

1. Contrôle par ultrasons

1.1. Propagation des ultrasons (U.S)

1.1.1. Nature des U.S :

Les atomes qui constituent a matée oscillent autour de leur position de repos sous l'effet d'une onde ultrasonore. Il s'agit donc d'une vibration de la matière : il n'y pas de propagation d'ultrasons dans le vide, bien sûr, mais nous verrons que même dans les gaz, la propagation des ultrasons est très atténuée.

Onde plane de mode longitudinal

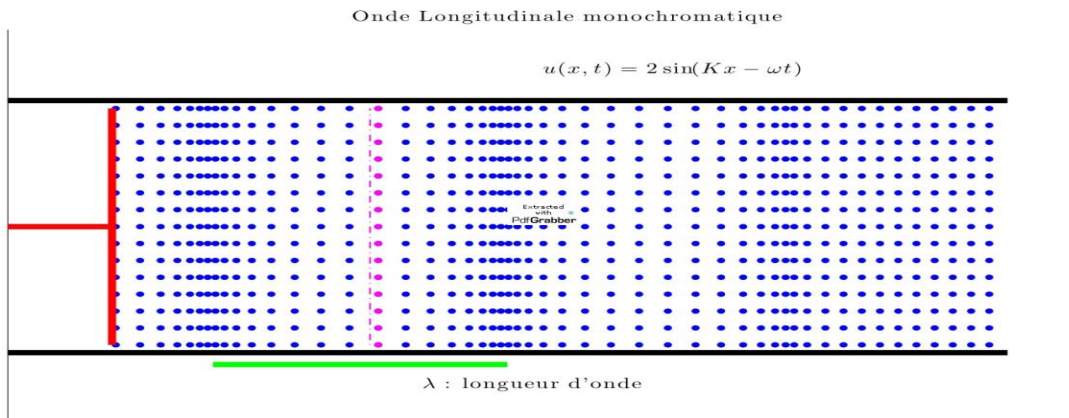


FIGURE 3-1 : ONDE PLANE DE MODE LONGITUDINAL

Onde plane de mode transversal

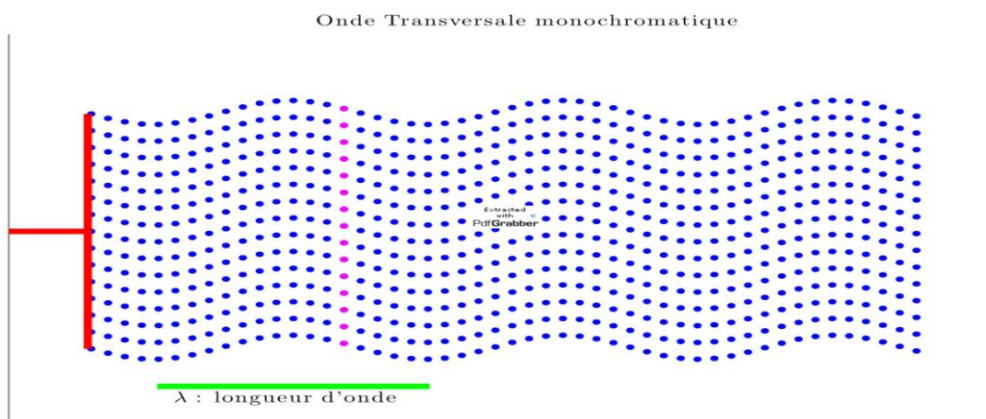


FIGURE 3-2 : ONDE PLANE DE MODE TRANSVERSAL

Le mode transversal fait intervenir des contraintes de cisaillement : de telles contraintes n'existent ni dans les liquides ordinaires, ni dans le gaz. Ainsi, les ondes transversales ne propagent que dans les solides et les liquides très visqueux.

Ondes transversales et longitudinales ne se propagent pas avec la même célérité : leurs

célérités respectives sont notées C_T et C_L et l'on a approximativement : $C_T \approx \frac{1}{2} C_L$

Toutefois, le rapport $\frac{C_T}{C_L}$ varie d'une matière à l'autre et dépend du coefficient de poisson du matériau.

1.1.2. Absorption des ultrasons dans un milieu

Lorsqu'une onde se propage dans un milieu, son amplitude décroît li long de son parcours. L'absorption est à la réaction des atomes voisins.

L'amplitude U décroît suivant une loi exponentielle :

$$U = U_0 e^{-kg}$$

Le coefficient d'amortissement k dépend du matériau ainsi que de la fréquence ν de l'onde ultrasonore.

Ce coefficient, faible dans les métaux, est très grand dans les plastiques et dans les gaz

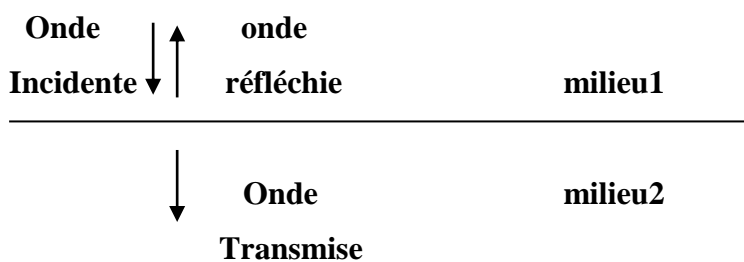
Pour un matériau donné, k est proportionnel à ν^2 . Les hautes fréquences sont donc atténuées plus rapidement que les basses fréquences : c'est l'inverse de ce que 'on observe dans le cas de la propagation des ondes électromagnétique.

Toute cette énergie perdue est transformée en chaleur. On sait utiliser cette dissipation d'énergie :

- Pour le soudage des matières plastiques
- Pour le réchauffage des tissus vivant en médecine.

1.1.3. Transmission des ultrasons entre deux milieux

1.1.3.1. En incidence normale :



Chaque milieu est caractérisé par une impédance caractéristique R donnée par :

$$R = \rho \cdot C$$

Ou : ρ masse volumique du matériau au repos

C célérité des ultrasons dans les matériaux

L'amplitude de l'onde réfléchie varie avec l'écart entre es impédances R_1 et R_2 des deux

milieux.

Si les deux milieux ont des impédances égales, les ultrasons sont entièrement transmis.

Si le milieu 1 est constitué de matière sous forme solide (métal, matière plastique ...) tandis que le milieu 2 est un gaz (air...) la réflexion est total. Une très mince lame d'air suffit pour renvoyer l'onde totalement.

1.1.3.2. Incidence oblique

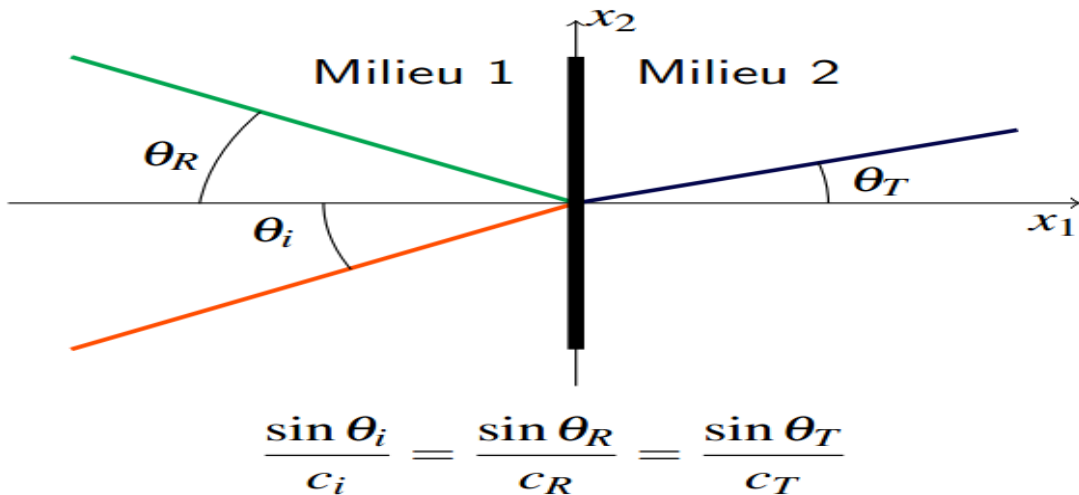


FIGURE 3-3 : FORMULE D'INCIDENCE OBLIQUE

Une onde incidence longitudinale donne donc naissance à deux ondes longitudinales et à deux ondes transversales. On a (loi de snell) :

$$\frac{\sin \alpha}{CL1} = \frac{\sin \alpha L1}{CL1} = \frac{\sin \alpha T1}{CT1} = \frac{\sin \alpha L2}{CL2} = \frac{\sin \alpha T2}{CT2}$$

$$\alpha L1 = \alpha$$

Une onde incidente transversale donnerait des résultats semblables. De la même façon qu'en incidence normale, si le milieu 2 est de l'air, rien n'est transmis.

1.1.3.3. Notion d'angle limite

Il existe une valeur particulière de α pour laquelle $\alpha L2$ Vaut 90° . Dans cette condition, une seule onde est transmise dans le milieu 2 : l'onde de mode transversal.

pour $\alpha L2 = \frac{\pi}{2}$ on trouve :

$$\sin \alpha_{lim} = \frac{CL1}{CL2}$$

Cet angle est appelé premier angle limite. Si α est supérieur ou égale à α_{lim} , l'onde T2 seul pénétrera dans le milieu 2 et nous permettra d'y effectuer un contrôle en incidence oblique.

L'angle α_{T2} correspondant sera donné par :

$$\sin \alpha_{T2} = \frac{CT2}{CL2} \sin(\alpha)$$

Et puisque $\sin \alpha \geq \sin \alpha_{Lim}$, on aura :

$$\sin \alpha_{T2} \geq \frac{CT2}{CL1} \cdot \frac{CL1}{CL2}$$

$$\sin \alpha_{T2} \geq \frac{CT2}{CL2}$$

Si le milieu 2 est de l'acier, on trouve :

$$\alpha_{T2} \geq 33^\circ$$

1.1.4. Production des ultrasons

L'élément essentiel est la pastille piézo-électrique ou transducteur. Soumise à une tension électrique d'excitation très brève (quelques us), la pastille cylindrique entre en résonance. La dimension de la pastille sont liées à a valeur de la longueur d'onde des ultrasons produits.

