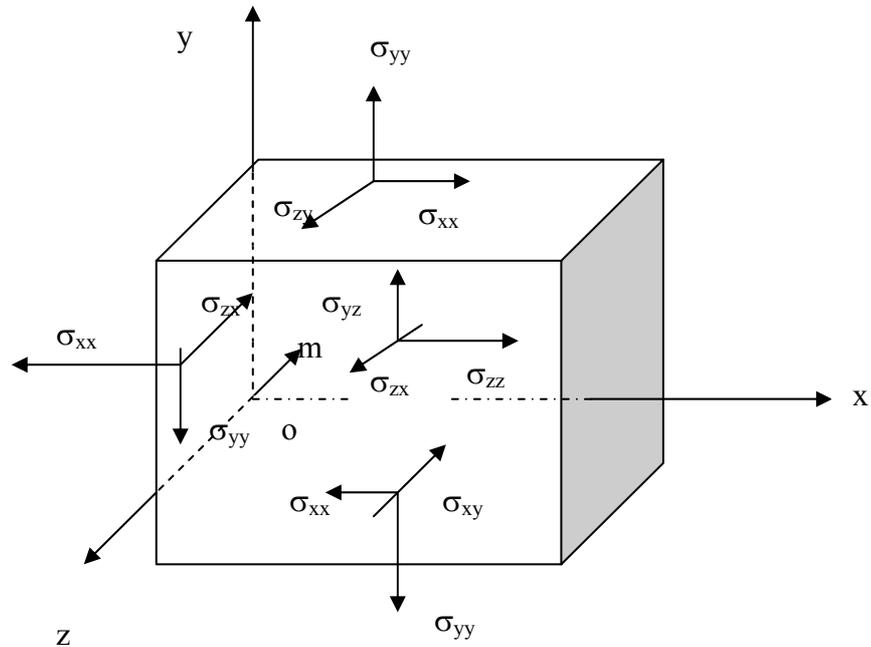


Figure 2.3 : Contraintes exercées sur un élément de volume

$\sigma_{ij}$  étant la contrainte exercée sur chaque face, on considère que c'est une contrainte de traction (de sens positif).

Il y a donc neuf (09) composantes pour ces contraintes que nous appellerons  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{zz}$ ,  $\sigma_{xy}$ ...etc.

- Le premier indice désigne la direction de la contrainte
- Le deuxième, désigne le plan dans lequel elle agit.

A l'équilibre, le moment résultant des forces par rapport à m est nul d'où:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$$

Il ne reste donc que :

- trois (3) composantes normales ( $i=j$ )
- trois (3) composantes tangentielles ( $i \neq j$ )

Dans le cas des petites déformations, le point  $m(x, y, z)$  se déforme et se déplace en  $m'$  de coordonnées  $(x+u, y+v, z+w)$  où  $u$ ,  $v$  et  $w$  sont les composantes du déplacement  $mm'$ .

Pour étudier la déformation en  $m$ , il faut chercher les variations de sa position par rapport à celles de ses voisins. Pour cela, on prend un point  $P(x+\Delta x, y+\Delta y, z+\Delta z)$  proche de  $m$ , Après déformation, il se déplace en  $P'$ .

D'où :

$$\vec{PP'} = \begin{cases} u + \Delta u \\ v + \Delta v \\ w + \Delta w \end{cases} \quad (2.1)$$

Si  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  sont suffisamment petits, on a (théorème des accroissements finis):

$$\vec{m'P'} - \vec{mP} = \begin{cases} \Delta u = \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial u}{\partial z} \Delta z \\ \Delta v = \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial v}{\partial z} \Delta z \\ \Delta w = \frac{\partial w}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial w}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial w}{\partial z} \Delta z \end{cases} \quad (2.2)$$

Ainsi, la connaissance des neuf (9) coefficients de cette matrice au point m permet de calculer le déplacement de tout point voisin.

Posons pour des raisons de simplification :

$$\begin{cases} \varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} ; \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} ; \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \\ \varepsilon_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} ; \quad \varepsilon_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} ; \quad \varepsilon_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \\ 2\bar{\omega}_x = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} ; \quad 2\bar{\omega}_y = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} ; \quad 2\bar{\omega}_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \end{cases} \quad (2.3)$$

$\varepsilon_{xx}$ ,  $\varepsilon_{yy}$ ,  $\varepsilon_{zz}$  correspondent à des déformations perpendiculaires à la surface du parallélépipède, C'est à dire de compression.

$\varepsilon_{xy}$ ,  $\varepsilon_{yz}$  et  $\varepsilon_{zx}$  représentent les composantes d'une déformation dans les plans repérés par les indices.

Tant qu'on se limite à de petites déformations réversibles, il existe des relations linéaires entre contraintes et déformations; c'est la loi de Hooke. Cette loi se traduit mathématiquement pour chacune des six (6) composantes de la contrainte et en tout point par une fonction linéaire des 6 composantes de la déformation :

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = C_{11} \varepsilon_{xx} + C_{12} \varepsilon_{yy} + C_{13} \varepsilon_{zz} + C_{14} \varepsilon_{yz} + C_{15} \varepsilon_{zx} + C_{16} \varepsilon_{xy} \\ \sigma_{yy} = C_{21} \varepsilon_{xx} + C_{22} \varepsilon_{yy} + C_{23} \varepsilon_{zz} + C_{24} \varepsilon_{yz} + C_{25} \varepsilon_{zx} + C_{26} \varepsilon_{xy} \\ \sigma_{zz} = C_{31} \varepsilon_{xx} + C_{32} \varepsilon_{yy} + C_{33} \varepsilon_{zz} + C_{34} \varepsilon_{yz} + C_{35} \varepsilon_{zx} + C_{36} \varepsilon_{xy} \\ \sigma_{yz} = C_{41} \varepsilon_{xx} + C_{42} \varepsilon_{yy} + C_{43} \varepsilon_{zz} + C_{44} \varepsilon_{yz} + C_{45} \varepsilon_{zx} + C_{46} \varepsilon_{xy} \\ \sigma_{zx} = C_{51} \varepsilon_{xx} + C_{52} \varepsilon_{yy} + C_{53} \varepsilon_{zz} + C_{54} \varepsilon_{yz} + C_{55} \varepsilon_{zx} + C_{56} \varepsilon_{xy} \\ \sigma_{xy} = C_{61} \varepsilon_{xx} + C_{62} \varepsilon_{yy} + C_{63} \varepsilon_{zz} + C_{64} \varepsilon_{yz} + C_{65} \varepsilon_{zx} + C_{66} \varepsilon_{xy} \end{cases} \quad (2.4)$$

Les 36 composantes  $C_{ij}$  étant les constantes élastiques ou coefficients de rigidité du matériau.

### 2.3.3 Cas particulier du solide isotrope

Il est bien évident que les calculs seront toujours très complexes dans les solides anisotropes alors qu'ils se simplifient dans un solide isotrope. En effet, dans ce cas, les valeurs des coefficients doivent être indépendants des axes rectangulaires choisis, et cette restriction appliquée aux équations précédentes (2.4) conduit à n'avoir que deux constantes indépendantes  $\lambda$  et  $\mu$  connues sous le nom de constantes de Lamé. Tous les autres coefficients sont nuls; d'où:

$$\begin{cases} C_{12} = C_{13} = C_{23} = C_{32} = C_{31} = C_{21} = \lambda \\ C_{44} = C_{55} = C_{66} = \mu \\ C_{11} = C_{22} = C_{33} = \lambda + 2\mu \end{cases} \quad (2.5)$$

Sur les trente-six (36) coefficients, vingt-quatre (24) sont nuls.

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = \lambda \Delta + 2\mu \varepsilon_{xx} \\ \sigma_{yy} = \lambda \Delta + 2\mu \varepsilon_{yy} \\ \sigma_{zz} = \lambda \Delta + 2\mu \varepsilon_{zz} \\ \sigma_{yz} = \mu \varepsilon_{yz} \\ \sigma_{zx} = \mu \varepsilon_{zx} \\ \sigma_{xy} = \mu \varepsilon_{xy} \end{cases} \quad (2.6)$$

$\Delta = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$  représente la dilatation volumique.

### 2.3.4. Equation de propagation dans un milieu élastique

On obtient l'équation de propagation dans un milieu élastique en considérant les variations de la contrainte dans le petit parallélépipède.

Les composantes de la contrainte vont varier d'une face à l'autre. La loi fondamentale de la dynamique se traduit par:

$$\left( \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \right) dx \cdot dy \cdot dz = \rho dx \cdot dy \cdot dz \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.7)$$

Avec :

$\rho$  = masse volumique de l'élément

$u$  = déplacement dans la direction  $x$

$v = \rho \, dx \, dy \, dz$

Il vient donc :

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \\ \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} \\ \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \end{array} \right. \quad (2.8)$$

Dans le cas d'un solide isotrope, il est possible de déterminer la forme générale de l'équation de propagation des ultrasons. En effet, les équations (2.8), compte tenu de (2.7), s'écrivent pour la propagation suivant la direction  $xx'$ :

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \lambda \frac{\partial \Delta}{\partial x} + 2\mu \frac{\partial \varepsilon_{xx}}{\partial x} + \mu \frac{\partial \varepsilon_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \varepsilon_{xz}}{\partial z} \quad (2.9)$$

En remplaçant  $\varepsilon_{xx}$ ,  $\varepsilon_{xy}$  et  $\varepsilon_{xz}$  par leurs valeurs tirées de l'équation (2.3), on peut regrouper les équations précédentes en une seule relation vectorielle donnée par:

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{mm}'}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \vec{\text{grad}} \, \text{div} \, \vec{mm}' - \mu \, \text{rot} \, \text{rot} \, \vec{mm}' \quad (2.10)$$

La résolution de l'équation de propagation peut se faire en superposant deux fonctions  $\text{grad}\Psi$  et  $\text{rot}A$ , l'une représente la compression seule tandis que l'autre révèle le cisaillement.

$$\vec{U} = \vec{\text{grad}} \psi + \vec{\text{rot}} A \quad (2.11)$$

$\Psi$  : est une fonction scalaire.

A : est une fonction vectorielle.

Si on considère que :

$$\vec{U} = \vec{\text{rot}} A \Rightarrow \text{div} \vec{U} = \text{div} \vec{\text{rot}} A = \vec{0} \quad (2.12)$$

Et

$$\vec{U} = \vec{\text{grad}} \psi \Rightarrow \vec{\text{rot}} \vec{U} = \vec{\text{rot}} \vec{\text{grad}} \psi = \vec{0}$$

- **Cas de la compression :**

$\vec{U} = \vec{\text{grad}} \psi \Rightarrow \vec{\text{rot}} \vec{U} = \vec{\text{rot}} \vec{\text{grad}} \psi = \vec{0}$  , l'équation (2.10) devient

$$\rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \nabla^2 U \quad (2.13)$$

**D'où :**

$$\frac{\rho}{\lambda + 2\mu} \frac{\partial^2 \vec{\text{grad}} \psi}{\partial t^2} = \nabla^2 \vec{\text{grad}} \psi$$

$$\frac{\rho}{\lambda + 2\mu} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = \nabla^2 \psi \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = V^2 \nabla^2 \psi \quad (2.15)$$

C'est une équation des cordes vibrantes qui montre que l'onde se propage dans le solide avec la vitesse V.

- **Cas transversal**

$$\vec{U} = \vec{\text{rot}} A \Rightarrow \text{div} \vec{U} = \text{div} \vec{\text{rot}} A = \vec{0} \quad (2.16)$$

Or :

$$\nabla^2 A - \vec{\text{grad}} \text{div} A = \frac{\rho}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2}$$

De la même manière  $V = \left(\frac{\mu}{\rho}\right)^{1/2}$

### 2.3.5. Conclusion

Dans un solide élastique et isotrope, les ondes peuvent se propager avec deux vitesses différentes :

- des ondes n'impliquant pas de rotation, se déplaçant avec la célérité :

$$V_L = ((\lambda+2\mu)/\rho)^{1/2} \quad (2.17)$$

- des ondes n'impliquant aucune dilatation ( $\Delta=0$ ) se propageant avec la célérité :

$$V_T = (\mu/\rho)^{1/2} \quad (2.18)$$

Si E est le module d'Young et  $\nu$  le coefficient de Poisson, les équations des vitesses deviennent :

$$V_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2.19)$$

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{\rho 2(1+\nu)}} \quad (2.20)$$

Le tableau 2.1 résume certains matériaux avec leurs vitesses longitudinales et transversales ainsi que leurs masses volumiques.

Tableau 2.1 Vitesse des ondes longitudinales et transversales [5]

matériaux	Masse volumique ( $10^3 \text{ kg/m}^3$ )	Vitesse des ondes longitudinales (m/s)	Vitesse des ondes transversales (m/s)
Acier	7.8	5880	3250
Fonte	7.2	4600	2150
Aluminium	2.7	4700	3100
Cuivre	8.9	6300	2250
Araldite	1.2	2500	1050
Plexiglas	1.2	2700	1100
Huile	0.8	1500	/
Eau	1.0	1480	/

## 2.4 Passage d'une interface entre deux milieux

### 2.4.1 Loi de Descartes

Quand un faisceau ultrasonore rencontre une interface entre deux milieux, une partie de son énergie est transmise ou réfractée, l'autre partie est réfléchi.

Les faisceaux réfléchis et réfractés sont contenus dans le plan d'incidence, plan formé par le faisceau incident et la normale à l'interface.

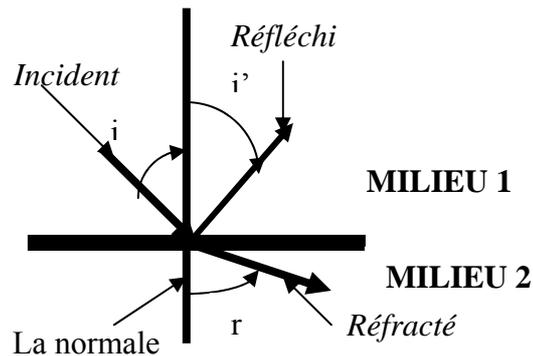


Figure 2.4 : Réflexion et réfraction d'une onde ultrasonore

La loi de Snell Descartes s'écrit [5]:

$$\frac{\sin i}{V_1} = \frac{\sin i'}{V_1} = \frac{\sin r}{V_2} \quad (2.21)$$

$$i = i'$$

$$\sin r = \frac{V_2}{V_1} \sin i \quad (2.22)$$

Où :

$i$  : angle d' incidence .

$i'$  : angle de réflexion.

$r$  : angle de réfraction ou de transmission.

$V_1, V_2$  : sont respectivement les vitesses de propagation de l'onde dans les milieux 1 et 2.

### 2.4.2 Changement de mode à une interface

Lorsqu'un faisceau rencontre une interface sous incidence oblique , il ne se transforme pas uniquement en un faisceau réfléchi et un faisceau réfracté mais en deux

faisceaux réfléchis et deux faisceaux réfractés. Il y a un phénomène de conversion de mode.

L'angle de chaque faisceau réfléchi ou réfracté est toujours déterminé par les lois de Snell Descartes en prenant en compte la vitesse de propagation des ondes considérées.

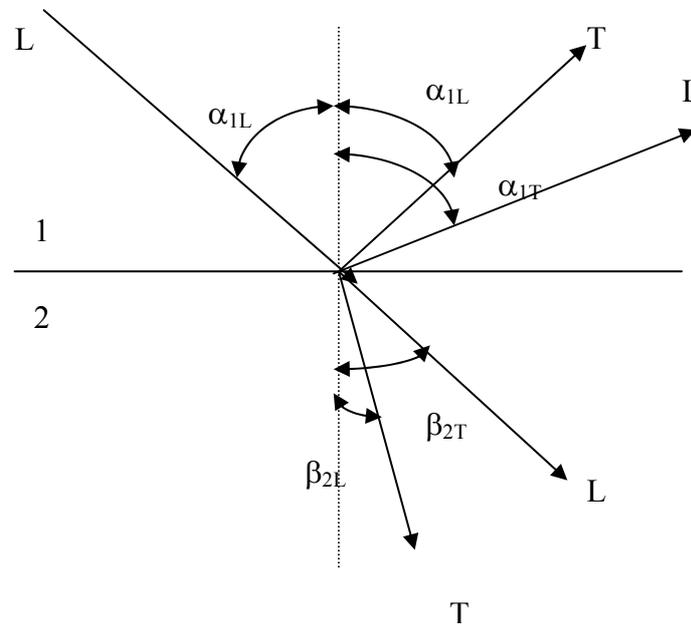


Figure 2.5 : Transformation de mode d'une onde

#### 2.4.3 Coefficient de réflexion et de transmission à incidence normale – impédance acoustique :

On peut calculer deux coefficients : de réflexion et de transmission.

- Le coefficient de réflexion  $R$ : rapport de la pression ultrasonore réfléchie à la pression ultrasonore incidente  $P_i$  [5].

$$R = \frac{P_r}{P_i} \text{ Avec :}$$

$P_r$  est la pression réfléchie.

$P_i$  est la pression incidente.

- le coefficient de transmission  $T$  : rapport de la pression ultrasonore transmise à la pression ultrasonore incidente

$$T = \frac{P_t}{P_i} \text{ Avec :}$$

$P_t$  est la pression transmise.

- L'impédance acoustique  $Z$  : caractérise la qualité du matériau à transmettre les ondes ultrasonores.

$Z = \rho \cdot V$  Pour les ondes planes

$\rho$  : Masse volumique

$$Z = \frac{P}{U}$$

$P$  : Pression acoustique

$U$  : vitesse de vibration des particules

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

$Z$  : impédance.

1 : milieu d'incidence

2 : milieu de transmission

$$T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}$$

#### 2.4.4 Atténuation des ondes ultrasonores

Dans un matériau idéal sans atténuation, une onde ultrasonore n'est atténuée que du fait de la divergence du faisceau. Dans le cas d'une onde plane (pour qu'il n'y ait pas de divergence du faisceau), la pression acoustique décroît de façon exponentielle en fonction du trajet parcourue par l'onde.

$$P = P_0 e^{-\alpha x} \quad (2.23)$$

Avec :

$P_0$ : pression initiale

$P$  : pression après un parcours  $x$

$\alpha$ : Coefficient d'atténuation.

D'où :

$$\alpha = \ln (P_0 / P) / x \quad (\text{mm}^{-1}) \quad (2.24)$$

Généralement,  $\alpha$  est donné par :

$$\alpha = 20 \log (P_0 / P) / x \quad (\text{dB/ mm})$$

L'atténuation de l'onde est toujours d'autant plus importante que la fréquence est élevée. Cette atténuation est due à deux phénomènes qui se superposent : l'absorption et la diffusion

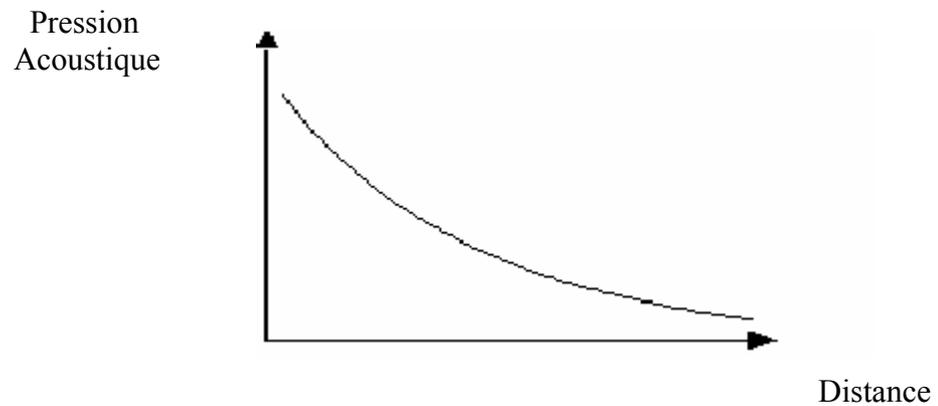


Figure 2.6 : Variation de la pression en fonction de la distance

D'une façon générale, le coefficient d'atténuation  $\alpha$  est un paramètre relatif composé du coefficient d'absorption  $\alpha_A$  et du coefficient de diffusion  $\alpha_s$  [6], [7], [8]

$$\alpha = \alpha_A + \alpha_s \quad (2.25)$$

Beaucoup de modèles ont montré que le coefficient d'atténuation est fonction de la fréquence [9], [10], [11], [12] et [13]. Le plus important résultat montre que  $\alpha(f)$  est fonction du diamètre du grain du matériau  $D$  (diamètre moyen) par rapport à la longueur d'onde  $\lambda$  :

Région de Rayleigh  $\lambda \gg D$  (cas le plus fréquent):  $\alpha(f) = c_1 D^3 f^4$  (2.26)

Région stochastique  $\lambda \approx D$ :  $\alpha(f) = c_2 D f^2$  (2.27)

Région de diffusion  $\lambda \ll D$  :  $\alpha(f) = c_3 D f$  (2.28)

Où  $c_1$ ,  $c_2$  et  $c_3$  sont des constantes.

La diffusion des ultrasons au contact des grains et les interfaces dans les matériaux polycristallins sont la cause de l'atténuation et créent des vitesses dispersives. Le

coefficient d'atténuation et la dispersion de vitesses provoqués par les grains sont décrits analytiquement dans la bibliographie [11], [13], [14], [15], [16] et [17].

En général, les pertes par diffusion sur les grains sont prépondérantes comparées aux pertes par absorption. Dans la région de Rayleigh (notre cas) où  $\lambda \gg D$ , le coefficient d'absorption dépend linéairement de la fréquence et le coefficient de diffusion est proportionnel à  $f^4$  [9], [10], [11] et [13] .

$$\alpha(f) = a_1 f + a_2 D^3 f^4 \quad (2.29)$$

Où  $a_1$  est la constante d'absorption,  $a_2$  la constante de diffusion et le  $f$  la fréquence. Le coefficient de diffusion montre une sensibilité élevée à la variation de la taille de grain. Les équations suivantes donnent respectivement l'expression du coefficient de diffusion pour une onde longitudinale et de cisaillement, respectivement, [18] et [19] :

$$\alpha_s^l = \frac{8 \pi^3 V_g A^2}{375 \rho_0^2 V_l^8} \left[ 2 + 3 \left( \frac{V_l}{V_t} \right)^5 \right] f^4 \quad (2.30)$$

$$\alpha_s^t = \frac{6 \pi^3 V_g A^2}{375 \rho_0^2 V_l^8} \left[ 3 + 2 \left( \frac{V_l}{V_t} \right)^5 \right] f^4 \quad (2.31)$$

Avec  $A = C_{11} - C_{12} - 2C_{44}$  et  $V_g$  : le volume moyen des grains.

Les équations (2.30) et (2.31) indiquent que les pertes par diffusion affectent beaucoup plus les ondes de cisaillement que les ondes de compression.

## 2.5 Contrôle par contact

### 2.5.1 Principe

Les vibrations ultrasonores de très courte durée (quelques  $\mu s$ ) sont émises par un générateur vers un transducteur dont l'élément sensible, une pastille piezo ou ferroélectrique transforme l'énergie électrique en énergie acoustique et réciproquement.

Sous l'effet d'une différence de potentiel, le cristal entre en vibration et produit des ultrasons.

L'impulsion ultrasonore se propage dans le milieu à contrôler et se réfléchit en partie sur les obstacles rencontrés. Les échos ultrasonores ainsi produits seront récupérés par le transducteur en contact avec le milieu à contrôler, qui les convertira en signaux électriques.

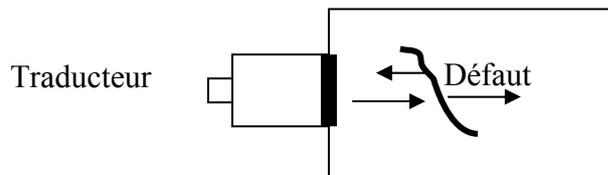


Figure 2.7 : Principe de contrôle par contact

L'ensemble des points mis en vibration pendant la durée de la propagation constitue le faisceau acoustique.

### 2.5.2 Faisceau acoustique d'un transducteur plan

Le champ acoustique d'un transducteur plan (supposé vibrer comme un piston à une fréquence donnée et émettant dans un milieu homogène, isotrope et non dispersif) peut être décomposé en deux zones à partir de l'émetteur.

- Zone proche du transducteur, appelée champ proche ou zone de Fresnel, caractérisée par des irrégularités de l'amplitude de l'écho du réflecteur ponctuel qui se traduisent, notamment sur l'axe, par une succession de maxima et de minima dans la direction de propagation.
- Zone située au delà du champ proche, appelée champ éloigné ou zone de Fraunhofer, pour laquelle l'amplitude de l'écho du réflecteur ponctuel décroît de façon monotone, vers la périphérie du faisceau et, suivant l'axe, proportionnellement à la distance. Le dernier maximum suivant l'axe de propagation détermine la limite du champ proche dont la longueur est symbolisée par  $l_0$ . Lors d'un contrôle il est recommandé de travailler dans cette zone.

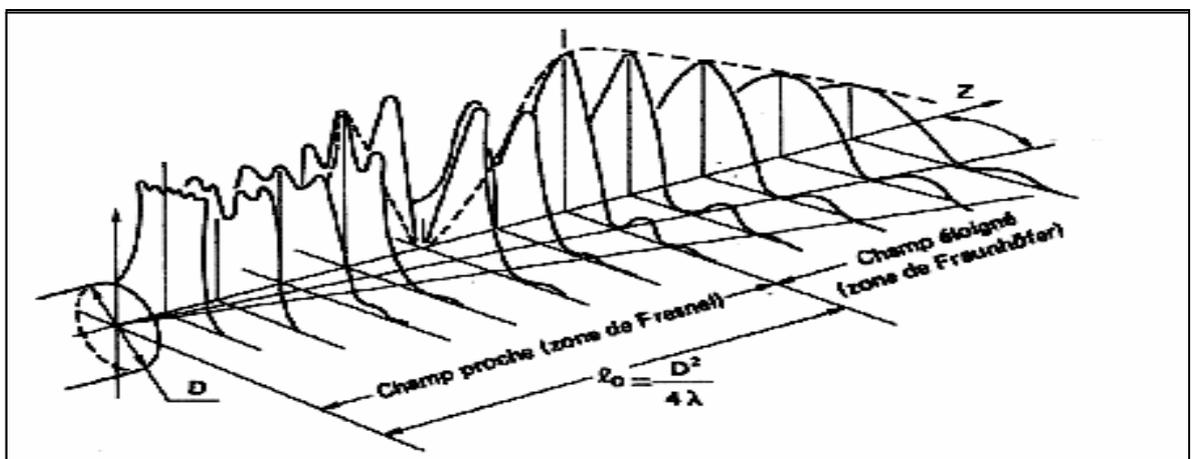


Figure 2.8 : Faisceau acoustique d'un transducteur plan

#### 2.5.4 Choix du traducteur

Chaque traducteur porte sur son boîtier un numéro de série et sa fréquence du travail. Celle-ci dépend de l'épaisseur du spécimen à contrôler. En effet, une bonne sensibilité nécessite des traducteurs de faible fréquence.

#### 2.5.5 Les conditions d'un contrôle

##### A/ mode de couplage

Pour le cas du contrôle par contact, il existe qu'un seul mode  $\Rightarrow$  contact direct

##### B/ choix du milieu de couplage

- **Huile :**

Elle est utilisée quand les surfaces de sondage sont rugueuses ou non horizontales, il faut penser au nettoyage après examen

- **Graisse :**

Elle peut remplacer l'huile quand la rugosité de la pièce est très importante

- **Colle de tapissier :**

Une fois sèche, la colle s'enlève facilement par simple brossage. Elle peut être utilisée dans tous les cas, mais la préparation doit être faite sur place, au moment de l'examen.

#### 2.5.5. /a Avantages de la méthode

1. Méthode très simple.
2. Exploitation générale et sans limite.
3. Résultat spontané et visuel.
4. Nécessite moins de matériel que la méthode par immersion (que nous verrons ultérieurement).
5. Matériel portable.

#### 2.5.5. /b Inconvénients de la méthode

1. Nécessite un personnel qualifié.
2. La présence d'un couplant est indispensable.
3. Absence de possibilité d'enregistrement.

#### 4. Intervention intégrale de l'opérateur.

### 2.6 Contrôle par immersion

#### 2.6.1 Principe

La pièce à contrôler est immergée dans un liquide de couplage le plus souvent de l'eau parfois du pétrole, plus rarement de l'huile.

Le palpeur n'étant pas en contact avec la pièce à contrôler, la hauteur du fluide intervient dans le trajet effectué par les ultrasons.

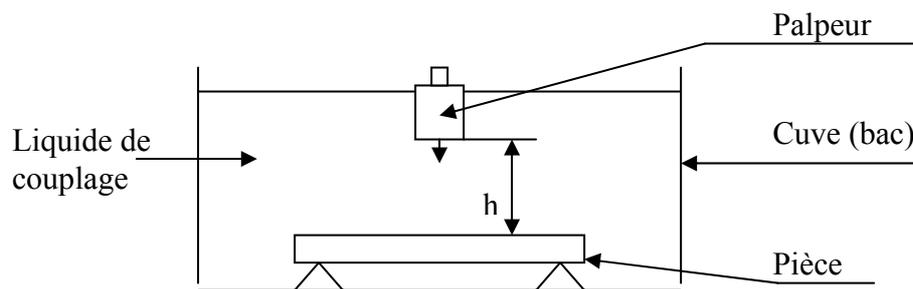


Figure 2.9 : Principe du contrôle par immersion

#### 2.6.2 Les caractéristiques du palpeur

Le palpeur doit réaliser le meilleur compromis entre :

- son efficacité à l'émission.
- sa sensibilité à la réception.
- la symétrie de son lobe en ondes longitudinales.
- la netteté des échos qu'il fournit.

Ce compromis est aussi valable pour le contrôle par contact.

#### 2.6.3 Les avantages de la méthode

##### 1. Couplage constant

L'opérateur n'intervient pas directement sur les paramètres de couplage comme dans le contrôle par contact où des variations de pression exercée sur le palpeur suffisent à modifier la hauteur d'un écho. En revanche en immersion, les résultats sont parfaitement reproductibles, les analyses quantitatives précises et aisément exploitables.

## 2. Contrôle précis de la pièce

Ce procédé permet une automatisation des déplacements de la sonde ou de la pièce suivant deux, ou trois directions. Les échos obtenus sont visualisés et ou mémorisés.

## 3. Enregistrement des résultats

Le recueil des informations émises par le palpeur peut se faire de différentes manières :

- visualisation sur un écran des pics de réflexion avec seuil d'acceptabilité.
- enregistrement des informations sur une table traçante.
- mémorisation des informations sur ordinateur.

## 4. Utilisation des faisceaux focalisés

La focalisation des ondes ultrasonores est la concentration de l'énergie du faisceau dans une zone restreinte de l'espace.

## 5. La distance palpeur –pièce est réglable

Il est possible de positionner la zone de focalisation du palpeur à une profondeur choisie dans la pièce.

### 2.6.4 Les précautions d'utilisations

#### 1. L'oxydation des pièces immergées

Un matériau qui s'oxyde rapidement doit être immergé dans du pétrole désodorisé.

#### 2. La présence de bulles ou d'impuretés dans le fluide de couplage provoque des échos parasites

L'eau utilisée contient une grande quantité de gaz dissout. Ces gaz se déposent rapidement sur toutes les pièces immergées. Pour atténuer ce phénomène il faut chauffer le fluide pour le dégazer ou bien par cavitation.

#### 3. la création d'échos fantômes

Au niveau du contact fluide –pièce, un faible pourcentage des ondes ultrasonores pénètre dans la pièce, les ondes réfléchies vont circuler de nombreuses fois entre la pièce et le palpeur pendant un temps supérieur à celui qui sépare deux émissions consécutives.

#### 4. l'influence des états de surface des pièces à contrôler

Si le couplage palpeur – pièce est correct, il est possible de contrôler par immersion des pièces ayant de mauvais états de surface.

### 2.7 L'appareil à ultrasons

Pour émettre un faisceau d'ondes élastiques dans un matériau et analyser les variations de propagation de celui –ci, on utilise un appareil qui est appelé : appareil générateur –détecteur par ultrasons.

#### 2.7.1 Générateur d'impulsions

Il fournit à l'élément transducteur des impulsions électriques à l'intervalle régulier. Les impulsions émises peuvent être de quatre types :

- émission sinusoïdale entretenue
- émission sinusoïdale amortie.
- émission choc.
- émission brève.

##### 2.7.1/a Emission sinusoïdale entretenue

Le signal est sinusoïdal et peut comporter plus de 15 cycles. La variation de la puissance d'émission s'effectue soit en agissant sur la tension du signal, soit sur le nombre de cycles.

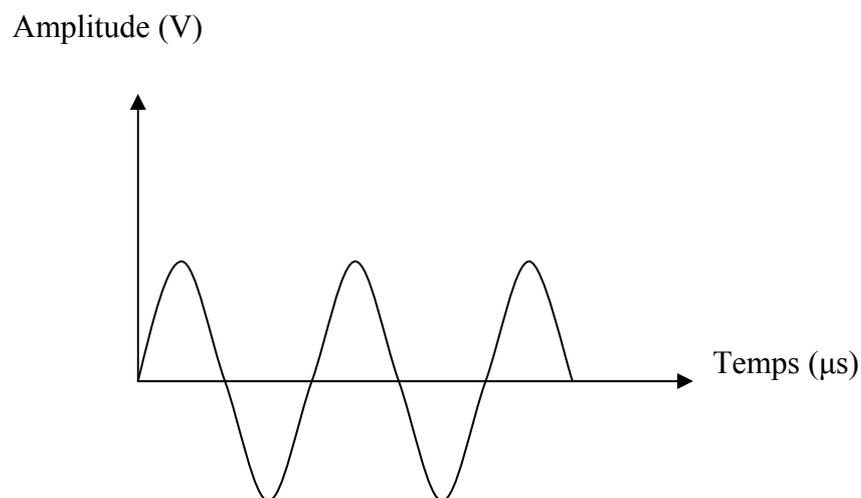


Figure 2.10 : Emission sinusoïdale entretenue

- Avantages :

Le bon rendement de ce type d'émission permet l'utilisation d'une tension d'émission relativement faible et d'effectuer un contrôle avec un faible gain en réception évitant l'apparition de bruits parasites.

- Inconvénients

Les appareils donnant cette émission doivent nécessairement être équipés d'un commutateur permettant d'adapter la fréquence d'émission à la fréquence nominale du traducteur.

La durée relativement élevée du signal d'émission entraîne un pouvoir de résolution médiocre et une difficulté d'obtenir une information d'anomalies en zone proche du traducteur.

#### 2.7.1/b Emission sinusoïdale amortie

Le signal sinusoïdal est fortement amorti et ne comprend que quelques cycles

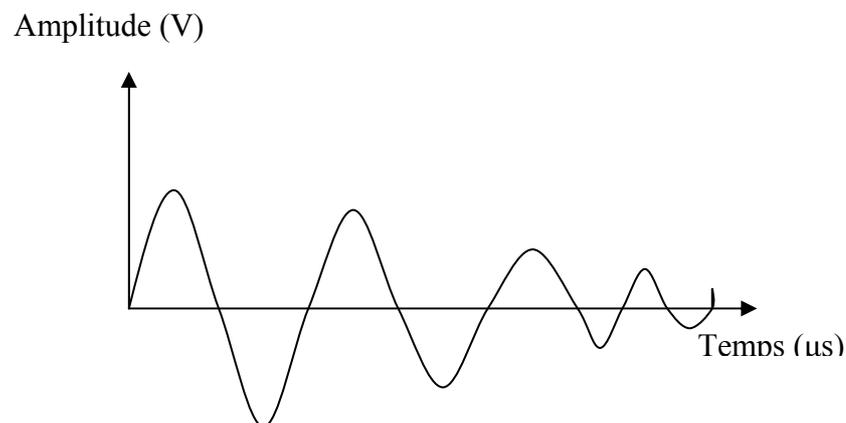


Figure 2.11 : Emission sinusoïdale amortie

- Avantages

Elle présente un excellent compromis entre puissance d'émission élevée (faible gain donc peu de bruits) et pouvoir de résolution plus élevé que pour le précédent type d'émission.

Cet ensemble de critères contribue à l'obtention d'une bonne qualité du réflectogramme.

- Inconvénients :

Il faut que l'appareil utilisé soit équipé d'un commutateur de fréquence à fin de pouvoir sélectionner les fréquences d'émission désirées.

La durée d'émission encore élevée se concrétise par un mauvais pouvoir de résolution axial et l'exploration avec la zone proche du transducteur est médiocre.

### 2.7.1/c Emission choc

Le temps de montée du signal est supérieur à 50 ns et la descente a l'allure d'une exponentielle et de durée beaucoup plus longue que la montée.

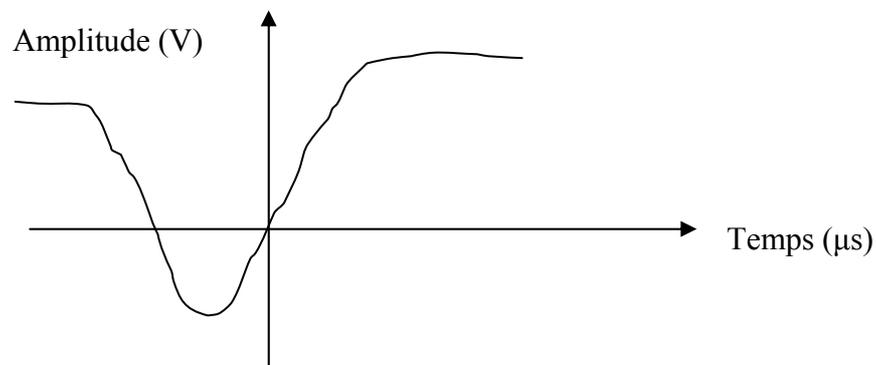


Figure 2.12 : Emission choc

- Avantages

La durée de l'émission relativement courte contribue à une bonne représentation de la zone proche du transducteur et un excellent pouvoir de résolution.

- Inconvénients

Le rapport d'adaptation et le rendement sont moyens, ce qui nécessite une tension d'émission et des gains élevés (risque d'apparition des bruits, détérioration de la qualité des réflectogrammes).

Les appareils doivent malgré tout être équipés de commutateur de fréquence.

La plupart présentent des rebondissements à la fin du signal qui détériorent sa fréquence et les pouvoirs de résolution.

### 2.7.1/d Emission brève

Emission semblable à l'émission choc mais beaucoup plus rapide, elle est caractérisée par une bande passante à 3 dB très large.

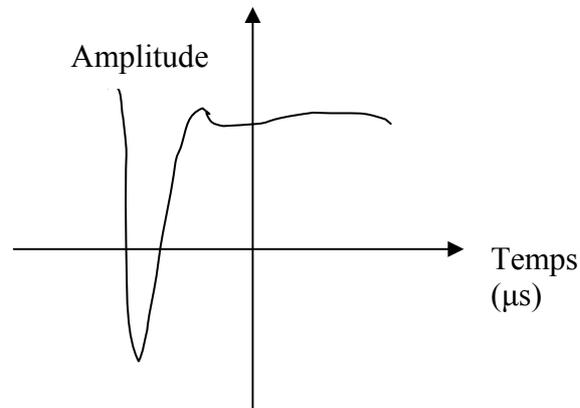


Figure 2.13 : Emission brève

- Avantages

Le temps très court de l'émission permet d'obtenir de très bonne image en zone proche du transducteur et un très bon pouvoir de résolution. Actuellement ce type d'émission est le plus utilisé.

- Inconvénients

Le rapport d'adaptation et le rendement relativement faible nécessitent une tension d'émission élevée.

### 2.7.2 Quelques définitions

- le pouvoir de résolution

Le pouvoir de résolution caractérise la capacité de la sonde à différencier nettement des obstacles proches les uns des autres situés sur l'axe du faisceau.

$$PR = \frac{V \times t}{2}$$

Ou :

t : durée de l'écho.

V : vitesse des ultrasons dans l'eau.

PR : pouvoir de résolution.

- La piézoélectricité

L'effet piézo-électrique a été découvert en 1880 par Pierre et Jaques Curie [20].

Son principe est que certains matériaux, comme les cristaux de quartz, ont la propriété de se charger lorsqu'ils sont comprimés, et de se déformer (comprimer) lorsqu'ils sont chargés.

En appliquant un courant alternatif sur un cristal piézoélectrique, le cristal se comprime et se décomprime alternativement et émet donc un son.

- La sensibilité

La sensibilité est la capacité de l'onde à détecter de petits défauts.

## 2.8 La chaîne de contrôle

### 2.8.1 Introduction

Dans le domaine de la caractérisation et du contrôle non destructif par ultrasons, toute l'information est contenue dans un signal électrique, appelé signal écho. La qualité du contrôle (sensibilité) est donc conditionnée par celle des appareils utilisés.

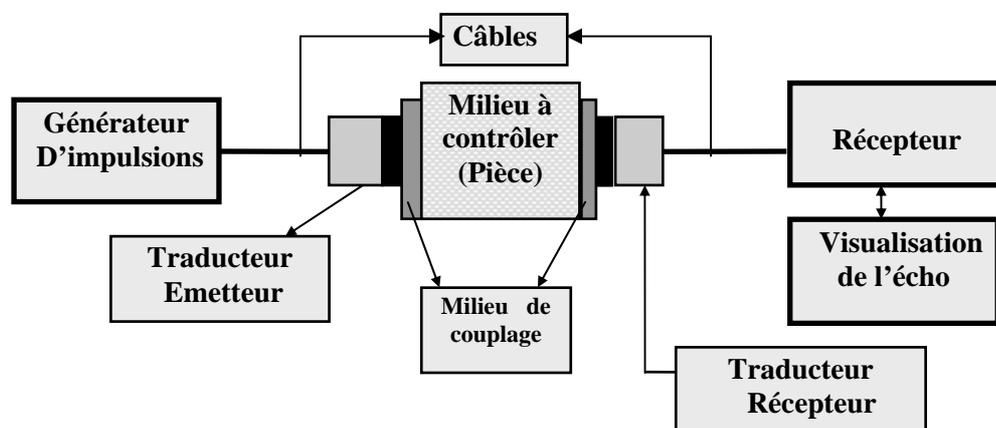


Figure 2.14 : Schéma de la chaîne de contrôle

### 2.8.2 Le générateur d'impulsions

L'appareil de contrôle ultrasonore, auquel le palpeur est connecté par un câble de liaison se compose :

- d'une émission synchronisée avec le départ de balayage.

- de systèmes électroniques qui amplifient et adaptent les signaux délivrés par le palpeur dans le but d'obtenir sur l'écran du tube cathodique des échos facilement exploitables.

### 2.8.3 Déclenchement du circuit émetteur

Le déclenchement de l'impulsion d'émission s'effectue par l'intermédiaire d'une horloge. Cette impulsion est émise à intervalle régulier.

La fréquence de répétition de l'impulsion d'émission est appelée fréquence de récurrence. Généralement cette fréquence est directement commutée avec le circuit base de temps.

### 2.8.4 Le récepteur

Les vibrations acoustiques qui ont parcouru le matériau sont recueillies par le transducteur qui transforme la pression reçue en signaux électriques.

Ces signaux de très faibles tensions doivent subir une amplification pour les rendre exploitables ; c'est le rôle de « l'amplificateur ». Celui-ci est un élément essentiel de la chaîne de contrôle, qui transposera les informations acoustiques en images exploitables par le contrôleur.

### 2.8.5 La visualisation

La visualisation du signal se fait à l'aide d'un oscilloscope qui se compose :  
D'un tube cathodique constitué de trois parties :

#### 1. Le canon à électron

Un filament porte une cathode à haute température. Celle-ci émet des électrons, le faisceau d'électrons qui est canalisé par le **Wehnelt** qui entoure la cathode.

#### 2. le Wehnelt

Il est porté à une tension négative et les électrons n'ont que la possibilité de passer par un trou percé au centre.

En modifiant cette tension, on agit sur la tension des électrons et par conséquent sur la linéarité du spot. Une anode de concentration permet d'obtenir un faisceau très fin.

Enfin le faisceau, par une accélération en deux temps est projeté sur l'écran.

### 3. L'écran

Il est composé d'une matière qui devient luminescente sous l'action du bombardement électronique. Cette matière doit être conductrice.

## 2.9 Procédés de contrôle

### 2.9.1 Par écho mode

Elle a d'abord été utilisée pour la détection des défauts dans les solides durant la seconde guerre mondiale par Sproule et Firestone [20] avant d'être généraliser à différents types de mesures dans toutes sortes de matériaux.

La technique de base est d'utiliser un seul transducteur pour l'émission et la réception du signal (palpeur émetteur récepteur)

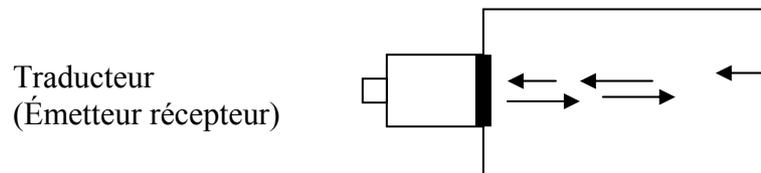


Figure 2.15 : Technique en mode écho

#### Avantages de la méthode

- accessibilité par une seule face de la pièce (contrôle sans démontage).
- possibilité de localiser et dimensionner les défauts.
- rapidité de mise en œuvre.
- examen de pièces volumineuses.
- appareillage facilement maniable.

### 2.9.2 Par transparence

Le procédé consiste à placer deux palpeurs des deux cotes de la pièce, l'un joue le rôle d'émetteur l'autre de récepteur.

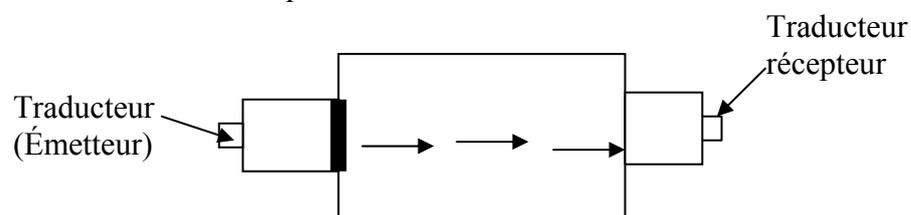


Figure 2.16 : Technique de transparence

Cette technique est très appréciée lors des processus de fabrication à la chaîne. Un exemple d'application est le contrôle des joints soudés des tubes juste après leurs réalisations.

#### Inconvénients

- nécessité d'accéder des deux cotés de la pièce.
- parallélisme des surfaces de sondage sinon difficultés d'interprétation des résultats.

## CHAPITRE 3

### RADIOGRAPHIE

#### 3.1 Introduction

La radiographie est l'une des méthodes de contrôle non destructif. Elle consiste à placer une source de radiations pénétrantes (rayons X ou gamma) d'un côté de l'objet à examiner et à disposer un détecteur de rayonnement (le film) de l'autre.

#### 3.2 Principe

Le détecteur est généralement un film photographique placé dans une enveloppe opaque ou un chargeur dont la surface frontale est suffisamment mince pour laisser passer les rayons X [21].

Le générateur des rayons X est activé pendant une période de temps adéquate puis le film est soumis à un traitement photographique : développement, fixage, lavage et séchage.

Le cliché obtenu est placé ensuite sur un écran éclairé appelé le **négatoscope**. Les différences d'intensité du faisceau de rayons X traversant l'objet entraînent des différences de noircissement qui se traduisent sur le film éclairé par des différences de luminosité.

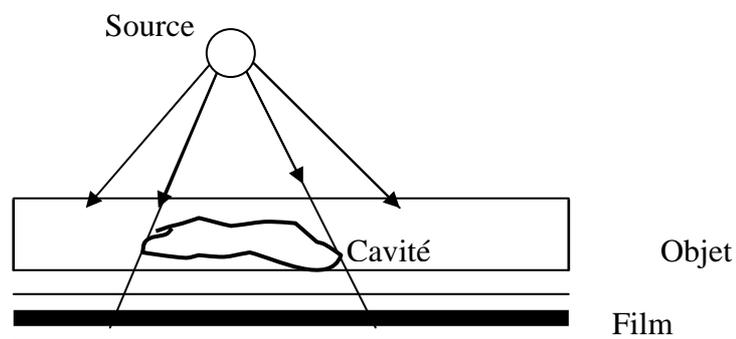


Figure 3.1 : Principe de la radiographie

### 3.3 Qualité de l'image du film

Elle est déterminée par trois facteurs :

#### 3.3.1 Contraste

Considérons un objet présentant une série de rainures de différentes profondeurs usinées en surface. La différence entre la densité de l'image d'une rainure et celle du fond de la radiographie s'appelle contraste. Il faut donc un contraste minimum pour qu'une anomalie soit perceptible.

#### 3.3.2 Netteté de l'image

La plupart des radiologistes ont l'habitude d'utiliser le terme flou d'image, cette caractéristique est matérialisée par :

$$fl = \frac{d-l}{D-d}$$

Avec

fl = largeur du flou

l = plus grande dimension du foyer d'émission

D = distance source-film

d = distance défaut - film

#### 3.3.2 Granulation

L'image reproduite sur un film photographique est formée de grains d'argent. Ce facteur est également susceptible de masquer les petits détails de l'image.

### 3.4 Sensibilité radiographique

C'est l'aptitude d'une radiographie à montrer les détails d'une image. On dit que l'image possède une bonne sensibilité si elle permet de percevoir de minuscules défauts.

### 3.5 Principales propriétés des rayons X

1- Les rayons X sont invisibles.

2- Ils se propagent en ligne droite à la vitesse de la lumière.

3- Ils ne peuvent être déviés au moyen d'une lentille ou d'un prisme mais le sont par un réseau cristallin.

4- Ils traversent la matière et sont partiellement absorbés au cours de la transmission. Le degré de la pénétration dépend de la matière et de l'énergie des rayons X.

5- Ils peuvent endommager ou détruire les cellules vivantes. Ils sont très dangereux pour ceux qui les manipulent donc des radioprotectons sont indispensables.

### 3.6 Rayons gamma

Les rayons gamma sont des radiations électromagnétiques de même nature physique que les rayons X. Ils possèdent les mêmes propriétés mais ne sont pas produits au moyen d'un appareillage électrique.

Ils proviennent de la désintégration de noyaux atomiques d'un élément radioactif

L'énergie du rayonnement et l'intensité des rayons gamma ne sont pas réglables.

### 3.7 Source de rayon X

Le tube à rayons X classique se compose d'une ampoule de verre dont laquelle sont logées sous vide une électrode positive (anode) et une électrode négative (cathode).

La cathode comporte un filament qui libère des électrons lorsqu'il est porté à incandescence par un courant de quelques ampères.

Les électrons cathodiques sont attirés par l'anode qui consiste en une pastille appelée anticathode fabriquée dans un métal à point de fusion élevé.

Les rayons X sont engendrés lorsque les électrons accélérés issus du filament chauffé percutent l'anticathode

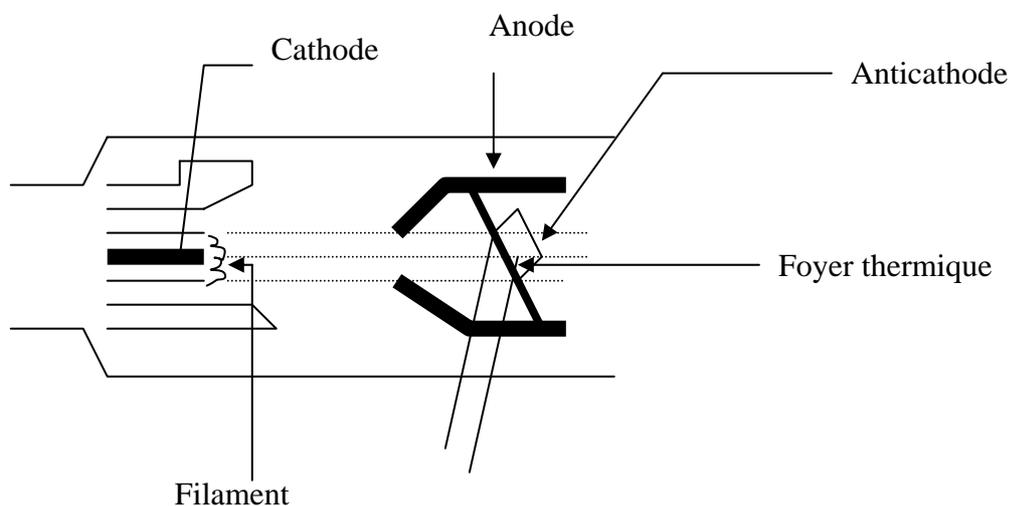


Figure 3.2 : Source de rayons X

### 3.8 Types de générateurs

En dehors des générateurs directionnels les plus courants, divers types de tubes ont été réalisés pour des applications spécifiques : [22]

- Un tube panoramique, pour la radiographie des soudures de tubes, par exemple des oléoducs.

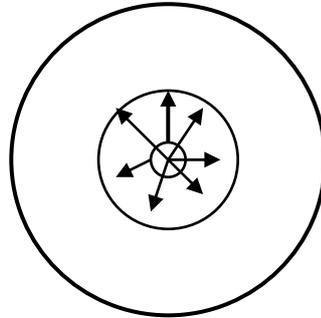


Figure 3.3 : Source à tube panoramique

- Un tube à anode longue qui peut pénétrer dans des orifices de faible diamètre.

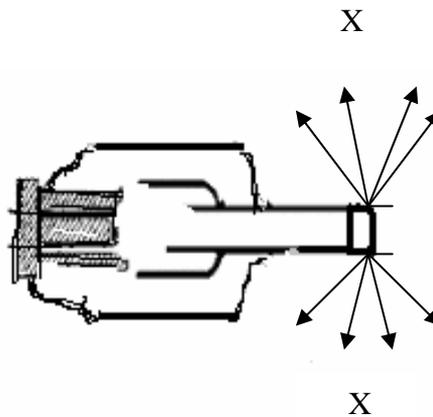


Figure 3.4 : Source à anode longue

- Un tube à anode tournante utilisé en médecine : la chaleur est mieux dissipée par la grande surface totale de l'anode se déplaçant à l'emplacement du foyer. Ceci autorise la réduction du temps d'exposition grâce à une plus grande intensité de rayonnement, et permet l'élimination du flou cinétique provenant des mouvements du corps humain.

Remarque :

Comme la formation du rayonnement X s'accompagne d'un important dégagement de chaleur, il est nécessaire de refroidir l'anode. Ce refroidissement peut être réalisé soit :

- par rayonnement,
- par convection,
- par circulation forcée du liquide,

3.9 Le foyer thermique

C'est la surface de l'anticathode percutée par les électrons. Il peut être petit ou grand

3.10 Débit des rayons X

Dans la plupart des appareils à rayons X, le débit se mesure en fonction du courant d'électrons traversant le tube, exprimé en milliampères. L'objet absorbe partiellement le faisceau primaire de rayons X. Une partie de la radiation est diffusée et peut atteindre le film de manière indirecte. Par conséquent la radiation totale atteignant un point quelconque du film, est constituée par une partie de la radiation primaire qui forme l'image du défaut, appelée directe et une partie de la radiation diffusée ou indirecte qui ne contribue pas à la formation de l'image.

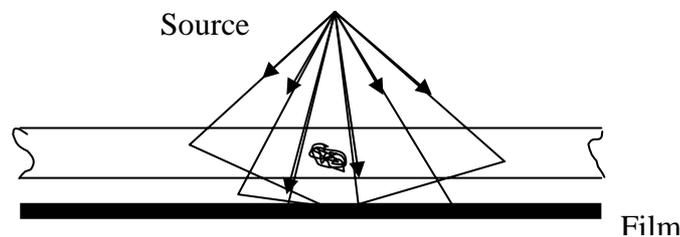


Figure 3.5 : Image radiante et image sur film

Remarque

On peut diminuer les effets de la radiation diffusée :

- En réduisant au strict minimum la section du faisceau de rayons X à l'aide d'un diaphragme ou d'un localisateur.
- En disposant des masques autour des arêtes de l'objet à radiographier
- L'utilisation des filtres radiographiques: le filtre peut être placé à proximité immédiate du tube à rayons X, il est généralement constitué d'une feuille de

plomb ou de cuivre dont l'épaisseur est choisie en fonction de l'énergie des rayons X.

### 3.11 la structure d'un film radiographique

Un film radiographique comporte sept couches :

1 : un support en tri acétate de cellulose ou en polyester, de part et d'autre du support ou trouve :

a- une couche de gélatine durcie qui protège l'émulsion

b- une couche d'émulsion

c- une couche très mince appelée substrat

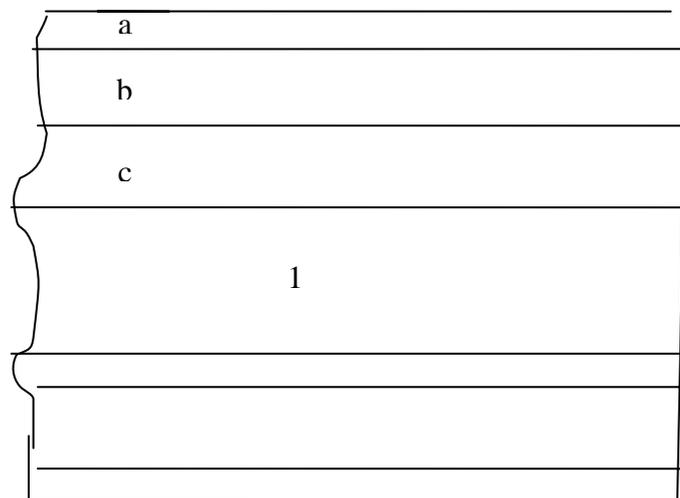


Figure 3.6 : Structure d'un film radiographique

### 3.12 le développement

Il permet de transformer l'image latente (invisible) en image visible. Il existe plusieurs produits chimiques capables de faire cette transformation appelées développeurs comme : Metol, Hydroquinone, Phenidone, Glycine, Pyrocatechine Amidol, Paraphenylenediamine.

### 3.13 Types de film

La plupart des fabricants de films radiographiques commercialisent des films destinés à être utilisés avec des écrans renforçateurs métalliques ou sans écrans. La société

Agfa-Gevaert commercialise des films de ce type sous les noms D<sub>2</sub>, D<sub>3</sub>, D<sub>4</sub>, D<sub>5</sub>, D<sub>7</sub> et D<sub>8</sub>. [21].

### 3.14 La visibilité des défauts

La visibilité des défauts est déterminée par trois facteurs :

- 1- facteurs géométriques : dimensions de la source, distance source- objet et distance défaut –film.
- 2- les propriétés du film : granulation, contraste, voile flou interne
- 3- la qualité du rayonnement utilisé.

### 3.15 Indicateurs de qualité d'image

Pour apprécier la qualité des clichés radiographiques, nous utilisons les indicateurs de qualité d'image (IQI) ou pénétramètres.

En France, la norme NF A 90205[21] préconise l'utilisation de plaques métalliques à gradins percés de trous d'un diamètre égal à l'épaisseur de la plaque correspondante. Ces IQI sont de forme soit rectangulaire, soit hexagonale.

Cependant, d'autres IQI sont utilisés en France :

- Indicateurs à 7 fils (DIN 54.109) de largeur 50 mm (parfois 25 mm) et de diamètre décroissant. Ces fils doivent être de même nature que le métal à contrôler.
- indicateurs américains (type ASTM code ASME ou API),
- Indicateurs anglais (type BWRA).

Ces indicateurs se placent en travers de la soudure devant être radiographiée.

### 3.16 Traitement des films radiographiques industriels

Actuellement les films sont de plus en plus souvent traités de manière automatique, mais connaître le manuel est toujours fondamental.

#### 3.16.1 Chambre noire

Pour des raisons pratiques, la chambre noire doit se trouver aussi près que possible du local de prise de vues mais hors d'atteinte du rayonnement radioactif.

#### 3.16.2 Le traitement automatique

Au cours de ces dernières années l'utilisation de machines automatiques pour le traitement des films radiographiques industriels s'est largement répandue, en comparaison

avec le traitement manuel. Ces machines permettent de réduire considérablement la durée du traitement. Cette réduction de la durée du traitement est obtenue en utilisant des produits chimiques spéciaux et des températures supérieures.

### 3.17 Les applications de la radiographie

- les soudures de raccordement.
- les vannes et corps de vannes.
- la recherche de corrosion.
- les pièces de fonderie.

### 3.18 La radioscopie

#### 3.18.1 Définition :

La radioscopie est un système d'imagerie qui permet d'obtenir une image dynamique (en temps réel). La radioscopie est à la radiographie ce que le cinéma est à la photographie. La fluorescence d'écrans sensibles aux rayons X forme l'image visible de l'objet. Cette image était naguère observée directement derrière l'écran, ce qui était très dangereux pour l'observateur non protégé et a entraîné de nombreuses maladies, et même plusieurs décès. De nos jours cette image est reprise par une caméra de télévision et l'observation se fait donc loin des rayonnements.

#### 3.18.2 Principe de fonctionnement

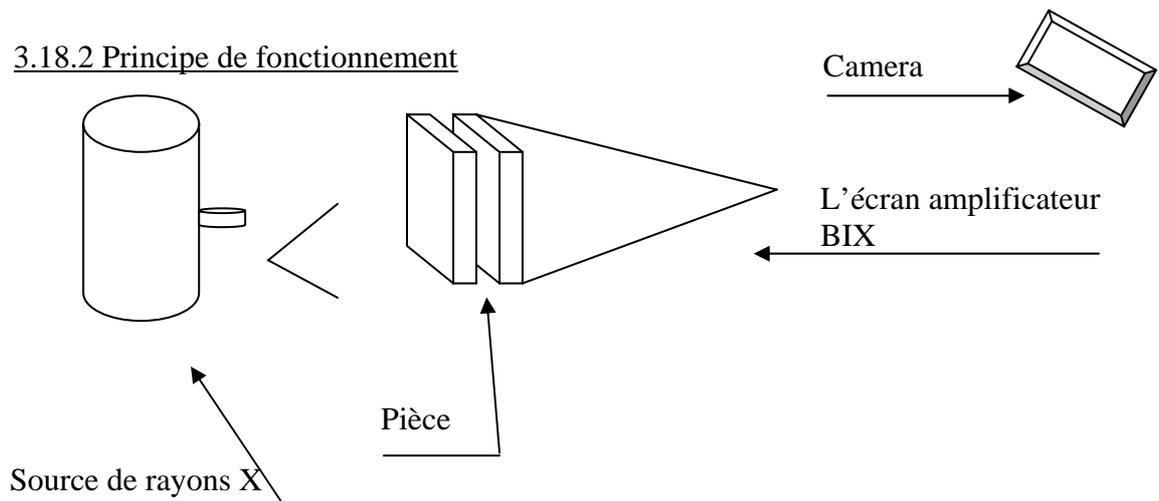


Figure 3.7 : Radioscopie

### 3.18.3 Description

Les principaux éléments qui composent un radioscope sont :

#### 3.18.3.1 La source

La source de rayon X, est identique a celle utilisée par radiographie.

#### 3.18.3.2 L'écran amplificateur

Il est aussi appelé amplificateur de luminance. Il est placé derrière la pièce et remplace la cassette.

Il est forme de trois éléments : la fenêtre d'entrée, un système d'amplification et une fenêtre de sortie.

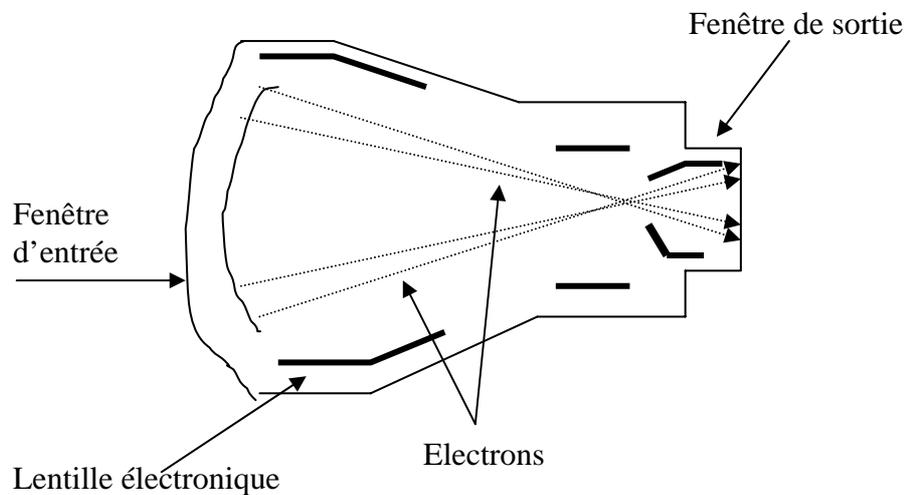


Figure.3.8 : Amplificateur de luminance (BIX)

#### 3.18.4 Principe de base de l'amplificateur de luminance

La fenêtre d'entrée est placée contre l'objet à examiner et a pour fonction de transformer les rayons X constituant l'image radiante en électrons.

Les électrons sont accélérés et focalisés par une différence de potentiel et projetés sur la fenêtre de sortie. Chaque électron projeté forme un signal lumineux et l'information est transformée en une image visible.

## CHAPITRE 4 PARTIE EXPERIMENTALE

### 4.1 Introduction

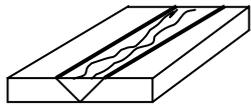
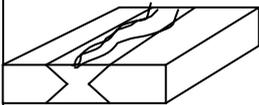
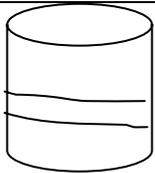
Cette partie explicite les démarches qui permettent la détection du défaut, le calcul de la profondeur de celui –ci et notamment l'évaluation de sa dimension par les deux méthodes du contrôle non destructif.

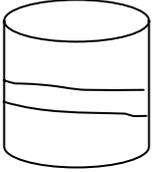
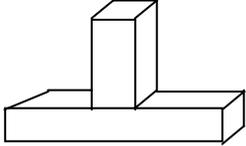
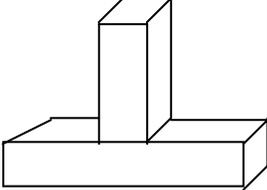
Nos expériences ont porté sur des échantillons contenant des défauts réels et fréquents dans l'industrie destinée à la formation et la qualification des opérateurs du contrôle non destructif de niveaux I, II et III. Ces pièces en acier sont soudées, de forme et de dimension différentes réparties entre plates, cylindriques et inclinées.

### 4.2 Description des échantillons

Le tableau 4.1 récapitule l'ensemble des pièces à contrôler, leurs formes, leurs joints ainsi que leurs dimensions. [23]

Tableau 4.1 Description des échantillons

pièce : n°	forme	joint	Longueur (mm)	Epaisseur (mm)
1		bout à bout en V	300	25
2		bout a bout en X	300	30
4		Cylindrique	300	12

5		Cylindrique	300	25
6		Inclinée en T	300	20
7		Inclinée en T	300	30

### 4.3 Contrôle des pièces par ultrasons

La gamme des pièces présentées ci-dessus a subi un ensemble de contrôles afin de permettre la détection des défauts entre autre le contrôle par contact.

#### 4.3.1 Contrôle par contact

.1/a Dispositif expérimental :

La chaîne de contrôle par ultrasons par contact est décrite au (chap.2.5).

La structure de base d'une chaîne de contrôle par ultrasons comprend les éléments suivants :

1. un générateur d'impulsion électrique apte à exciter le palpeur émetteur avec une énergie électrique suffisante.
2. un palpeur qui transforme les impulsions électriques en ondes mécaniques.
3. un couplant réalisant la liaison acoustique entre le palpeur et la pièce à contrôler.
4. un récepteur dont le rôle est l'amplification, le filtrage et la visualisation du signal.
5. un ou plusieurs câbles pour la liaison électrique.

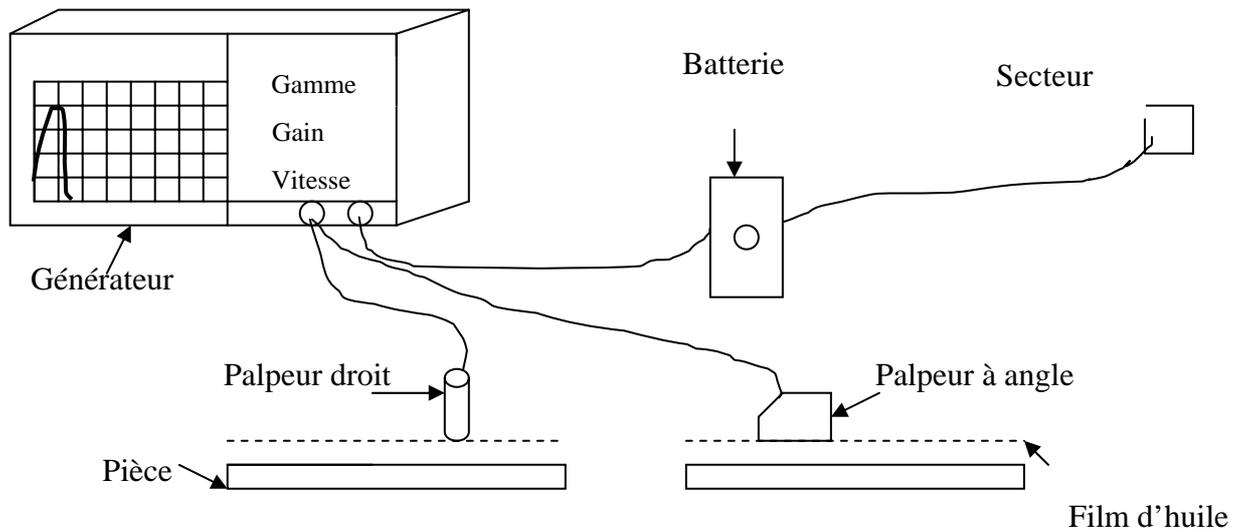


Figure.4.1 : Chaîne de contrôle à ultrasons par « contact »

#### 4.3.1.1 Choix de la fréquence d'une sonde

De nombreuses consultations et des essais réalisés par certains organismes techniques et utilisateurs ont montré qu'une grande partie des difficultés et des erreurs remarquées provenaient des traducteurs.

Il est donc de l'intérêt général des utilisateurs industriels et médecins que soient connues les caractéristiques des traducteurs ultrasonores afin de permettre une meilleure adaptation du palpeur au type de recherche envisagée.

#### 4.3.1.2 Mode opératoire

Pour déterminer expérimentalement la fréquence réelle du palpeur, deux types de dispositifs expérimentaux peuvent être utilisés, dont l'un est très simple à mettre en œuvre. Ce dispositif montré par la figure 4.2 permet de déterminer les courbes des parties réelles et imaginaires de l'impédance électrique des sondes en fonction des fréquences

En utilisant un logiciel qui nécessite comme données de départ (les entrées) :

- La fréquence initiale  $<$  à la fréquence du travail de la sonde.
- La fréquence finale  $>$  à la fréquence du travail de la sonde.
- Un pas de fréquence qui dépend de la précision voulue.

Ce logiciel donne les résultats sous forme de tableau, les parties réelles et imaginaires en fonction de leurs fréquences. Ce tableau peut être stocké dans une mémoire.

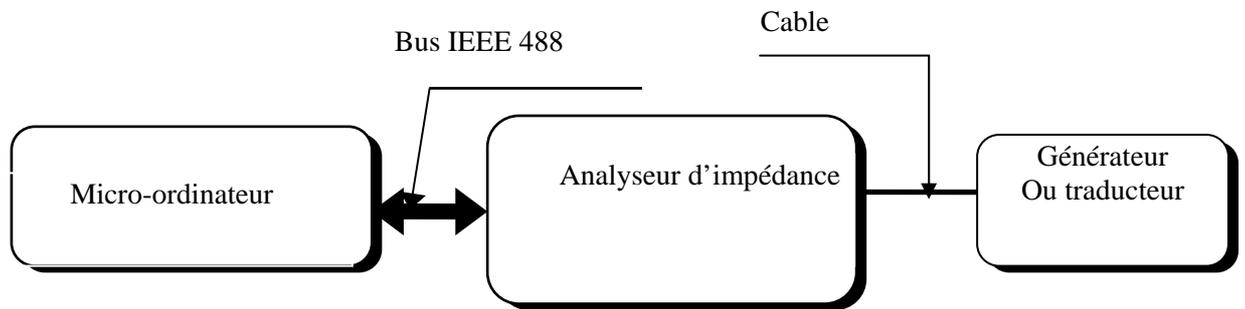


Figure.4.2 : Chaîne de mesure de l'impédance

Le tableau suivant donne les différents palpeurs utilisés lors des manipulations ainsi que les paramètres d'entrée de leurs entrées.

Tableau 4.2 Les entrées du logiciel

Les palpeurs	Fréquence initiale (MHz)	Fréquence finale (MHz)	Le pas (KHz)
MWB 70 -4	2.5	6	50
MWB 60 -4	2.5	6	50
MWB 70 -4	2.5	6	50
MWB 45 -4	2.5	6	50
MB 5M	2.5	7	50
MB 2S	0.85	4	50

#### 4.3.1.3 Les résultats expérimentaux

L'efficacité de cette méthode dépend intégralement du pas de fréquence choisi ce qui influe sur la précision du résultat. Cependant on fait appel à une autre méthode plus lourde mais dont les résultats sont beaucoup plus précis.

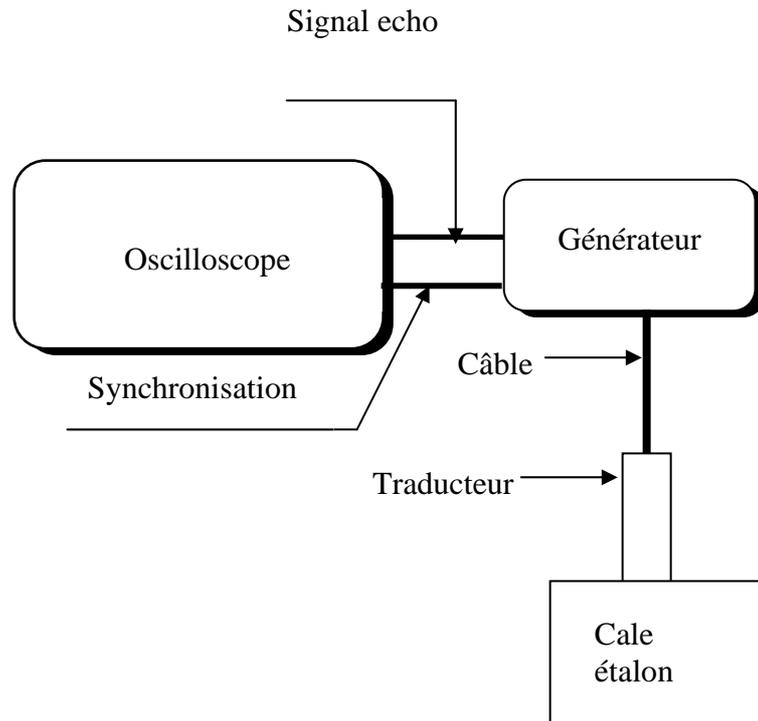


Figure.4.3 : Chaîne de mesure de la tension écho

On mesure le signal ultrasonore provenant de la réflexion d'une onde acoustique sur une interface séparant deux milieux de propagation ; l'acier et l'air.

Les résultats des figures 4.4 et 4.5 représentent respectivement à titre d'exemple l'écho et le spectre, d'une sonde de 5 MHz pour un réglage donné de l'énergie et du damping.

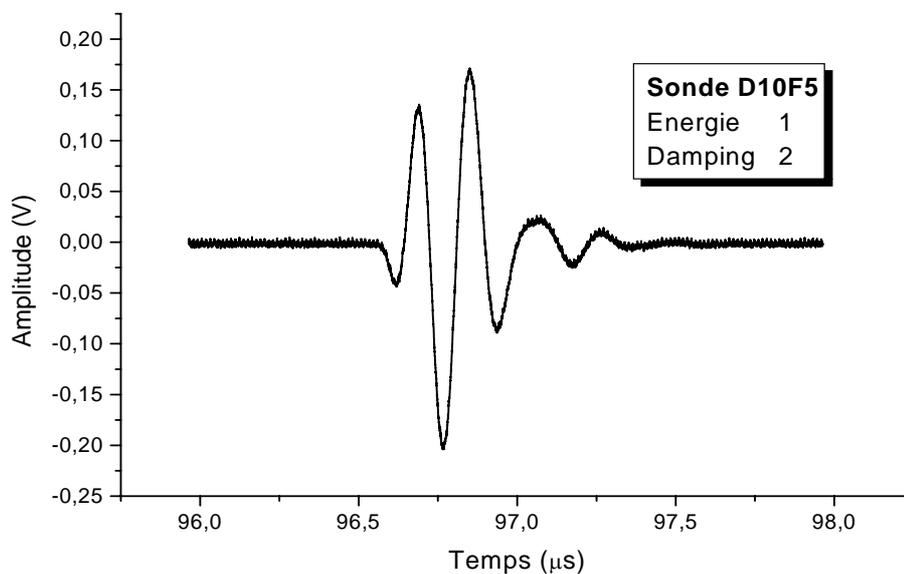


Figure.4.4 : Echo de la sonde MB 5M

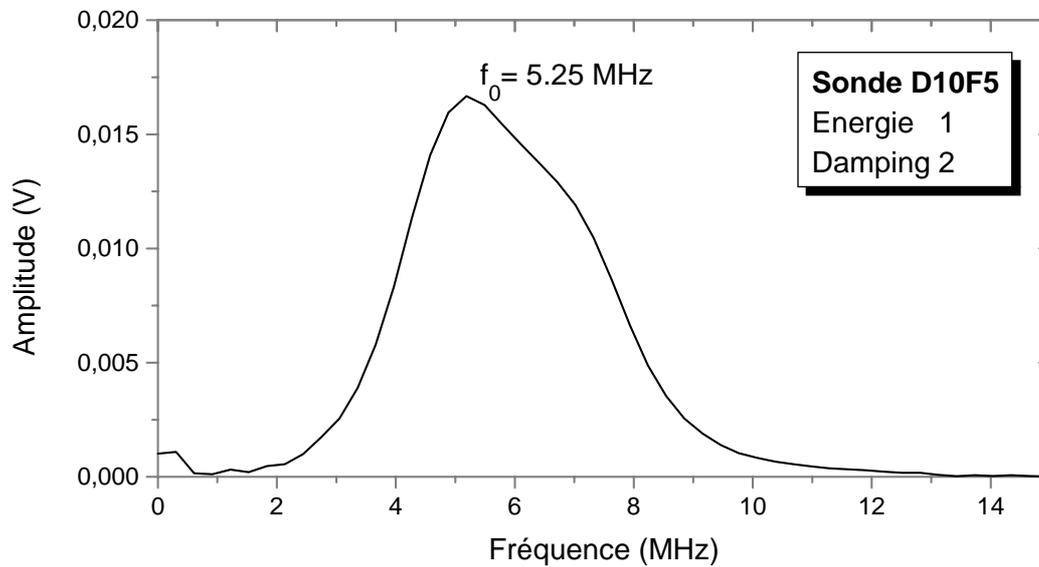


Figure.4.5 : Spectre de l'écho

### Conclusion

On remarque que la fréquence expérimentale est très proche de la fréquence de travail du palpeur et c'est le même cas pour les autres palpeurs utilisées. La différence entre les valeurs données par le constructeur et les valeurs réelles n'excède pas les 5% la gamme de palpeurs du tableau (4.2) est fiable et ils ne vont pas influencer de manière significative sur la précision des résultats.

#### 4.3.1.4 Préparation de l'état de surface

Pour chaque test ultrasonore, la forme et la rugosité de la surface sont très importantes du fait qu'elles influent sur la sensibilité de la méthode appliquée et par conséquent sur la fiabilité du contrôle. Toutes les méthodes recommandent impérativement un bon état de surface.

#### 4.3.1.5 Point d'émergence

C 'est le point par lequel émerge le faisceau ultrasonore. Il est nécessaire de connaître sa position exacte pour pouvoir localiser avec précision les défauts.

Il est déterminé expérimentalement à l'aide d'une cale étalon

Dans le cas de la figure suivante le point d'émergence est de 10 mm du repère

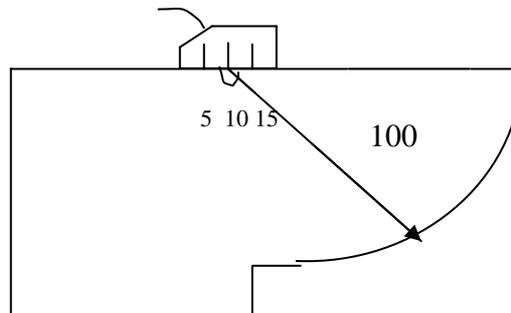


Figure.4.6 : Point d'émergence

#### 4.3.1.6 Etalonnage

Avant chaque contrôle, il est impératif d'étalonner la chaîne de contrôle. La fiabilité du contrôle est liée à cet étalonnage.

#### 4.3.1.7 Calcul de la profondeur du défaut en ondes longitudinales

Lorsque l'onde ultrasonore émise par le palpeur rencontre un milieu d'impédance acoustique différente, une partie de son énergie sera réfléchie pour donner l'écho du défaut, le reste de l'énergie parcourt la pièce .

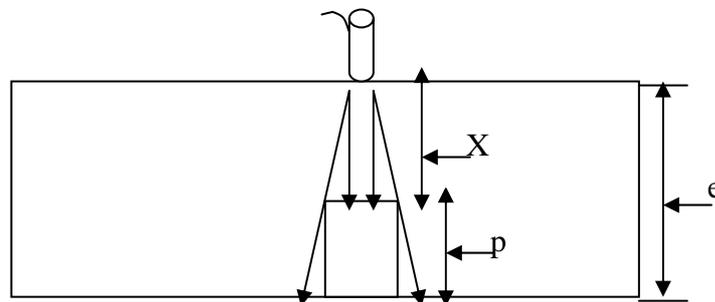
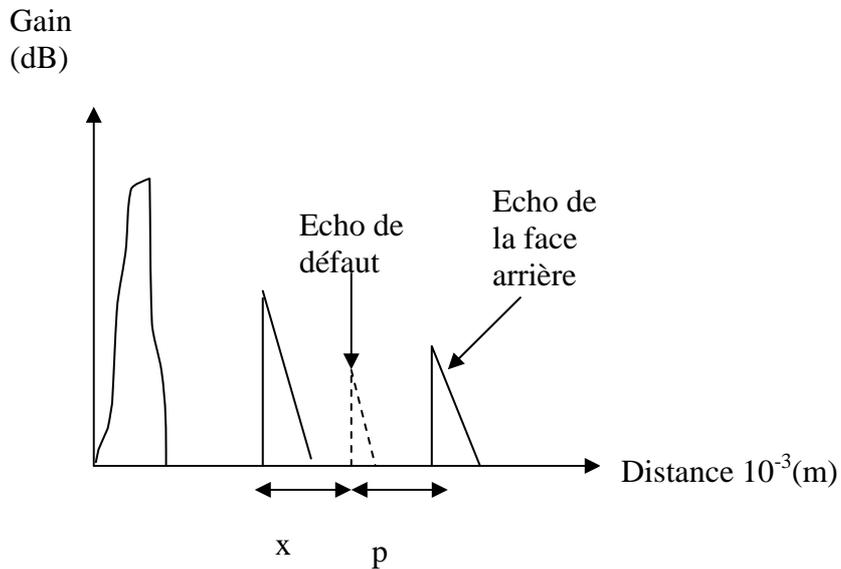


Figure 4.7 : Calcul de la profondeur des défauts avec un palpeur droit

L'écho correspondant



$$p = e - x$$

$e$  : épaisseur de la pièce.