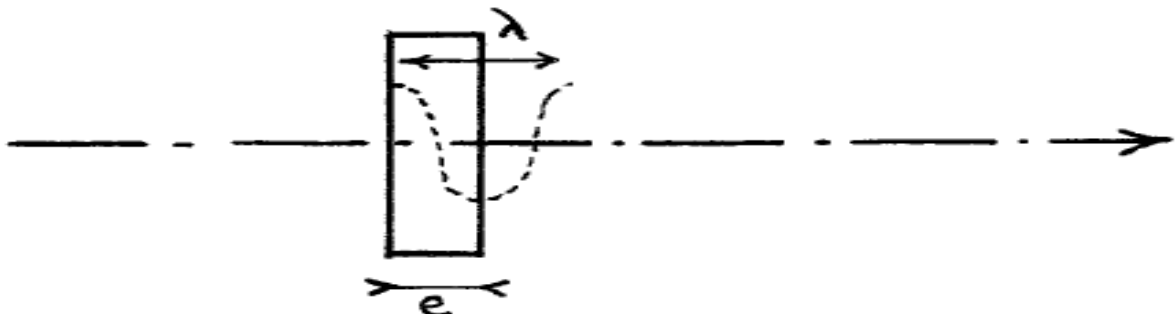


FIGURE 3-4 : PASTILLE CYLINDRIQUE DE DIAMETRE D ET D'ÉPAISSEURS $e = \lambda / 2$

Ces pastilles sont, le plus souvent, des céramiques poly cristallines de titanate de baryum ou de

titanate de plomb.

Ces pastilles sont montées un palpeur.

Palpeur droit : il émet des ondes longitudinales perpendiculairement à sa plaque couvercle

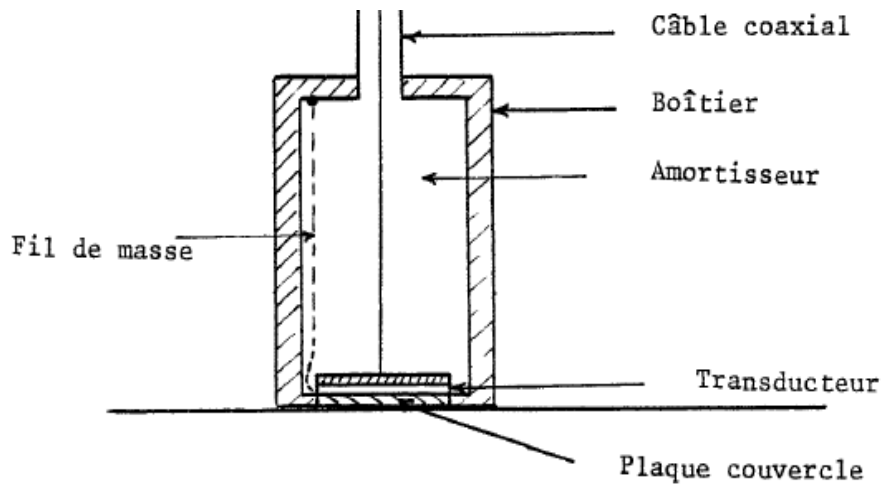


FIGURE 3-5 : SCHEMA D'UN PALPEUR DROIT.

L'onde longitudinale, émise dans la semelle, donne la pièce, une onde transversale. L'onde longitudinale transmise est éliminée (notion de premier angle limite).

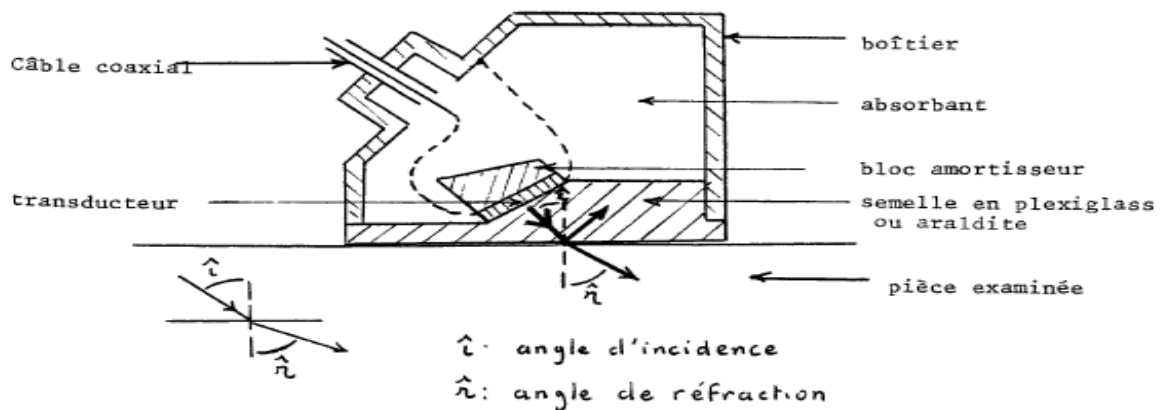


FIGURE 3-6 : SCHEMA D'UN PALPEUR OBLIQUE (OU PALPEUR D'ANGLE)

- Remarque 1 : les ondes ultrasonores ne sont pas produites en continu mais sous forme de trains d'onde

-Remarque 2 : nous avons vu que la transmission des ultrasons était arrêtée par une mince lame d'air. Entre la semelle du palpeur et la pièce on interpose donc un milieu visqueux (huile, graisse, colle à papier dissoute dans l'eau ...).

Tout au long de l'examen ultrasonique, l'opérateur devra s'assurer que les caractéristiques de ce milieu se conservent. Le milieu de couplage influence en effet sur les résultats du contrôle.

Remarquons que les résidus d'huile introduisent une gêne pour l'opération qui doivent être exécutés ensuite sur la pièce (manutention, contrôle radiologique, ...).

-Remarque 3 : la transmission d'onde transversale pure n'est pas possible dans les pièces minces. Pour une fréquence ultrason V (en MHz) et une plaque d'épaisseur e (en mm) :

Si $Ve < 10$ ce sont en fait des ondes de plaque qui prennent naissance

Il faut $Ve > 20$ pour que le contrôle soit possible.

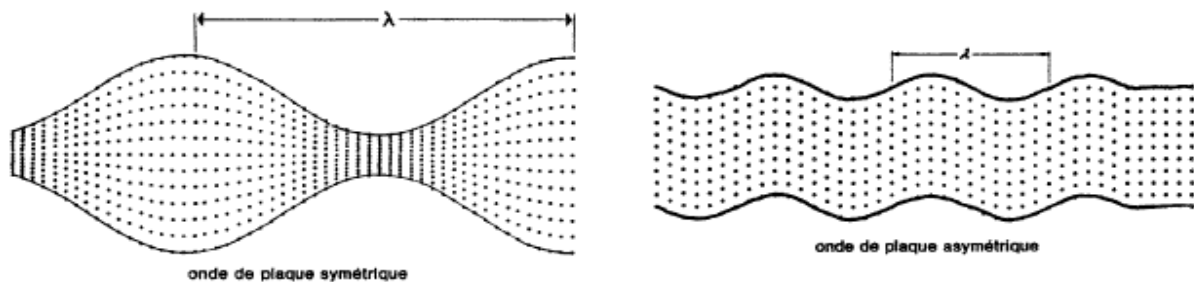


FIGURE 3-7 : ONDES DE PLAQUE

Dans la pratique, un contrôle sur des pièces d'épaisseur inférieure à 10 mm pose de gros problèmes.

Caractéristique des palpeurs courants

- Fréquence : 0.5 ; 1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 10 ; 15 ; 25 ; MHz.
- Angle de réfraction dans l'acier : 0° ; 35° ; 45° ; 60° ; 70° ; 80°.
- Une autre caractéristique importante est la valeur du demi-angle au sommet du cône divergence

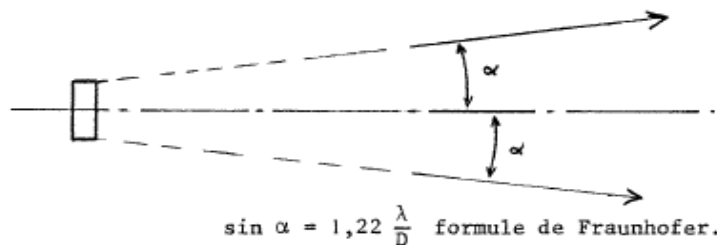


FIGURE 3-8 : FORMULE DE FRAUNHOFER.

Zone proche ou zone turbulente de Fresnel

La région proche de l'émetteur est très perturbée sur une distance z qui, en gros

$$N = \frac{D^2}{4\lambda}$$

Exemple : D=10mm λ = 1.16mm (pour 5 MHZ dans l'acier)
 N= 25mm

Application : on trouve (à côté des palpeurs normaux) des palpeurs dits miniatures .

Qui se caractérisent par un rapport $\frac{\lambda}{D}$ fort.

(Valeurs moyennes arrondies)				
Matériau	Masse volumique (10 ³ kg/m ³)	Vitesse des ondes longitudinales (m/s)	Vitesse des ondes transversales (m/s)	Impédance acoustique (10 ⁶ kg m ⁻² s ⁻¹)
Aciers	7,8	5 900	3 250	46
Fonte	7,2	4 600	2 150	33
Aluminium	2,7	6 300	3 100	17
Cuivre	8,9	4 700	2 250	42
Laiton	8,5	4 500	2 100	38
Béton	2,5	4 500		11
Muscle	1,0	1 600		1,6
Araldite	1,2	2 500	1 050	3
Plexiglas	1,2	2 700	1 100	3,2
Verre	2,5	5 650	3 400	14
Huile	0,8	1 500		1,2
Glycérine	1,3	1 900		2,5
Eau	1,0	1 480		1,5
Mercure	13,6	1 450		20
Quartz	2,7	5 750		15
Titanate de baryum	5,7 1,3 · 10 ⁻³	4 400 330		35 4 · 10 ⁻⁴
Air				

TABLEAU 3-1 : Tableau du Vitesses et impédance acoustique.

1.2. Principe du contrôle par ultrasons

1.2.1. Méthode par écho- présentation de type A

La méthode la plus utilisée est dite « méthode par écho ». Sa mise en œuvre la plus courante est appelée ‘ présentation de type A’.

Très souvent, on utilise un seul palpeur qui fonction tantôt en émetteur et tantôt en récepteur

pour recevoir les échos.

Le temps mis par l'écho pour faire le trajet aller-retour est proportionnel à la profondeur à laquelle se situe le défaut. La position du défaut est donc connue avec précision.