$x$  : distance entre l'écho de défaut et l'écho de la face arrière.

4.3.1.8 Calcul de la profondeur du défaut en ondes transversales

Pour pouvoir calculer la profondeur du joint, on associe un joint de soudure et un joint fictif. [24].

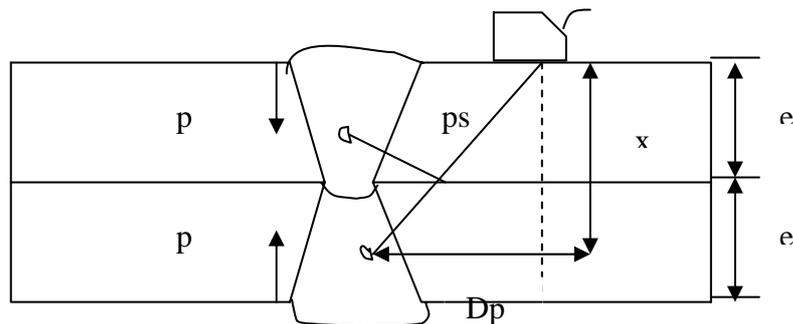


Figure 4.8 : Calcul de la profondeur du défaut par un palpeur à angle

$D_p$  : distance projetée.

$$2 \times e = x + p \Rightarrow p = 2 \times e - x$$

$$x = ps \times \cos \alpha \Rightarrow p = 2 \times e - ps \times \cos \alpha$$

D'où :

Ps : trajet lu sur l'oscillogramme.

$\alpha$  : Angle de réfraction.

## CHAPITRE 5

### CONTROLE PAR CONTACT

#### 5.1 Introduction

Les pièces à contrôler contiennent des défauts plans (laminage, manque de fusion ou de pénétration et fissure) et d'autres volumiques (inclusion et porosité).

Notre objectif est de détecter tous ces défauts pour pouvoir juger la fiabilité de la méthode.

#### 5.2 Contrôle de la pièce n°1

On procède toujours par contrôler la zone adjacente au cordon pour vérifier s'il n'y a pas de défauts. En effet un défaut non détecté dans cette zone peut erroné les résultats lors du contrôle du joint de soudure. Pour réaliser ce contrôle on utilise une sonde à ondes longitudinales de fréquence égale à 2 MHz. Le choix de la fréquence se fait en tenant compte de l'atténuation qui est proportionnelle à  $f^4$  (voir chap. 2.4.4).

Cette procédure est valable pour toutes les pièces à contrôler

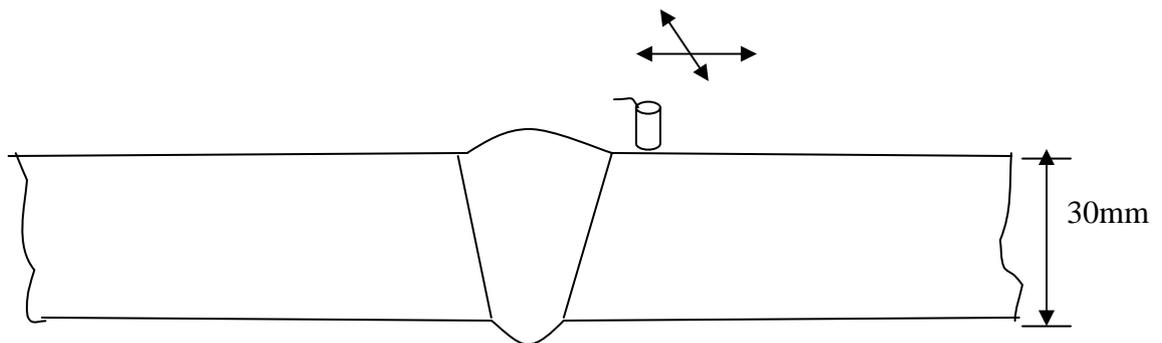


Figure 5 .1 : présentation du contrôle

#### 5.2.1 Réglage de l'appareil à ultrasons

Le gain =35 dB

La vitesse =5960 m/s

Retard  $= -2,133 \cdot 10^{-6}$  s

Gamme  $= 0.1$  m

### 5.2.2 Echo représentatif

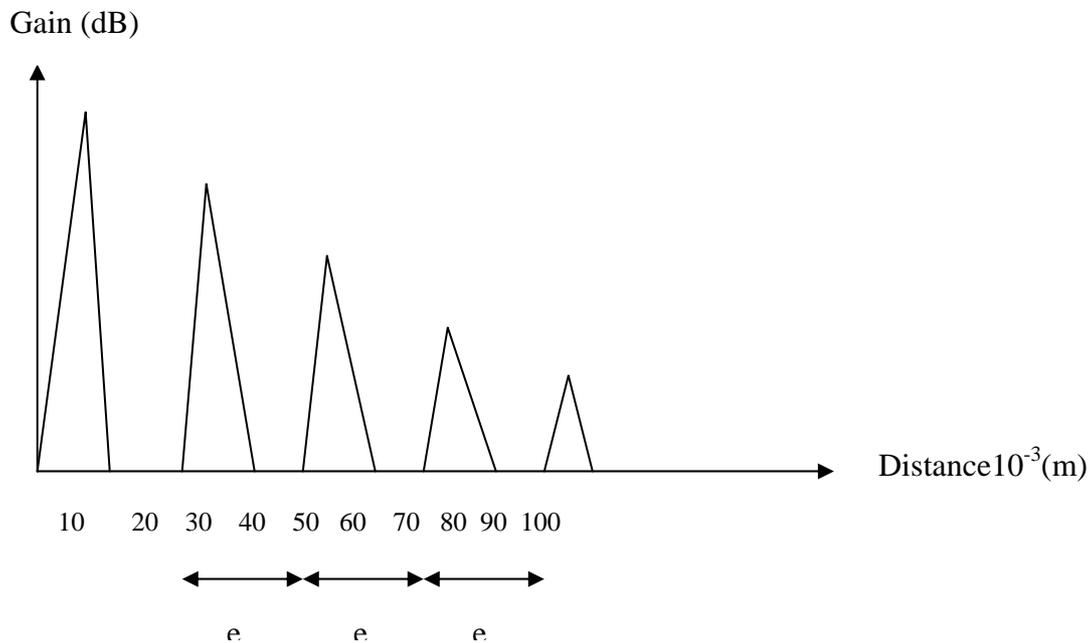


Figure 5.2 : Contrôle de la pièce n° : 1 dans la zone adjacente au cordon

L'oscillogramme de la zone saine montre des échos équidistants séparés par une distance égale à l'épaisseur de la pièce.

Avant chaque contrôle on doit déterminer les lignes de balayage, ces lignes servent à délimiter la zone de balayage de la sonde pour être certain de contrôler la totalité d'un cordon de soudure.

### 5.2.3 Contrôle du joint de soudure

Pour contrôler le joint de soudure, on utilise généralement des sondes à angles. Dans ce cas le Palpeur à un angle de 60°, de fréquence de 4 MHz et de point d'émergence de 0.013 m.

Ce contrôle est valable pour le reste des pièces à contrôler

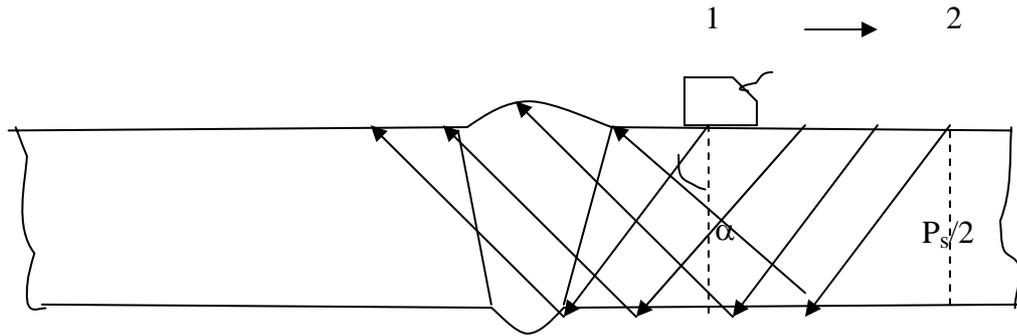


Figure 5.3 : Présentation du contrôle

$P_s$  : Parcours sonore, il doit être strictement inférieur à la gamme choisie préalablement.

(1) : la première ligne de balayage appelée A.

(2) : la deuxième ligne de balayage appelée B

$$\text{En A : } P_s = \frac{e}{\cos 60^\circ} = \frac{25 \times 10^{-3}}{0.5} = 0.05m$$

$$\text{En B : } P_s = \frac{2 \times e}{\cos 60^\circ} = 2 \times 50 \times 10^{-3} = 0.1m$$

#### 5.2.4 Réglage de l'appareil à ultrasons

Le gain = 58 dB

La vitesse = 3255 m/s

Retard =  $5.9 \times 10^{-6}$  s

Gamme = 0.2m.

#### 5.2.5 Oscillogramme avec défaut n°1

Gain (dB)

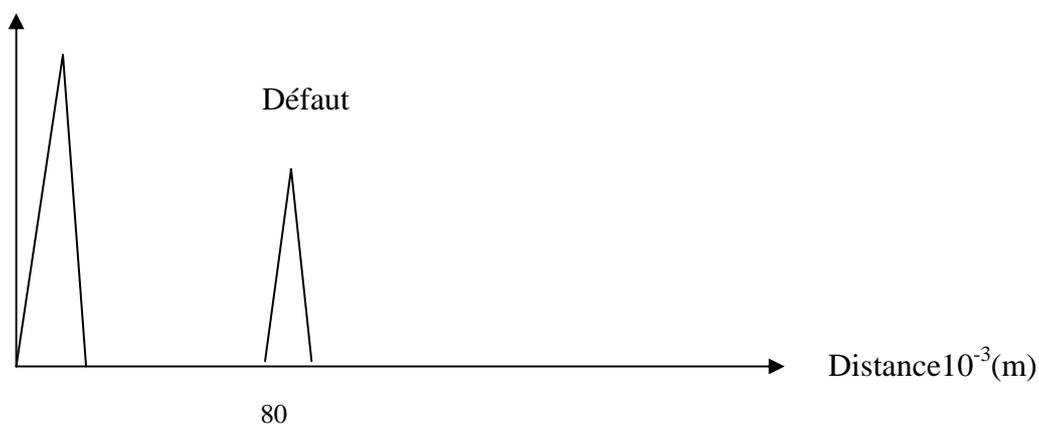


Figure 5.4 : Echo représentatif de la pièce n°1 avec défaut

### 5.2.6 Calcul de la profondeur

$$dp = ps \times \sin \alpha = 80 \times \sin 60^\circ$$

$$dp = 0.069 \text{ m}$$

$$p = 2 \times e - ps \times \cos \alpha$$

$$p = (50 - 40) \times 10^{-3} \Rightarrow p = 0.01 \text{ m}$$

Position du défaut : 162mm.

Profondeur : 10mm

Longueur : 28mm

Nature : inclusion

Une fois le défaut détecté, on procède à l'identification par un pivotement du palpeur et à travers les échos obtenus on peut distinguer un défaut d'un autre. Quand à l'inclusion, son écho est pratiquement petit.

### 5.2.7 Oscillogramme avec défaut 2

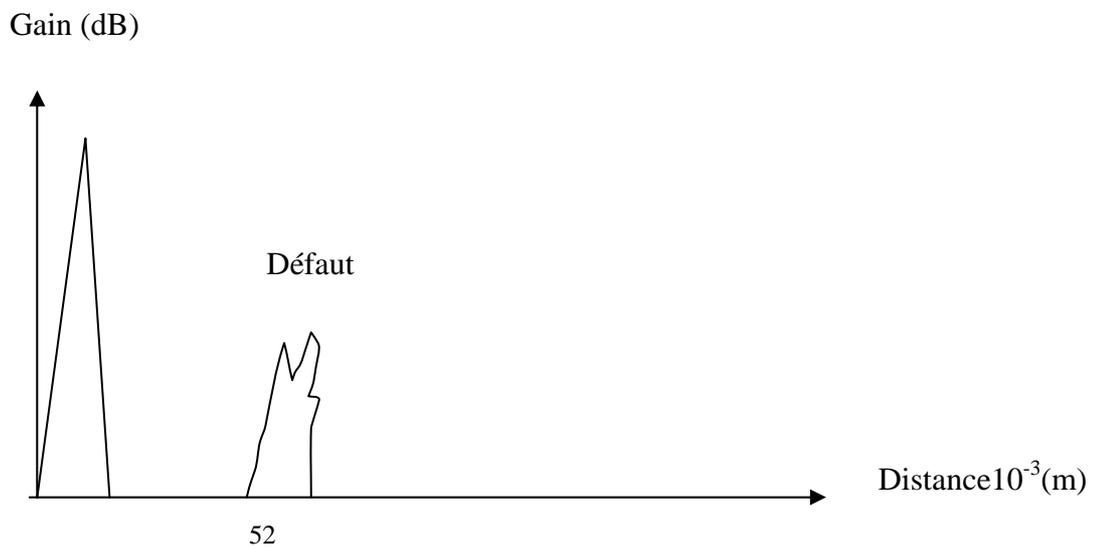


Figure 5.5 : Echo représentatif de la pièce n°1 avec défaut 2

### 5.2.8 Calcul de la profondeur

$$dp = ps \times \sin \alpha = 52 \times \sin 60^\circ$$

$$dp = 0.045 \text{ m}$$

$$p = 50 - 52 \times \cos 60^\circ$$

$$p = (50 - 26) \times 10^{-3} \Rightarrow p = 0.024 \text{ m}$$

Position du défaut : 90 mm.

Profondeur : 24 mm

Longueur : 16 mm

Nature : fissure à la pénétration.

En général, l'écho obtenu à partir d'une fissure (défaut plan) est important en hauteur, et le moyen qui permet de mieux différencier un défaut plan d'un défaut volumique, est la rotation du palpeur autour d'un axe passant par le défaut, si l'écho disparaît ; c'est un défaut plan, sinon c'est un défaut volumique.

L'allure de cet écho est un peu particulière, elle se caractérise par une multitude de pic d'amplitude plus ou moins prononcée, si on pivote le palpeur par rapport à son axe, l'amplitude de ces petits pics varie alternativement mais globalement l'allure générale de l'écho reste la même.

### 5.2.9 Oscillogramme avec défaut 3

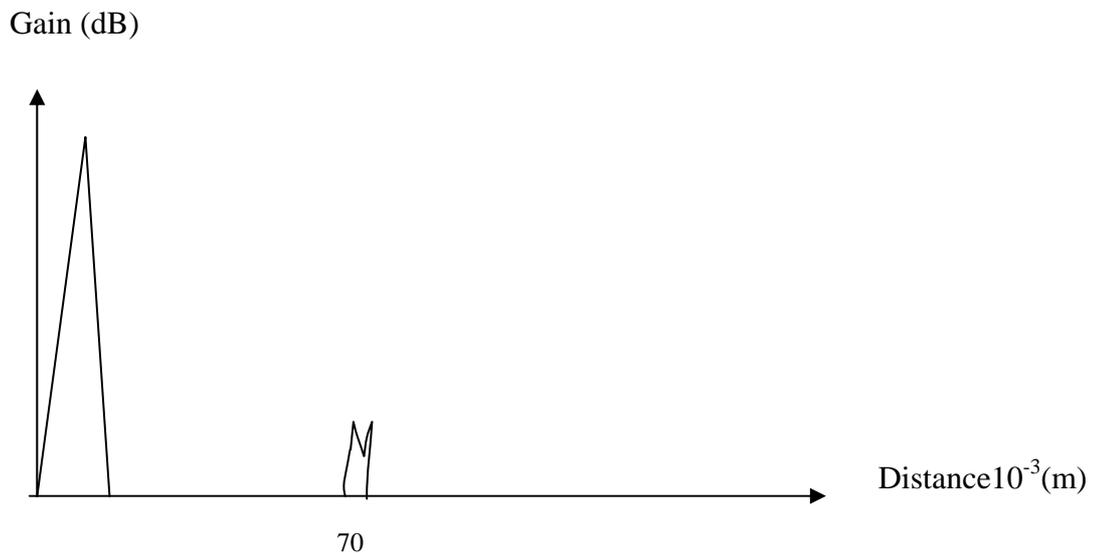


Figure 5.6 : Echo représentatif de la pièce n°1 avec défaut 3

### 5.2.10 Calcul de la profondeur

$$dp = ps \times \sin \alpha = 70 \times \sin 60^\circ$$

$$dp = 0.06 \text{ m}$$

$$p = 50 - 70 \times \cos 60^\circ$$

$$p = (50 - 35) \times 10^{-3} \Rightarrow p = 0.015 \text{ m}$$

Position du défaut : 250 mm.

Profondeur : 15 mm

Longueur : 30 mm

Nature : fissure.

### 5.2.11 Résultats du contrôle

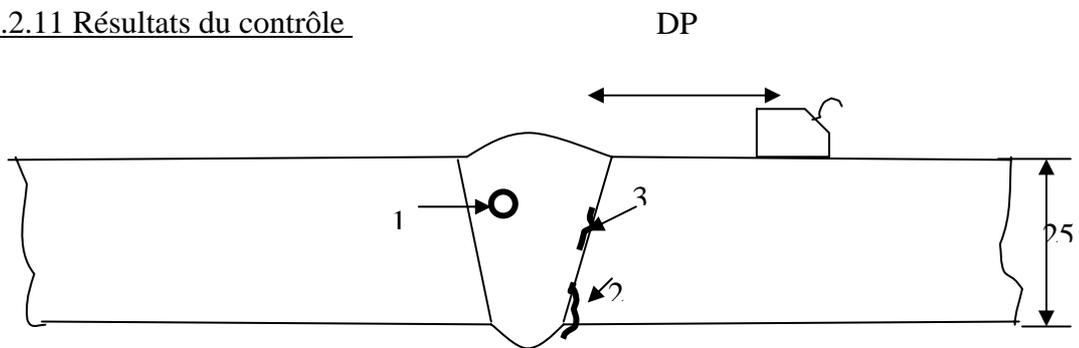


Figure 5.7 : Pièce n° 1 avec les trois défauts

Tableau 5.1 : Résultats de la pièce 1

Défaut n°	Type	Longueur (m)	Profondeur (m)
1	inclusion	0.028	0.01
2	fissure à la pénétration	0.016	0.024
3	fissure	0.030	0.015

### 5.3 Contrôle de la pièce n°2

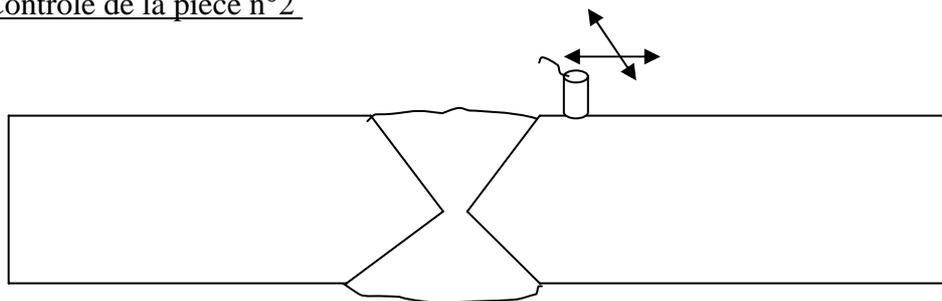


Figure 5.8 : Présentation du contrôle

### 5.3.1 Réglage de l'appareil à ultrasons

Le gain =32.5dB

La vitesse =5960 m/s

Le retard =-2,133\*10<sup>-6</sup> s

La gamme =0.1m.

### 5.3.2 Oscillogramme du défaut 1

Gain (dB)

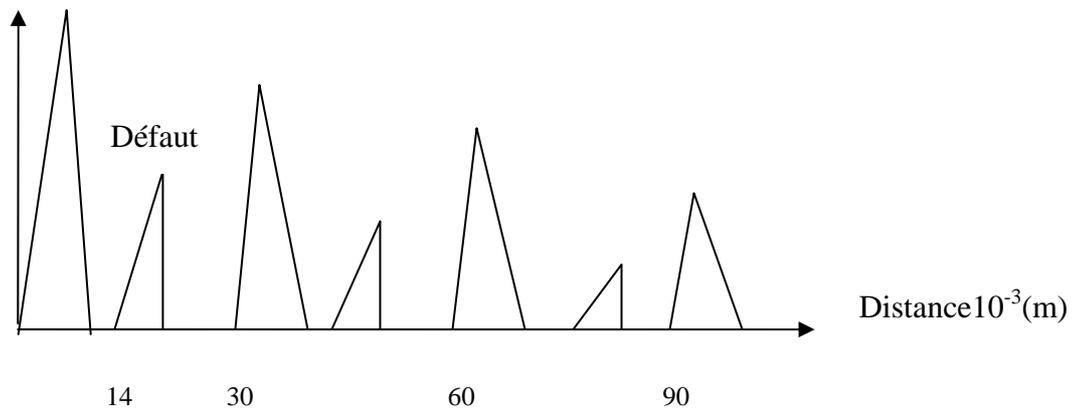


Figure 5.9 : Contrôle de la pièce n° : 2

$p=0.014$  m

Position du défaut : 110 mm.

Profondeur : 14 mm

Longueur : 28mm

Nature : laminaire.

### 5.3.3 Contrôle du joint de la pièce n° 2

$$\text{En A : } P_s = \frac{e}{\cos 60^\circ} = \frac{30 \times 10^{-3}}{0.5} = 0.06m$$

$$\text{En B : } P_s = \frac{2 \times e}{\cos 60^\circ} = 2 \times 60 \times 10^{-3} = 0.12 m$$

### 5.3.4 Réglage de l'appareil à ultrasons

Le gain =56.5 dB

La vitesse =3240 m/s

Le retard = $0.211 \times 10^{-6}$  s

La gamme =0.2m.

### 5.3.5 Oscillogramme du défaut 2

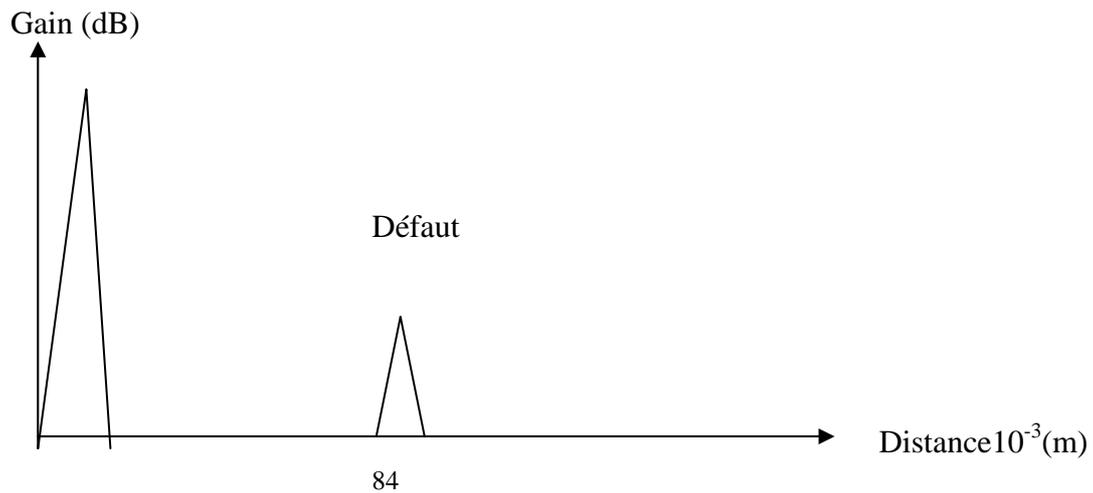


Figure 5.10 : Echo représentatif de la pièce n °2 avec défaut 2

### 5.3.6 Calcul de la profondeur

$$dp = p \sin \alpha = 84 \times \sin 60^\circ$$

$$dp = 0.072 \text{ m}$$

$$p = 60 - 84 \times \cos 60^\circ$$

$$p = 0.018 \text{ m}$$

Position du défaut : 250 mm.

Profondeur : 18 mm

Longueur : 15mm

Nature : manque de fusion ou de pénétration.

### 5.3.7 Oscillogramme du défaut 3:

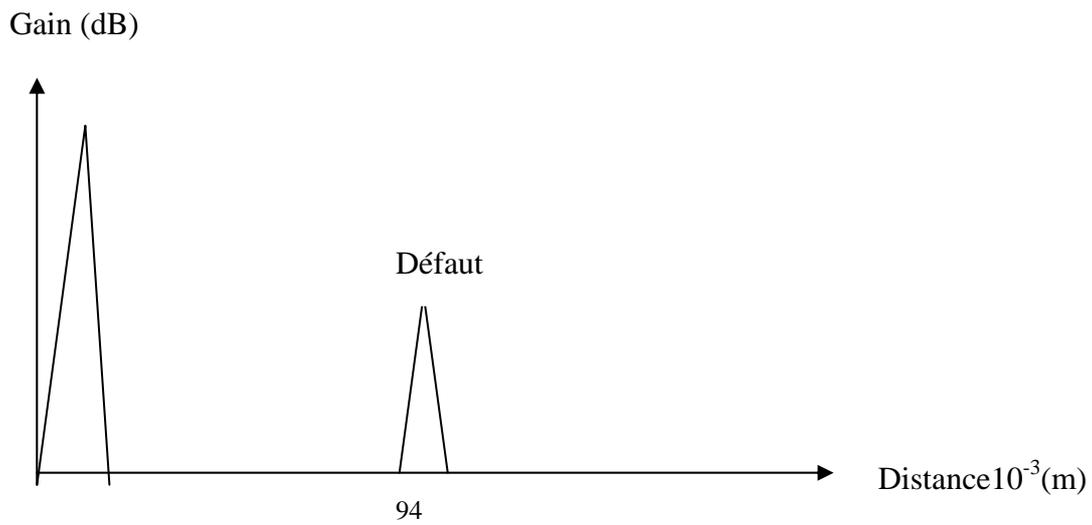


Figure.5.11 : Echo représentatif de la pièce n °2 avec défaut 2

### 5.3.7 Calcul de la profondeur

$$dp = ps \times \sin \alpha = 94 \times \sin 60^\circ$$

$$dp = 0.086 \text{ m}$$

$$p = 60 - 94 \times \cos 60^\circ$$

$$p = 0.013 \text{ m}$$

Position du défaut : 180 mm.

Profondeur : 13 mm

Longueur : 36 mm

Nature : manque de pénétration ou de fusion.

### 5.3.8 Résultat du contrôle

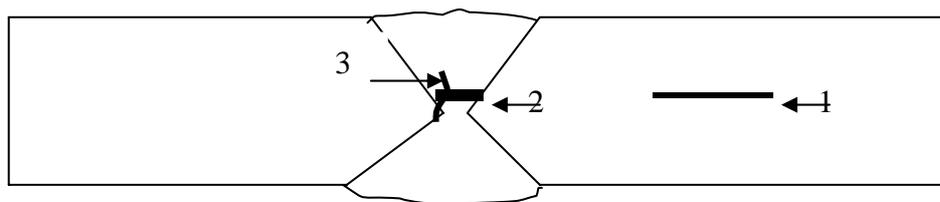


Figure 5.12 : Pièce n° 2 avec les trois défauts

Défaut n°	Type	Longueur (m)	Profondeur (m)
1	laminaire	0.028	0.015
2	Manque de fusion ou de pénétration	0.015	0.015
3	Manque de fusion ou de pénétration	0.036	0.013

#### 5.4 La pièce n°3

##### 5.4.1 Réglage de l'appareil à ultrasons

Le gain : 47.6db

La vitesse : 5674 m/s

Retard :-2,625\*10<sup>-6</sup> s

Gamme : 0.1m

Aucun défaut n'a été constaté.

##### 5.4.2 Contrôle du joint de la pièce n° 3

$$\text{En A : } P_s = \frac{e}{\cos 60^\circ} = \frac{25 \times 10^{-3}}{0.5} = 0.05 \text{ m}$$

$$\text{En B : } P_s = \frac{2 \times e}{\cos 60^\circ} = 2 \times 50 \times 10^{-3} = 0.1 \text{ m}$$

##### 5.4.3 Oscillogramme du défaut 1

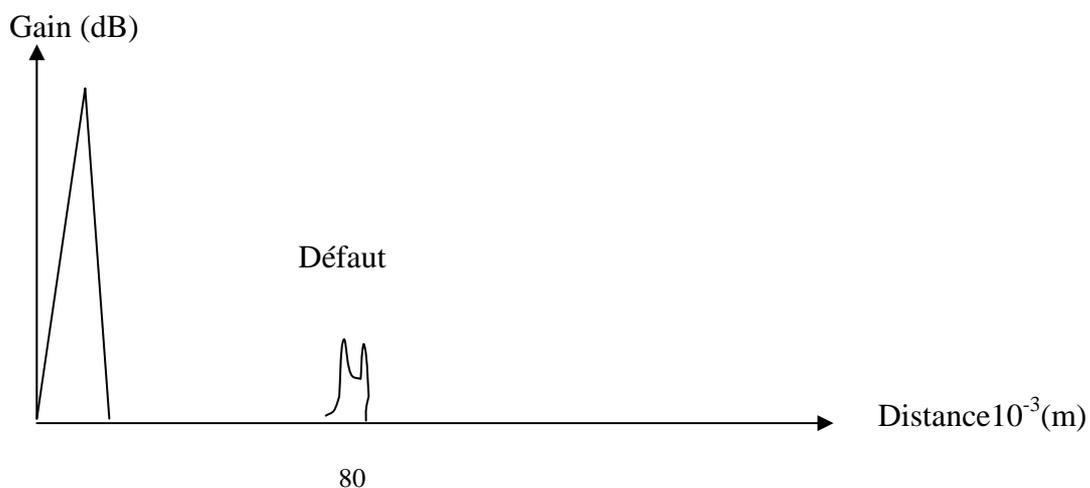


Figure 5.13 : Contrôle du joint de la pièce n° 3

#### 5.4.4 Calcul de la profondeur

$$dp=80 \times \sin 60^\circ$$

$$dp=0.069 \text{ m}$$

$$p=50-80 \times \cos 60^\circ$$

$$p=0.01 \text{ m.}$$

Position du défaut : 200 mm.

Profondeur : 10 mm

Longueur : 20mm

Nature : fissure

#### 5.4.5 Oscillogramme du défaut 2

Gain (dB)

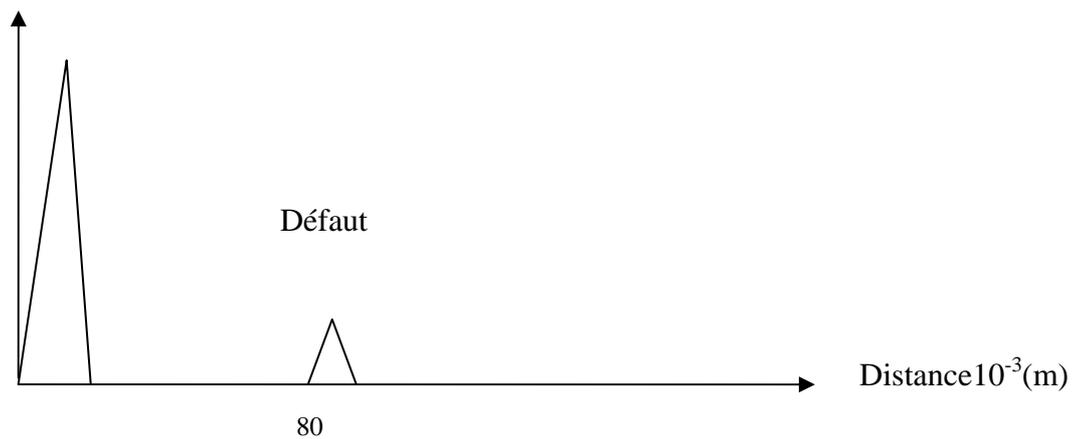


Figure 5.14 : Contrôle du joint défaut n° 2

#### 5.4.6 Calcul de la profondeur

$$dp=80 \times \sin 60^\circ$$

$$dp=0.069 \text{ m}$$

$$p=50-80 \times \cos 60^\circ$$

$$p = 0.01 \text{ m .}$$

Position du défaut : 328 mm.

Profondeur : 10 mm.  
 Longueur : 19mm.  
 Nature : porosité.

La porosité existe généralement dispersé, ceci facilite son identification. En effet dès qu'on avance le palpeur la hauteur de l'écho subit des variations de hausse et de baisse.

#### 5.4.7 Oscillogramme du défaut 3

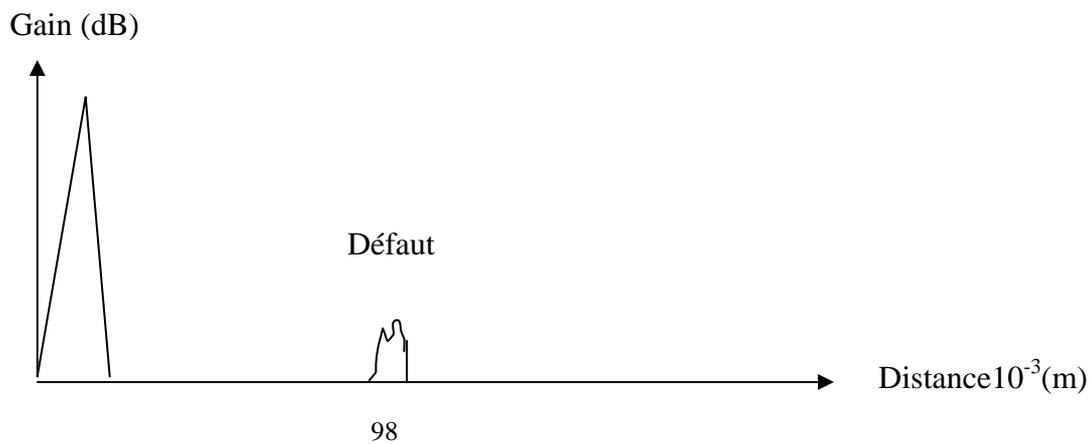


Figure 5.15 : Contrôle du joint défaut n° 3

#### 5.4.8 Calcul de la profondeur

$$dp = 98 \times \sin 60^\circ$$

$$dp = 0.084 \text{ m}$$

$$p = 50 - 98 \times \cos 60^\circ$$

$$p = 0.001 \text{ m .}$$

Le défaut est situé à 460 mm à partir du 0 de profondeur égale à 0.001 m

Type de défaut : fissure.

De longueur 0.034 m

### 5.4.9 Résultat du contrôle

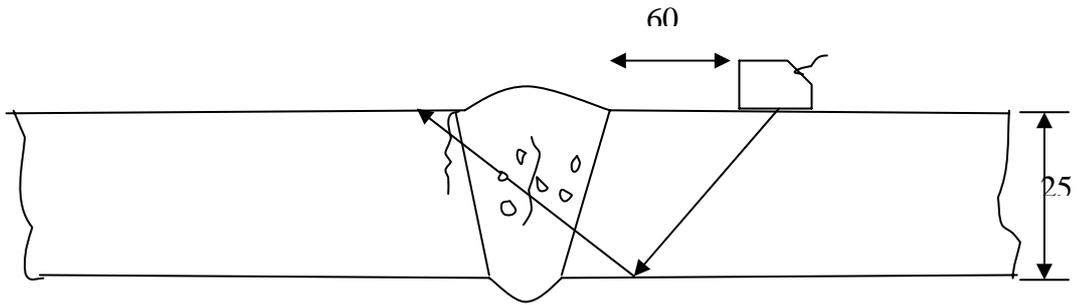


Figure 5.16 : Pièce n° 3 avec les trois défauts

Tableau 5.3 : Résultats de la pièce 3

Défaut n°	Type	Longueur (m)	Profondeur (m)
1	Fissure au centre	0.020	0.010
2	porosité	0.019	0.010
3	fissure	0.034	0.001

## 5.5 Contrôle de la pièce n° 4

### 5.5.1 Réglage de l'appareil à ultrasons

Le gain : 35.6dB

La vitesse : 5978 m/s

Le retard :  $-2,555 \times 10^{-6}$  s

La gamme : 0.1m

Aucun défaut n'a été constaté.

### 5.5.2 Contrôle du joint de la pièce n° 4

$$\text{En A : } P_s = \frac{e}{\cos 70^\circ} = \frac{12 \times 10^{-3}}{0.34} = 0.035 \text{ m}$$

$$\text{En B : } P_s = \frac{2 \times e}{\cos 70^\circ} = 2 \times 35 \times 10^{-3} = 0.07 \text{ m}$$

### 5.5.3 Réglage de l'appareil à ultrasons

Le gain = 58 dB

La vitesse = 3240 m/s

Le retard =  $2.188 \times 10^{-6}$  s

La gamme = 0.1m.

### 5.4 Oscillogramme du défaut 1

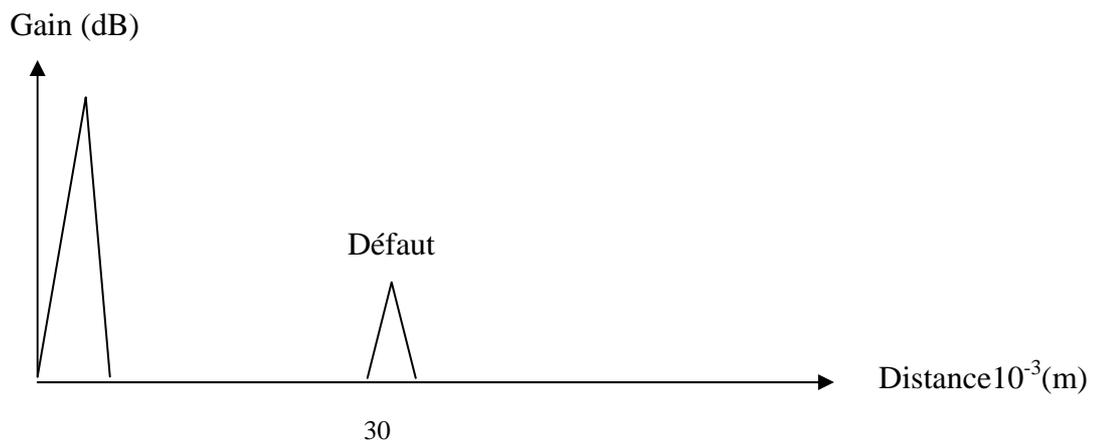


Figure 5.17 : Contrôle du joint de la pièce n° 4

### 5.5.5 Calcul de la profondeur

$$p = 30 \times \cos 70^\circ$$

$$p = 0.01 \text{ m.}$$

Position du défaut : 200 mm.

Profondeur : 10 mm

Longueur : 36mm

Nature : manque de pénétration ou de fusion

Un défaut manque de pénétration ou de fusion peut être identifié à partir de sa position (profondeur) qui est proche du fond de la pièce à contrôler.

### 5.5.6 Oscillogramme du défaut 2

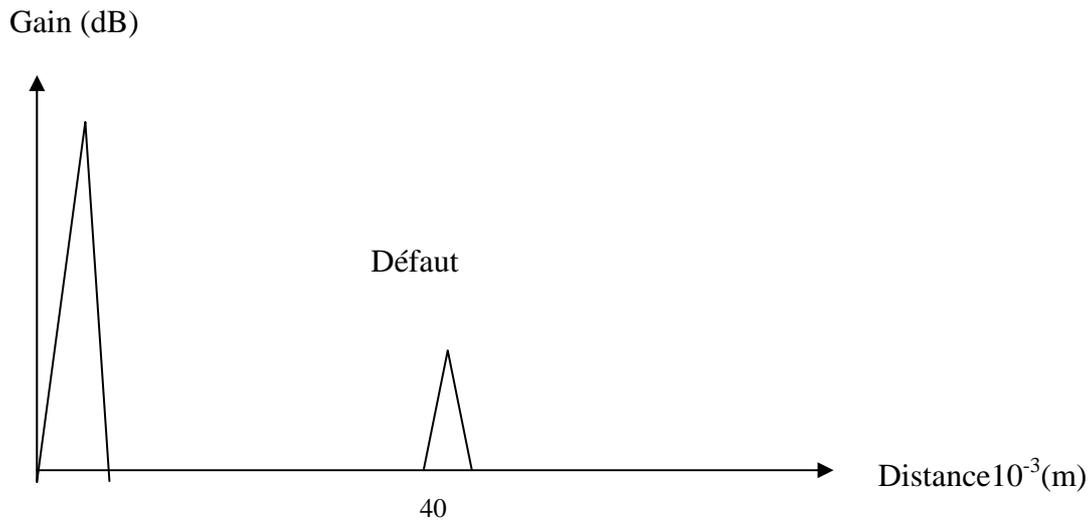


Figure 5.18 : Echo représentatif de la pièce n °4 avec défaut 2

### 5.5.7 Calcul de la profondeur

$$dp = 40 \times \sin 70^\circ$$

$$dp = 0.037 \text{ m}$$

$$p = 24 - 40 \times \cos 70^\circ$$

$$p = 0.01 \text{ m}$$

Position du défaut : 330 mm.