1.2.2. Méthode par écho – autres présentations

On observe, de nos jours, un développement du contrôle automatique (au moins pour les pièces de géométrie simple).

Le contrôle automatique aux ultrasons peut être facilité par une technique dite 'Par immersion'.

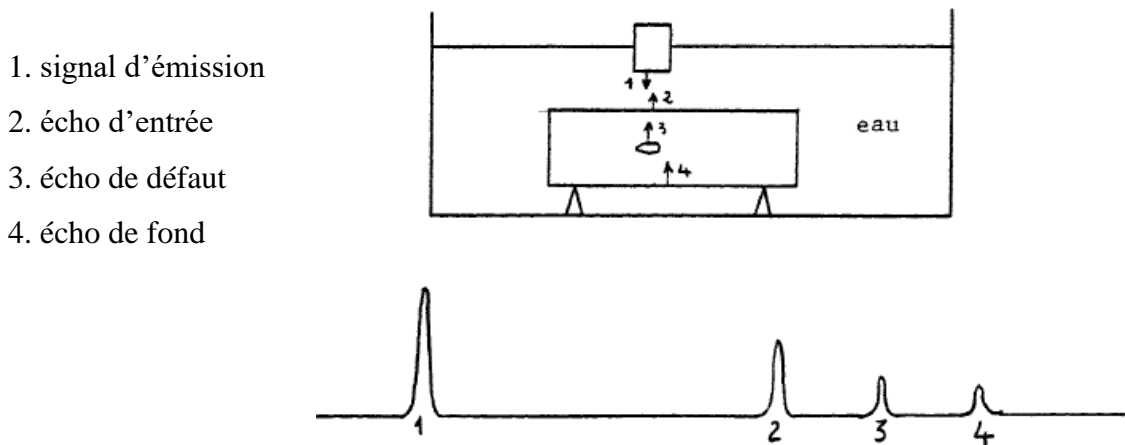


FIGURE 3-9 : TECHNIQUE IMMERSION : PIECE ET PALPEUR SONT IMMERGÉS SANS ETRE EN CONTACT

La célérité des ondes l'eau est environ 4 fois faible que dans l'acier et le décalage entre 1 et 2 est grand.

Les avantages sont :

- examen d'objets rugueux sans du palpeur
- examen à grande vitesse en conservant un couplage constant.

Par contre :

- l'équipement est plus complexe
- seules les pièces de petites dimensions conviennent
- l'eau et l'acier ayant des impédances acoustiques très différentes forte proportion de l'énergie est réfléchi à l'entrée dans la pièce .

Il est néanmoins possible d'assurer une exploration automatique de la pièce. Nous citerons en exemple la présentation de type B.

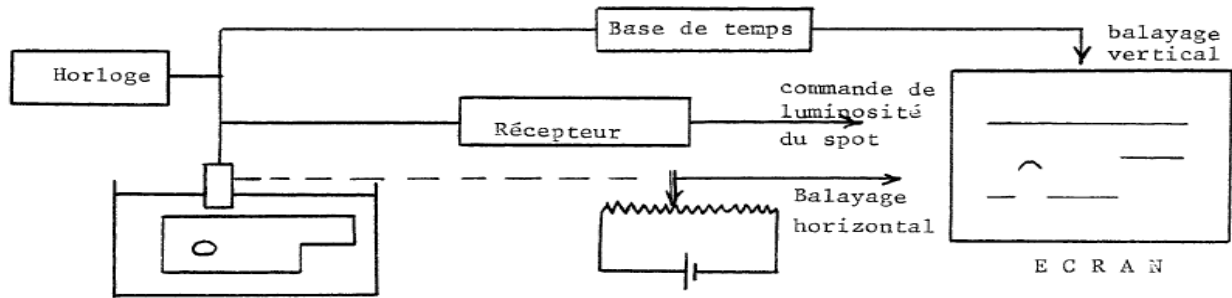


FIGURE 3-10 : ECHOGRAPHIE DE TYPE B

- la base de temps commande cette fois le balayage vertical
- le palpeur est mobile suivant une droite et commande le balayage horizontal
- les échos modulent la luminosité du sept.

1.3. Limites de la méthode

1.3.1 Taille et orientation des défauts

1.3.1.1. Défaut plan

Ce sont des défauts qui aux ultrasons donnent des échos intenses. Si le plan du défaut est perpendiculaire au faisceau, la détection est facile. Sinon, elle est difficile, voire même impossible.

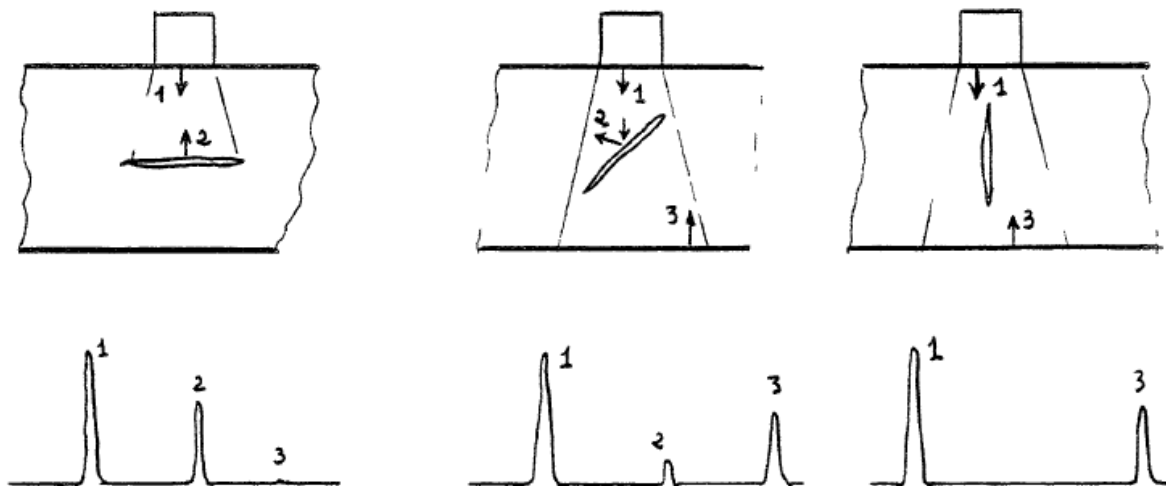


FIGURE 3-11 : LES DEFAUTS ET SON ECHOS.

Attention, les défauts plans étant toujours déformés, la réponse n'est pas toujours liée à la surface du défaut ou à l'angle du défaut par rapport au faisceau. La profondeur du défaut dans la pièce est bien déterminée, mais pas son épaisseur.

La détection des défauts plans est nette mais il importe de choisir plusieurs angles de réfraction dans le matériau.

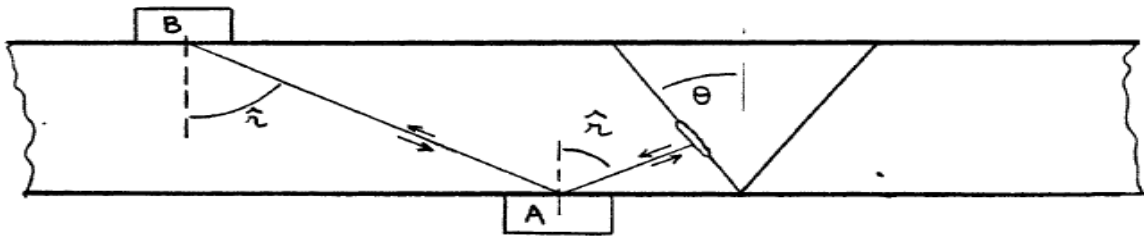


FIGURE 3-12 : EXEMPLE DE RECHERCHE D'UN COLLAGE DANS UNE SOUDURE EN V.

Exemple de recherche d'un collage dans une soudure en V

On choisit un angle α lié à l'angle Θ du chanfrein. La recherche avec le palpeur en A risque d'être rendue difficile par l'influence des perturbations de la zone proche. L'écho peut même être caché par le signal d'émission (zone morte de l'ordre de quelques mm).

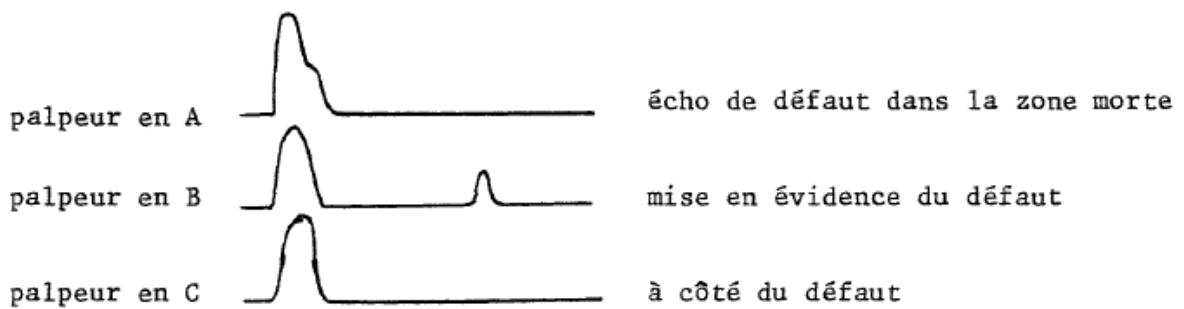
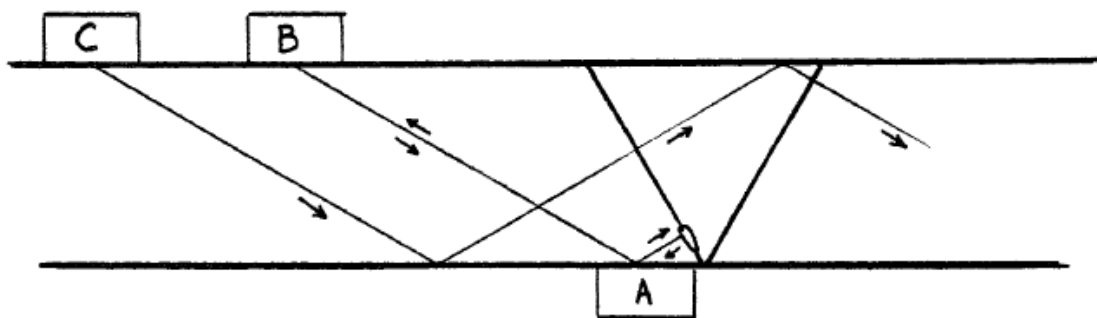


FIGURE 3-13 : PRESENTATIONS DES DEFAUTS AVEC SON ECHOS DE L'EXEMPLE PRECEDENT.

1.3.1.2. Défauts volumiques

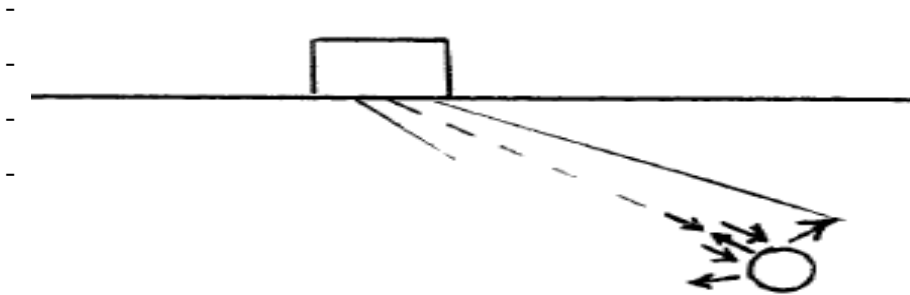


FIGURE 3-14 : TECHNIQUE POUR DETECTER LES DEFAUTS VOLUMIQUES.

- donnent un écho faible s'ils sont de petite taille.
- L'angle d'incidence importe peu.

Il faut bien songer qu'à la limite, on ne peut pas détecter les soufflures. Une multitude de petites inclusions va donner un fond continu nommé « fine herbe ».

1.3.1.3. Résolution des contrôles US

L et W représentent respectivement la longueur et la largeur du train d'ondes au niveau de la zone défectueuse.

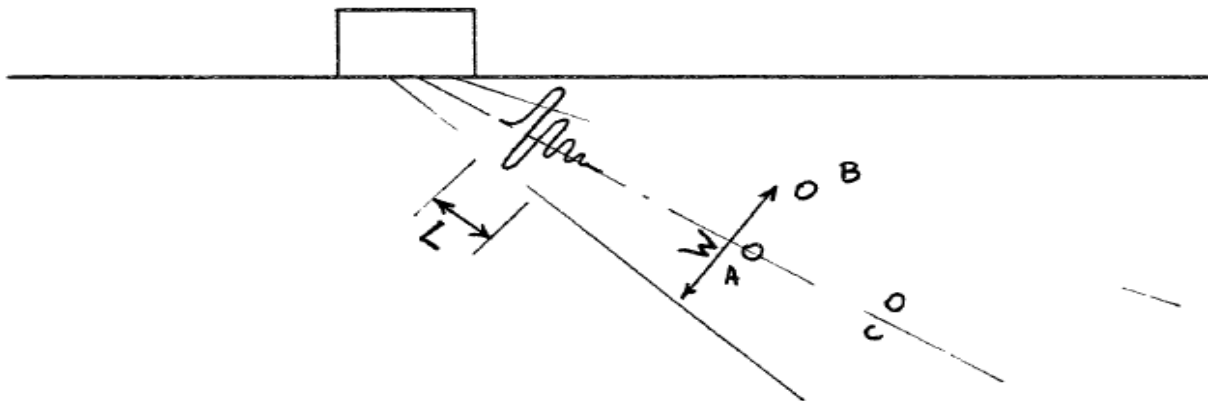


FIGURE 3-15 : RESOLUTION DES CONTROLES US

A et B seront distincts s'ils sont distants de $w/2$, ce qui peut être énorme si le faisceau est large. Un faisceau correspond à un palpeur ayant une forte divergence ou à un défaut situé à une grande profondeur. Il est toujours utile, lorsqu'un défaut a été repéré à une profondeur donnée, d'affiner le contrôle en choisissant un nouveau présentant un faisceau étroit dans la zone intéressante. On peut ainsi arriver à des valeurs de $w/2$ de l'ordre de quelques mm.

A et C seront distincts pourvu que, sur l'écran du tube cathodique, les échos soient séparés par $L/2$.

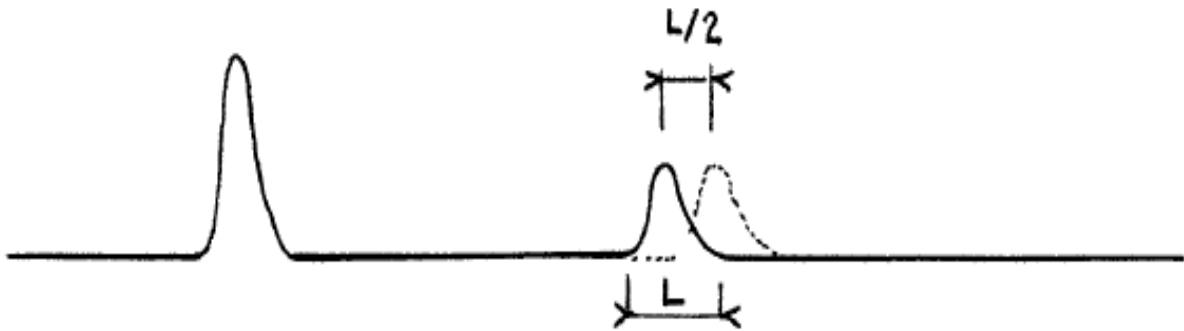


FIGURE 3-16 : SIGNALE PRESENTE LA SEPARATION DE A ET C.

Ceci sera vérifié si A et C sont séparés, dans la pièce, par une longueur $L/4$. Une valeur typique de résolution est 3 mm mais avec des palpeurs très amortis on peut descendre plus bas.

Au total, deux défauts seront considérés comme un défaut unique s'ils sont contenus dans un ellipsoïde défini par la figure suivante :

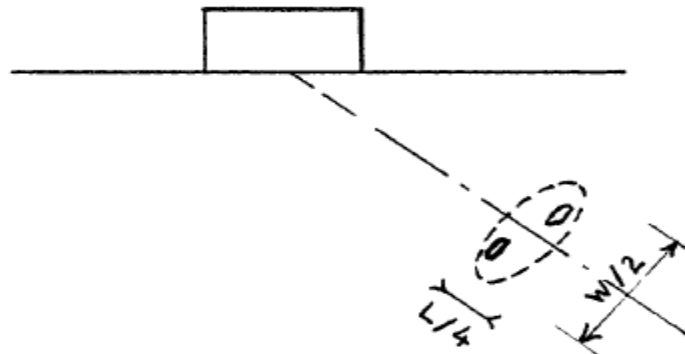


FIGURE 3-17 : DEFINITION DU LA CONSIDERATION DE DEUX DEFAUTS COMME UN DEFAUT UNIQUE.

Remarque : si le défaut qui se trouve devant est un défaut plan, il empêche la mise en évidence des défauts situés derrière lui. Il faut attaquer la pièce par l'autre face, ou avec incidence différente.

1.3.2. Influence des matériaux examinés

Avec le laiton, les aciers austénitiques et l'inconel, de gros problèmes apparaissent : l'atténuation est forte et les échos en retour sont difficilement lisibles. La taille des grains importante provoque une dispersion du faisceau lorsque la taille des grains devient comparable à $\lambda/2$. On est alors contraint d'augmenter λ c'est-à-dire de travailler à des fréquences très faibles.

Cette diminution de fréquence s'accompagne d'une augmentation de la divergence du faisceau. Valeur de l'angle α pour trois palpeurs de fréquences différentes. (Dans l'acier) :

$$V=10 \text{ MHZ} \quad \alpha = 4^\circ$$

$$V=2 \text{ MHZ} \quad \alpha = 10^\circ$$

$$V=0.5 \text{ MHZ} \quad \alpha = 28^\circ$$

Dans le cas des contrôle de soudures l'acier inoxydable austénitique, le phénomène de dispersion du faisceau ultrasonore est encore accru par l'anisotropie au niveau de chaque grain.

1.3.3. Géométrie de la pièce

1.3.3.1. Pièce mince

Pour des épaisseurs inférieure à 10 mm, il devient impossible de contrôler la pièce avec des palpeurs. Il est possible d'effectuer des contrôles en ondes de plaque mais la précision n'est pas bonne.

Le contrôle de la pièce mince avec un palpeur droit est délicat :

Les défauts se trouvent à coup sûr dans la zone morte du palpeur. Ceci veut dire que l'écho de défaut revient, alors que dernière vibration du signal d'émission sont à peine amorties.

Une solution consiste à utiliser un palpeur double-combiné dans lequel pastille émettrice et pastille réceptrice sont juxtaposées. Le récepteur, qui n'est pas relié à l'émetteur, n'est donc jamais aveuglé et permet de détecter des défauts très proches de la surface (2 mm).

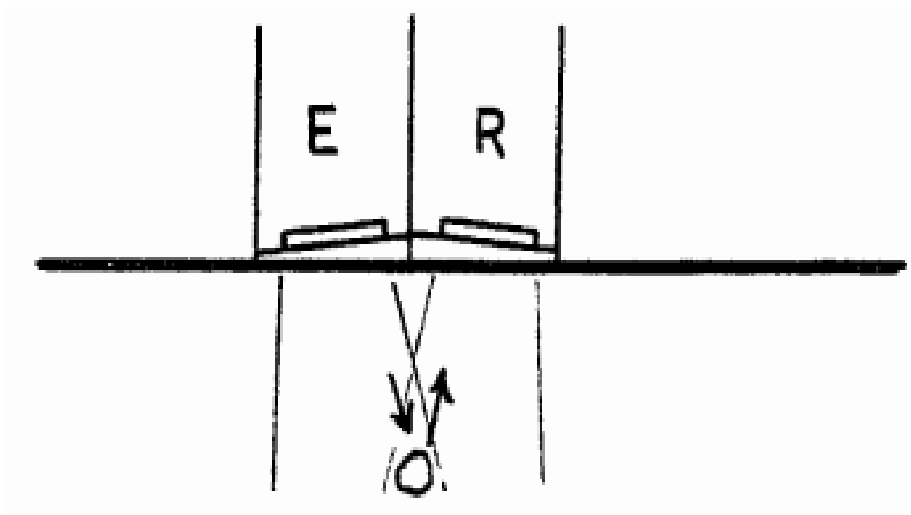


FIGURE 3-18 : SCHEMA D'UN PALPEUR DOUBLE COMBINE.

1.3.3.2. Effets de bords

Les pièces de formes complexes donnent naissance à de nombreux échos parasites.