Profondeur : 10 mm

Longueur : 20mm

Nature : manque de pénétration ou de fusion

### 5.5.8 Oscillogramme du défaut 3

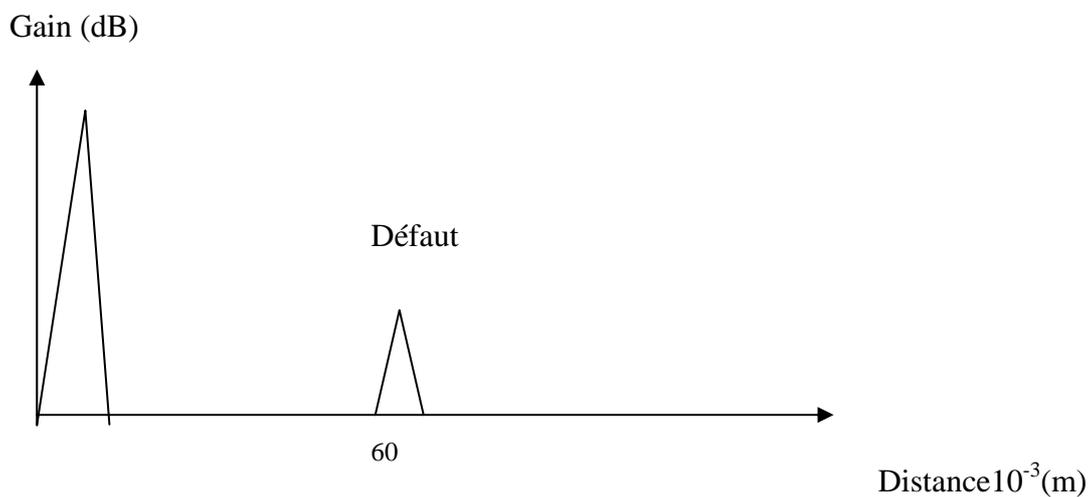


Figure 5.19 : Echo représentatif de la pièce n ° 4 avec défaut 3

### 5.5.9 Calcul de la profondeur

$$dp = 60 \times \sin 70^\circ$$

$$dp = 0.056 \text{ m}$$

$$p = 24 - 60 \times \cos 70^\circ$$

$$p = 0.0034 \text{ m}$$

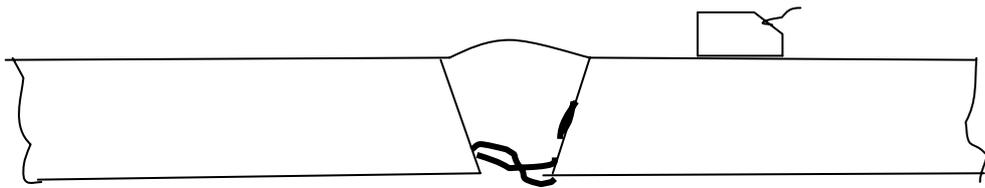
Position du défaut : 486 mm.

Profondeur : 3.4 mm

Longueur : 25mm

Nature : manque de pénétration ou de fusion.

### 5.5.10 Résultats du contrôle



12

Figure 5.20 : Pièce n° 4 avec les trois défauts

Tableau 5.4 : Résultats du contrôle de la pièce 4

Défaut n°	Type	Longueur (m)	Profondeur (m)
1	Manque de fusion ou de pénétration	0.036	0.01
2	Manque de fusion ou de pénétration	0.02	0.01
3	Manque de fusion latérale	0.025	0.0034

## 5.6 Contrôle de la pièce n° 5

### 5.6.1 Réglage de l'appareil à ultrasons

Le gain : 41.6dB

La vitesse : 5821 m/s

Le retard :  $-1.83 \cdot 10^{-6}$  s

La gamme : 0.05m

Aucun défaut n'a été constaté.

### 5.6.2 Oscillogramme de la pièce dans la zone adjacente au cordon

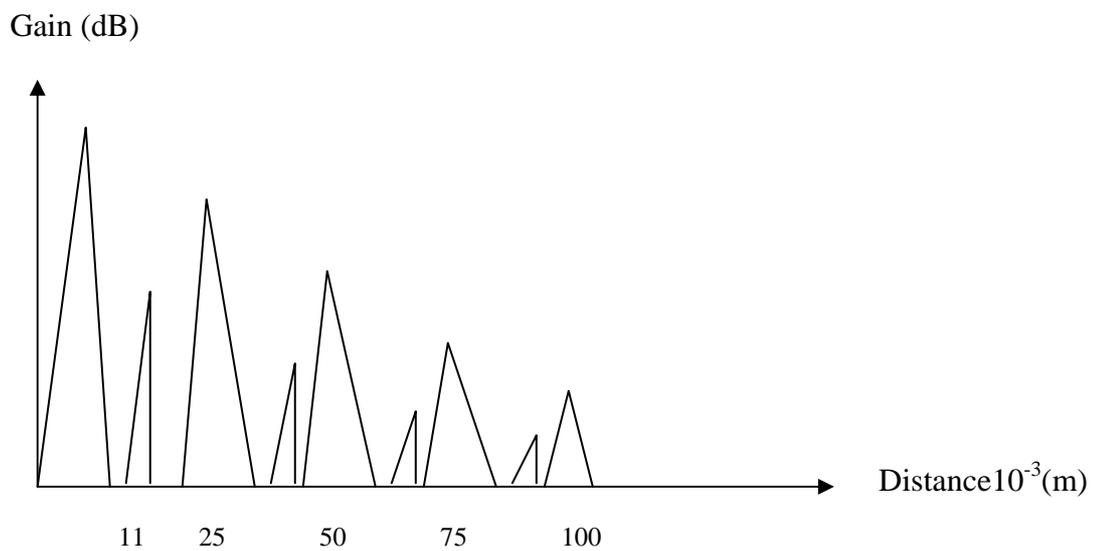


Figure 5.21 : Contrôle de la pièce n° 5 dans la zone adjacente au cordon

$p=0.011m$

Position du défaut : 660 mm.

Profondeur : 11mm

Longueur : 15mm

Nature : laminaire.

### 5.6.3 Contrôle du joint de la pièce n° 5

$$\text{En A : } P_s = \frac{e}{\cos 60^\circ} = \frac{25 \times 10^{-3}}{0.5} = 0.05 \text{ m}$$

$$\text{En B : } P_s = \frac{2 \times e}{\cos 60^\circ} = 2 \times 50 \times 10^{-3} = 0.1 \text{ m}$$

### 5.6.4 Oscillogramme du défaut 2

Gain (dB)

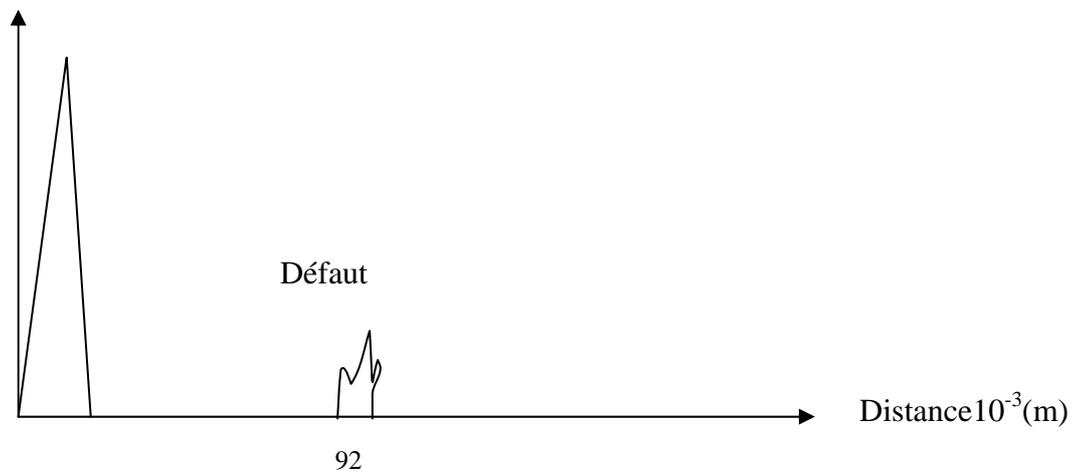


Figure 5.22 : Contrôle du joint de la pièce n° 5

### 5.6.5 Réglage de l'appareil à ultrasons

Le gain = 59.5 dB

La vitesse = 3228 m/s

Le retard =  $1.109 \times 10^{-6}$  s

La gamme = 0.2m.

### 5.6.6 Calcul de la profondeur

$$dp = 92 \times \sin 60^\circ$$

$$dp = 0.079 \text{ m}$$

$$p = 50 - 92 \times \cos 60^\circ$$

$$p=0.004 \text{ m.}$$

Position du défaut : 160 mm.

Profondeur : 4 mm

Longueur : 20mm

Nature : fissure

### 5.6.7 Oscillogramme du défaut 3

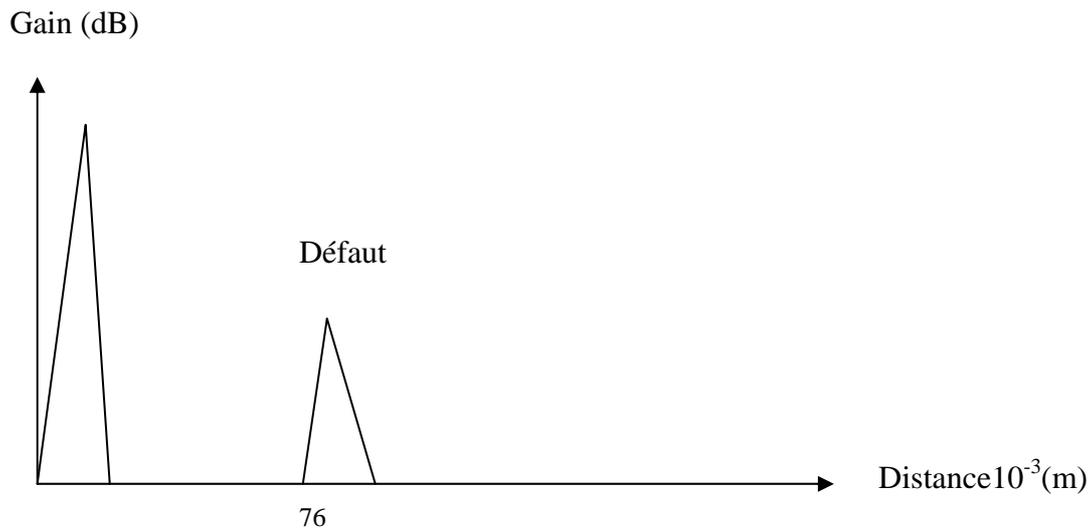


Figure 5.23 : Contrôle du joint de la pièce n° 5

### 5.6.8 Calcul de la profondeur

$$dp=76 \times \sin 60^\circ$$

$$dp=0.065 \text{ m}$$

$$p=50-76 \times \cos 60^\circ$$

$$p=0.012 \text{ m}$$

Position du défaut : 265 mm.

Profondeur : 12 mm

Longueur : 32mm

Nature : porosité.

### 5.6.9 Résultat du contrôle

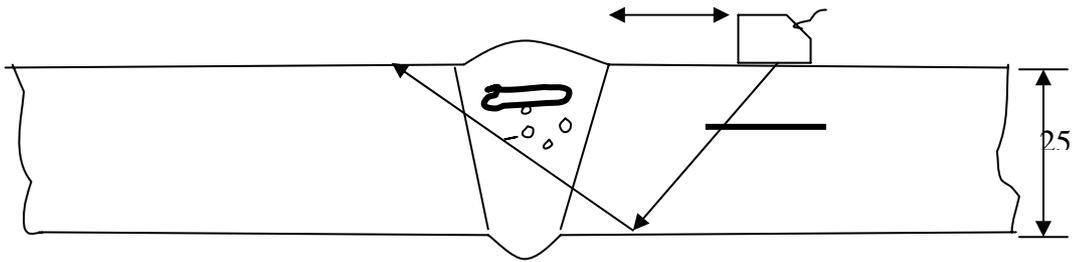


Figure 5.24 : Pièce n° 5 avec les trois défauts

Défaut n°	Type	Longueur (m)	Profondeur (m)
1	laminaire	0.015	0.011
3	fissure	0.020	0.009
2	porosité	0.032	0.012

### 5.7 Contrôle de la pièce n° 6

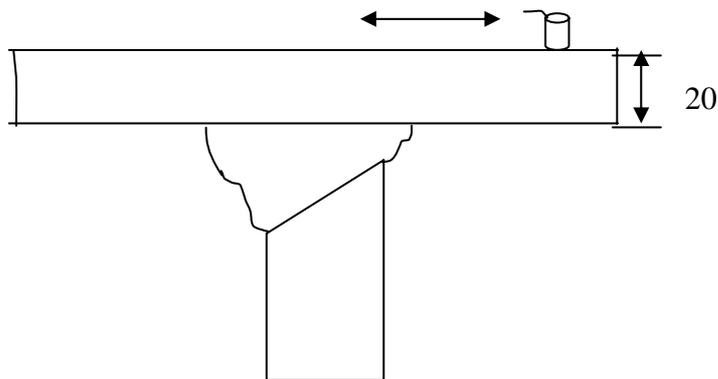


Figure 5.25 : Présentation du contrôle

#### 5.7.1 Réglage de l'appareil à ultrasons

Le gain : 39.6db

La vitesse : 5580 m/s

Le retard :  $-1.609 \cdot 10^{-6}$  s

La gamme : 0.05m

### 5.7.2 Oscillogramme du défaut n° 1



Figure 5.26 : Contrôle de la pièce n° 6 par un palpeur droit

### 5.7.3 Vérification par un palpeur à angle

#### Réglage de l'appareil à ultrasons

Le gain = 59 dB

La vitesse = 3243 m/s

Le retard =  $1.85 \cdot 10^{-6}$  s

La gamme = 0.2m.

### 5.7.4 Oscillogramme du défaut n° 1

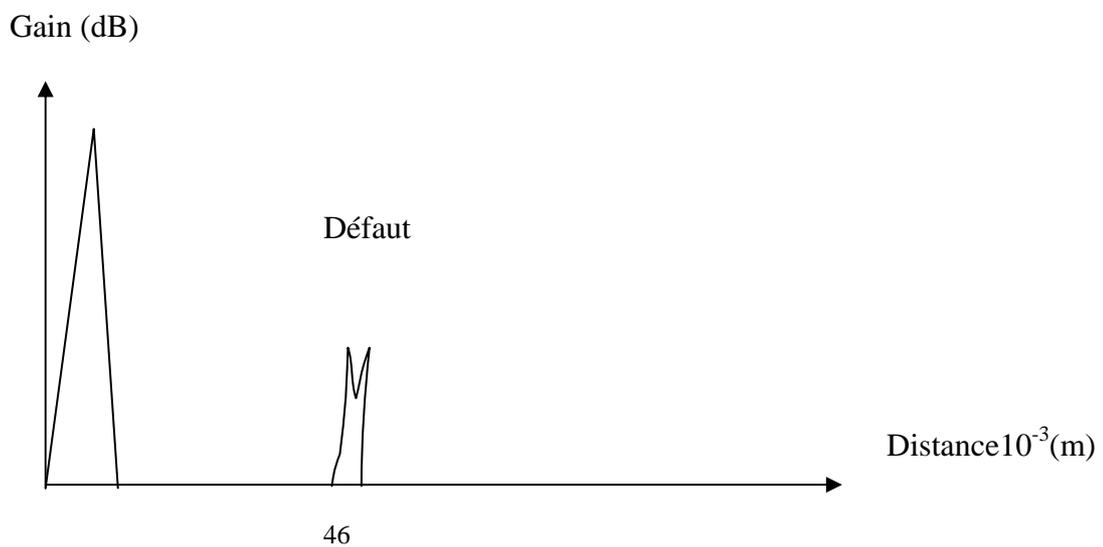


Figure 5.27 : Contrôle de la pièce n° 6 par un palpeur à angle

$$\text{En A : } P_s = \frac{e}{\cos 60^\circ} = \frac{20 \times 10^{-3}}{0.5} = 0.04 \text{ m}$$

$$\text{En B : } P_s = \frac{2 \times e}{\cos 60^\circ} = 2 \times 40 \times 10^{-3} = 0.08 \text{ m}$$

$$p = 0.046 \times \cos 60^\circ$$

$$p = 0.023 \text{ m}$$

Position du défaut : 37mm.

Profondeur : 23 mm

Longueur : 27mm

Nature : fissure.

### 5.7.5 Oscillogramme du défaut n° 2

Gain (dB)

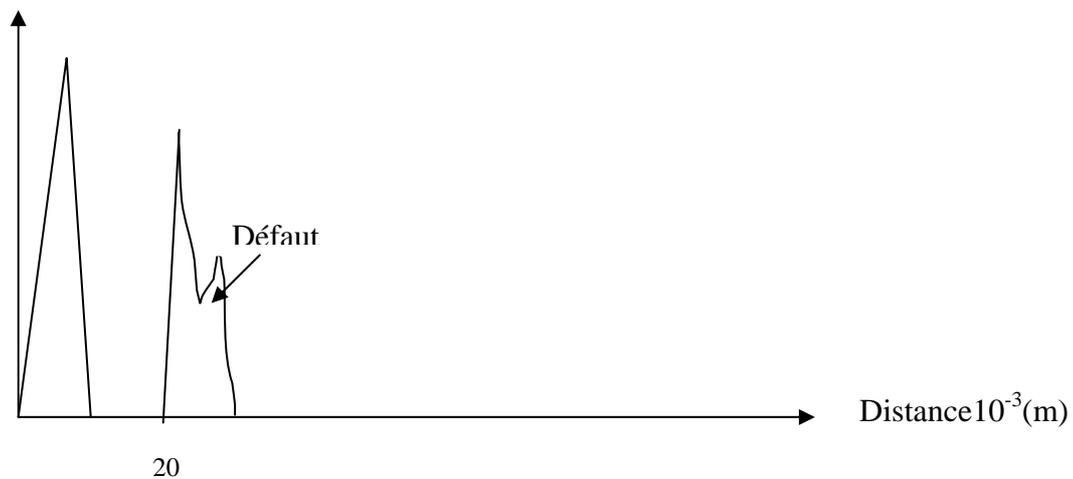


Figure 5.28 : Contrôle de la pièce n° 6 par un palpeur droit

$$p = 0.02 \text{ m}$$

### 5.7.6 Vérification par un palpeur à angle

#### Réglage de l'appareil à ultrasons:

Le gain = 59 dB

La vitesse = 3243 m/s

Le retard =  $1.85 \times 10^{-6}$  s

La gamme = 0.2m.

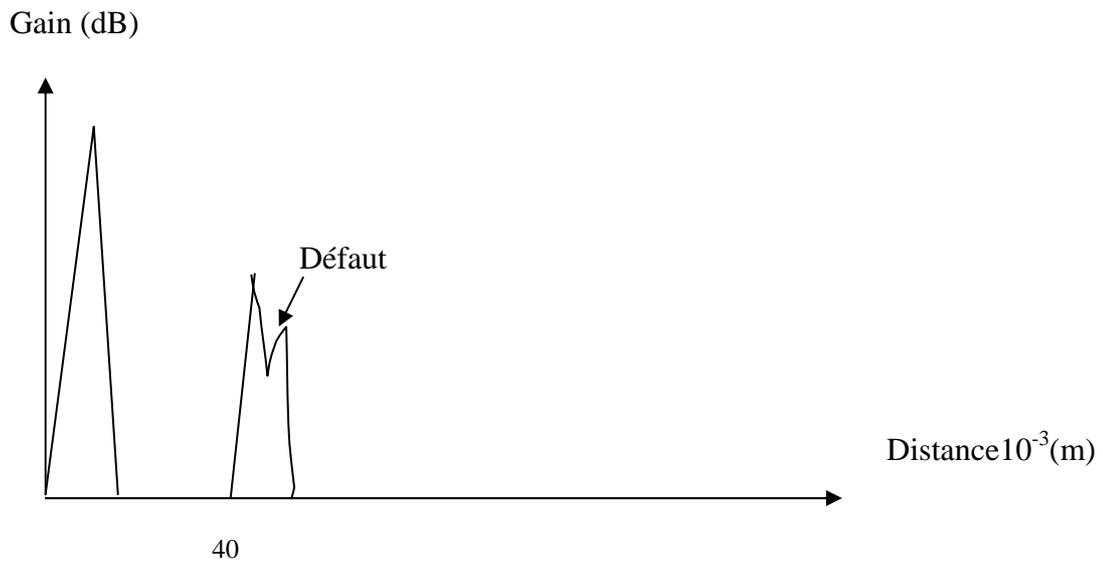


Figure 5.29 : Contrôle de la pièce n° 6 par un palpeur à angle

#### 5.7.7 Calcul de la profondeur

$$dp = 0.04 \times \sin 60^\circ$$

$$p = 40 - 40 \times \cos 60^\circ$$

$$p = 0.02 \text{ m}$$

Position du défaut : 201 mm.

Profondeur : 20 mm

Longueur : 19 mm

Nature : manque de pénétration ou de fusion.

#### 5.7.8 Résultats du contrôle

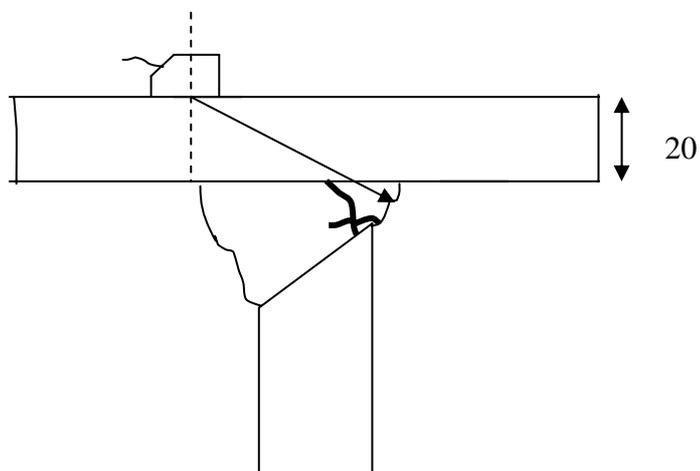


Figure 5.30 : Pièce n° 6 avec les deux défauts

Tableau 5.6 : Résultats du contrôle de la pièce 6

Défaut n°	Type	Longueur (m)	Profondeur (m)
1	Fissure	0.027	0.023
2	Manque de fusion ou de pénétration	0.019	0.020

### 5.8 Contrôle de la pièce n° 7

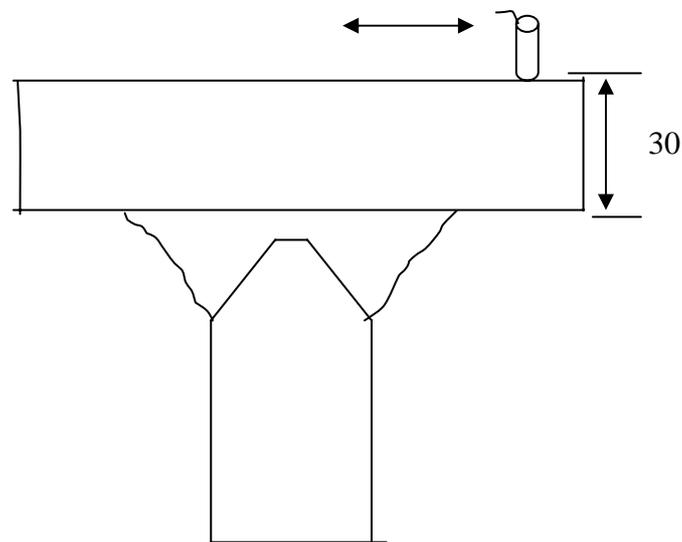


Figure 5.31 : Présentation du contrôle

#### 5.8.1 Réglage de l'appareil à ultrasons

Le gain : 39.6dB

La vitesse : 5686 m/s

Retard :  $-1.703 \cdot 10^{-6}$  s

Gamme : 0.05m

Pas de défaut

#### 5.8.2 Contrôle de la pièce n° 7 en ondes transversales

##### Réglage de l'appareil à ultrasons

Le gain =59 dB

La vitesse =3243 m/s

Le retard =  $1.85 \times 10^{-6}$  s

La gamme = 0.2m.

$$\text{En A : } P_s = \frac{e}{\cos 60^\circ} = \frac{30 \times 10^{-3}}{0.5} = 0.06 \text{ m}$$

### 5.8.3 Oscillogramme du défaut n° 1

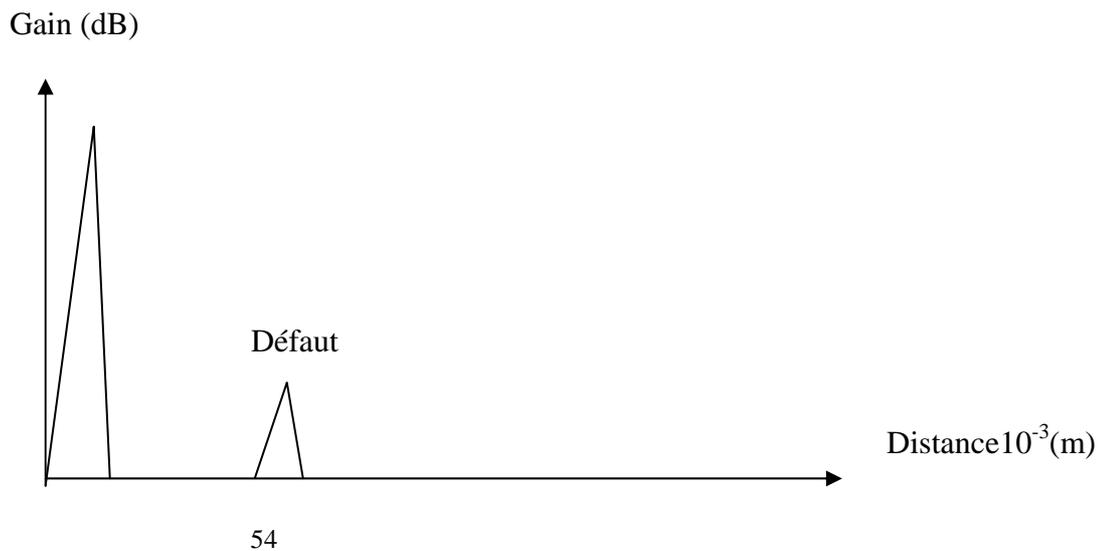


Figure 5.32 : Contrôle de la pièce n° 7 par un palpeur à angle

### 5.8.4 Calcul de la profondeur

$$p = 0.054 \times \cos 60^\circ$$

$$p = 0.027 \text{ m}$$

Position du défaut : 220 mm.

Profondeur : 27 mm

Longueur : 27 mm

Nature : inclusion.

### 5.8.5 Oscillogramme du défaut n° 2

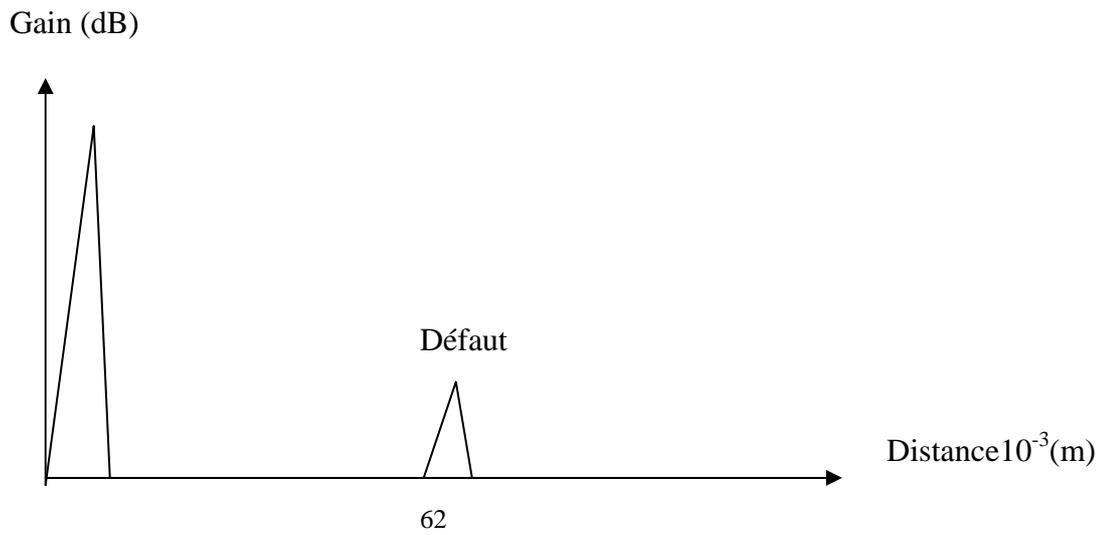


Figure 5.33 : Contrôle de la pièce n° 7 par un palpeur à angle

$$p = 0.062 \times \cos 60^\circ$$

$$p = 0.031 \text{ m}$$

Position du défaut : 135 mm.

Profondeur : 31 mm

Longueur : 20 mm

Nature : manque de pénétration ou de fusion.

### 5.8.6 Oscillogramme du défaut n° 3

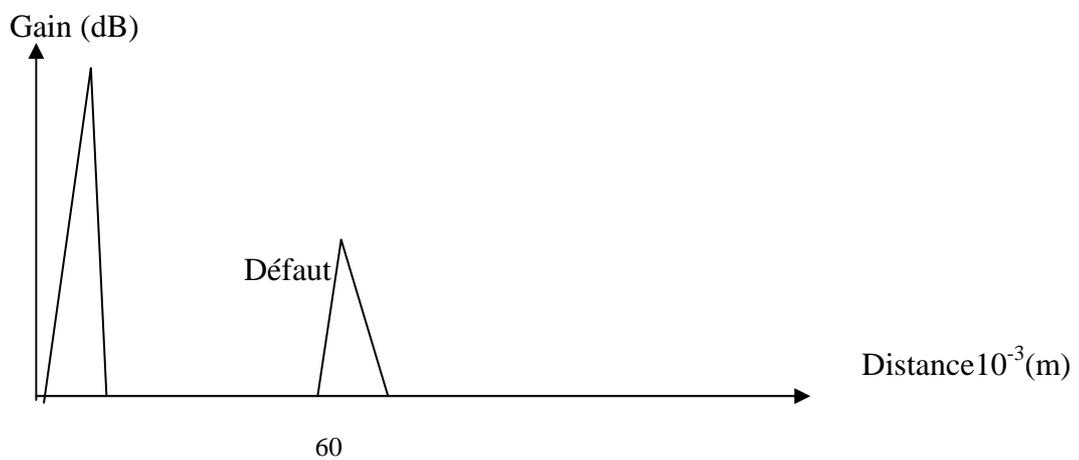


Figure 5.34 : Contrôle de la pièce n° 7 par un palpeur à angle

$$p=0.064 \times \cos 60^\circ$$

$$p=0.032 \text{ m}$$

Position du défaut : 45 mm.

Profondeur : 32mm

Longueur : 20mm

Nature : manque de pénétration ou de fusion.

### 5.8.7 Résultats du contrôle

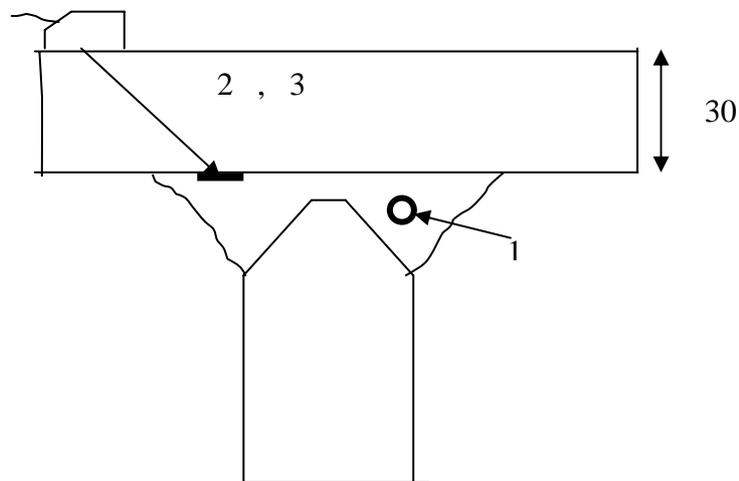


Figure 5.35 : Pièce n° 7 avec les trois défauts

Tableau 5.7 : Résultats de la pièce 7

Défaut n°	Type	Longueur (m)	Profondeur (m)
1	inclusion	0.027	0.027
3	Manque de fusion ou de pénétration	0.020	0.031
2	Manque de fusion ou de pénétration	0.020	0.032

## CHAPITRE 6

### CONTROLE EN IMMERSION

#### 6.1 Introduction

Après un contrôle par contact de toutes les pièces, nous nous proposons de reprendre le contrôle de ces pièces en immersion. Cette méthode consiste à immerger la pièce ainsi que la sonde dans un couplant (eau).

Le dispositif expérimental permet de balayer l'échantillon automatiquement ou semi automatiquement par l'intermédiaire de moteurs pas à pas de déplacement suivant trois axes X, Y, Z.

Le générateur d'impulsion excite un palpeur qui émet dans l'échantillon une onde longitudinale ou transversales (conversion de mode).

Le palpeur peut être utilisé comme émetteur ou émetteur - récepteur (cas de notre travail) ou en émetteur seul, pour les deux cas l'oscilloscope traite la réponse et l'amplifie (voir chap. 2.8.4) pour qu'elle puisse être enregistrée par l'ordinateur.

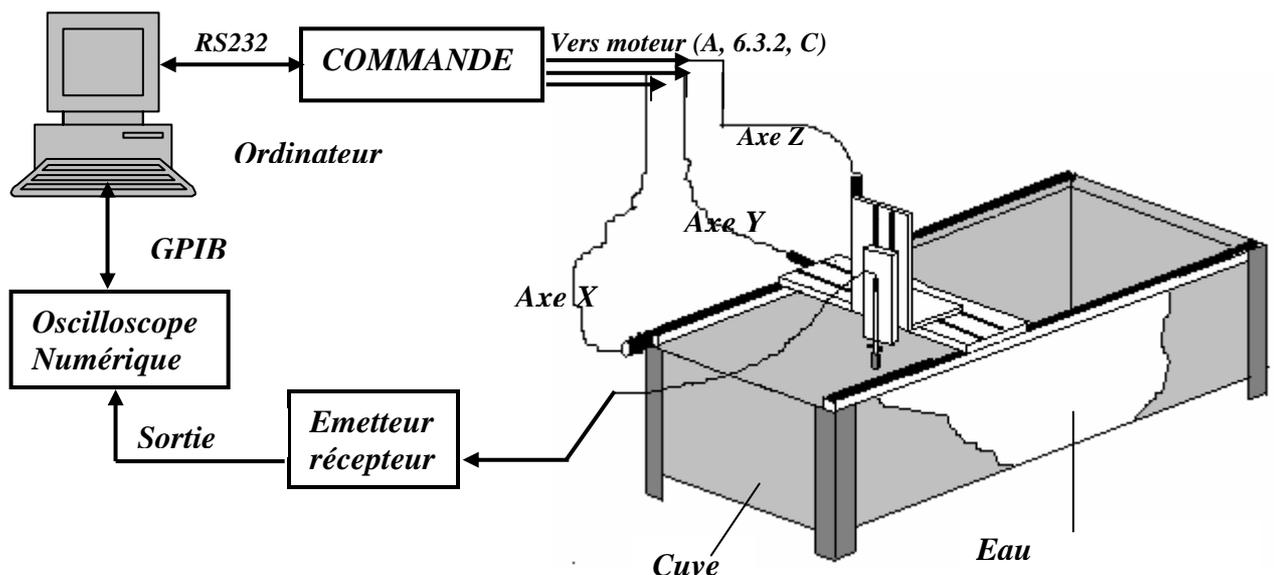


Figure 6.1 : Chaîne de contrôle

## 6.2 Mode opératoire

### 6.2.1 Calcul de la vitesse de propagation des ultrasons

L'écho 1 : correspond à la réflexion de la surface eau / pièce

L'écho 2 : correspond au fond de la pièce

La vitesse de propagation est donnée par :

$$V = \frac{2 \times e}{\delta T}$$

$\delta T$  : lue directement sur l'oscilloscope

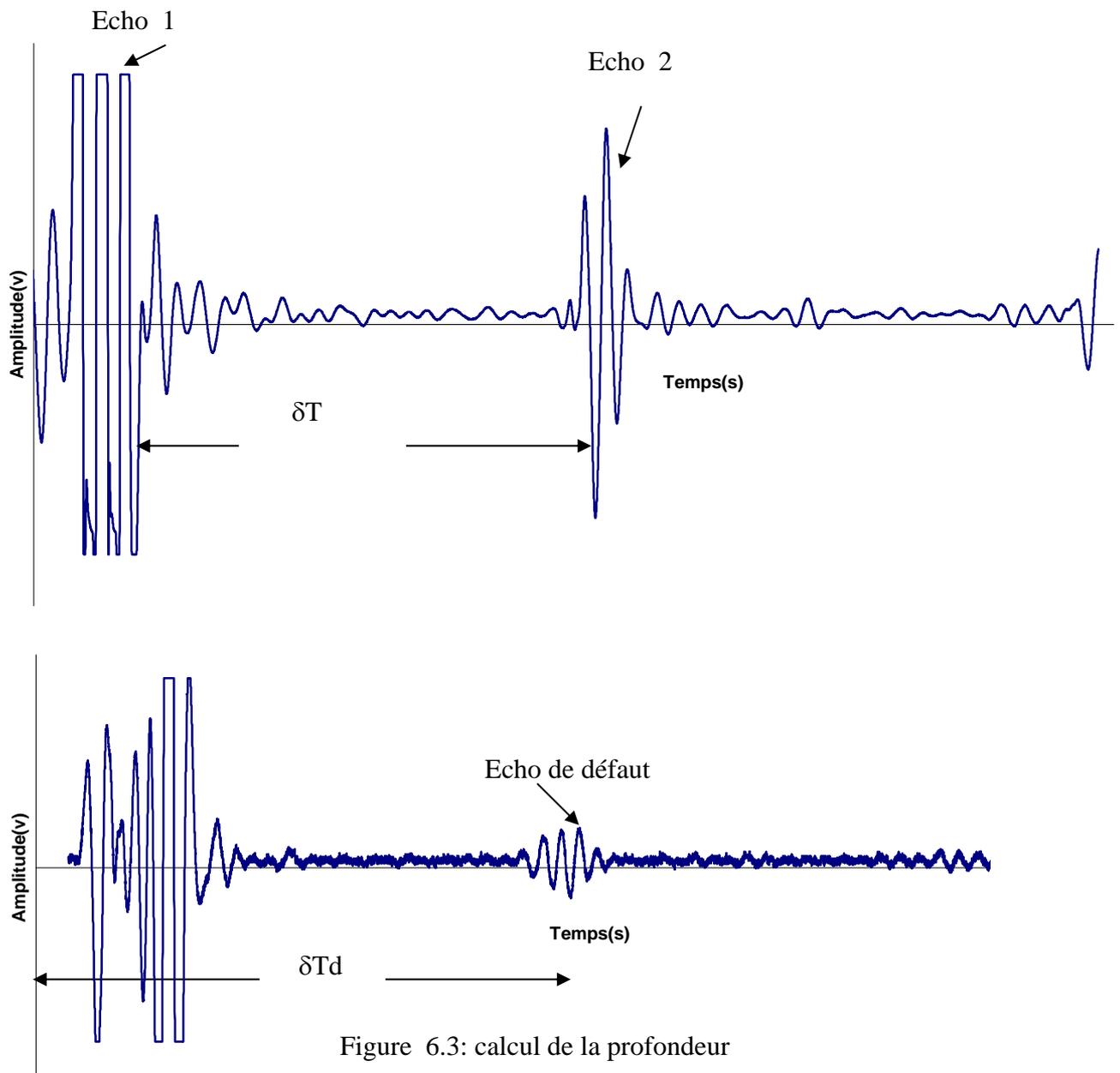


Figure 6.3: calcul de la profondeur

### 6.2.2 Calcul de la profondeur du défaut

$$V = \frac{2 \times p}{\delta T d}$$

$$p = \frac{V \times \delta T d}{2}$$

$\delta T d$  : lue sur l'oscilloscope

### 6.3 contrôle en immersion

#### 6.3.1 La pièce n° 1 :

- Calcul de la vitesse

$$\delta T = 4.48 \times 10^{-6}$$

$$V = \frac{2 \times 25 \times 10^{-3}}{4.48 \times 10^{-6}} \Rightarrow V = 5896.22 \text{ m / s}$$

#### 6.3.1.1 La recherche du défaut n° 1

Palpeur à immersion de fréquence égale à 2.25 MHz.