Le contrôle des pièces cylindriques est délicat :

le coin de huile joue le rôle de prisme et augmenter la divergence du faisceau ultrasonore ce qui peut être à l'origine d'échos parasites.

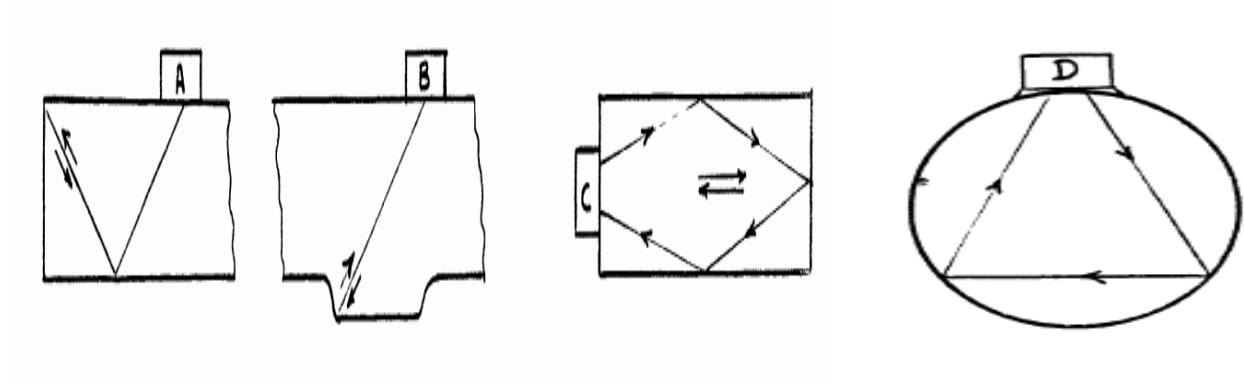
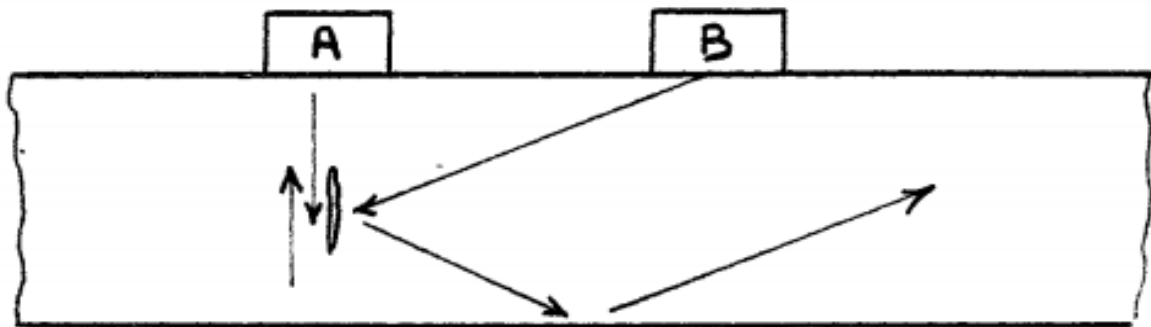


FIGURE 3-19 : TECHNIQUE POUR CONTROLER LES PIECES CYLINDRIQUES.

1.3.3.3. Recherche perpendiculaires à la grande face d'une pièce

Une fissure située dans un plan perpendiculaire à une tôle est difficilement détectable en ce sens que palpeurs droits et palpeurs d'angles ne permettent pas d'obtenir d'écho.



**FIGURE 3-20 : RECHERCHER DES FISSURES PERPENDICULAIRES A LA GRANDE FACE D'UNE
PIECE.**

On utilisera dans ce cas une méthode dite « tandem » avec un palpeur émetteur et un palpeur récepteur.

La recherche des fissures proches de surface est plus aisée.

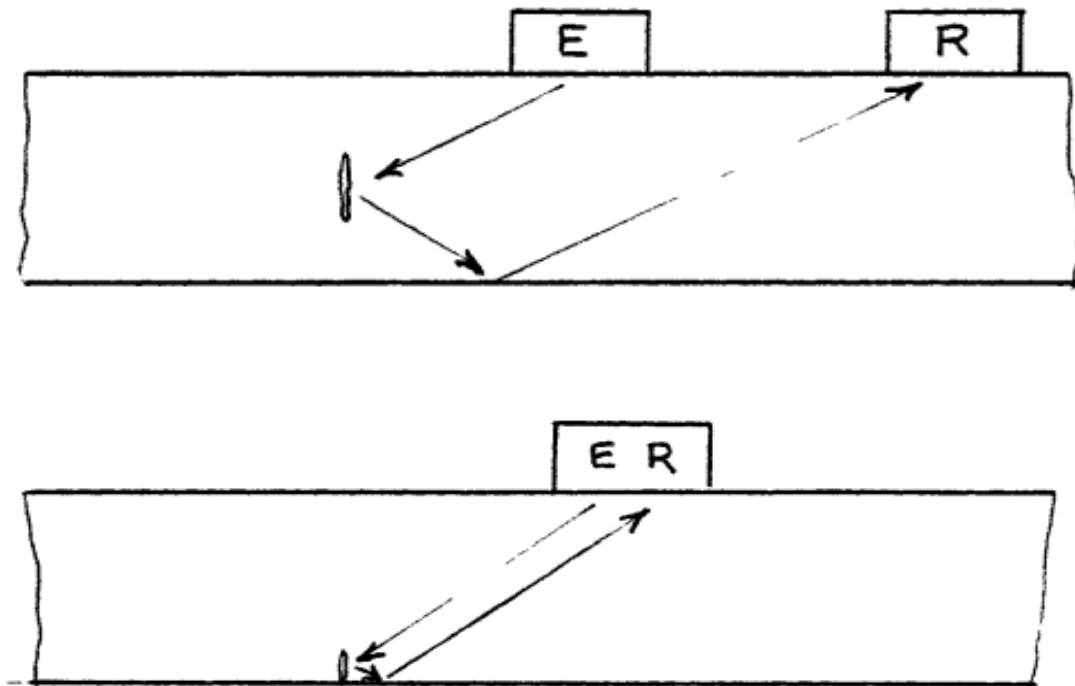


FIGURE 3-21 : LA METHODE DE TANDEM

1.3.3.4. Etat de surface

La pièce brutes de lamina, de forge ou de fonderie se prêtent mal au contrôle. La calamine les oxydes peu adhérents, le mauvais état de surface gênent le contact et usent la semelle des palpeurs.

En fonderie, ou le mauvais état de surface se combine généralement avec des formes complexes, les contrôles ultrasonores sont délicats et peu répandus.

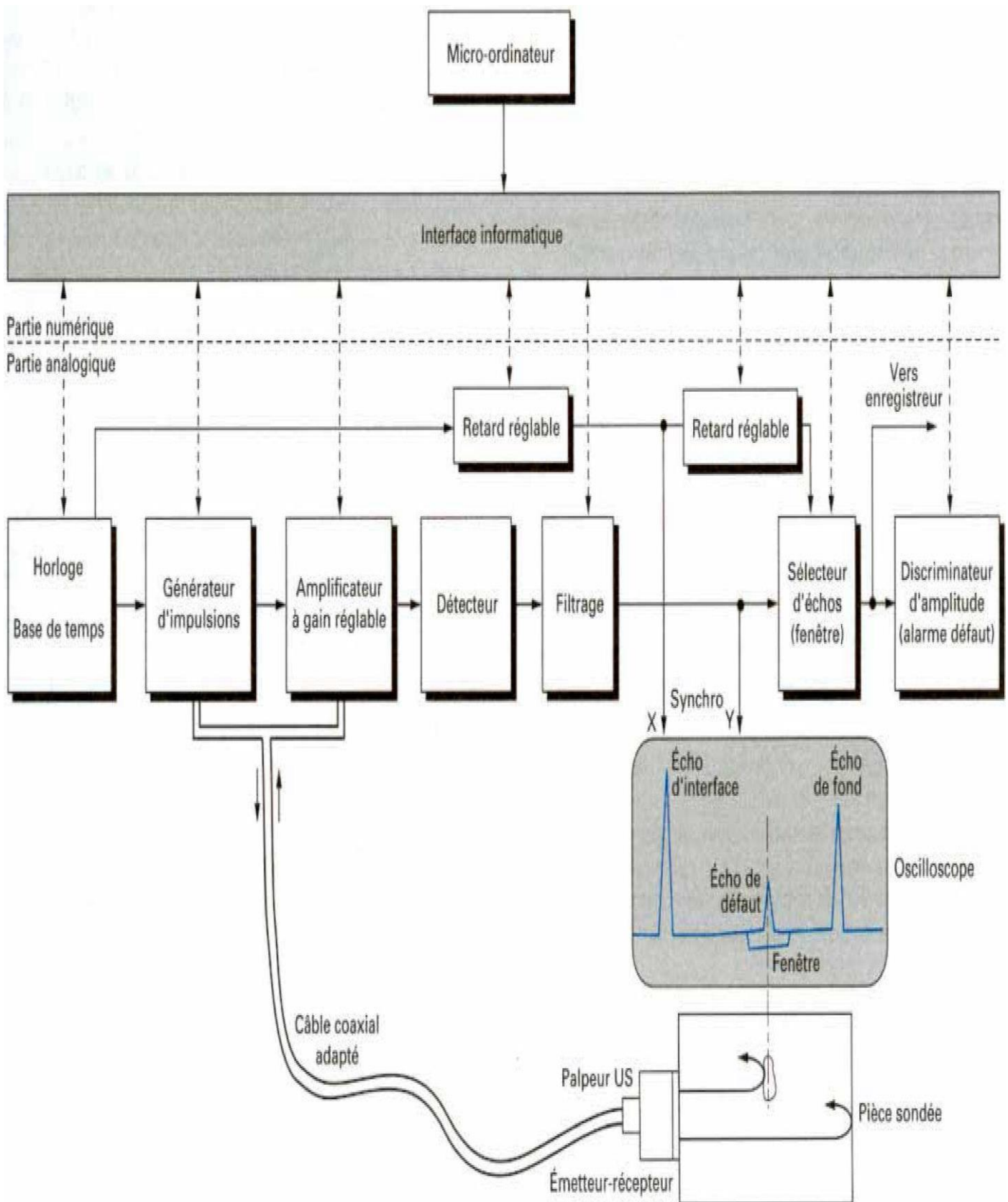


FIGURE 3-22 : SCHEMA DE PRINCIPE D'UN APPAREIL CLASSIQUE DE CONTROLE PAR ULTRASONS

2. Contrôle des soudures et interprétations du résultats

2.1. Définition de la soudure

Le **soudage** est un moyen d'assemblage **permanent**. Il a pour objet d'assurer la continuité de la matière à assembler. Dans le cas des métaux, cette continuité est réalisée à l'échelle de l'édifice atomique. En dehors du cas idéal où les forces intra-atomiques et la diffusion assurent lentement le soudage des pièces métalliques mises entièrement en contact suivant des surfaces parfaitement compatibles et exemptes de toute pollution, il est nécessaire de faire intervenir une énergie d'activation pour réaliser rapidement la continuité recherchée.

2.2. Défaut de soudure

- **Soufflures**

Ce terme désigne un groupe de porosités non débouchâtes. Quand elles sont allongées, on parle de soufflures vermiculaires. Si elles sont débouchâtes, on parle alors de piqûres.

- **Inclusions**

Elles désignent un composé étranger à la soudure et peuvent contenir du tungstène (Cas du Soudage TIG) ou du laitier (Soudage à l'électrode enrobée ou baguette) ou encore des oxydes.

- **Retassures**

C'est le nom donné à l'espace vide créé au sein du métal fondu lors de la solidification (le volume liquide génère un plus petit volume solide), ce défaut peut être typique du procédé de soudage par résistance.

- **Excès de pénétration**

Métal débordant du côté envers du cordon.

- **Collage ou manque de pénétration**

Le métal de base n'est pas fondu, ce qui diminue la section efficace de la soudure. On distingue le collage noir où l'interface entre le métal de base et la soudure est vide (par contrôle radiographique apparaît une tache sombre sur les clichés) et le collage blanc, où l'interface est cette fois-ci comblée par des oxydes fondus (cette variété est indécélable par contrôle radio).

- **Fissure**

On distingue :

- La fissuration à froid causée par la présence combinée de contraintes mécaniques, d'hydrogène protonique et d'une phase fragile,
- La fissuration à chaud (ou plus exactement liquation) créée par la ségrégation dans le joint d'un eutectique à bas point de fusion par exemple et,
- Arrachement lamellaire (inclusions allongées dans le même sens que le sens de laminage de la tôle) au sein du métal (défaut rare qui n'existe presque plus chez les aciéristes qui fabriquent des aciers propres exempt d'inclusion genre « MnS »),
- En ce qui concerne les aciers au chrome ou des aciers inoxydables, la formation de carbures de chrome $Cr_{23}C_6$ qui précipitent au niveau des joints de grains rendant ainsi les zones appauvries en chrome propice au développement d'une corrosion inter granulaire (le chrome pompé par le carbone n'assure plus son rôle de résistance à la corrosion).

- **Morsures :**

Défaut où le métal de base est « creusé » sur une partie du cordon.

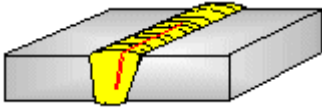
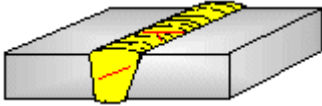
- **Caniveaux :**

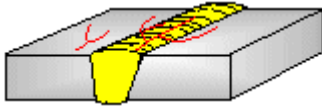
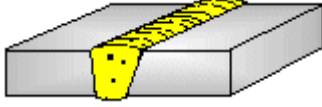
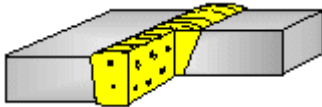
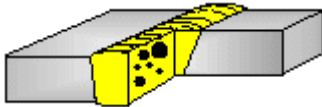

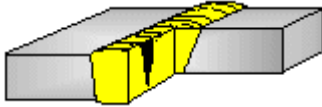
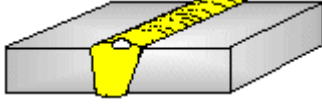
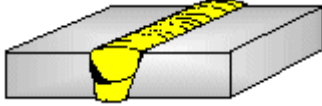

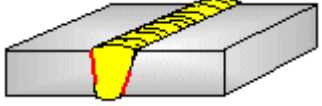

Un caniveau est une morsure de grande taille proportionnellement à la grandeur du

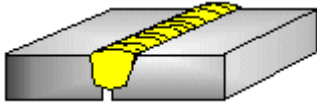
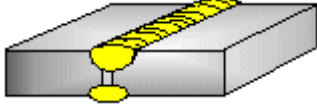









Métal de base due à une trop grande chaleur du métal d'apport par rapport à l'épaisseur

Ou la densité du métal qui reçoit. (Voir mauvais paramètres du générateur de courant

De soudage). Petit creux de chaque côté de la soudure

Numéro	Désignation	Illustration
101	FISSURE LONGITUDINALE	
102	FISSURE TRANSVERSALE	

103	FISSURES RAYONNANTES	
2011	SOUFFLURE SPHÉROÏDALE	
2012	SOUFFLURES UNIFORMÉMENT REPARTIES	
2013	NID DE SOUFFLURES	
2014	SOUFFLURES ALIGNÉES	
2016	SOUFFLURE VERMICULAIRE	
2017	PIQÛRE	
301	INCLUSION DE LAITIER	
304	INCLUSION MÉTALLIQUE	
4011	MANQUE DE FUSION DES BORDS	
4012	MANQUE DE FUSION ENTRE PASSES	

402	MANQUE DE PÉNÉTRATION	
402	MANQUE D'INTERPÉNÉTRATION	
5011	CANIVEAU	
5012	MORSURE	
5013	CANIVEAU A LA RACINE	
502	SURÉPAISSEUR EXCESSIVE	
504	EXCÈS DE PÉNÉTRATION	
5041	GOUTTE OU EXCÈS LOCAL DE PÉNÉTRATION	
507	DÉFAUT D'ALIGNEMENT	
508	DÉFORMATION ANGULAIRE	
511	MANQUE D'ÉPAISSEUR	

515	RETASSURE A LA RACINE	
-----	-----------------------	--

TABLEAU 3-2: TABLEAU DES DEFAUTS DE SOUDURE.

2.2.1. Le contrôle proprement dit

*En ultrason : les spécifications imposent :

- Le type de générateur d’ultrasons.
- Les caractéristiques (défaut de linéarité).
- La fréquence du palpeur.
- Le type de palpeur.
- Le milieu de couplage palpeur- pièce.
- L’état de surface de la pièce.
- L’étalonnage du palpeur (angle de réfraction, point d’émergence.
- Le réglage du générateur (puissance d’émission et amplification de la réception) sur des défauts types ou sur des cales étalons.

Les modalités d’exploration permettant de contrôler la pièce au mieux.

2.2.2. Interprétation des résultats

Le travail ne s’achève pas avec la partie technique du contrôle :

- L’interprétation du contrôle et la discussion sont des étapes fondamentales.
- Les défauts sont souvent à la limite de l’acceptation.

L’interprétation se déroule en quatre temps :

- a) acceptation de la technique de contrôle.
- b) caractérisation des défauts observés.
- c) acceptation des défauts observés.

d) rédaction d'un procès-verbal.

2.2.2.1. Acceptation de la technique de contrôle

La technique mise en œuvre doit être conforme en tous points à la spécification.

***En ultrasons :** le client n'a aucun moyen de contrôle "a posteriori " ! son seul recours est de déléguer des inspecteurs chez le fabricant pendant la durée du contrôle .A moins qu'il ne préfère recommencer le contrôle chez lui, après réception.

2.2.2.2. Caractérisation des défauts observés

- **Nature des défauts**

*En cette procède , il est impossible de connaitre directement la nature exacte d'un défaut. Il est toutefois possible de la deviner d'après la position du défaut dans le cordon et d'après la connaissance que doit avoir l'opérateur (ou l'inspecteur) de la technique de soudage.

La seule distinction que l'on puisse faire est la distinction entre défaut volumiques et défaut plans. Ont procédé, dans ce but, à un examen complémentaire en tournant le palpeur de 10 degrés autour de l'axe du défaut s'il est volumique, l'écho de défaut ne doit pas varier beaucoup, à l'issue de cette rotation de 10 degrés. S'il est plan au contraire, l'écho de défaut doit voir son amplitude diminuer sensiblement puisque l'impulsion ne pas en direction du palpeur.

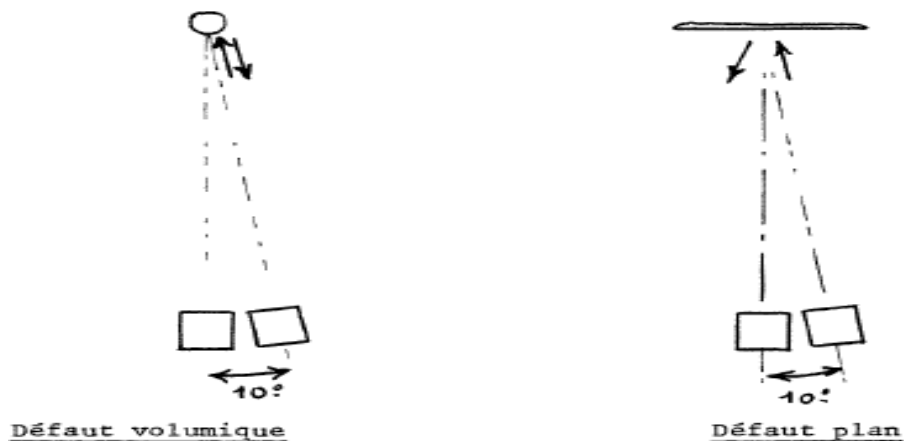


FIGURE 3-23 : VUE DESSUS D'UN DEFAUT DANS UNE PLAQUE PLANE, ET RECHERCHE DU TYPE AUQUEL IL APPARTIENT.

On admet arbitrairement que si une rotation de 10degrés entraine une diminution de l'écho inférieure à 50% (soit 6 dB), le défaut est volumique .dans le cas contraire, il est plan. Cette distinction reste souvent toute théorique car, dans la réalité, les défauts volumiques donnent des

échos très faibles ou même illisibles.

- **Position du défaut dans la pièce**

*En ultrasons, **position** dans le plan et profondeur du défaut sont assez facilement connues.

- **Dimensions du défaut**

*En ultrasons, il est très difficile de connaître la taille des défauts.