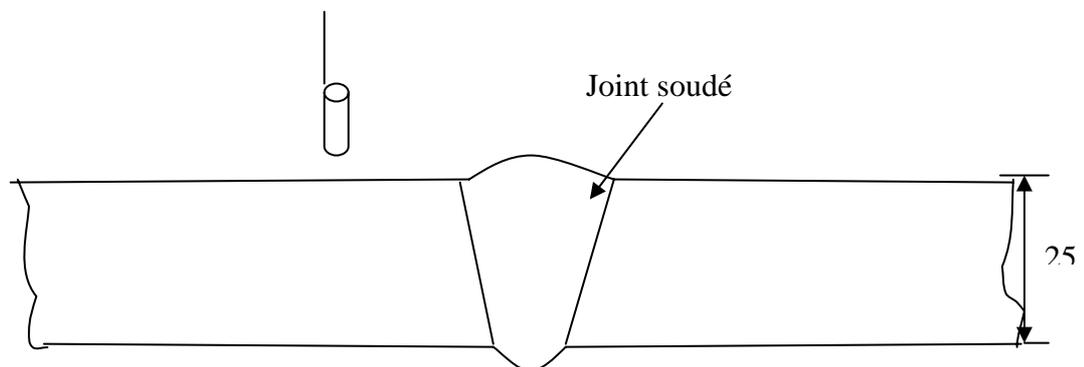
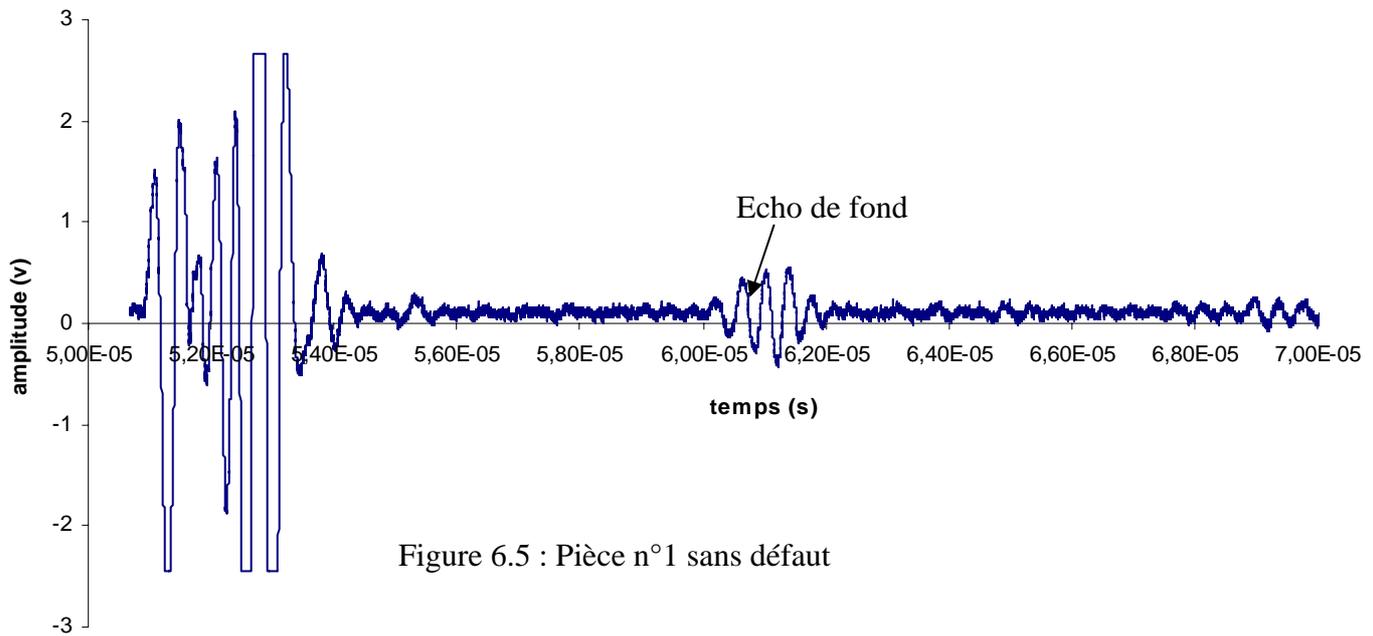


Figure 6.4 : Présentation du contrôle

### 6.3.1.2 l'écho représentatif de la pièce n° 1 sans défaut



### 6.3.1.3 Echo représentatif de la pièce n° 1 avec défaut

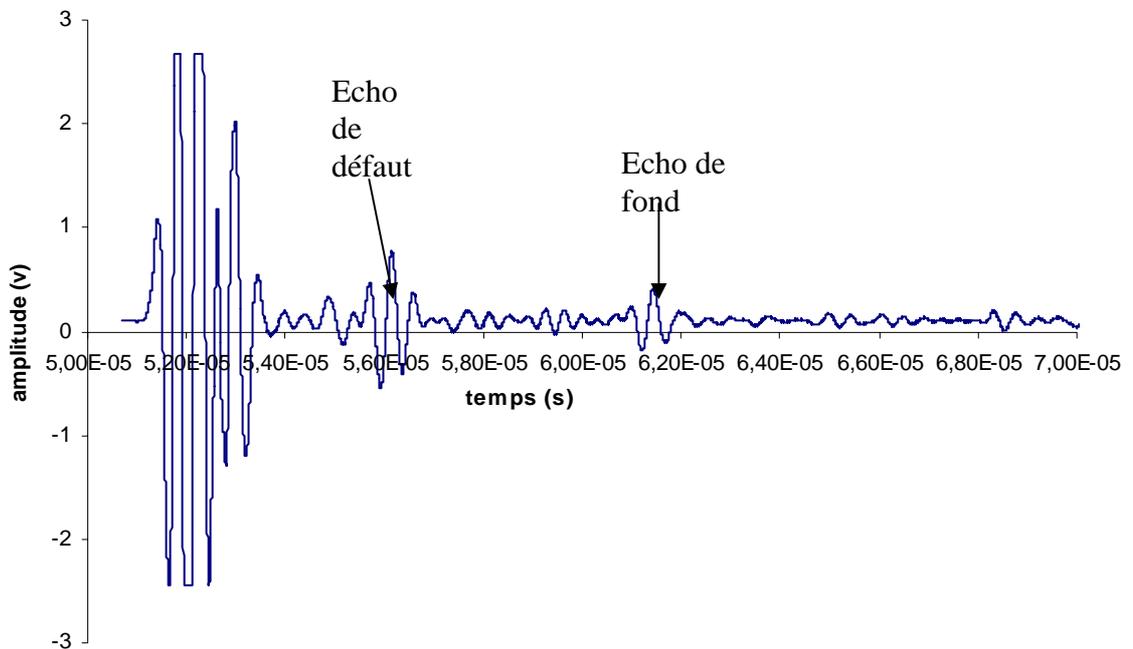


Figure 6.6 : pièce n° 1 avec défaut fissure

$$p = \frac{5896 \cdot 22 \times 4.4 \times 10^{-6}}{2} \Rightarrow P = 0.012 \text{ m}$$

#### 6.3.1.4 La recherche du défaut n° 2

Palpeur à immersion de fréquence égale à 2.25 MHz.

#### 6.3.1.5 l'écho représentatif de la pièce n° 1 sans défaut

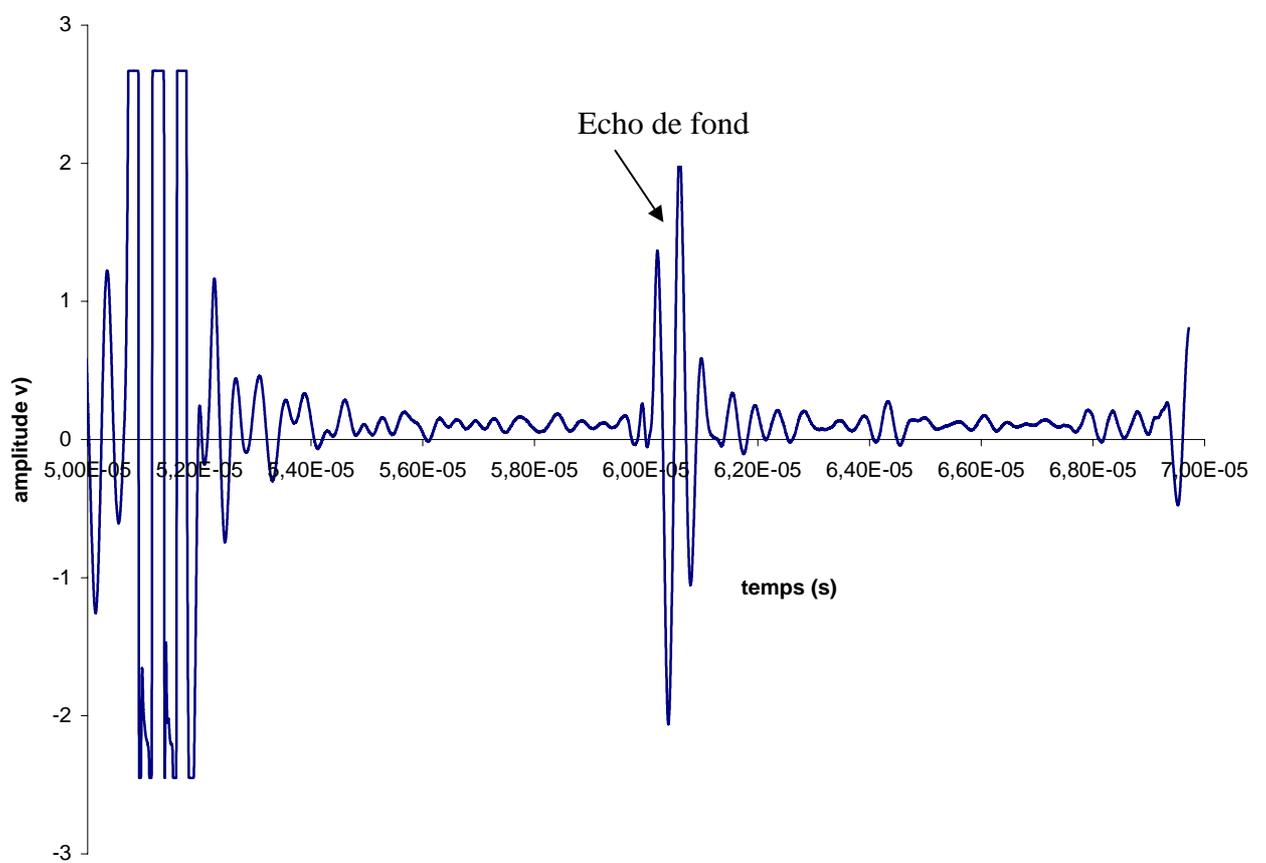
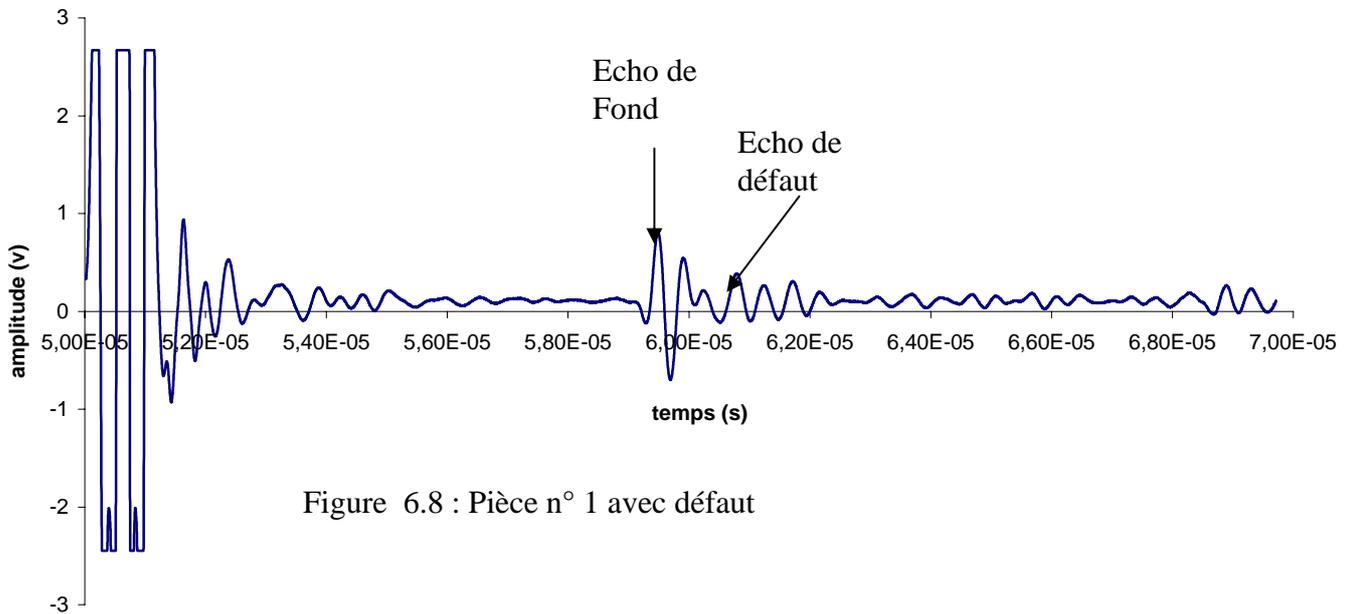


Figure 6.7 : Pièce n° 1 sans défaut

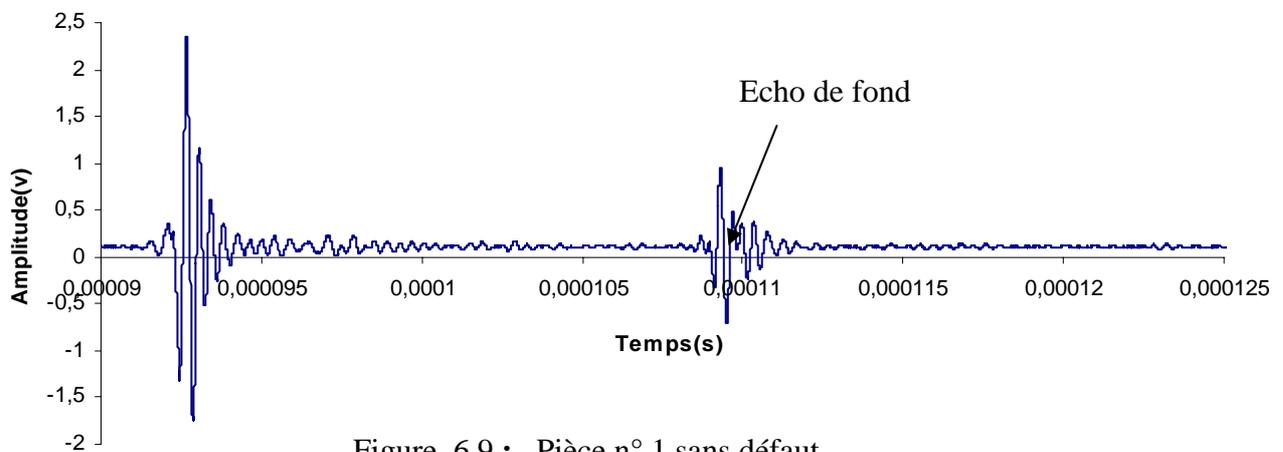
### 6.3.1.6 l'écho représentatif de la pièce n° 1 avec défaut n°2



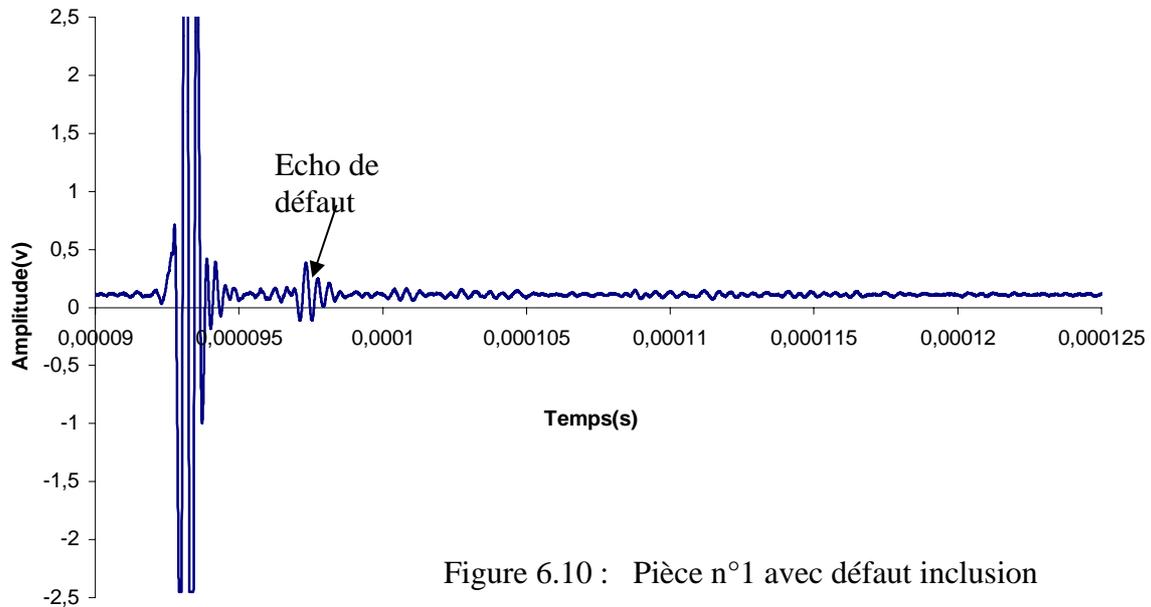
$$\delta T = 9.8 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$p = \frac{5896.22 \times 9.8 \times 10^{-6}}{2} \Rightarrow P = 0.028 \text{ m}$$

### 6.3.1.7 l'écho représentatif de la pièce n° 1 sans défaut



### 6.3.1.8 l'écho représentatif de la pièce n° 1 avec défaut



$$\delta T = 4,5 \times 10^{-6}$$

$$p = \frac{5896,22 \times 4,5 \times 10^{-6}}{2} \Rightarrow P = 0,013 \text{ m}$$

### 6.3.1.9 Résultat du contrôle

Tableau 6.1 : Résultats du contrôle de la pièce 1

Défaut n°	Type	Longueur (m)	Profondeur (m)
1	inclusion	0.030	0.013
2	fissure à la pénétration	0.029	0.028
3	fissure	0.018	0.012

### 6.3.2 La pièce n° 2

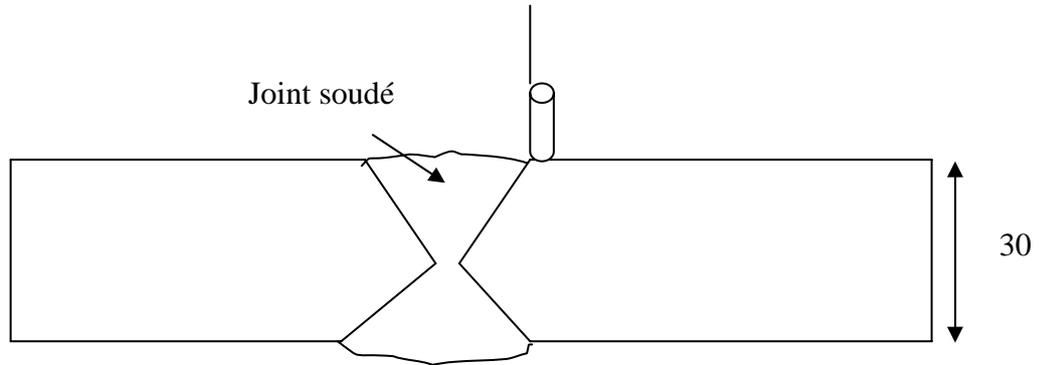


Figure 6.11 : Présentation du contrôle

$$\delta T = 10 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$V = \frac{2 \times 30 \times 10^{-3}}{10^{-5}} \Rightarrow V = 6000 \text{ m / s}$$

#### 6.3.2.1 Recherche du défaut n° 1

Palpeur à immersion de fréquence égale à 2.25 MHz.

### 6.3.2.2 Echo représentatif de la pièce n° 2 sans défaut

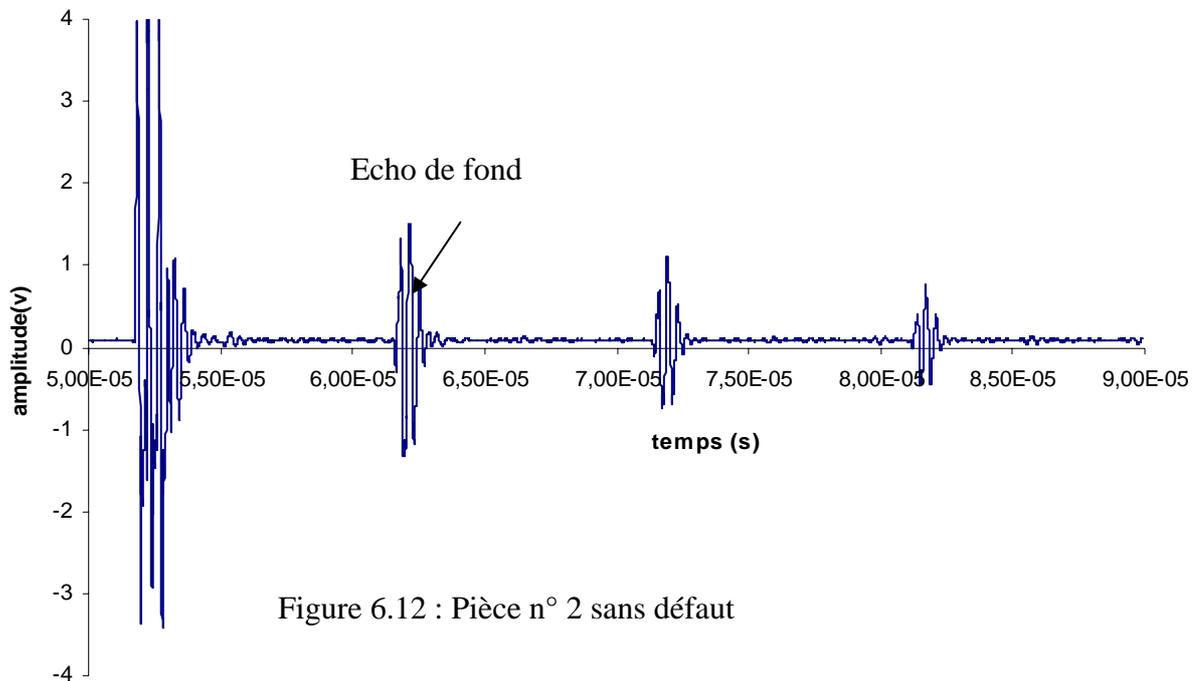


Figure 6.12 : Pièce n° 2 sans défaut

### 6.3.2.3 Echo représentatif de la pièce n° 2 avec défaut

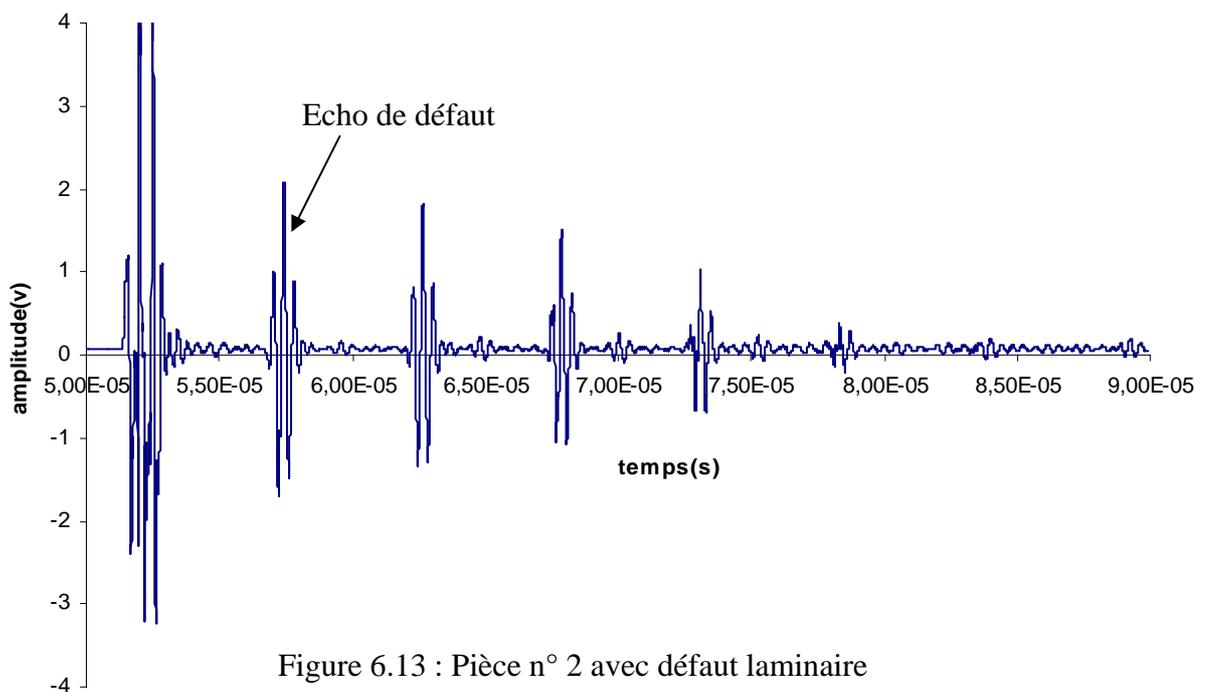


Figure 6.13 : Pièce n° 2 avec défaut laminaire

$$\delta T = 3.68 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$p = \frac{Vol \times \delta T d}{2}$$

$$p = \frac{6000 \times 3.68 \times 10^{-6}}{2} \Rightarrow P = 0.011 \text{ m}$$

#### 6.3.2.4 Echo représentatif de la pièce n° 2 sans défaut

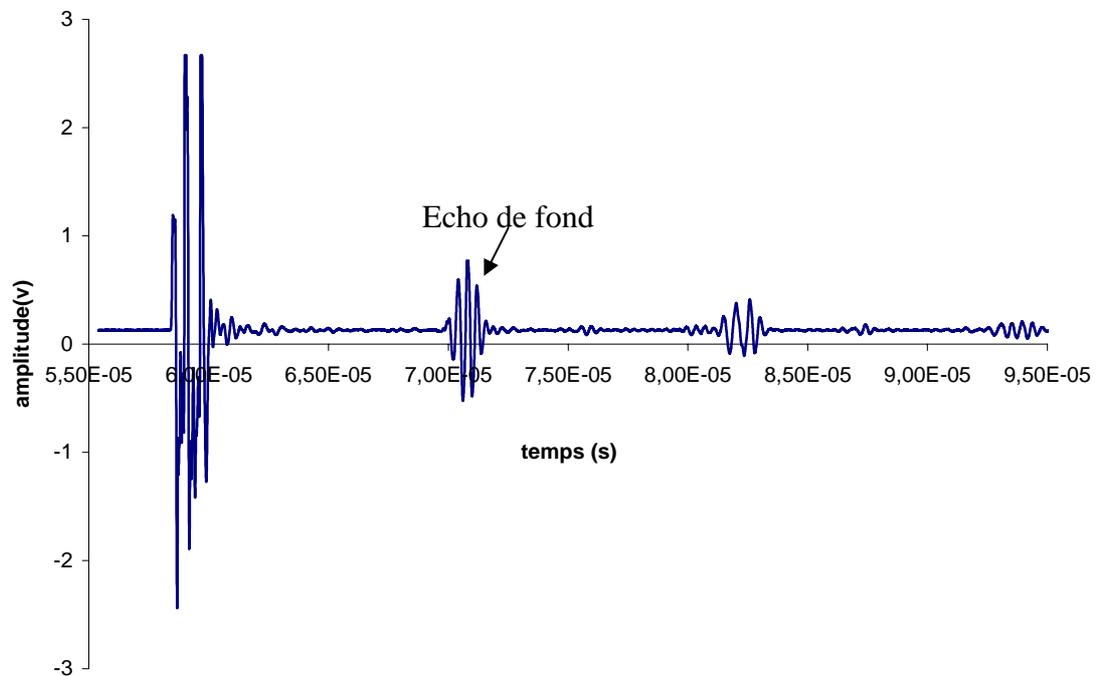


Figure 6.14 : Pièce n° 2 sans défaut

Palpeur incliné d'un angle calculer d'après la loi de Snell-Descarte

### 6.3.2.5 Echo représentatif de la pièce n° 2 avec défaut

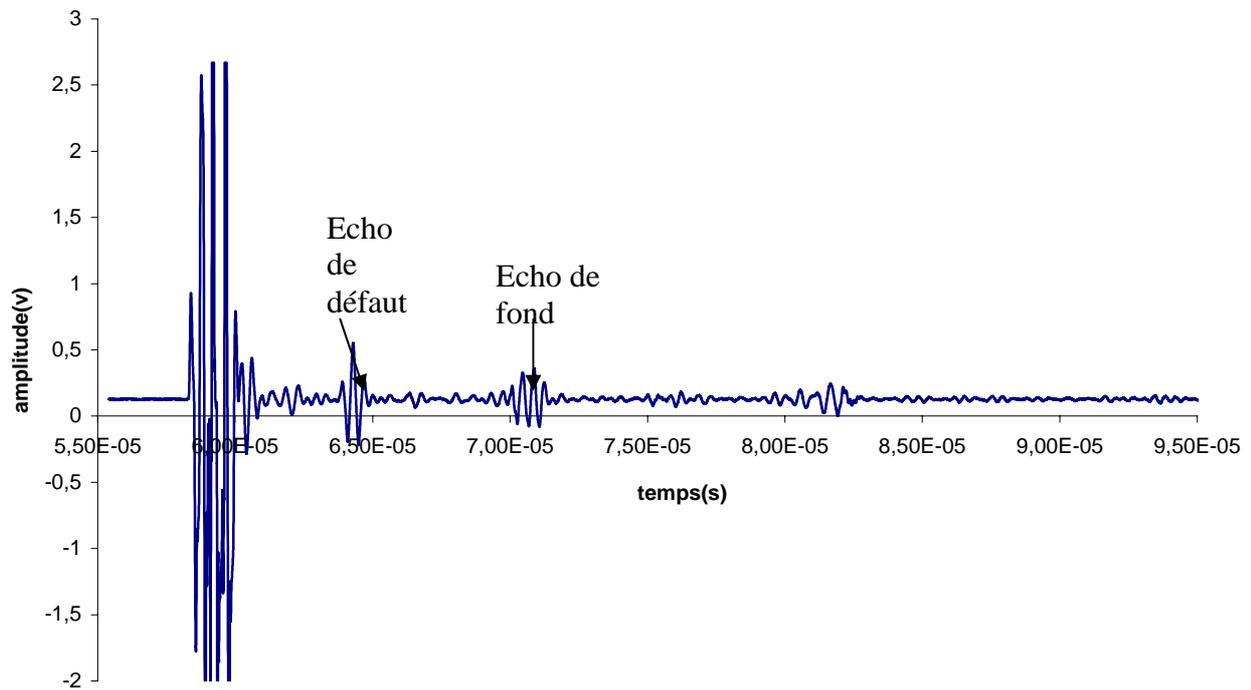


Figure 6.15 : Pièce avec manque de fusion

$$\frac{\sin 70^\circ}{V_{\text{acier}}} = \frac{\sin \theta}{V_{\text{leau}}}$$

$$\sin \theta = \frac{V_{\text{leau}} \times \sin 70^\circ}{V_{\text{acier}}}$$

Les vitesses utilisées sont données par le tableau (2.1).

$$\sin \theta = \frac{1480 \times 0.93}{3300}$$

$$\theta = 24.65^\circ$$

$$\delta T = 10.8 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$p = \frac{Vol \times \delta T \times \cos 70^\circ}{2}$$

$$p = \frac{6000 \times 10.8 \times 10^{-6} \times \cos 70^\circ}{2} \Rightarrow P = 0.011 \text{ m}$$

### 6.3.2.6 Echo représentatif de la pièce n° 2 sans défaut

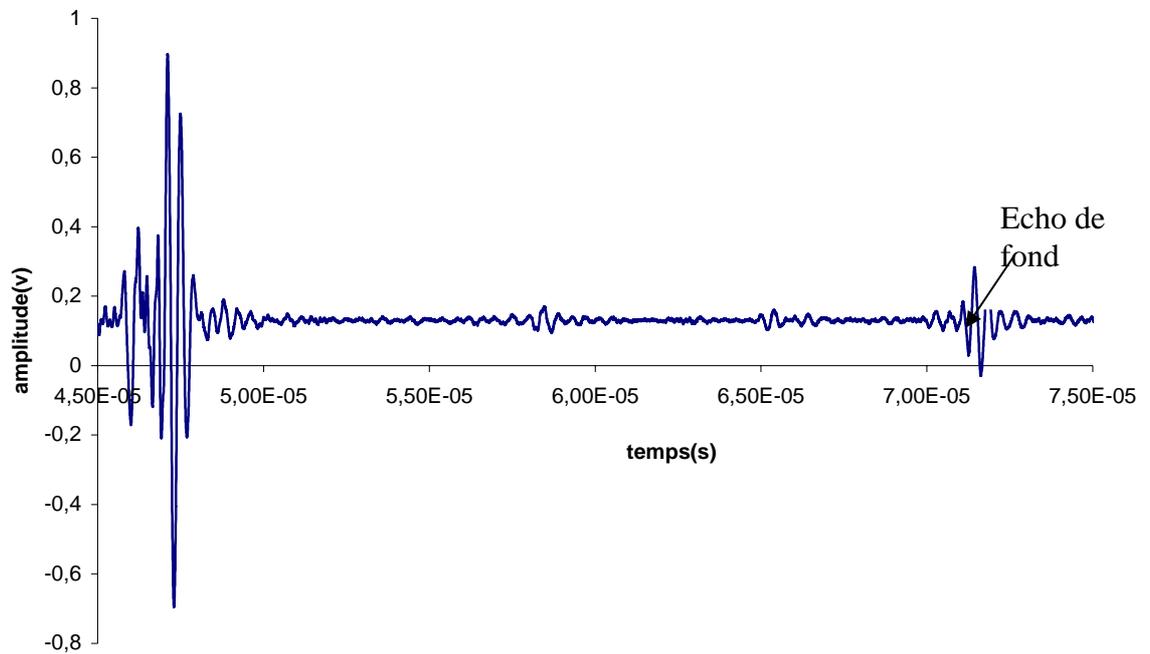


Figure 6. 16 : Pièce n° 2 sans défaut

### 6.3.2.7 l'écho représentatif de la pièce n° 2 avec défaut

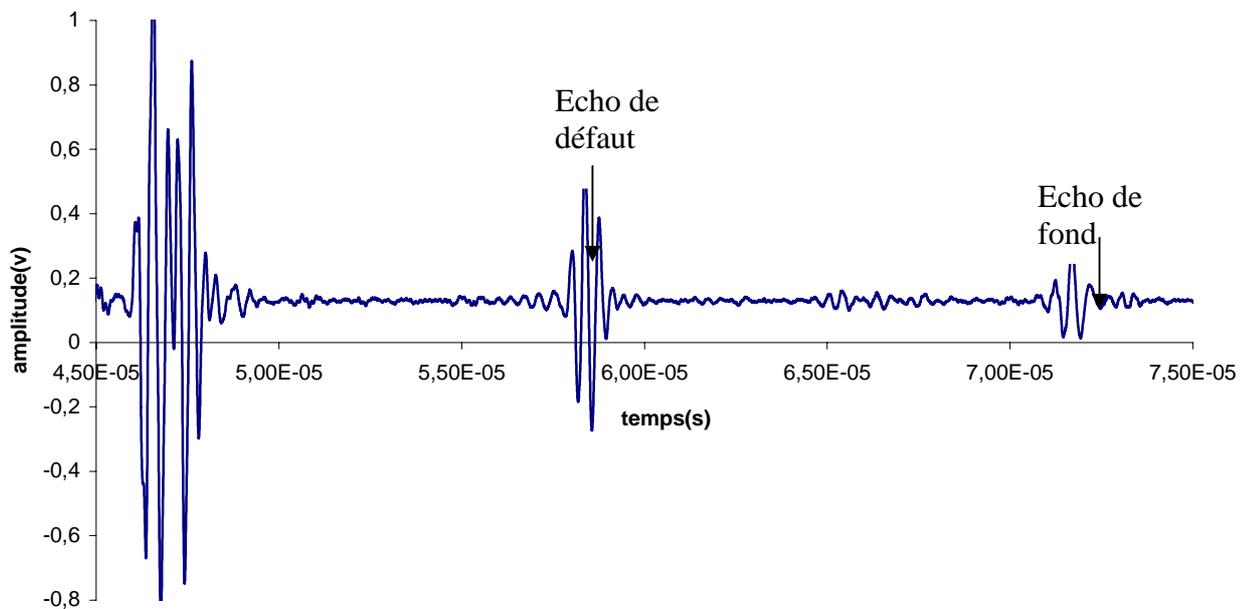


Figure 6.17 : Pièce avec manque de pénétration

$$\frac{\sin 60^\circ}{V_{\text{acier}}} = \frac{\sin \theta}{V_{\text{leau}}}$$

$$\sin \theta = \frac{V_{\text{leau}} \times \sin 60^\circ}{V_{\text{acier}}}$$

$$\theta = 23^\circ$$

$$\delta T = 11 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$p = \frac{\text{Vol} \times \delta T \times \cos 60^\circ}{2}$$

$$p = \frac{6000 \times 11 \times 10^{-6} \times \cos 60^\circ}{2} \Rightarrow P = 0.016 \text{ m}$$

#### 6.3.2.8 Résultat du contrôle

Tableau 6.2 : Résultats du contrôle de la pièce 2

Défaut n°	Type	Longueur (m)	Profondeur (m)
1	laminaire	0.030	0.011
3	Manque de fusion ou de pénétration	0.015	0.016
2	Manque de fusion ou de pénétration	0.035	0.016

#### 6.3.3 La pièce n° 3

$$\delta T = 8.36 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$V = \frac{2 \times 25 \times 10^{-3}}{8.36 \times 10^{-6}} \Rightarrow V = 5980.86 \text{ m / s}$$

##### 6.3.3.1 Recherche du défaut n° 1

Palpeur à immersion de fréquence égale à 2.25 MHZ.

### 6.3.3.2 Echo représentatif de la pièce n° 3 sans défaut

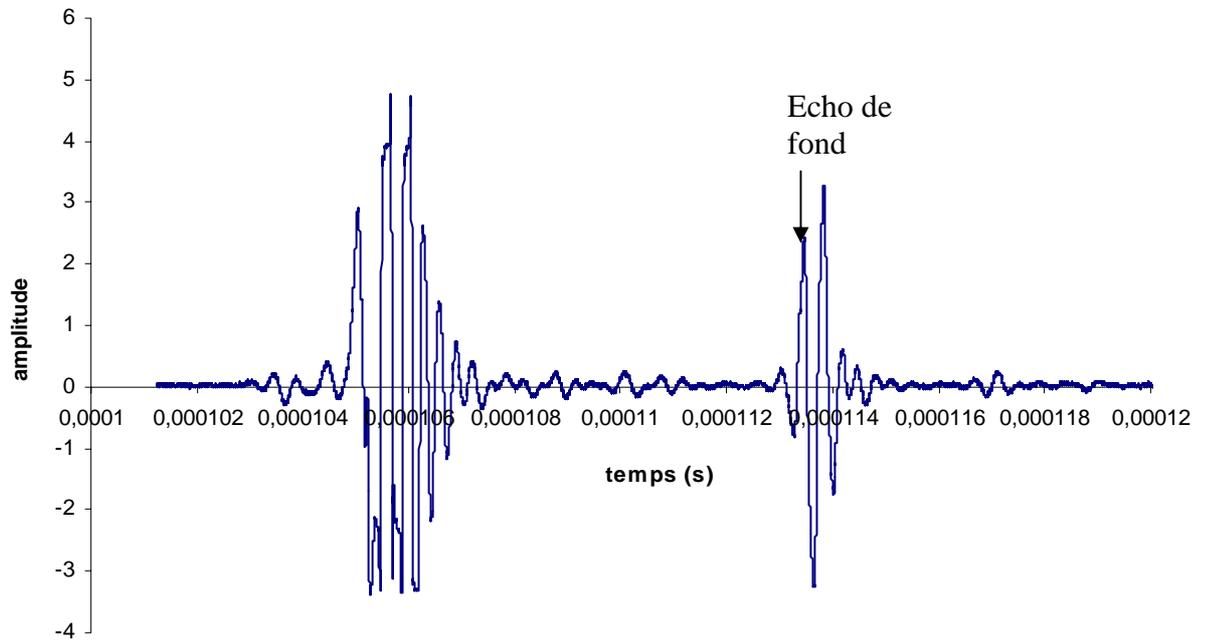


Figure 6.18 : Pièce n° 3 sans défaut

### 6.3.3.3 Echo représentatif de la pièce n° 3 avec défaut

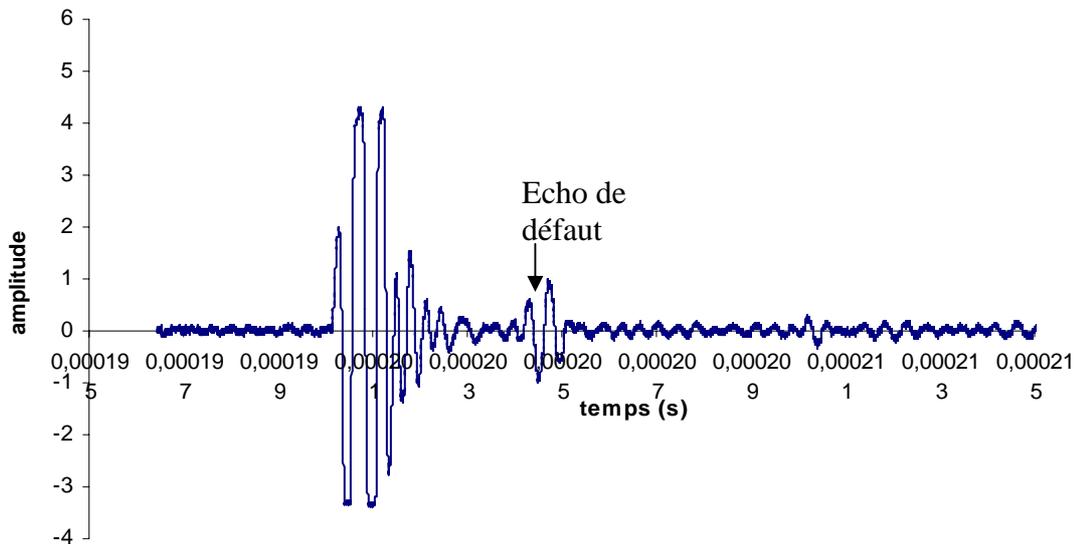


Figure 6.19 : Pièce n° 3 avec défaut fissure

$$\delta T = 4 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$p = \frac{Vol \times \delta T d}{2}$$

$$p = \frac{5980 \cdot 86 \times 2.72 \times 10^{-6}}{2} \Rightarrow P = 0.011 \text{ m}$$

#### 6.3.3.4 Recherche du défaut n° 2

Palpeur à immersion de fréquence égale à 2.25 MHz.

#### 6.3.3.5 Echo représentatif de la pièce n° 3 sans défaut

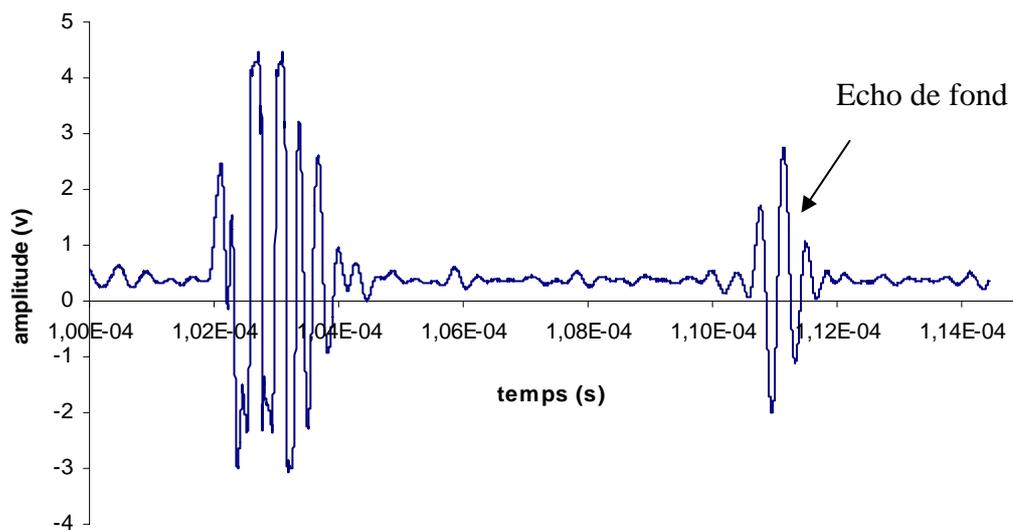


Figure 6.20 : Pièce n°3 sans défaut

### 6.3.3.6 Echo représentatif de la pièce n° 3 avec défaut

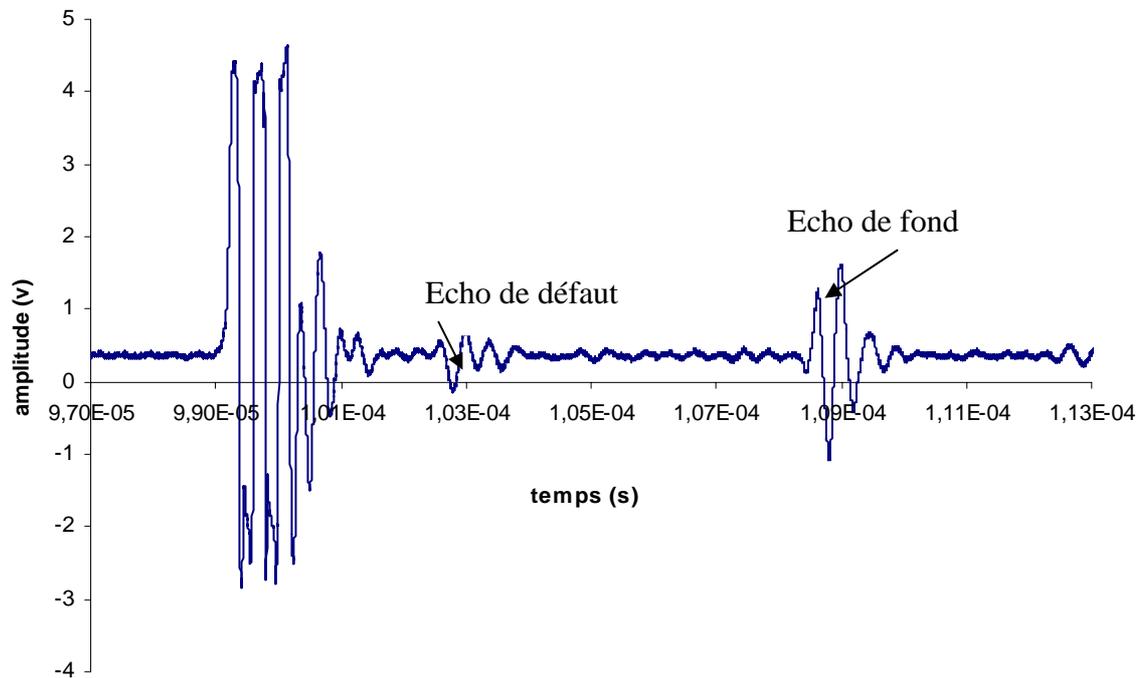


Figure 6.21 : Pièce n°3 avec défaut porosité

$$\delta T = 4 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$p = \frac{Vol \times \delta T d}{2}$$

$$p = \frac{5980 \cdot 86 \times 4 \times 10^{-6}}{2} \Rightarrow P = 0.011 \text{ m}$$

### 6.3.3.7 La recherche du défaut n° 3

Palpeur à immersion de fréquence égale à 2.25 MHZ.

### 6.3.3.8 Echo représentatif de la pièce n° 3 avec défaut

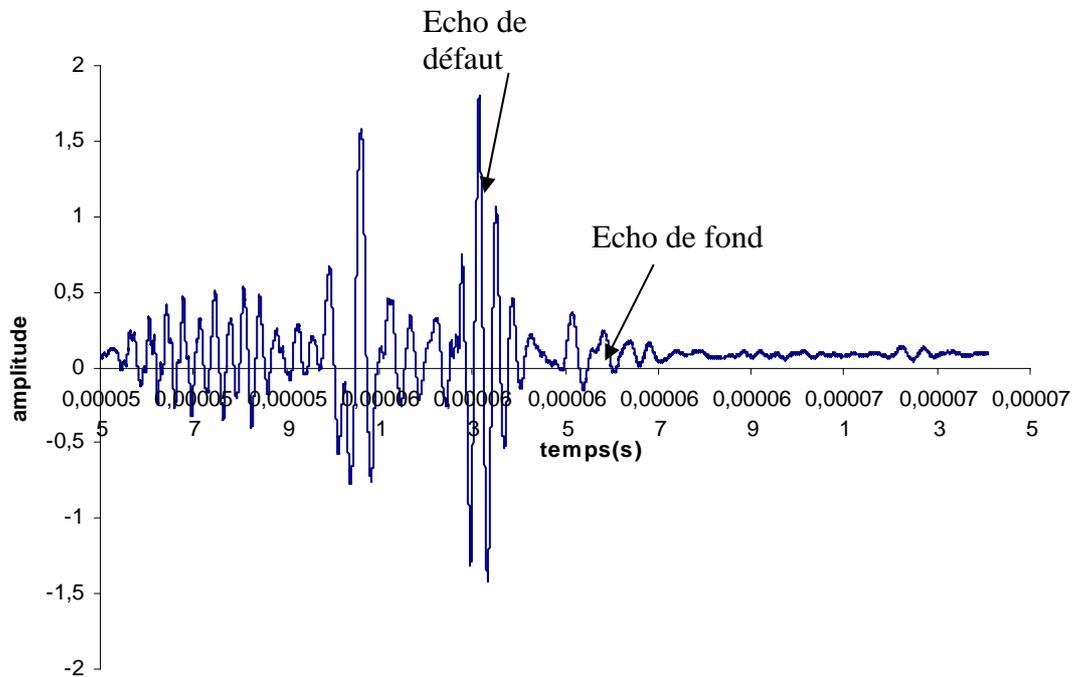


Figure 6.22 : Pièce n° 3 avec défaut fissure au coin

$$\frac{\sin 60^\circ}{V_{\text{acier}}} = \frac{\sin \theta}{V_{\text{leau}}}$$

$$\sin \theta = \frac{V_{\text{leau}} \times \sin 60^\circ}{V_{\text{acier}}}$$

$$\theta = 23^\circ$$

$$\delta T = 2,8 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$p = \frac{Vol \times \delta T \times \cos 60^\circ}{2}$$

$$p = \frac{6000 \times 2,8 \times 10^{-6} \times \cos 60^\circ}{2} \Rightarrow P = 0,004 \text{ m}$$

### 6.3.3.9 Résultats du contrôle

Tableau 6.3 : Résultats du contrôle de la pièce 3

Défaut n°	Type	Longueur (m)	Profondeur (m)
1	fissure	0.030	0.011
2	porosité	0.029	0.011
3	Fissure au coin	0.018	0.004

### 6.3.4 La pièce n° 4

$$\delta T = 4.06 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$V = \frac{2 \times 12 \times 10^{-3}}{4.06 \times 10^{-6}} \Rightarrow V = 5911.33 \text{ m / s}$$

#### 6.3.4.1 Recherche du défaut n° 1

Palpeur incliné à immersion de fréquence égale à 2.25 MHz.

#### 6.3.4.2 Echo représentatif de la pièce n° 4 sans défaut 1

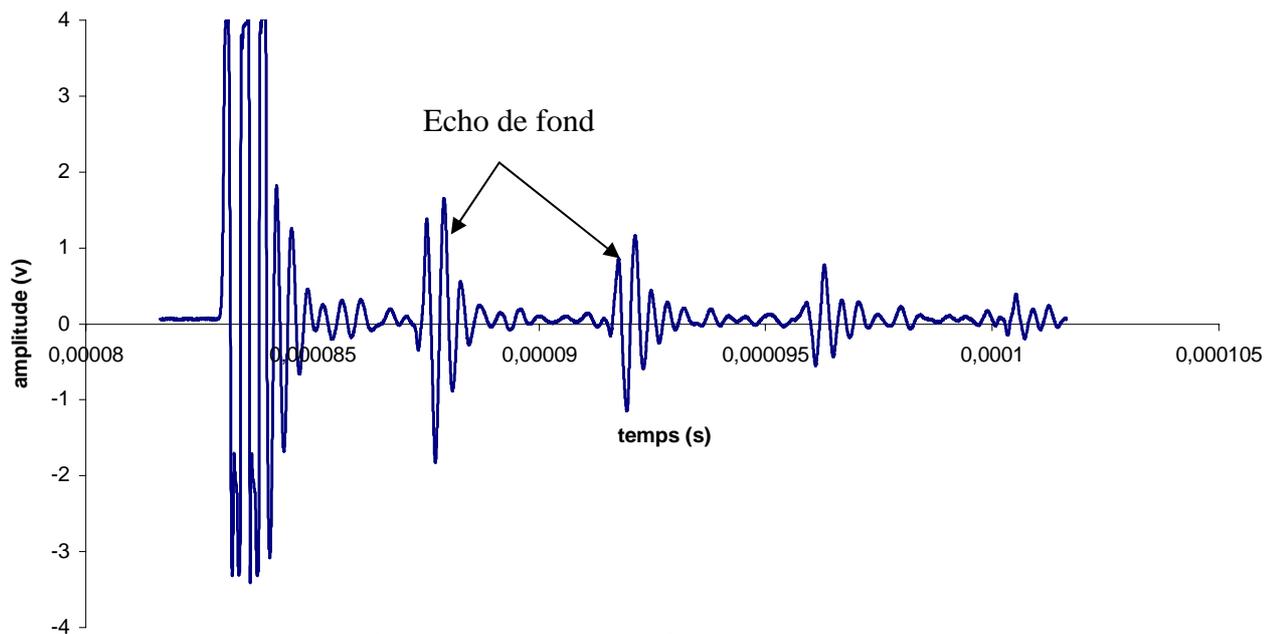
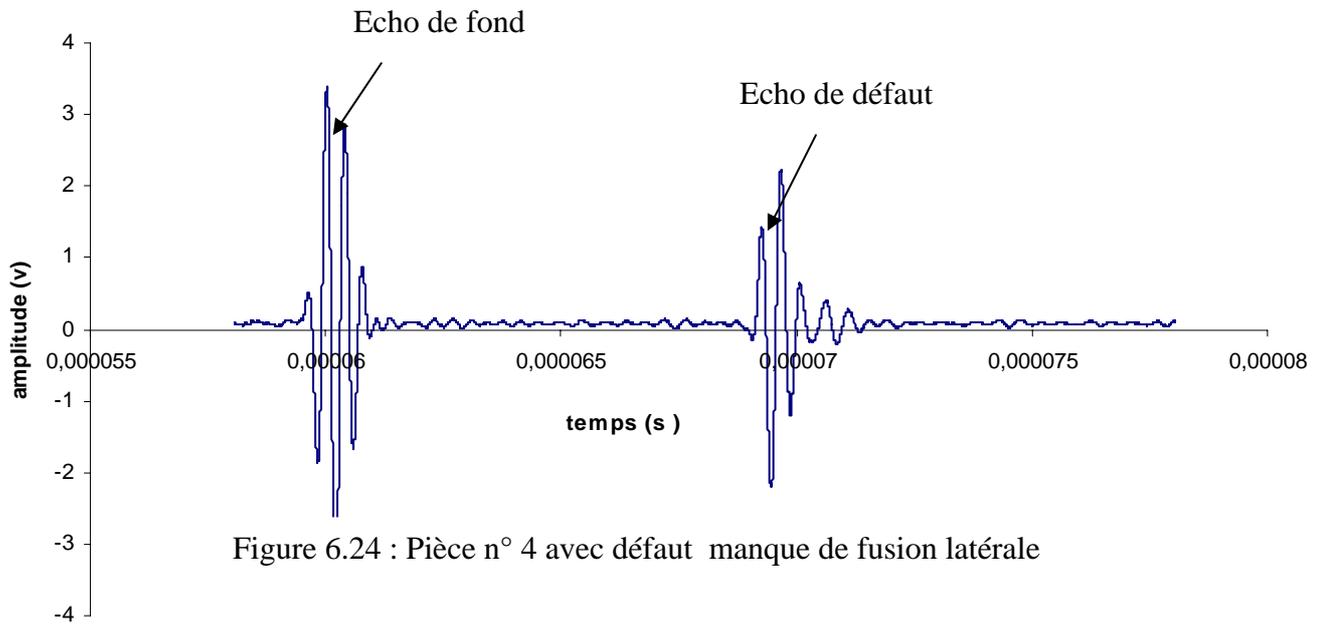


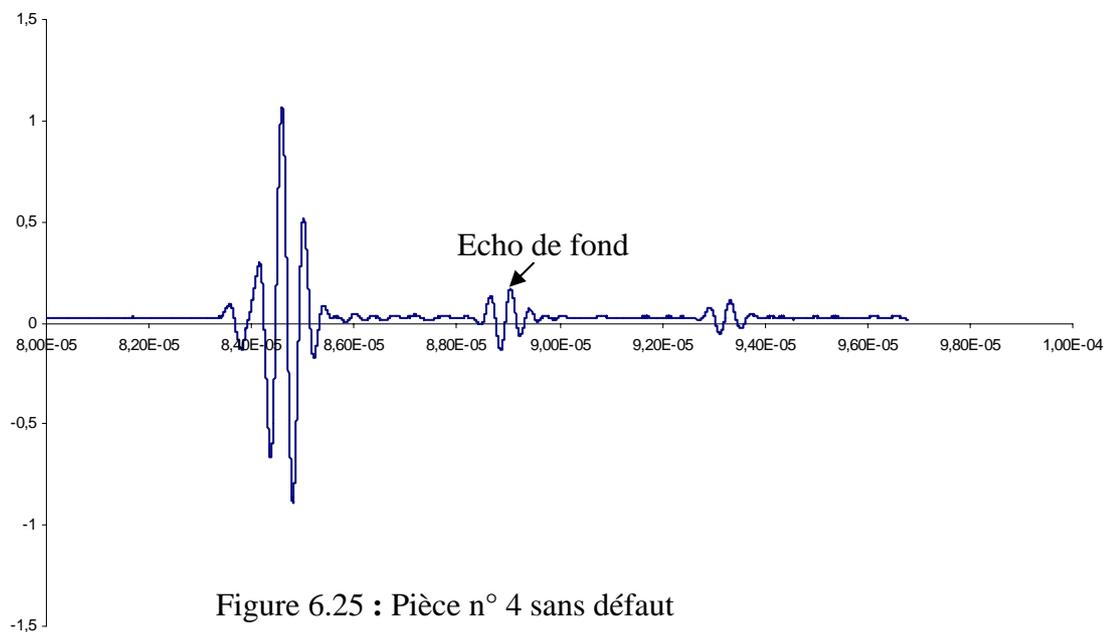
Figure 6.23 : Pièce n° 4 sans défaut

### 6.3.4.3 Echo représentatif de la pièce n° 4 avec défaut 1

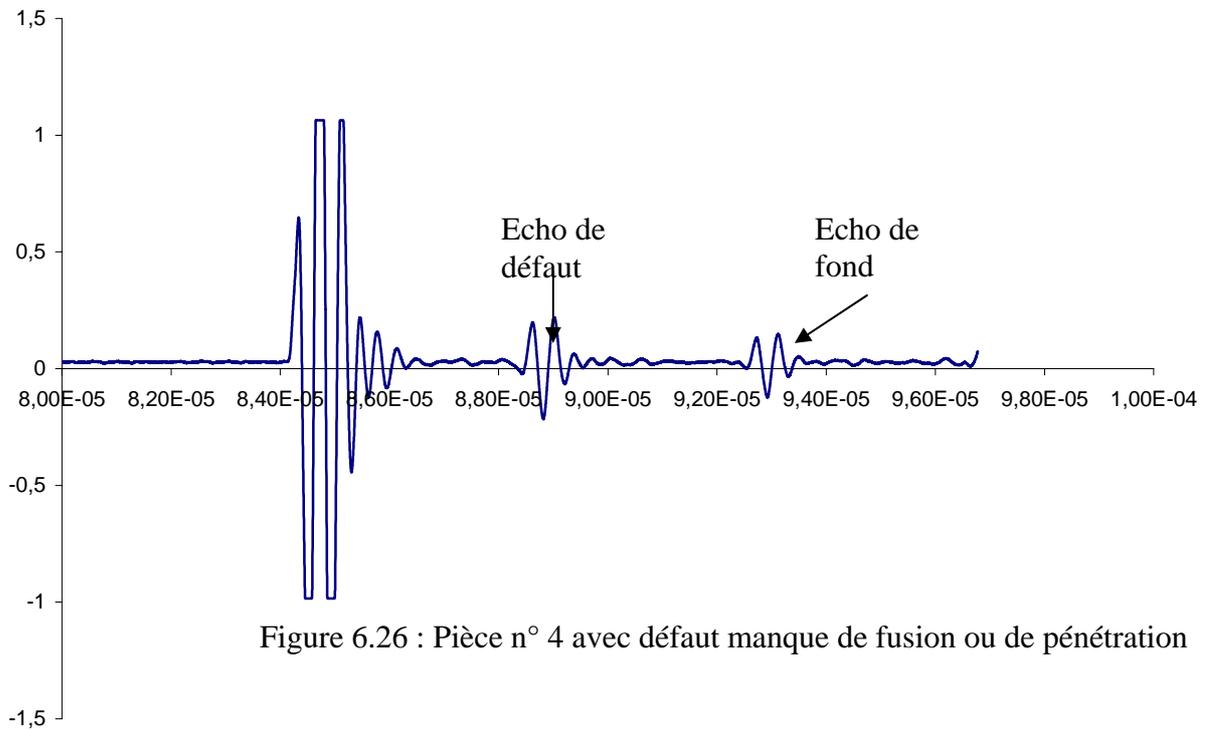


$$\delta T = 6 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$p = \frac{5911 \cdot 33 \times 6 \times 10^{-6} \times \cos 70^\circ}{2} \Rightarrow p = 0.006 \text{ m}$$



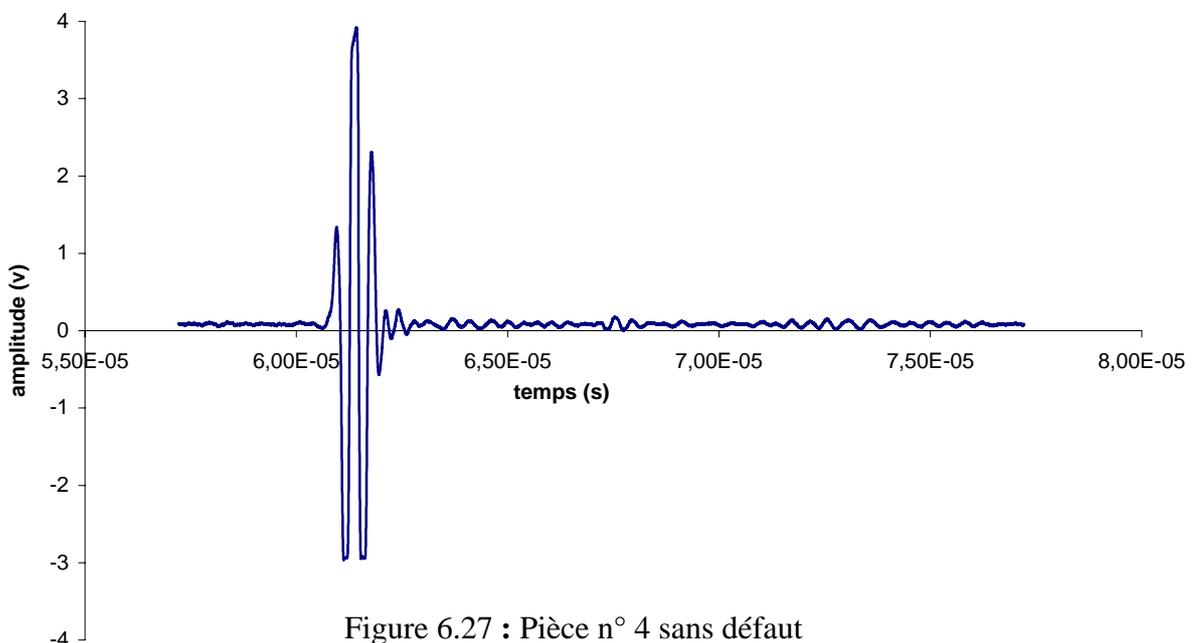
#### 6.3.4.4 Echo représentatif de la pièce n° 4 avec défaut 2



$$\delta T = 4 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$p = \frac{5911,33 \times 4 \times 10^{-6}}{2} \Rightarrow p = 0,011 \text{ m}$$

#### 6.3.4.5 Echo représentatif de la pièce n° 4 sans défaut 3



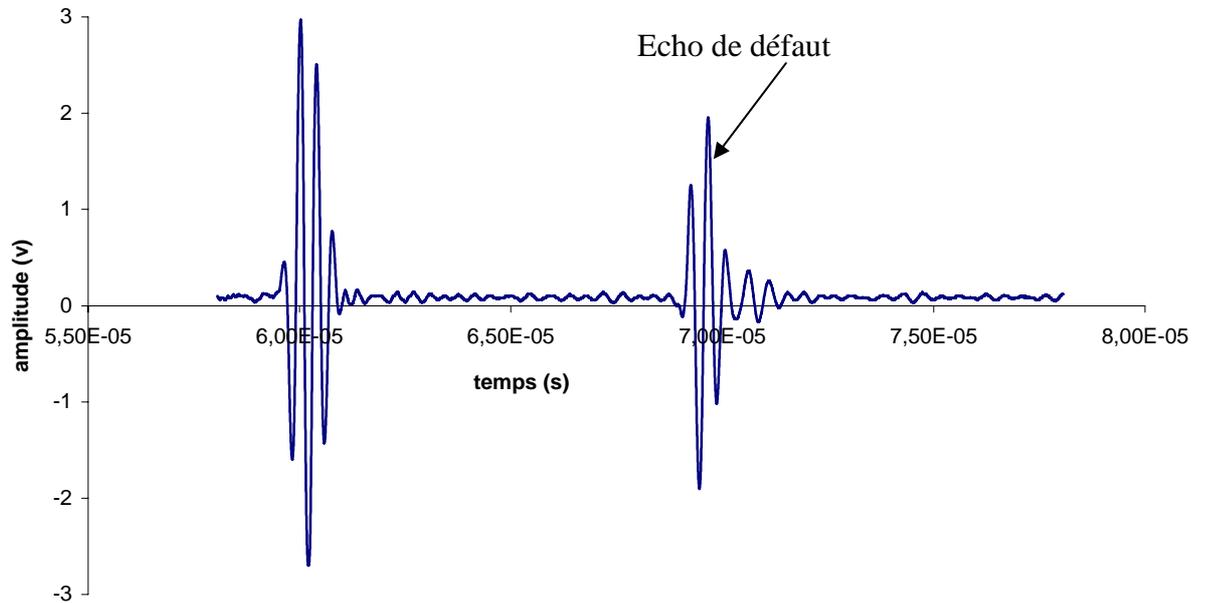


Figure 6.28 : Pièce n ° 4 avec défaut manque de pénétration ou de fusion

$$\delta T = 10 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$p = \frac{5911.33 \times 10^{-5}}{2} \Rightarrow p = 0.014 \text{ m}$$

#### 6.3.4.6 Résultat du contrôle

Tableau 6.4 : Résultats du contrôle de la pièce 4

Défaut n°	Type	Longueur (m)	Profondeur (m)
1	Manque de fusion latérale	0.025	0.006
2	Manque de fusion	0.036	0.011
3	Manque de fusion ou de pénétration	0.019	0.014

### 6.3.5 La pièce n° 5

$$\delta T = 8.36 \times 10^{-6} \text{ s}$$

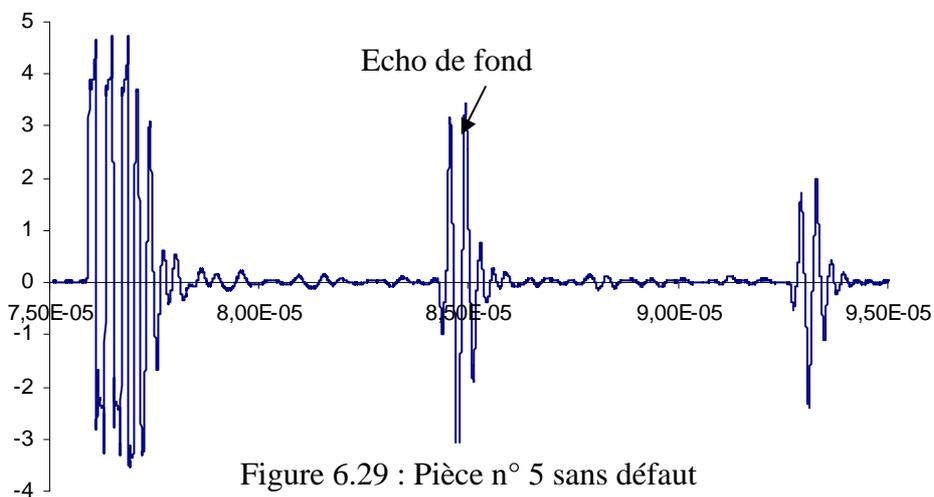
$$V = \frac{2 \times 25 \times 10^{-3}}{8.36 \times 10^{-6}}$$

$$V = 5980.86 \text{ m/s.}$$

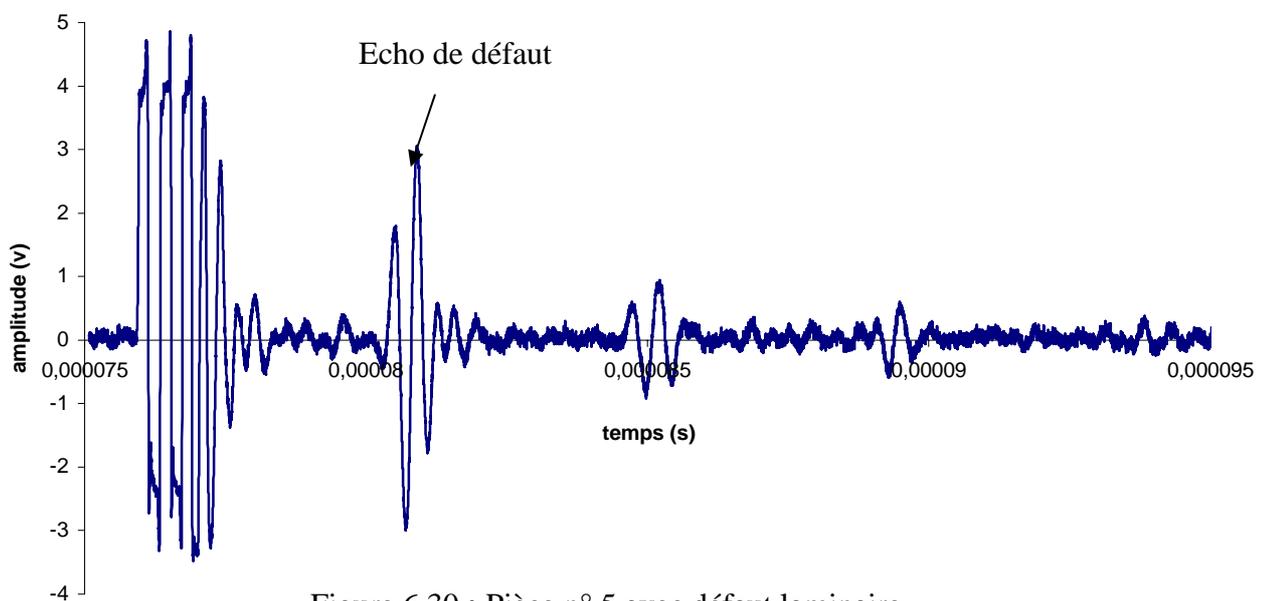
#### 6.3.5.1 La recherche du défaut n° 1

Palpeur droit à immersion de fréquence égale à 2.25 MHz

#### 6.3.5.2 Echo représentatif de la pièce n° 5 sans défaut



#### 6.3.5.3 l'écho représentatif de la pièce n° 5 avec défaut



$$\delta T = 4.3 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$p = \frac{5980 \cdot 0.86 \times 4.3 \times 10^{-6}}{2} \Rightarrow p = 0.012 \text{ m}$$

#### 6.3.5.4 La recherche du défaut n° 2

Palpeur à immersion de fréquence égale à 2.25 MHz.

#### 6.3.5.5 Echo représentatif de la pièce n° 5 sans défaut

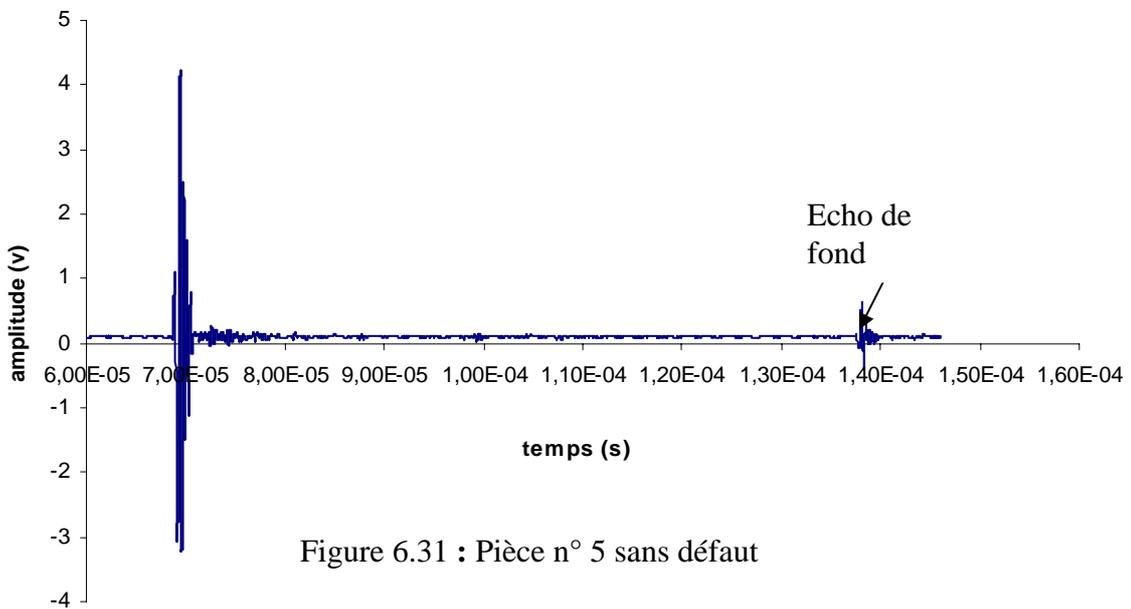


Figure 6.31 : Pièce n° 5 sans défaut

#### 6.3.5.6 Echo représentatif de la pièce n° 5 avec défaut

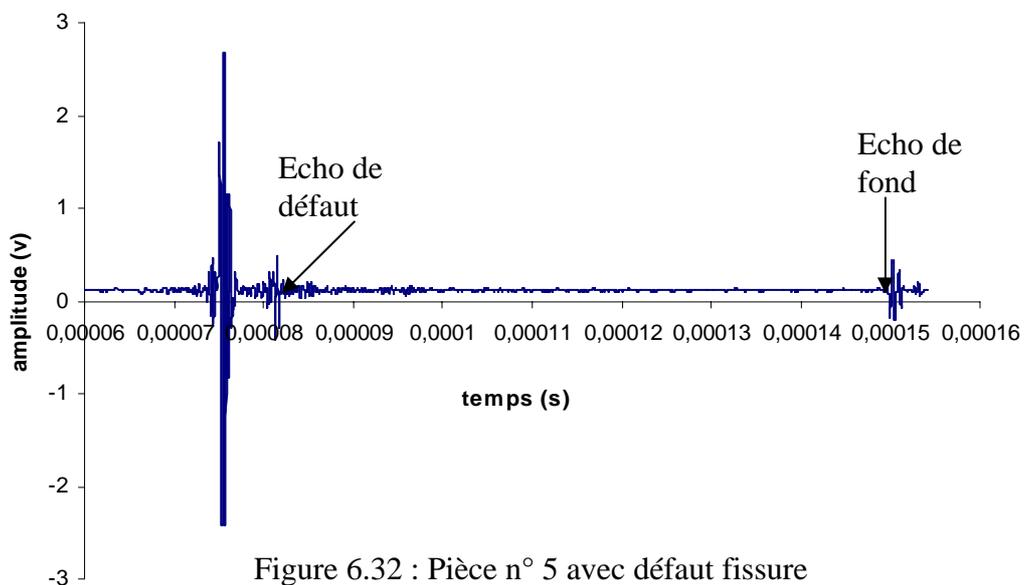


Figure 6.32 : Pièce n° 5 avec défaut fissure

$$\theta = 23^\circ$$

$$\delta T = 6.48 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$p = \frac{Vol \times \delta T \times \cos 60^\circ}{2}$$

$$p = \frac{3200 \times 6.48 \times 10^{-6} \times 0.5}{2} \Rightarrow p = 0.005 \text{ m}$$

### 6.3.5.7 Recherche du défaut n° 3

Palpeur incliné à immersion de fréquence égale à 2.25 MHz.

### 6.3.5.8 Echo représentatif de la pièce n° 5 sans défaut

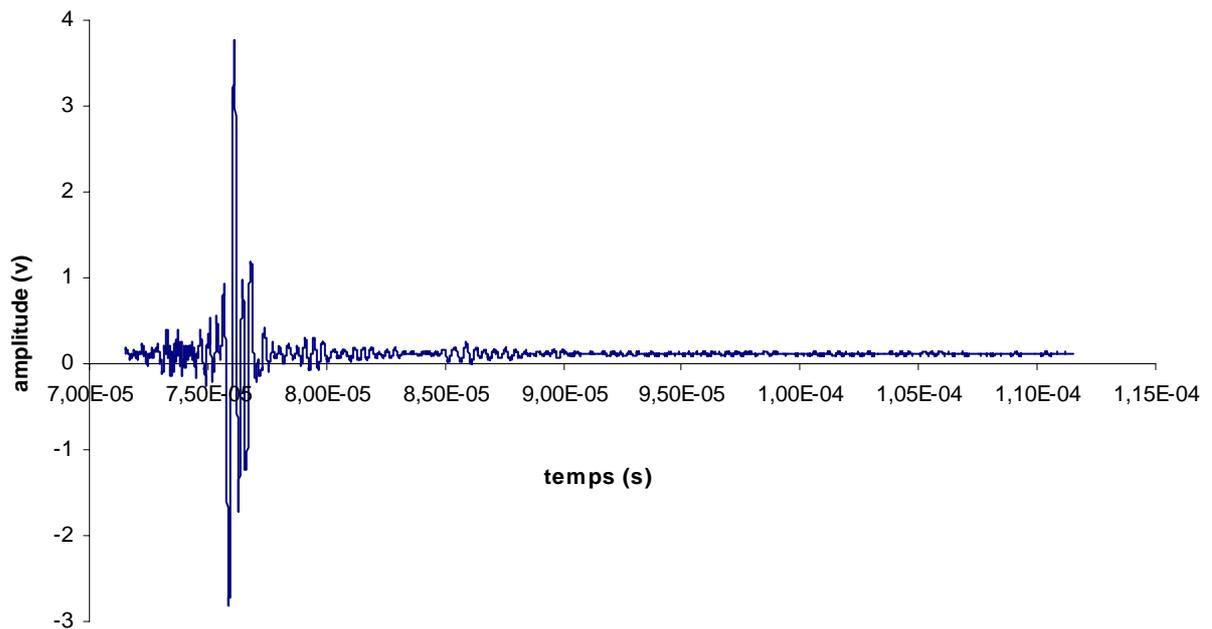


Figure 6.33: Pièce n° 5 sans défaut

### 6.3.5.9 Echo représentatif de la pièce n° 5 avec défaut

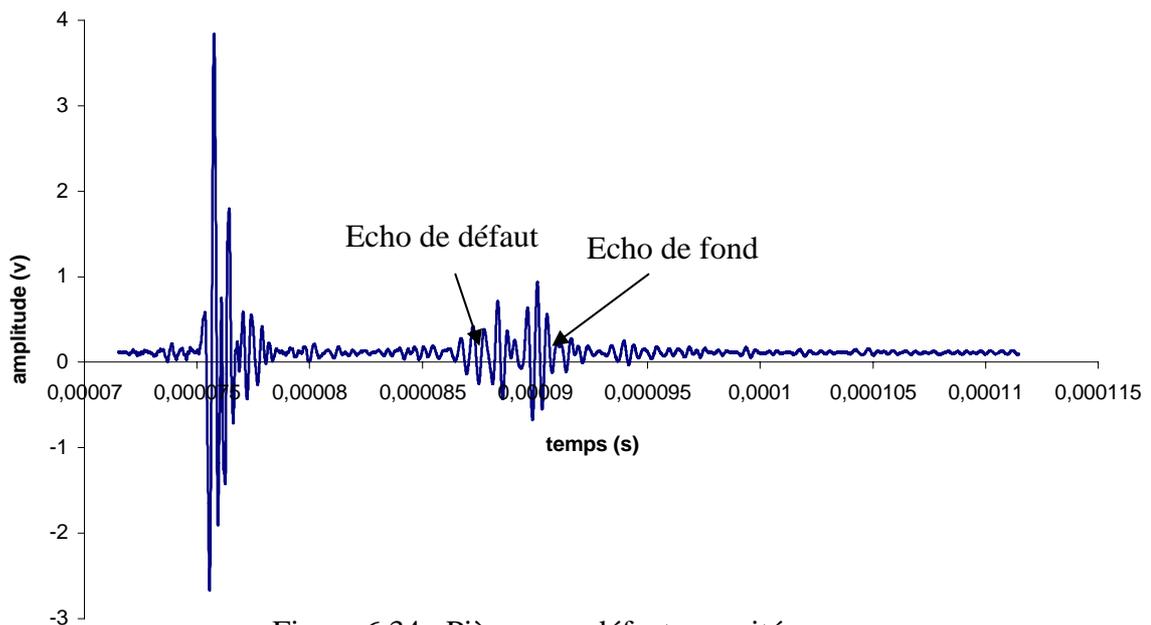


Figure 6.34 : Pièce avec défaut porosité

$$\theta = 23.^{\circ}$$

$$\delta T = 10 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$p = \frac{Vol \times \delta T \times \cos 60^{\circ}}{2}$$

$$p = \frac{5980,86 \times 10 \times 10^{-6} \times \cos 60^{\circ}}{2} \Rightarrow p = 0,014 \text{ m}$$

### 6.3.5.10 Résultat du contrôle

Tableau 6.5 : Résultats du contrôle de la pièce 5

Défaut n�	Type	Longueur (m)	Profondeur (m)
1	Laminaire	0,027	0,012
2	Fissure	0,020	0,005
3	porosité	0,032	0,014

### 6.3.6 La pièce n°6

$$\delta T = 7 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$V=5717 \text{ m/s}$$