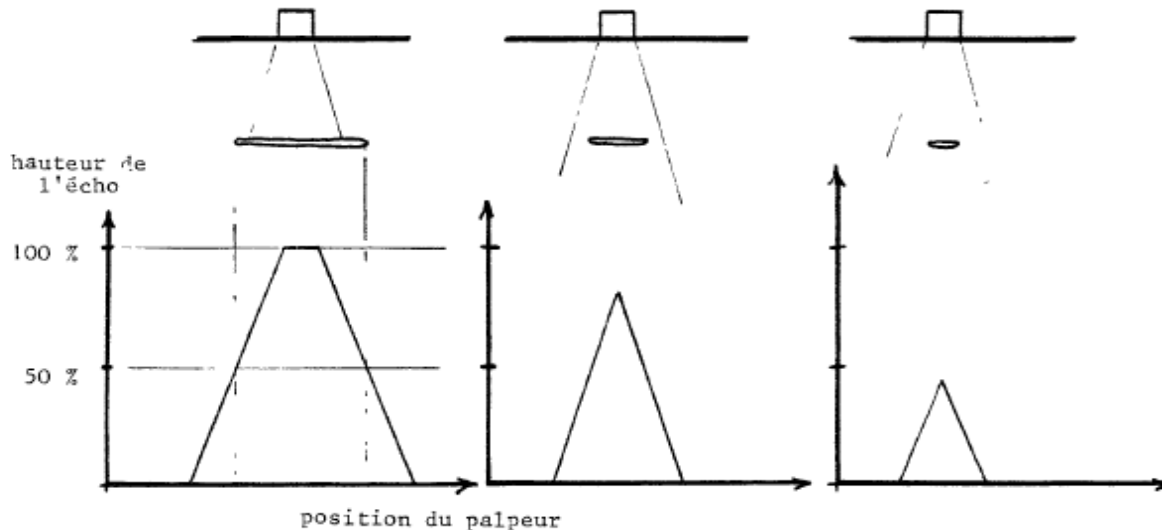


FIGURE 3-24 : PRESENTATION DE LA HAUTEUR DE L'ÉCHO DE DÉFAUT EN FONCTION DU DÉPLACEMENT DU PALPEUR POUR TROIS DÉFAUTS DE TAILLES DIFFÉRENTES.

La dimension du défaut dans le plan perpendiculaire au faisceau ultrasonore modifie la largeur et l'amplitude de l'écho !

De plus, ce n'est pas dimension absolue du défaut qui compte mais sa dimension relative par rapport à la largeur du faisceau.

Or, la largeur du faisceau ultrasonore change avec :

- le diamètre de la pastille.
- le matériau examiné.
- la fréquence.

Mais, même dans des conditions bien définies, la largeur du faisceau change avec la profondeur à laquelle on opère dans le matériau.

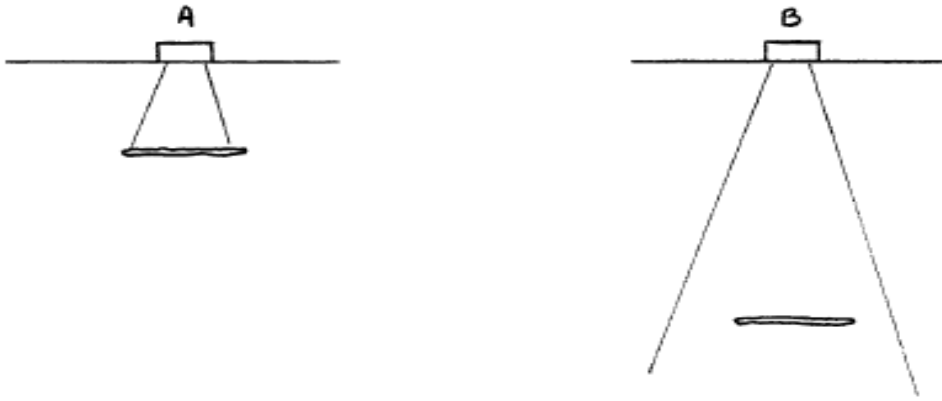


FIGURE 3-25 : PRESENTE QU'UN DEFAUT DE DIMENSIONS DONNEES PET ETRE PLUS GRAND OU PLUS PARTIT QUE LA LARGEUR DU FAISCEAU SUIVANT LA POSITION QU'IL OCCUPE DANS LA PIECE.

Dans le cas d'un petit défaut, on essaie de relier ses dimensions à la hauteur de l'écho. Dans la pratique, on compare la hauteur de l'écho de défaut de (HM) soit à lun. Écho de référence situé à la même distance (HO) soit à l'écho de fond (dans le cas ou cet de fond exister).

Dans le cas d'un grand défaut, on admet qu'au cours du balayage les bords du défaut sont donnés par la position du palpeur qui donne un écho valant 50% de l'écho de défaut maxi (soit - 6 dB).

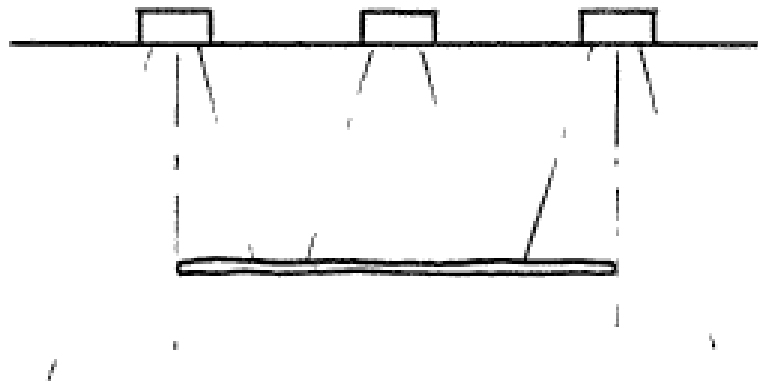


FIGURE 3-26 : RECHERCHE DE LA TAILLE DE DEFAUT

2.2.2.3. Acceptation des défauts

L'acceptation d'un défaut ou d'une série de défaut se fait l'aide d'un code ...et

après de longues discussions.

Les codes sont très nombreux et nous bornerons à citer quelques exemples.

2.3. Exemple : contrôle de la soudure par ultrasons

Code EDF (cahier des prescriptions de fabrication et contrôle c.p.f.c) pour la chaudière nucléaires à eau..

On définit deux classes de sévérité. La classe à prendre en considération doit être précisée aux ations techniques.

Les critères d’acceptation, établis en fonction du rapport HM /HO et de la longueur L du défaut, sont données dans le tableau ci –après :

Hauteur de l’écho de défaut HM	Nature du	Décision	
		Classe 1	Classe 2
Indifférent	Non Volumique	A réparer	A réparer
$H_o < HM$	Volumique	A réparer	A réparer
$\frac{H_o}{2} < HM \leq H_o$	Volumique	Tolérer si $L \leq 20mm$	Tolérer si $L \leq 40mm$
$HM \leq \frac{H_o}{2}$	Volumique	Tolérer si $L \leq 40mm$	Tolérer si $L \leq 80mm$

TABLEAU 3-3 : TABLEAU PRESENTE LES CRITERES D’ACCEPTATION

- ❖ Les échos tels que $H_m < H_o/4$ ne sont, en général, pas significatifs de défauts devant faire l’objet d’une réparation .toutefois, si L’est supérieure à 80 mm ou si le caractère volumique ou du défaut peut être par ailleurs présumé, le constructeur doit procéder à des examens complémentaires permettant de déterminer la nature du défaut, avant de soumettre à EDF sa proposition de décision.

- ❖ Dans le cas où la hauteur H_m de l'écho ou la longueur estimée L d'un défaut dépasse les limites fixées dans le tableau ci-dessus, sans excéder.

les valeurs fixées en c/ ci –après , le constructeur peut proposer que ce défaut ne soit pas réparé , lorsqu'il estime , compte tenu des examens complémentaire effectués , de la localisation et de nature du défaut ,des conditions de travail de la pièce et de tous autres éléments d'appréciation , un tel défaut n'est pas préjudiciable à la tenue de cette pièce .

EDF dispose d'un délai de dix jours à compter de la réception, de la demande motivée du constructeur, pour s'opposer, s'il le juge nécessaire, à ce que le défaut soit laissé en l'état.

- ❖ La disposition du § b ci-dessus ne sont applicables que dans le mesure ou les conditions ci –après sont remplies :
 - Pour $H_m < H_o/2$, $L < 60$ mm pour la classe 1
 - $L < 100$ mm pour la classe 2
 - pour $H_o/2 < H_m < 3H_o/4$, $L < 30$ mm pour la classe 1
 - $L < 60$ mm pour la classe
 - Pour $H_m > 3H_o/4$, aucune marge, autre que celle qui tient à l'imprécision des mesures, n'est tolérée.

3. Courant de Foucault

Les techniques mettant en œuvre les courants de Foucault sont utilisées pour la recherche des défauts métallurgiques (fissures, soufflures, inclusions) dans les barres, tubes et fils.

L'avantage des courants de Foucault sur les méthodes ultrasonores et magnétiques réside dans l'absence de contact avec les échantillons à contrôler et la possibilité de vérification à grande vitesse.

Les courants de Foucault permettent également la mesure des épaisseurs des plaques ou tubes, la détermination de l'épaisseur d'un revêtement et le tri entre des matériaux ayant des conductivités électriques ou des perméabilités magnétiques différents.

3.1. Principe général

Un solénoïde, appelé bobine, induit un champ magnétique alternatif à travers la pièce

sous examen, provoquant l'apparition des courants de Foucault.

Ces courants modifient l'impédance de la bobine excitatrice. L'existence de défauts dans la pièce à contrôler provoque des variations de l'impédance apparente de la bobine.

3.2. Détection des défauts à l'aide des courants de Foucault

3.2.1. Bobine simples : elles servent à créer le champ magnétique alternatif et simultanément, à détecter les défauts, par la mesure de leur impédance.

Ainsi, les barres sont contrôlées à l'aide d'une bobine extérieure. La zone étudiée est un petit disque

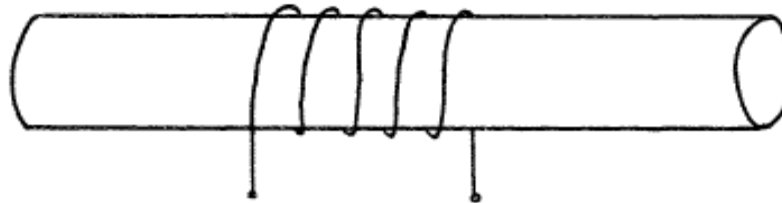


FIGURE 3-27 : BOBINE SIMPLE

La barre défile à l'intérieur de la bobine dont l'impédance varie brutalement au passage d'un défaut.