#### 6.3.6.1 Recherche du défaut n° 1

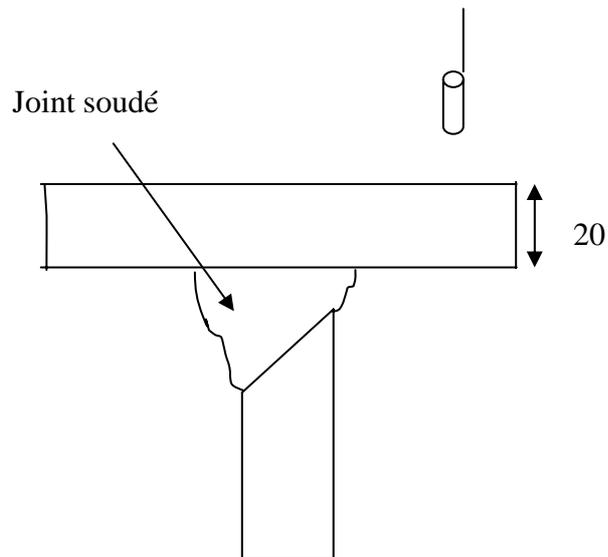


Figure 6.35 : Présentation du contrôle

#### 6.3.6.2 Echo représentatif de la pièce n°6 sans défaut

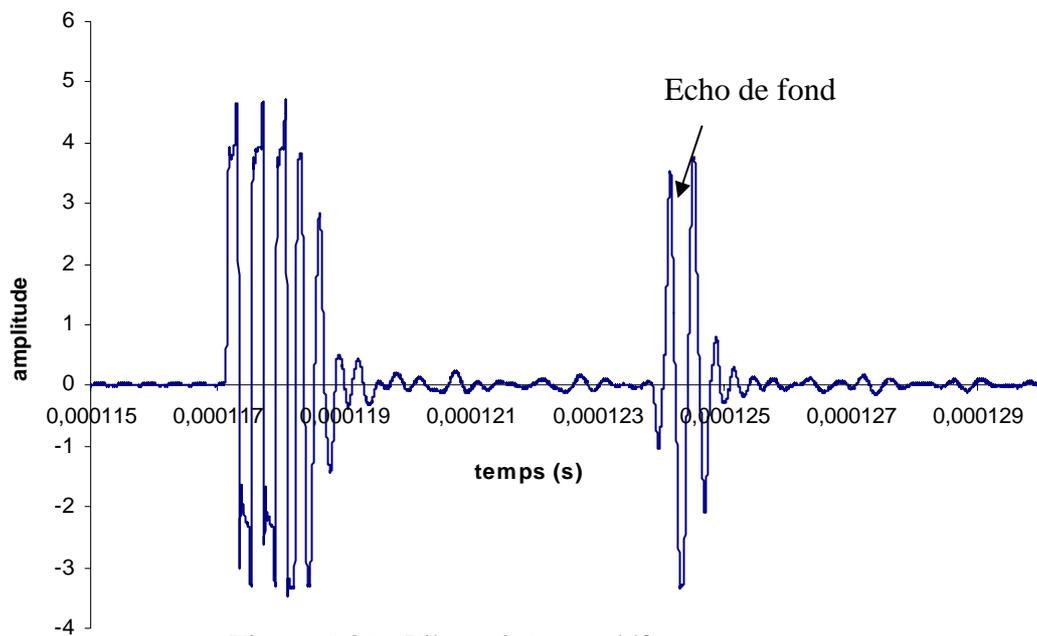


Figure 6.36 : Pièce n° 6 sans défaut

### 6.3.6.3 Echo représentatif de la pièce n °6 avec défaut

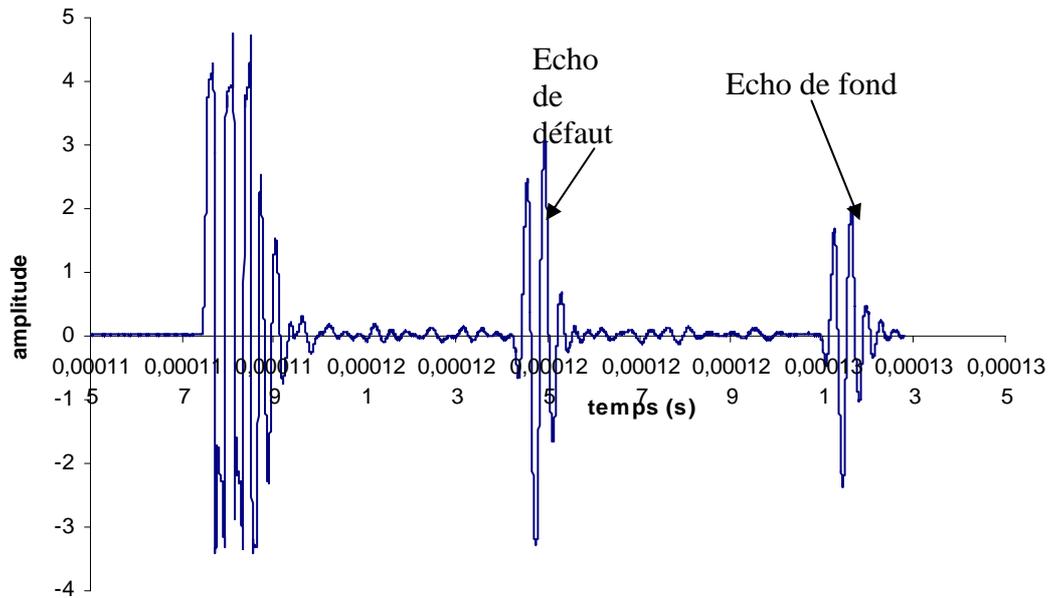


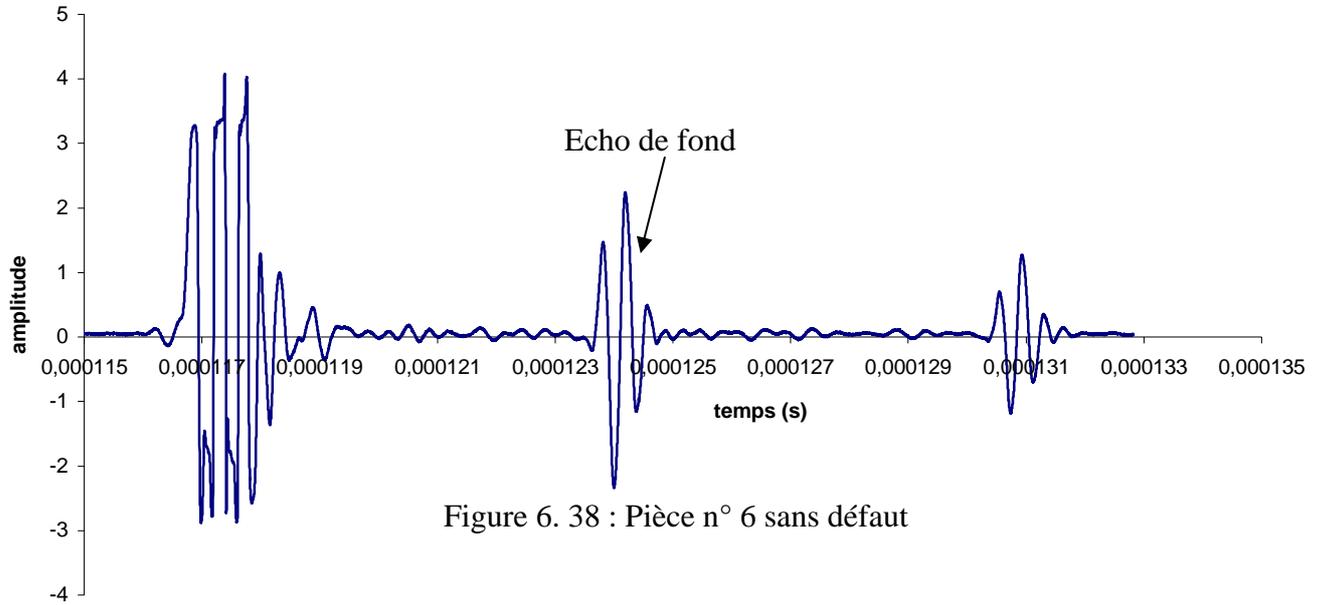
Figure 6.37 : Pièce n° 6 avec défaut manque de pénétration

$$\delta T = 7.04 \times 10^{-6} \text{ s}$$

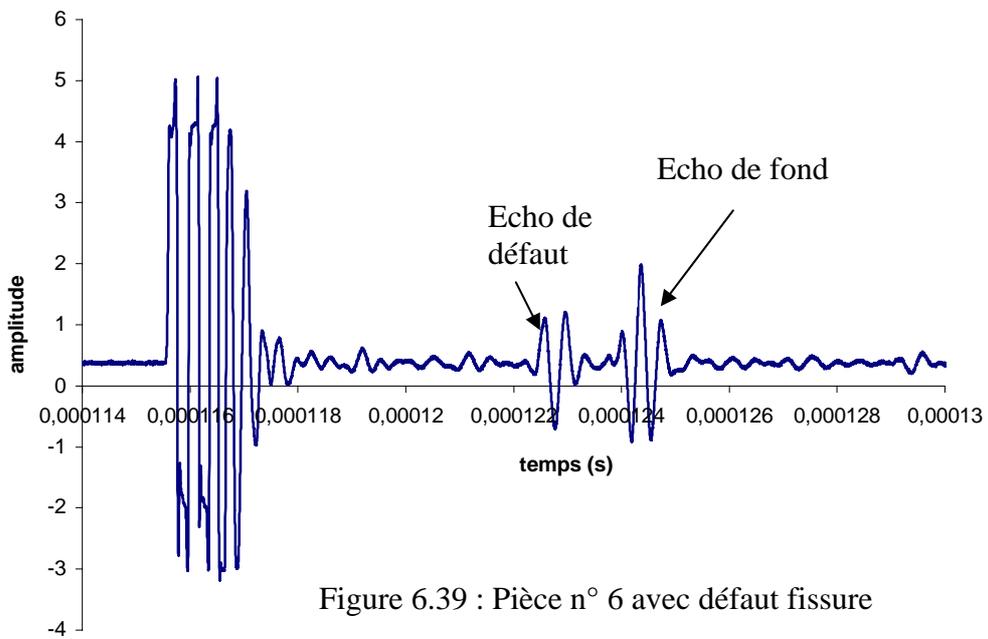
$$p = \frac{\text{Vol} \times \delta T d}{2}$$

$$p = \frac{5714 \times 7.04 \times 10^{-6}}{2} \Rightarrow p = 0.02 \text{ m}$$

#### 6.3.6.4 Echo représentatif de la pièce n °6 sans défaut



#### 6.3.6.5 Echo représentatif de la pièce n °6 avec défaut



$$\delta T = 1.52 \times 10^{-6} \text{ s} \quad \text{Intervalle de temps entre l'écho de défaut et celui de fond}$$

$$p = \frac{Vol \times \delta T d}{2}$$

$$p = \frac{5714 \times 1.52 \times 10^{-6}}{2} + \text{Épaisseur de la pièce}$$

$$p = 0.004 + 20$$

$$p = 0.024 \text{ m}$$

#### 6.3.6.6 Résultat du contrôle

Tableau 6.6 : Résultats du contrôle de la pièce 6

Défaut n°	Type	Longueur (m)	Profondeur (m)
1	Manque de pénétration ou de fusion	0.019	0.02
2	fissure	0.027	0.024

#### 6.3.7 La pièce n°7

$$\delta T = 10.8 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$V = \frac{2 \times e}{\delta T}$$

$$V = \frac{2 \times 30 \times 10^{-3}}{10.8 \times 10^{-6}} \Rightarrow V = 5555.55 \text{ m / s}$$

### 6.3.7.1 La recherche du défaut n° 1

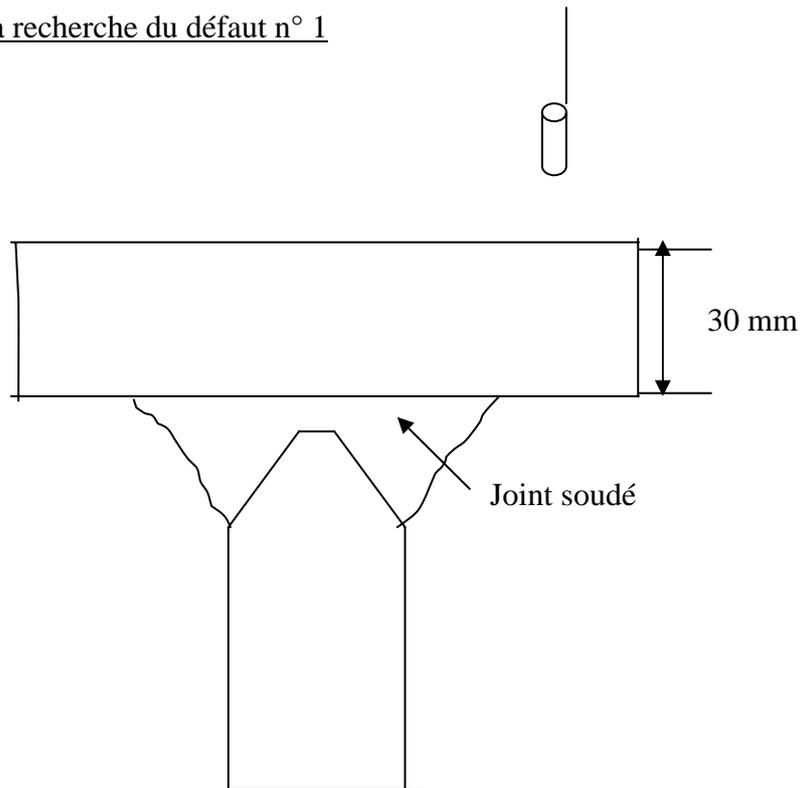


Figure 6.40 : Présentation du contrôle

### 6.3.7.2 Echo représentatif de la pièce n°7 sans défaut

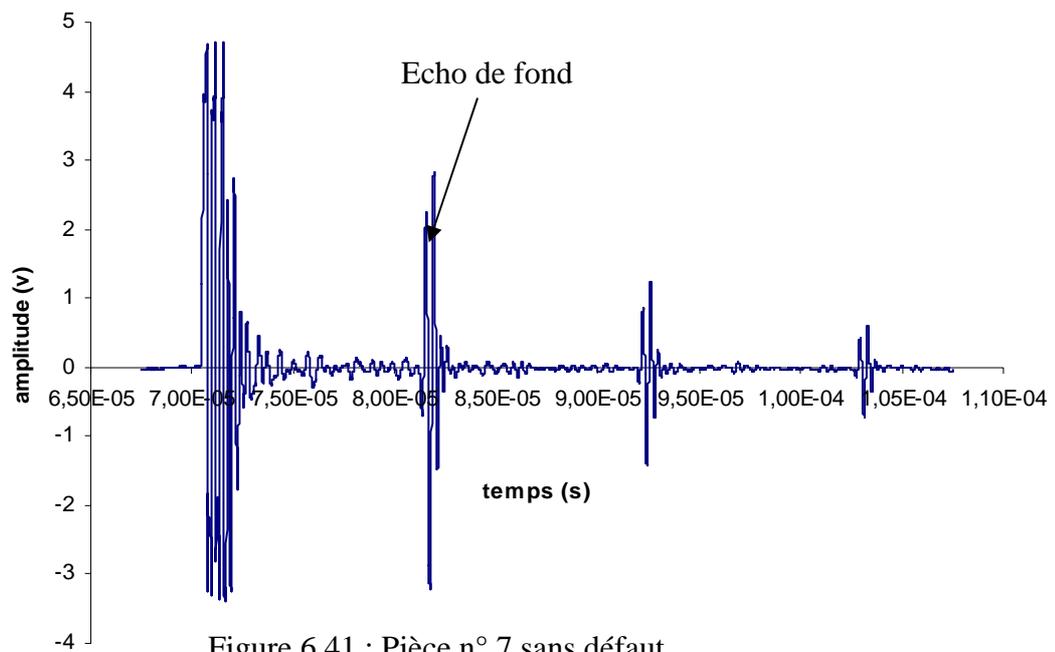
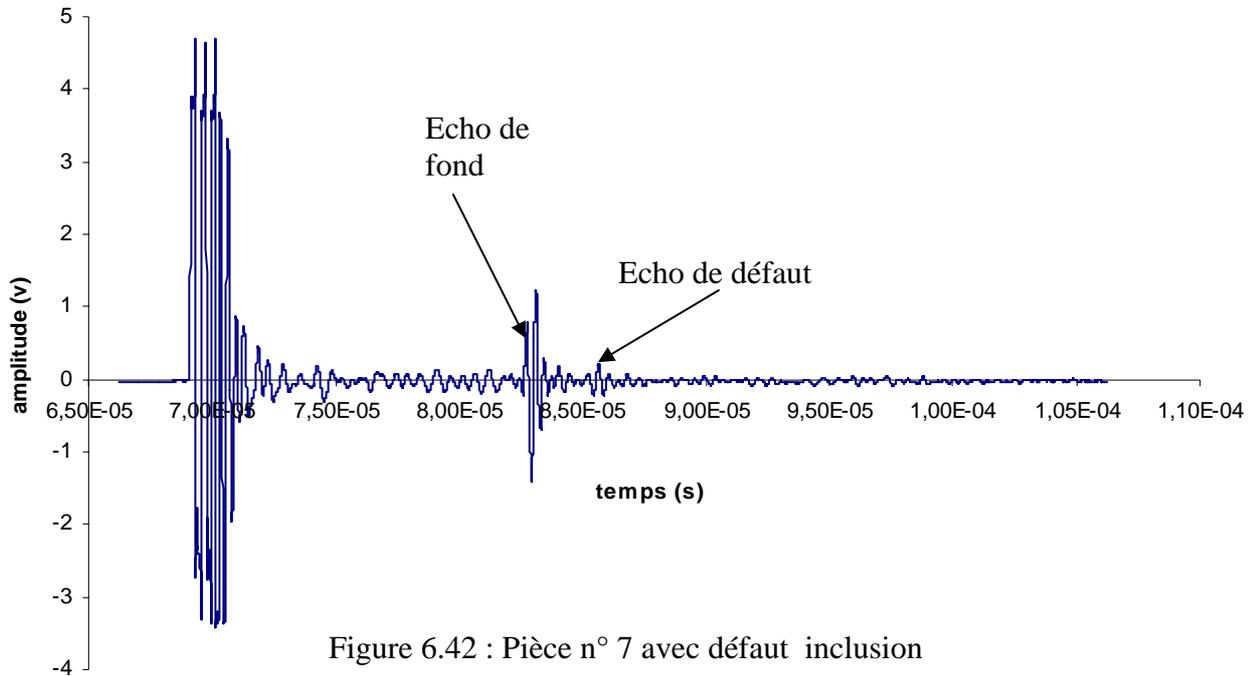


Figure 6.41 : Pièce n° 7 sans défaut

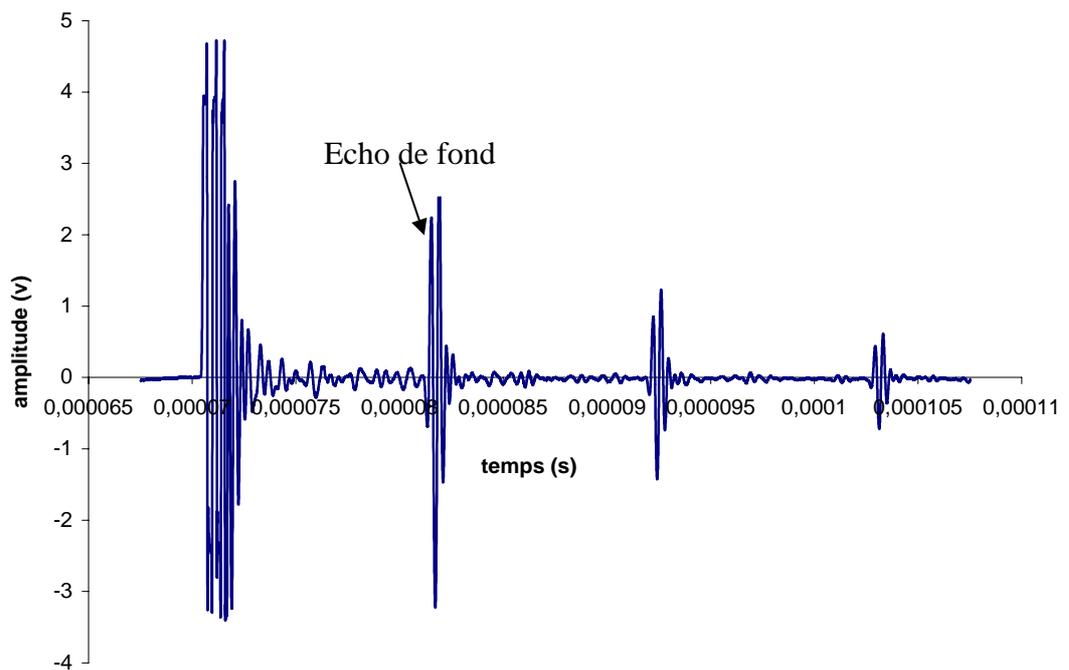
### 6.3.7.3 Echo représentatif de la pièce n°7 avec défaut 1



$$\delta T = 13 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$p=0.036 \text{ m}$$

### 6.3.7.4 Echo représentatif de la pièce n° 7



### 6.3.7.5 Echo représentatif de la pièce n ° 7 avec défaut 2

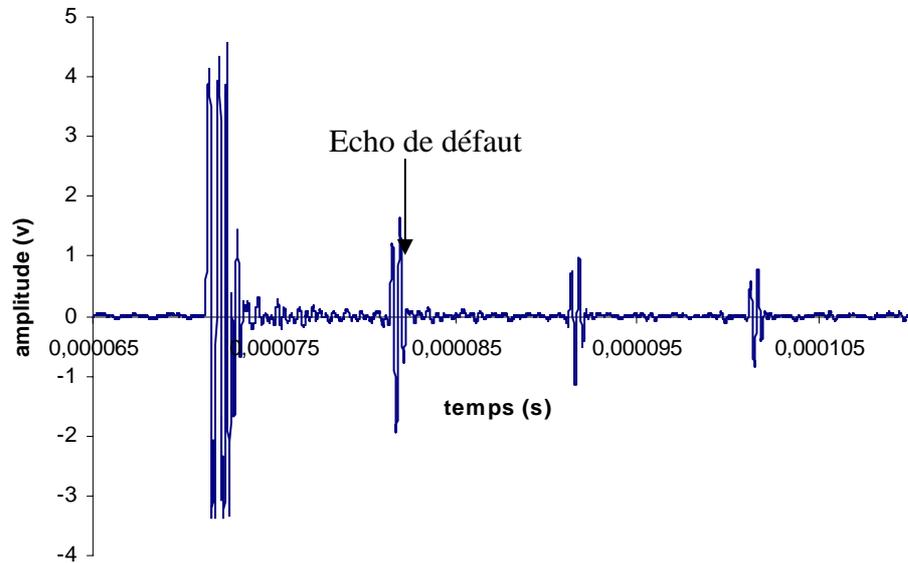


Figure 6.44 : Pièce n° 7 avec défaut manque de fusion ou de pénétration

$$\delta T = 10,5 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$p = \frac{5555,55 \times 10,5 \times 10^{-6}}{2} \Rightarrow P = 0,029 \text{ m}$$

### 6.3.7.6 Résultats du contrôle

Tableau 6.7: Résultats du contrôle de la pièce 7

Défaut n°	Type	Longueur (m)	Profondeur (m)
1	Inclusion	0,027	0,036
2	Manque de fusion ou de pénétration	0,024	0,029

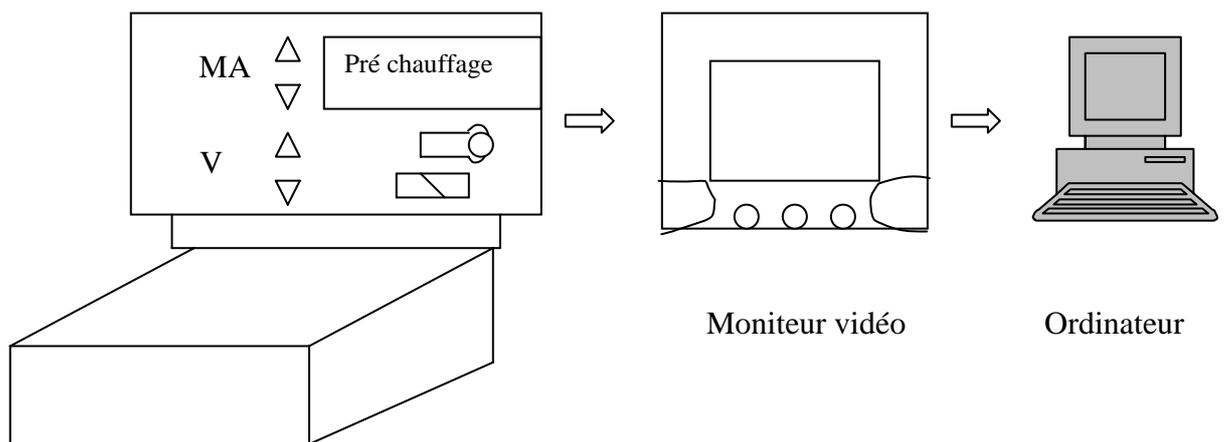
## CHAPITRE 7

### CONTROLE PAR RADIOSCOPIE

#### 7.1 Introduction

Les échantillons testés ont subi deux contrôles l'un par contact l'autre par immersion. A titre comparatif nous allons consacrer ce chapitre au contrôle des pièces par une autre méthode du contrôle non destructif : la radioscopie.

#### 7.2 Description du dispositif expérimental



Pupitre de commande

Figure 7.1 Dispositif expérimentale par radioscopie

#### 7.3 Mode opératoire

1. Nettoyer les pièces comme pour tout procédé de contrôle.
2. Placer la pièce à contrôler devant le générateur de façon à exposer la zone concernée aux rayons X.
3. Placer l'amplificateur de luminance (BIX) de telle manière à ne pas avoir de diffusion.

4. Renforcer la pièce avec des écrans en plomb en limitant la zone à examiner.
5. Diriger la caméra vers la pièce.
6. Vérifier si le circuit de refroidissement marche.
7. Mettre en marche le générateur à partir du pupitre de commande, un préchauffage est généralement nécessaire.

Le préchauffage est une procédure de reconditionnement du tube à rayons X, consistant à remettre sous tension ce tube de façon progressive lorsqu'il reste inutilisé pour une durée supérieure à 8 heures.

Une fois le préchauffage terminé, on procède à l'irradiation de l'échantillon par rayons X, une image instantanée est interceptée par le moniteur vidéo et sur l'ordinateur par l'intermédiaire du logiciel de type IPS 004.

#### 7.4 Les paramètres d'exposition

Les paramètres d'exposition sont : l'intensité du courant et la tension. Ces paramètres peuvent être ajustés pour obtenir une image lisible et exploitable.

Le réglage de l'intensité (mA) permet d'ajuster la luminosité de l'image, celui de la tension fait varier le contraste.

Tableau 7.1 Les paramètres d'exposition

Numéro de la pièce N° :	La tension (v)	Intensité du courant (mA)
1	200	03
2	225	02
3	225	9.5
4	200	03
5	225	9.5
6	190	13

### 7.5 Caractéristiques du générateur

Le générateur avec lequel toutes les manipulations ont été faites avec les caractéristiques suivantes :

1. La valeur de la différence de potentiel maximale en kV égale à 300.
2. La valeur maximale du débit électronique en mA.
3. Le mode de la production de la haute tension : tube à tension constante.
4. Le pouvoir de pénétration en mm, pour un matériau en acier : 51 mm.
5. Le mode de refroidissement à eau.
6. Affichage digital des paramètres.
7. Source à double foyers : petit foyer et grand foyer, ont les dimensions suivantes respectivement : et  $0.4*0.4$  et  $3*3$ (mm\*mm).

### 7.6 Quelques exemples de manipulation

#### 7.6.1 Pièces plates

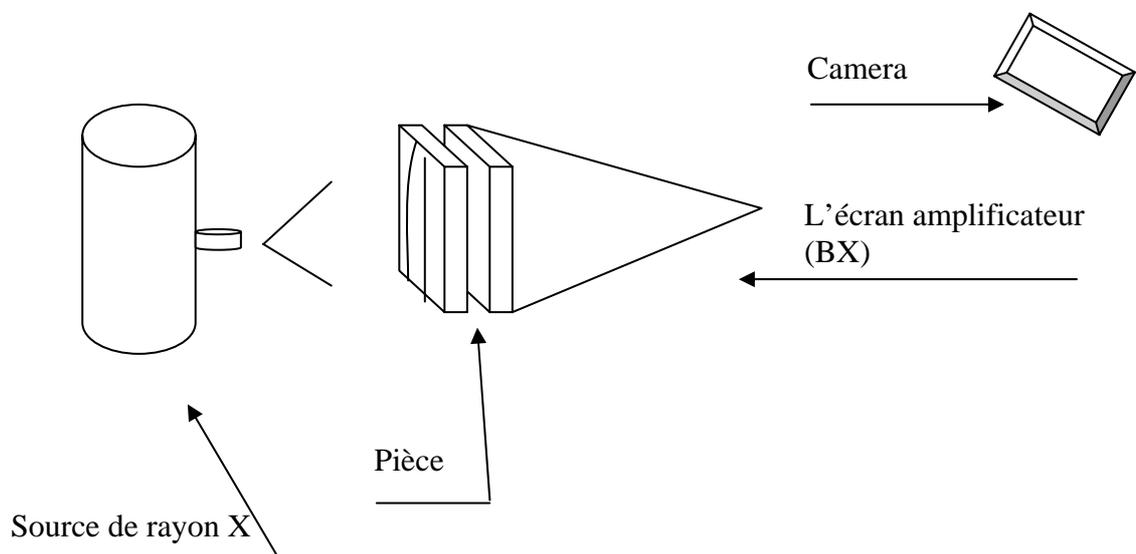


Figure 7.2 Pièce plate en radioscopie (n° :1,2)

### 7.6.2 Pièces en T

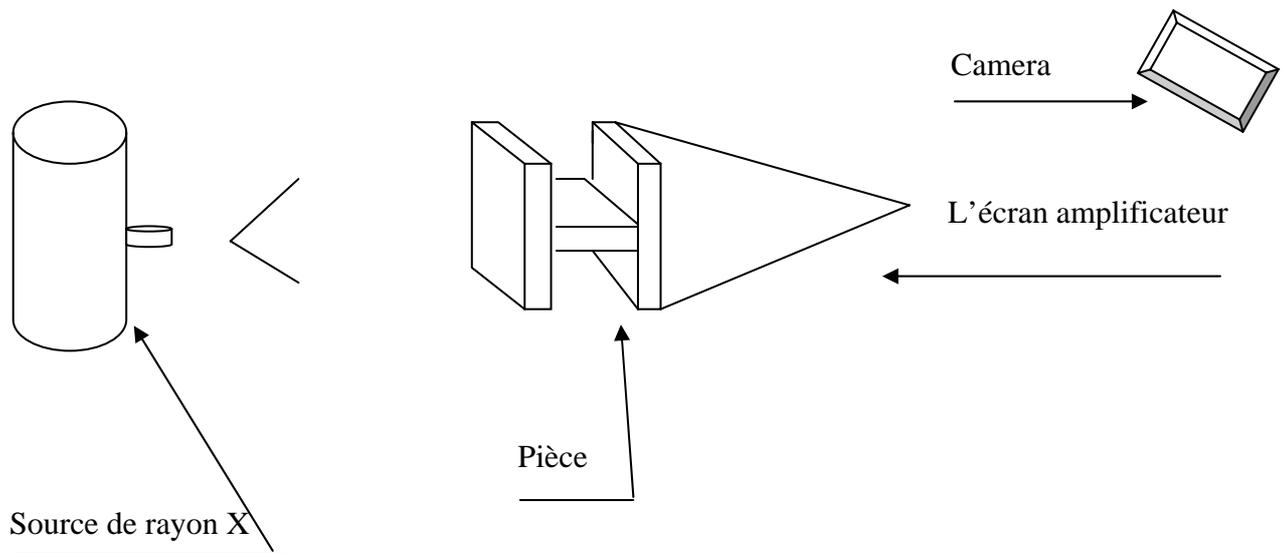


Figure 7.3 Pièces en T en radioscopie (n° :6,7)

### 7.6.3 Pièces circulaires

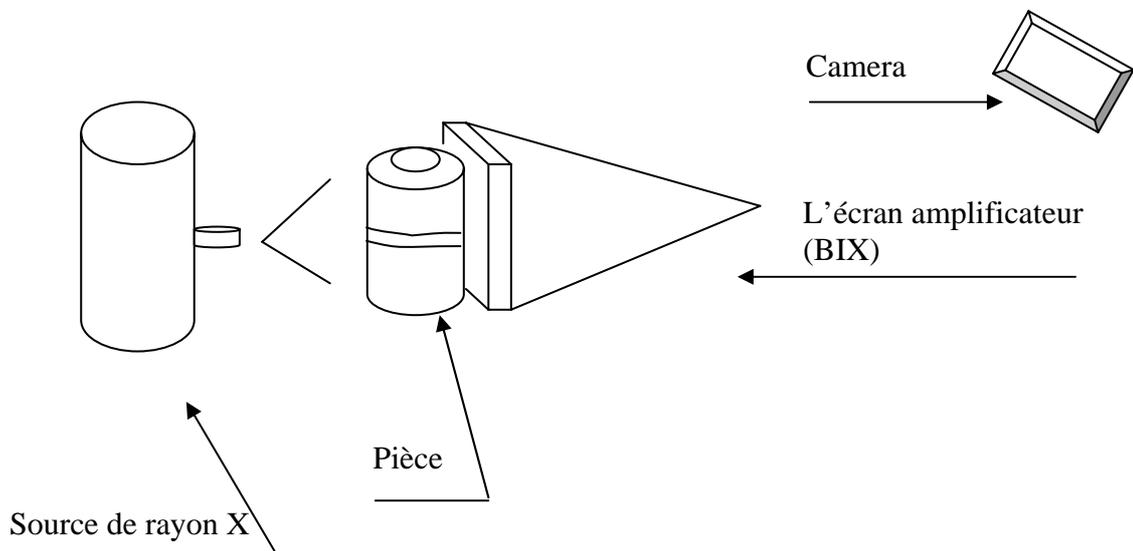


Figure 7.4 Pièces circulaires en radioscopie (pièce n°:3, 4 et5)

## 7.7 Résultats expérimentaux

Les résultats sont donnés sous forme d'images radiographiques en temps réel, pour chaque pièce.

### 7.7.1 Pièce 1

#### 7.7.1.1 Défaut 1 de la pièce 1

Inclusion



Figure 7.5 : Défaut 1 de la pièce 1

- **Inclusion**

Une bande assez large très sombre suivant la longueur du joint .

7.7.1.2 Défaut 2 de la pièce 1

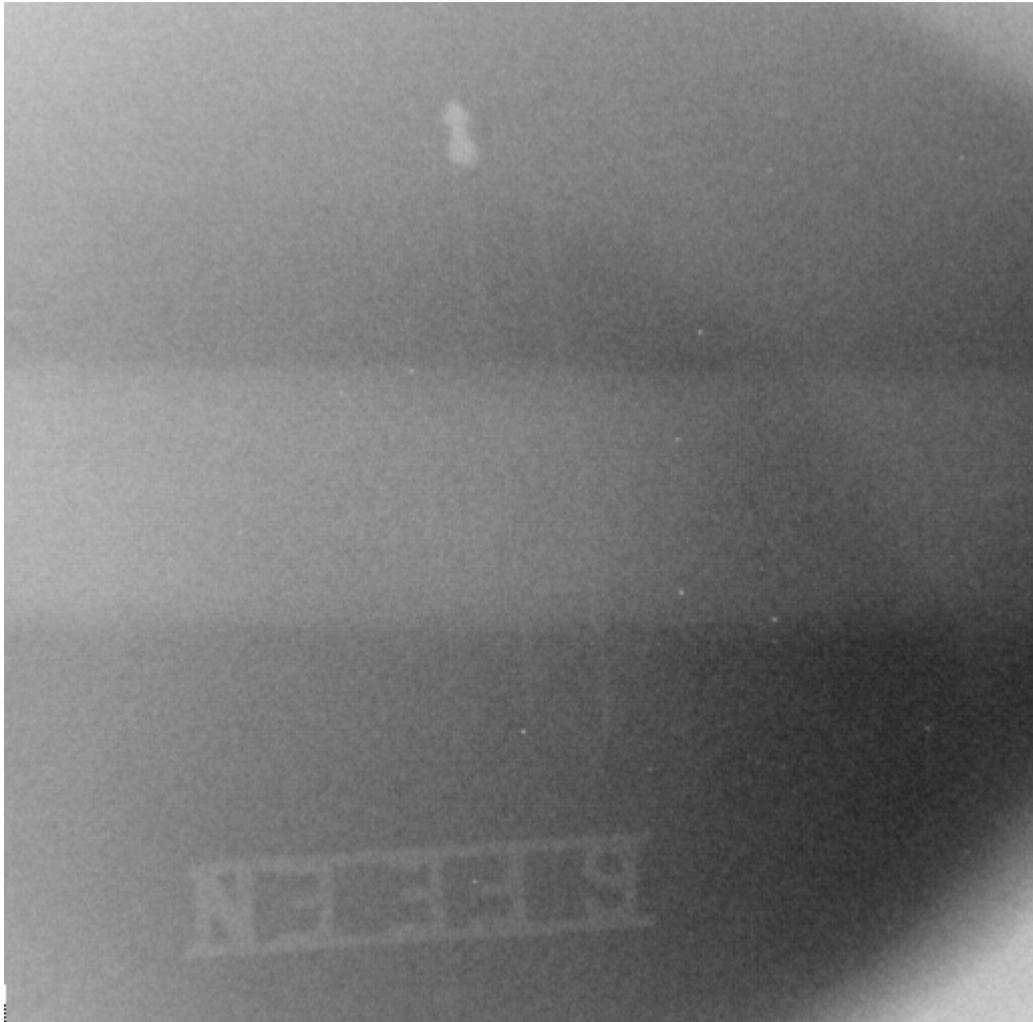
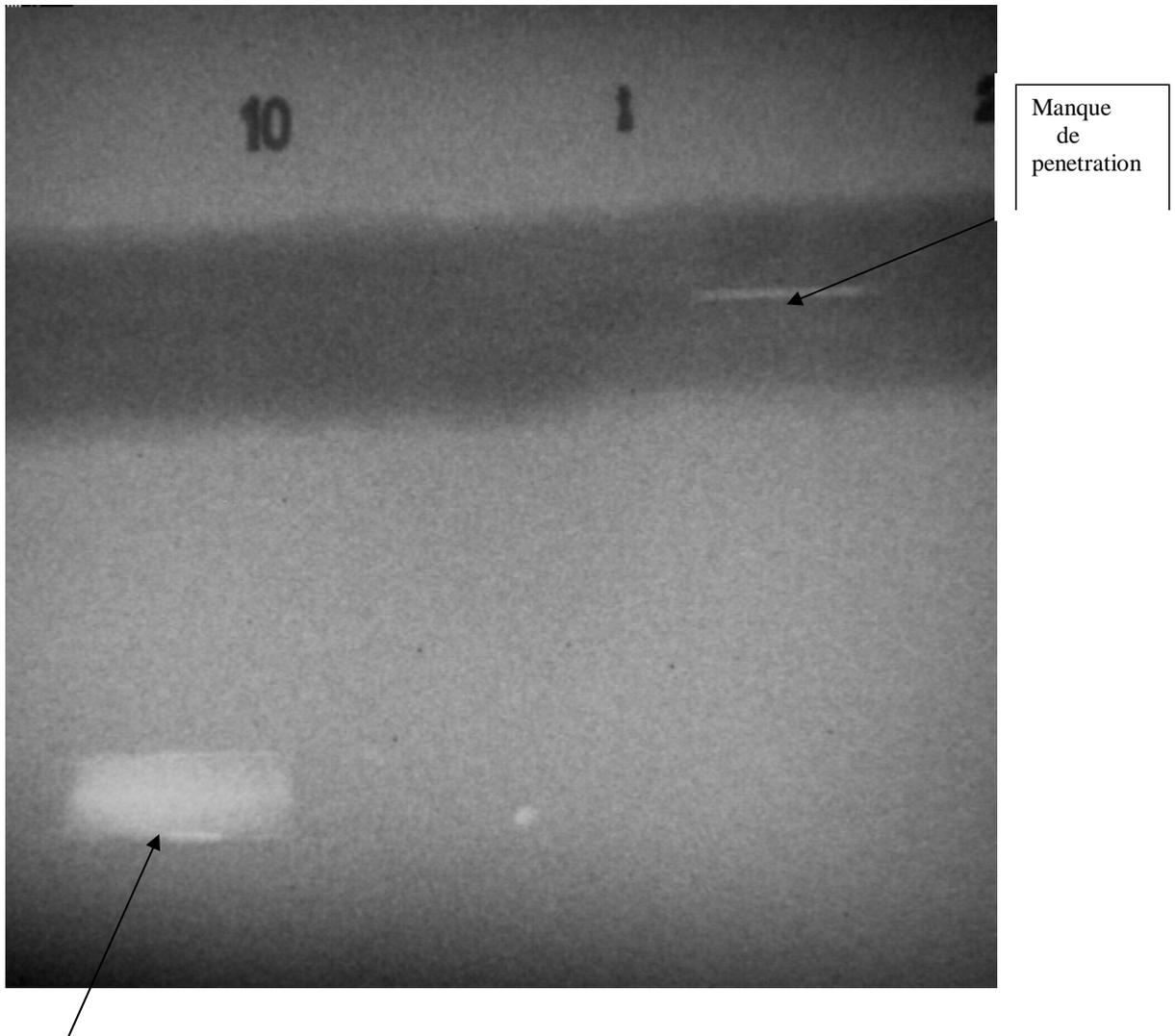


Figure 7.6 : Défaut 2 de la pièce 1

- **Pas de défaut.**

## 7.7.2 Pièce 2

### 7.7.2.1 Défaut 1 ,2 de la pièce 2



Laminaire

Figure 7.7 : Défaut 1, 2 de la pièce 2

- **Manque de pénétration**

Les arrêtes de la racine du joint n'ont pas été fusionnées ensemble. L'image radiographique révèle une longue bande de densité plus claire que le joint situé au milieu.

- **Défaut laminaire**

Ce défaut est dû au laminage, en radiographie il apparaît loin du joint et de dimension remarquable.

### 7.7.2.2 Défaut 3 de la pièce 2

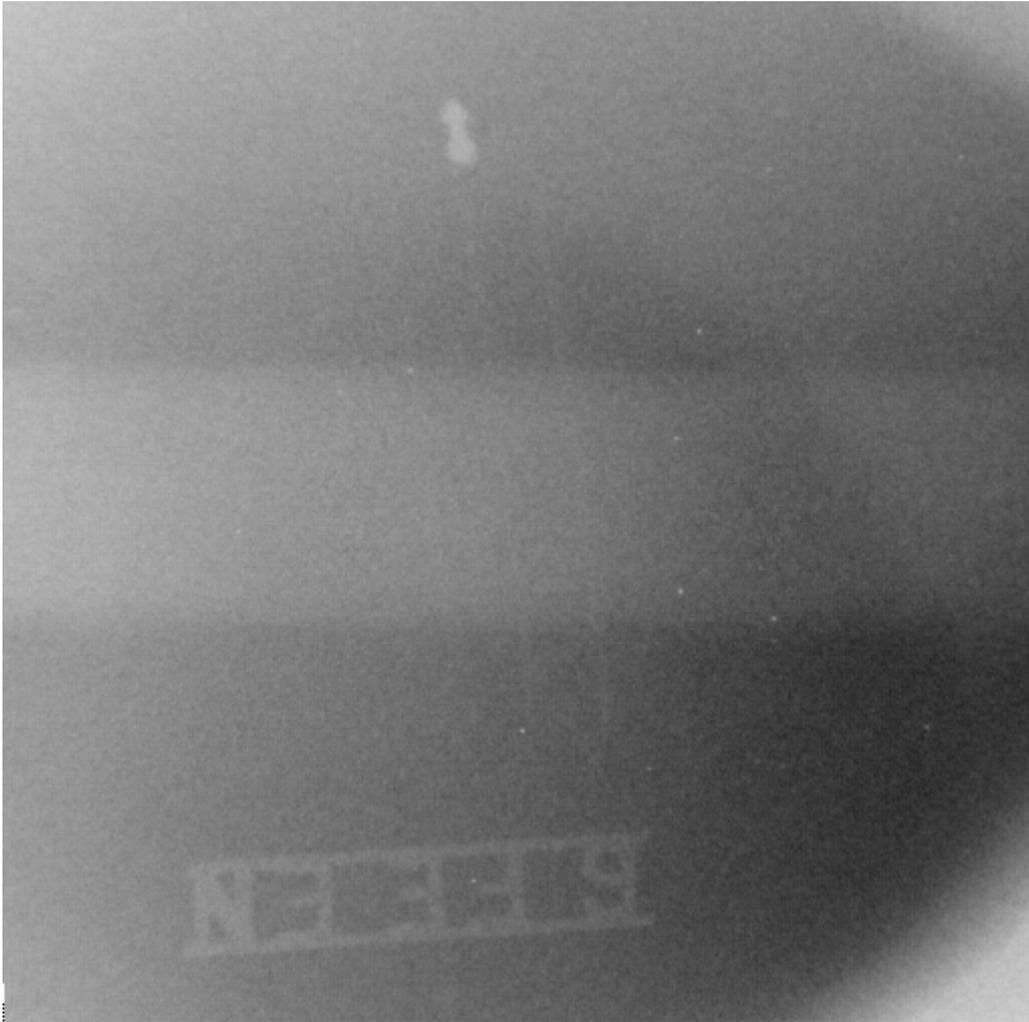


Figure 7.8 : Défaut 3 de la pièce 2

- Pas de défaut.

### 7.7.3 Pièce 3

#### 7.7.3.1 Image du défaut 1 de la pièce 3

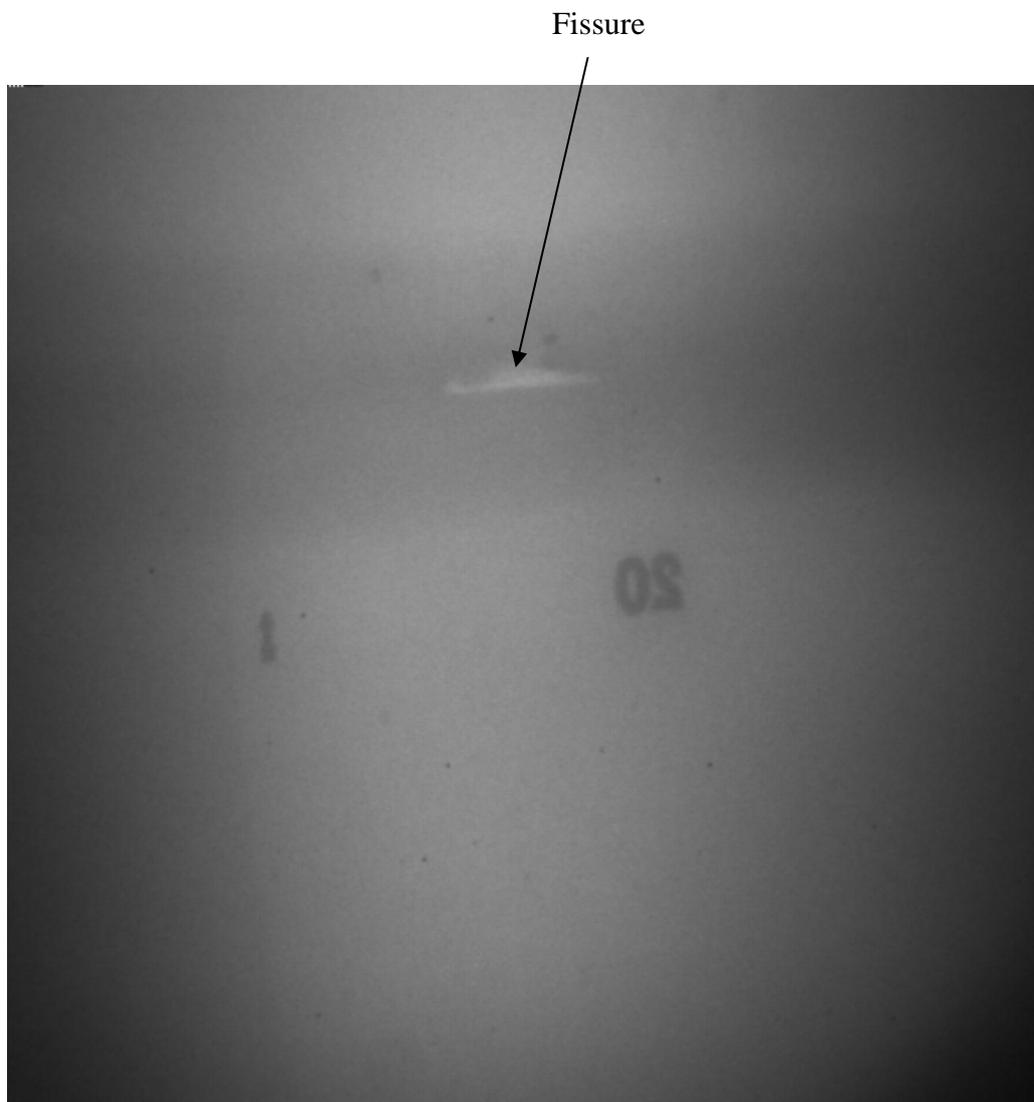


Figure 7.9 : Défaut 1 de la pièce 3

- **Fissure**

Discontinuité produite par une fracture dans le métal. L'image radiographique révèle une fine ligne rectiligne.

### 7.7.3.2 Image du défaut 2

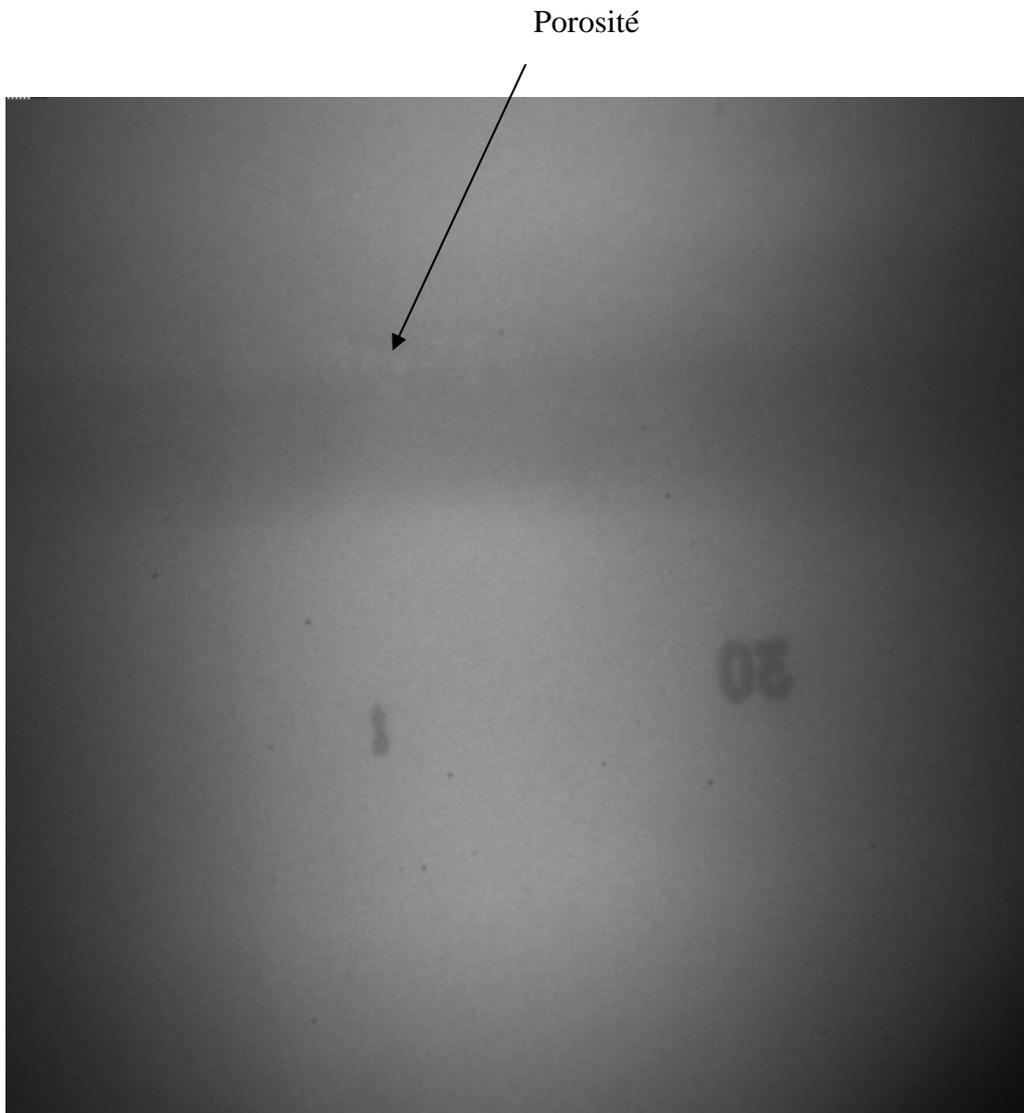


Figure 7.10 : Défaut 2 de la pièce 3

- **Porosité**

Petites poches gazeuses éparpillées, de grosseurs variées. L'image radiographique révèle de petits points clairs de densité, rond ou de forme irrégulière.

#### 7.7.4 Pièce 4

##### 7.7.4.1 Image du défaut 1

Manque de  
pénétration

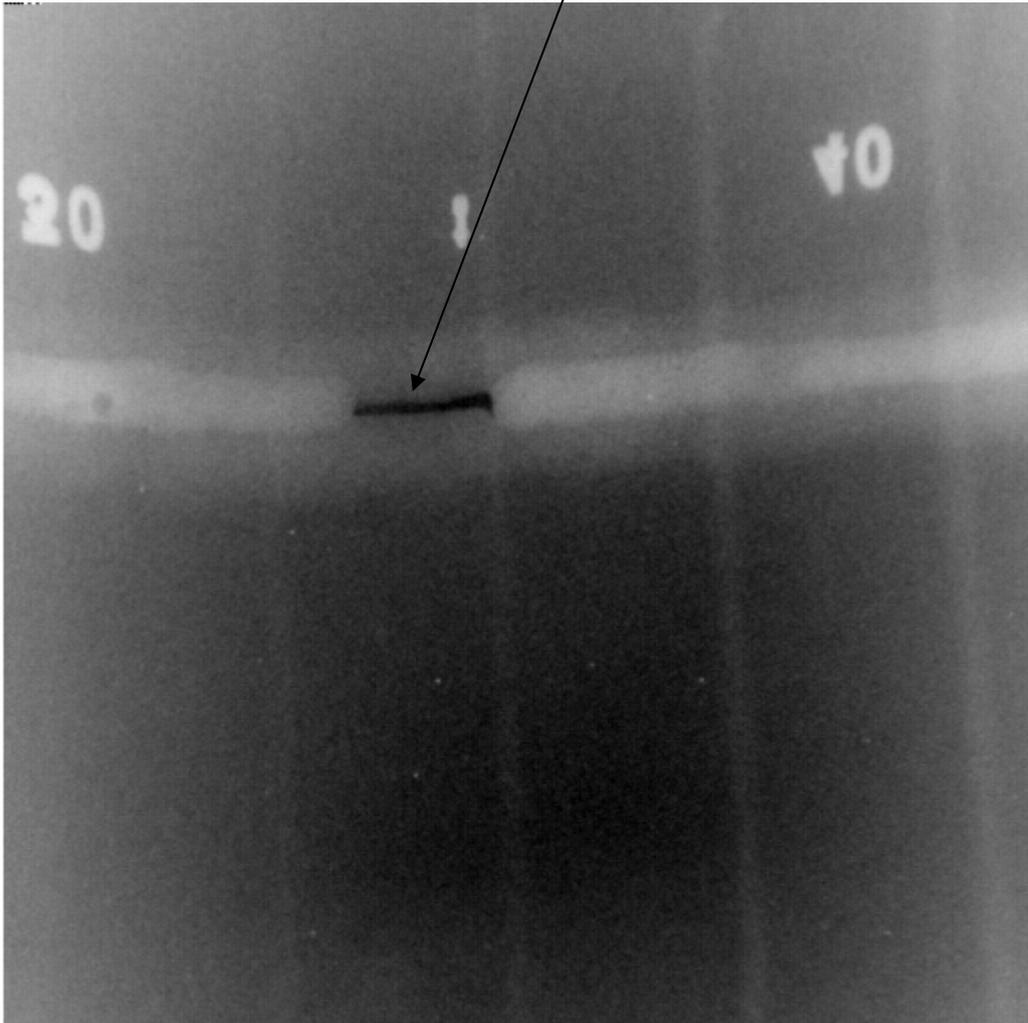


Figure 7.11 : Défaut 1 de la pièce 4

- **Manque de pénétration**

### 7.7.5 Pièce 5

#### 7.7.5.1 Image du défaut 1

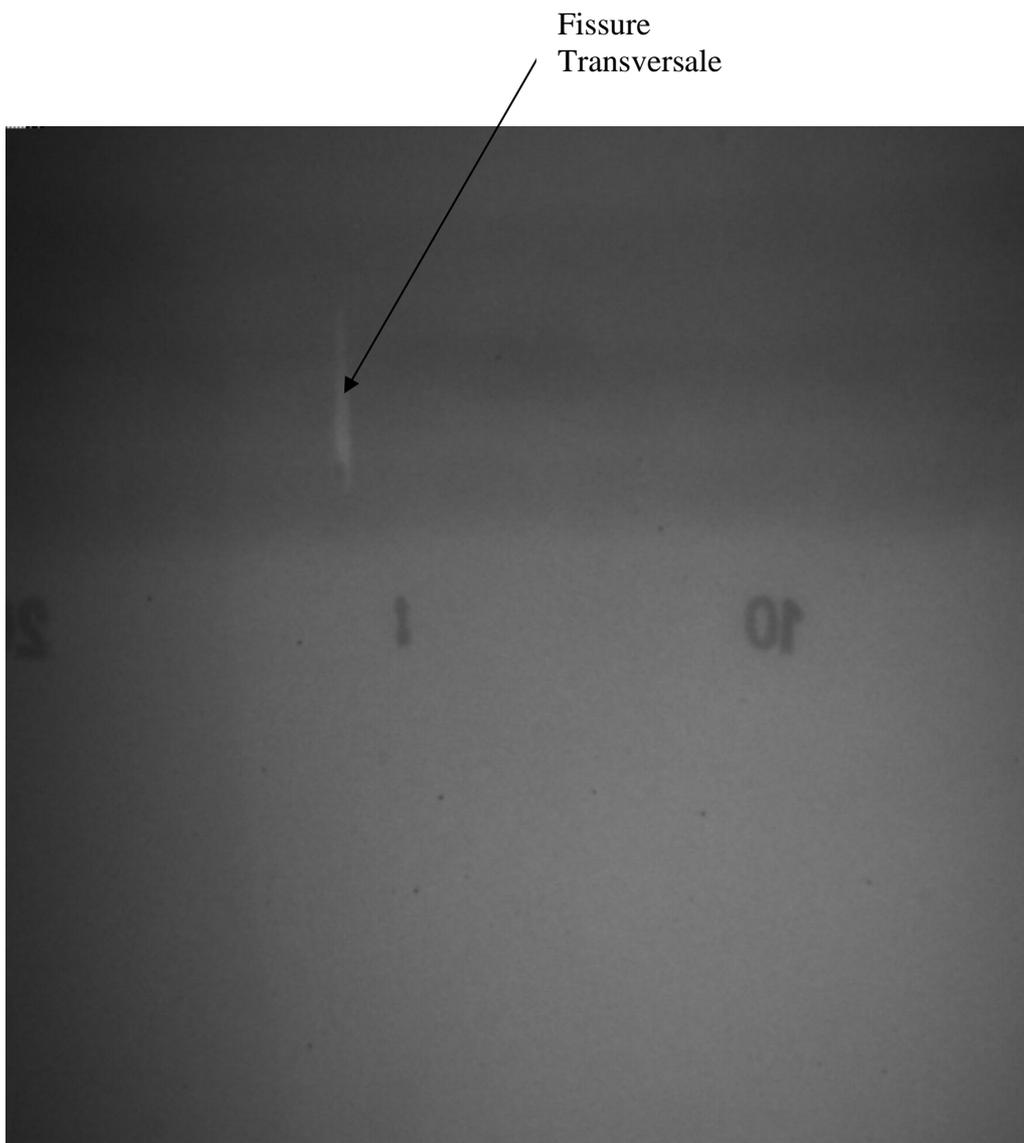


Figure 7.12 : Défaut 1 de la pièce 5

- **Fissure transversale**  
L'image radiographique révèle une bande claire transversale.

### 7.7.5.2 Image du défaut 2

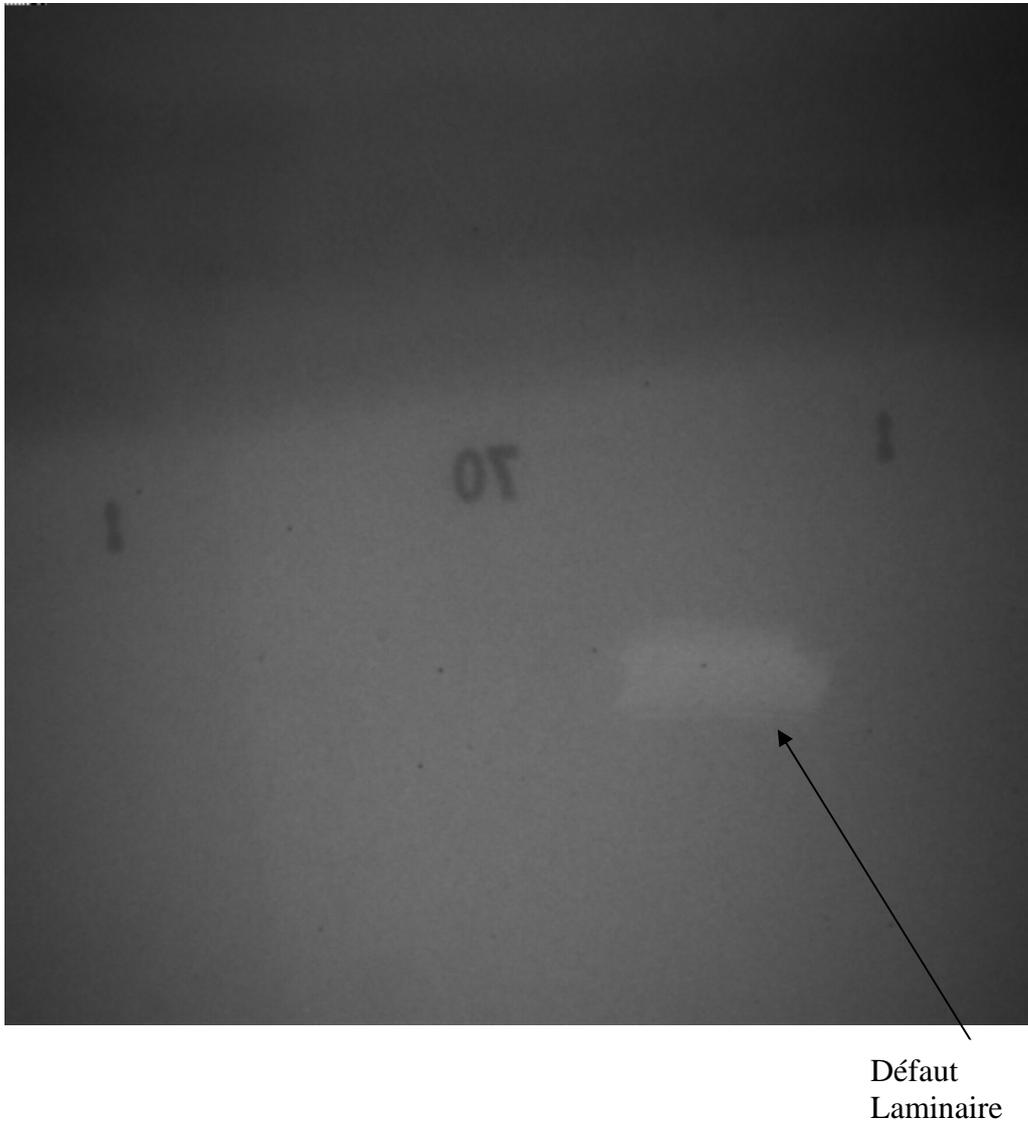


Figure 7.13 : Défaut 2 de la pièce 5

- **Défaut laminaire**

### 7.7.6 Pièce 6

#### 7.7.6.1 Image du défaut 1,2

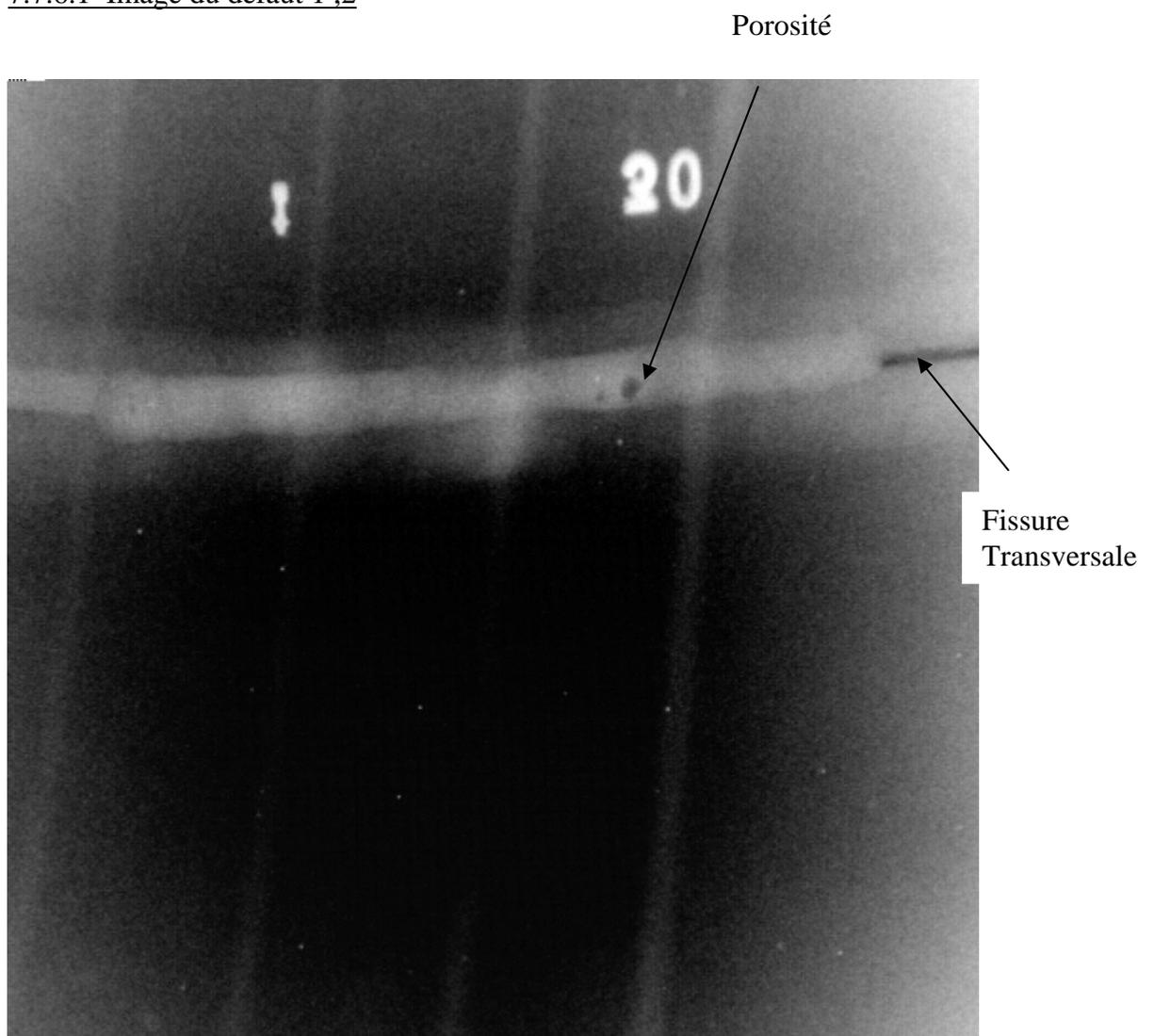


Figure 7.14 : Défaut 1, 2 de la pièce 6

- **Porosité.**
- **Fissure transversale.**

### 7.7.7 Pièce 7

#### 7.7.7.1 Image du défaut 1

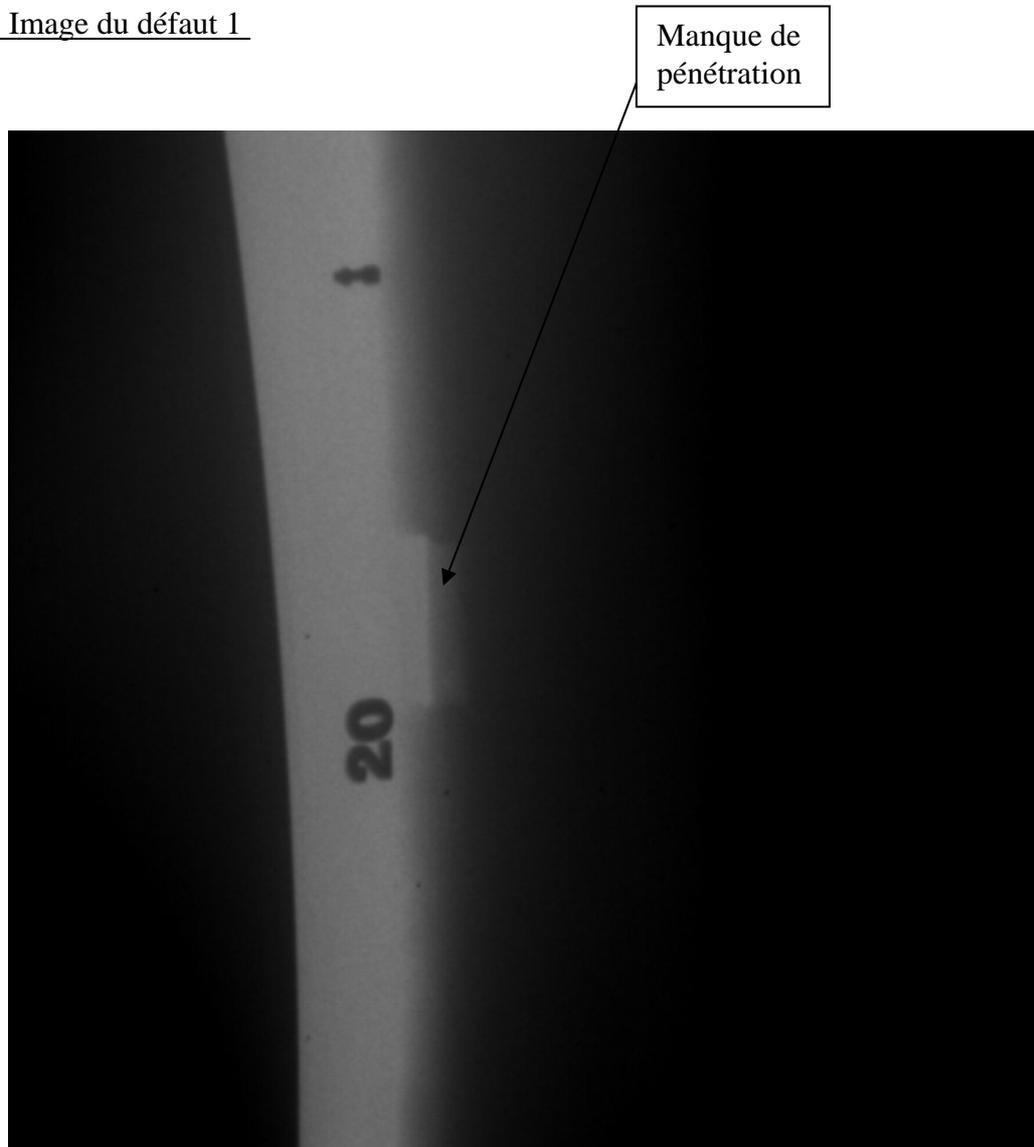


Figure 7.15 : Défaut 1 de la pièce 7

- **Manque de pénétration**

## 7.8 Tableau récapitulatif

Tableau 7.2 : Résultats des différents échantillons

N	Contact			Immersion		Radioscopie		Réelle	
	Type	D(mm)	P(mm)	D(mm)	P(mm)	D(mm)	P(mm)	D(mm)	P(mm)
Pièce 1	1	inclusion	28	10	30	13.26	45	30	13
	2	Fissure à la pénétration	16	24	18	28.89		18	22
	3	Fissure	30	15	29	15.50		29	15
Pièce 2	1	Laminaire	23	15	30	11.04		30	16
	2	Manque de fusion	15	15	15	11.00		15	14
	3	Manque de pénétration	36	13	35	16.50	25	35	14
Pièce 3	1	Fissure	20	10	16	11.90	25	16	08
	2	Porosité	19	10	20	11.97	30	20	13
	3	Fissure	34	01	34	04.00		34	00
Pièce 4	1	Manque de fusion	36	09	36	14.77		36	11
	2	Manque de pénétration	20	10.31	19	11.82	25	19	10
	3	Manque de fusion latérale	25	03	25	06.03		25	03
Pièce 5	1	Laminaire	25	11	27	12.58	32	27	10
	2	Fissure	02	04	20	05.18	32	20	03
	3	porosité	32	12	32	14.00	35	32	11
Pièce 6	1	Fissure	27	23	27	24.34		27	24
	2	Manque de pénétration	19	20	19	20.11	28	19	23
Pièce 7	1	Inclusion	27	27	35	36.00	45	27	35
	2	Manque de fusion	20	31	31	29.10		24	31
	3	Manque de fusion	20	32	31	Non détecte		20	31

## 7.9 Commentaires du tableau

Le tableau 7.2 expose indirectement les limites des trois méthodes : ultrasons par contact, par immersion et la radioscopie, vis à vis la détection des défauts.

Les résultats obtenus montrent que la méthode des ultrasons par contact a pu détecter pratiquement tous les défauts quelque soit leurs nature, leurs positions, et l'orientation de ceux -ci.

La grande sensibilité de la méthode aux défauts, facilite la détection. En effet elle permet en temps court d'obtenir des résultats visualises mais désormais non enregistrés.

Le contrôle par contact nécessite moins de matériel mais plus de personnel qualifiant qui rend l'exploitation de cette méthode difficile

A partir du tableau , on remarque que les profondeurs calculées en contrôle par immersion sont loin des valeurs réelles , mais il faut comprendre que les valeurs en temps correspondantes indiquent la différence entre la strie du joint et le défaut.

Contrairement à la méthode par contact, l'orientation du défaut en contrôle par immersion joue un rôle important sur la détectabilité de celui -ci. Un palpeur droit détecte rarement un défaut mal orienté, pour cela on utilise un palpeur à angle ; d'ou la compréhension et l'interprétation des échos devient une tache difficile.

L'avantage présenté en radioscopie est que les résultats obtenus sont significatifs, instantanés et encore facile à interpréter. Cette méthode de contrôle ne permet pas de déterminer la profondeur des défauts. Elle mesure les dimensions de ceux -ci avec une erreur du au choix du foyer.

## CONCLUSION

Ce mémoire était l'objet d'une comparaison de deux méthodes de contrôle non destructif : Les ultrasons et la radiographie. Pour cela nous avons commencé par donner une idée générale sur les différentes méthodes de contrôle non destructif, la mise en œuvre de chacune ,les Avantages ainsi que les inconvénients de chaque méthode.

Après avoir donné les principes fondamentaux de la théorie de la propagation des ultrasons dans les matériaux et qui est basée essentiellement sur les simplifications apportées au cas le plus général : milieu anisotrope, nous avons déduit les équations des vitesses longitudinales et transversales en fonction des propriétés du matériau.

La conversion de mode régie par la loi de Snell- Descartes nous a servi lors de la détection des défauts mal orientés et nous a permit d'incliner le palpeur selon le besoin.

Une étude détaillée était consacrée à la radiographie dans le but de se familiariser avec l'instrumentation lors de la manipulation.

Le travail expérimental a porté sur des pièces soudées, de forme différentes avec des défauts introduits volontairement pour pouvoir comparer les techniques d'ultrasons et la radiographie.

Nous avons en premier lieu contrôlé toutes les pièces par ultrasons par contact, les résultats obtenus étaient satisfaisants de point de vue possibilité de détection de tout les défauts quelque soit leurs natures (plans ou volumiques) à l'aide d'un matériel simple à manipuler.

La méthode par contact est très sensible comparée à d'autres méthodes de contrôle. En effet elle permet de détecter de petits défauts soit en ondes longitudinales ou transversales, même s'ils se trouvent très proche les uns des autres (pouvoir de résolution élevé).

Le contrôle par ultrasons par immersion a le même principe que par contact. La différence primordiale entre les deux est le couplant (eau) qui facilite la mise en œuvre de la technique. Cette technique bien que plus précise quand elle est possible, nécessite néanmoins des moyens beaucoup plus coûteux.

Nous avons vu que l'écart numérique entre les profondeurs obtenues par les deux méthodes vari d'une pièce à une autre, il est du à la planéité de la surface qui influe sur l'écho obtenu, et intervient directement dans les calculs.

La radioscopie consiste à enregistrer une image formée par des rayons X qui sont plus ou moins absorbés lorsqu'il traversent un objet. Les résultats ont montré que les valeurs des profondeurs obtenues, par radioscopie sont loin de la réalité et c'est du au flou de l'image.

Après tous les développements industriels et les progrès apportés dans la matière, la radioscopie reste désormais limitée vis à vis la détection des défauts en particulier les fissures mal orientées.

La technique de contrôle par ultrasons bien que très peu utilisée en Algérie comparativement à la radiographie pourrait avoir beaucoup de débouchés. En effet les échantillons que nous avons utilisés sont très largement répandus dans l'industrie.

## LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

- $V_S$  : vitesse de l'onde de surface.  
 $V_T$  : vitesse de l'onde transversale.  
 $E$  : module de Young.  
 $C_{ij}$  : constantes élastiques  
 $u$  : déplacement dans la direction  $x$   
 $i$  : angle d' incidence .  
 $i'$  : angle de réflexion.  
 $r$  : angle de réfraction ou de transmission.  
 $V_1, V_2$ : vitesses de propagation de l'onde dans les milieux 1 et 2.  
 $P_r$  : pression réfléchie.  
 $P_i$  : pression incidence  
 $P_t$  : pression transmise  
 $P$  : pression acoustique  
 $U$  : vitesse de vibration des particules  
 $Z$  : impédance  
 $P_0$  : pression initiale  
 $P$  : pression après un parcours  $x$   
 $D$  : diamètre du grain du matériau  
 $V_g$  : le volume moyen des grains  
 $t$  : durée de l'écho.  
 $V$  : vitesse des ultrasons dans l'eau.  
 $PR$  : pouvoir de résolution.  
 $fl$  : largeur du flou  
 $l$  : plus grande dimension du foyer d'émission  
 $D$  : distance source film  
 $d$  : distance défaut - film  
 $e$  : épaisseur de la pièce.

$X$	: distance entre l'écho de défaut et l'écho de la face arrière
$P_s$	: trajet lu sur l'oscillogramme.
$\alpha$	: Angle de réfraction.
$\sigma$	: Coefficient de Poisson.
$\rho$	: Masse volumique.
$\sigma_{ij}$	: contrainte exercée sur chaque face
$\varepsilon_{xz}$	: composantes d'une déformation
$\lambda$ et $\mu$	: constantes de Lamé
$\Delta$	: Dilatation volumique.
$\alpha_s$	: coefficient de diffusion
$\alpha$	: Coefficient d'atténuation.
$\alpha_A$	: coefficient d'absorption

## REFERENCES

1. Ronnie, K. Miller, " Non destructif testing hand book" , second édition , V .S , publie par american society for non destructive testing , (1986-1987).
2. Sapriel, J., "Ultrasons ", Technique de l'ingénieur, Traite électronique.
3. Harold, B., "destructive testing standard ", ASTM special technical publication, American society for testing and material, (1947).
4. "ultrasons –propagation des ondes ultrasonores", Niveau 2, 3<sup>eme</sup> édition.
5. " la pratique du contrôle industriel par ultrasons ", Tome II, personnel d'encadrement de formation et de recherche ensam.
6. Hireskorn, P. W., Van Andel, U. Netzelmann, " Ultrasonic Methods to Defect and Evaluate Damage in Steel", Non destructive Testing and evaluation ,V.15,(2000).
7. " Research technique in non destructive testing", V.4, (1980).
8. Saniie, J., Wang, T., Bilgutay, N. M., " Analysis of homomorphic processing for ultrasonic grain characterization , IEEE transaction on UFFC ,V.36, N°3, (1989).
9. Barralis, J., Maeder, G., " Métallurgie", tome 2, ENSAM (1983).
10. Dickinson, R. J., " Refection and scattering in physical principles of medical ultrasonic", (1986).
11. Hireskorn, S., acoustic journal, V. 72, N°3, (1982).
12. Mason, W. P., McSkimin, H. J., acoustique journal, V.19, N°3, (1947).
13. Stanke, F.E., Kino, G.S., acoustic journal, V.75, N°3, (1984).
14. Hireskorn, S., acoustic journal, V. 77, (1985).
15. Hireskorn, S., acoustic journal, V. 79, (1986).
16. Hireskorn, S., acoustic journal, V. 83, (1988).
17. Turner, J. A., Weaver, R. L., acoustique journal, V.96, (1949).
18. Robert, L., " Etude par microscopie acoustique de l'influence des irradiations sur des aciers

inoxydable" , Thèse de doctorat université de Montpellier, (1994).

19. Goebbels,K., Research technique in NDT , V.4,(1980).
20. Pelletier, J. L., "la pratique du contrôle industriel par ultrasons ", Tome II, collection scientifique école nationale supérieure d'arts et Métiers, (Nov. 1984).
21. Agfa , G. , " Radiographie industrielle " ,(1988 ) .
22. Dugrillon , D. , " contrôle non destructif par rayonnements ionisants ,( Décembre 1990) .
23. Sonaspection, " Weld test specimen NDE reports " , (7/06/2001).
24. . Banks , B . , Rawding , . H. , Oldfield , . GE. , " la détection ultrasonique des défauts "
25. Cousin, M., " Radiographie contrôle industriel " , stage de perfectionnement de niveau II
26. Taylor, J L., "Basic Metallurgy for non destructive testing", British institute of non destructive testing".
27. Hamidi, H., " propagation des ondes de Raleigh en présence de fissures application à l'évaluation de la profondeur des fissures débouchant en surface ", Faculté de physique , Thèse de magister spécialité matériaux et composants ,(03/2003 ) .
28. Niclos , L. , Frielinghans , .R . , Kaule , .W . "ultrasonic testing of materials " , second edition, Springer –verlage Berlin –New York, (1977).
29. Maurice, B., Sapriel , J. , " l'acousto optique " , (1976 ) .
30. Berrezeg , M. , Slimane , A. , " modélisation de l'instrumentation d'une chaîne de contrôle par ultrasons " , Thèse d'ingénieur en électronique option contrôle ,( Décembre 97)
31. Stein , P. , Woodard ,P. , Hull ,.R. , " Gadolinium – Enhanced Magnétique Resonance Angiography for detection of Acute pulmonary Embolism " , American college of chest phycians , V. 124 , (December 2003 ) .
32. Halimi, R., Benyahia , .N. , " Influence des grosseurs des grains sur les paramètres ultrasonores " , Thèse d 'ingénieur en mécanique option construction métallique , (Octobre 2001)
33. Giron, P., Pichard , . P., "ultrasons " , centre de formation S G S qualitest.
34. Renault, P., " Radiologie industrielle " , Tome I, Institut de soudage publication de la soudure autogène, (Octobre 1991).
35. Zwingelstein. G., "diagnostique des défaillances –Théorie et pratique pour les systèmes industriels traite des nouvelles technologies, (Paris 1995).

36. Martin, J. L. , "caractérisation expérimentale des matériaux Analyse par rayons X " Tome II, presses polytechniques et universitaires romandes, (1998).
37. Pelletier, J.L. , le tohic ,. Y., Caron, .J. C., " la pratique du contrôle industriel par ultrasons" , Tome I .
38. Burnes , N.T. , " quality assurance of welded construction " , Applied science London and New York , ( 1983 ).
39. Classroom training Handbook Ultrasonic testing, general dynamics, (1967).
40. Programmed instruction Handbook Ultrasonic testing, General dynamics.
41. " contrôle non destructifs ultrasons □, niveau III ingénieurs, centre d'actualisation scientifique et technique, 2 eme édition.
42. Site -X avec SCU 286, Manuel d'emploi, Industriel contrôle machine, Belgique, (15 /07/1997).
43. Ditchburn , R.J, Buttee , . S.K., Scala, C.M., " NDT of welds " , State of the art, NDT international, Vol 29, No 2.
44. Laroze , S. , Barrau , J. , " Mécanique des structures " , Tome 1 , Eyrottes Masson, (1988).
45. " Données encyclopédiques " , Hachette Multimédia, (2001).