Les tubes peuvent être contrôlés à l'aide d'une bobine extérieure ou intérieure. La zone étudiée est un petit anneau.

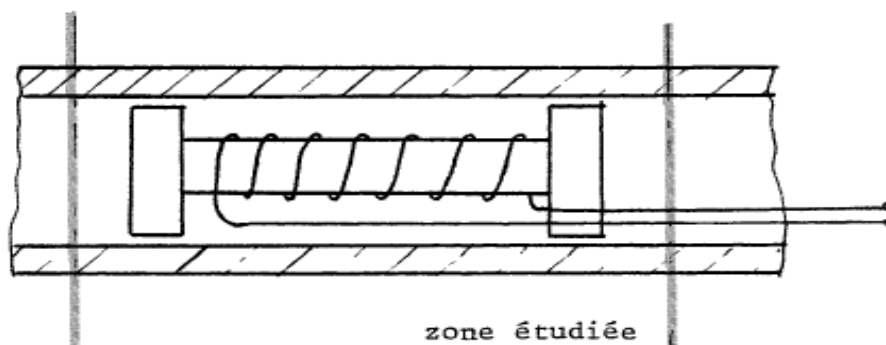


FIGURE 3-28 : PRESENTATION DE LA ZONE ETUDIEE

Les plaques et les objets de formes irrégulières sont contrôlés à l'aide de petites bobines appelées sondes, qui permettent d'étudier un cylindre de l'échantillon dont la section est voisine

de celle de la bobine.

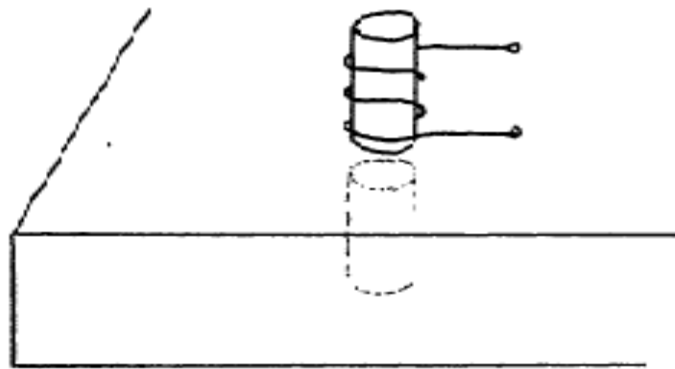


FIGURE 3-29 : LES PETITES BOBINES "LES SONDES"

3.2.2 .Bobine doubles

la bobine d'excitation induit le champ magnétique. Une bobine de détection, électriquement indépendante, permet de détecter les défauts avec une grande sensibilité. La bobine d'excitation est divisée en deux parties placées de part et d'autre de la bobine de détection. On lit directement les variations de f.é.m. aux bornes de la bobine détectrice.

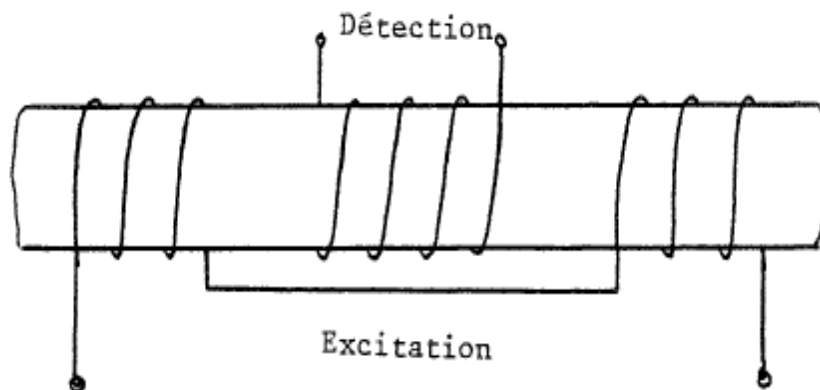


FIGURE 3-30 : BOBINE DOUBLES

3.2.3 .Bobines différentielles

Il s'agit de comparer la pièce à étudier avec un échantillon. On peut également deux régions différentes de la pièce à examiner. Le passage d'un défaut modifiera la f.e.m. aux

bornes des deux bobines détectrices successivement.

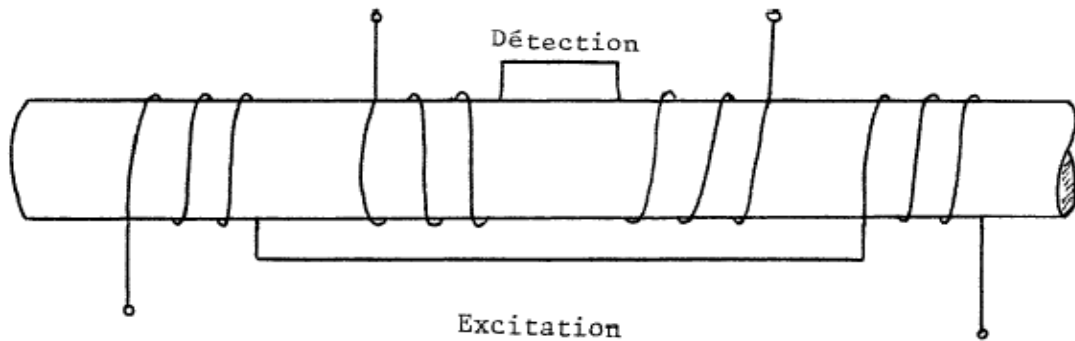


FIGURE 3-31 : BOBINE DOUBLES DIFFERENTIELLES

Les deux parties de la bobine de détection sont connectées de telle manière que les f.e.m. induites s’annulent lorsque les matériaux sont identiques. Le passage d’un défaut modifie la f.e.m. dans chacun des deux éléments de détection successivement. On obtient un signal de défaut présentant deux pics opposés.

Les bobines différentielles sont très sensibles à la présence de petits défauts.

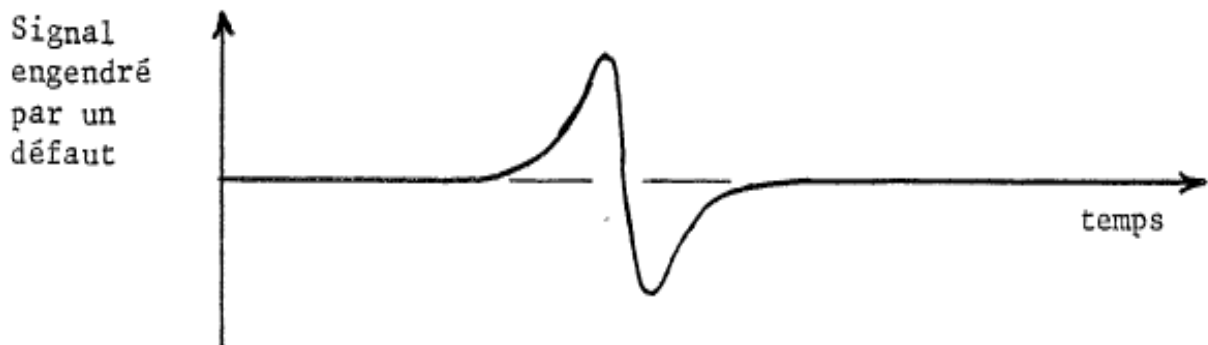


FIGURE 3-32 : LE SIGNAL DE DEFAUT

3.3.Profondeur de pénétration des courants de Foucault dans le cas d’un barreau plat

L’intensité des courants de Foucault est maximale à la surface du matériau étudié et diminue, en profondeur suivant une loi approximativement exponentielle. Dans un barreau plat, on peut écrire :

$$I = I_0 e^{-\delta \sqrt{\pi f \sigma \mu}}$$

Avec :

I_0 : Intensité à la surface du barreau

δ : Profondeur en m

f : Fréquence en Hz

σ : Conductivité magnétique du matériau en mhz. m^{-1}

μ : Perméabilité magnétique de Henry. m^{-1}

Par convention, on appelle profondeur de pénétration standard la profondeur pour laquelle :

$$I = 0.37 I_0$$

C'est-à-dire : $I = I_0 \cdot e^{-1}$

Dans un conducteur plat, cette profondeur vaut donc : $\delta_c = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}}$

Dans le cas des matériaux amagnétiques (alliages légers, alliages cuivreux, zinc...)

on a: $\mu = 4\pi 10^{-7} H.m^{-1}$

Donc : $\delta_c = \frac{1503}{\sqrt{f \cdot \sigma}}$

Exemple :

pour le duralumin, σ vaut $34 \cdot 10^6 \text{ mho} \cdot m^{-1}$. Si l'on engendre des courants de Foucault à la fréquence $f=5000 \text{ Hz}$, on aura une profondeur de pénétration : $\delta = 0,0012 \text{ m}$ soit 1,2 mm

3.3. Les avantages du CND par CF

❖ La simplicité

Le principal avantage des sondes à CF est leur facilité de mise en œuvre. Le contrôle est réalisé sans contact, et par conséquent sans utilisation de couplant. Le signal CF est

obtenu directement et instantanément.

❖ **l'intégration**

La nature électrique du signal CF mesuré permet aussi de bénéficier fortement des avancées récentes au niveau de l'intégration des composants électroniques, en termes de réduction de volume comme d'augmentation des performances. Le signal CF est en effet directement utilisable pour d'éventuels traitements électroniques analogiques, suivis d'une numérisation et de traitements numériques ou informatiques. Cela permet d'envisager des appareils de contrôle à la fois plus petits, plus légers et plus rapides.

❖ **le coût**

Un dispositif CF très simple est une unique bobine avec un générateur, un voltmètre et un ampèremètre. Il s'agit d'un dispositif très bon marché, qui même en augmentant la complexité de la technologie ou de l'instrumentation (utilisation de multiplexeur, de détection synchrone, de capteurs de haute technologie), reste abordable et ne demande pas un investissement primordial trop important.

3.5. Les inconvénients du CND par CF

❖ **la non-linéarité**

Les équations différentielles ne sont pas linéaires par rapport aux paramètres constitutifs du matériau. Leurs solutions, comme la densité de courant définie par l'équation, ne le sont pas non plus. Cela entraîne une forte non-linéarité entre la géométrie des défauts situés dans la pièce à inspecter et la réponse obtenue avec une sonde CF. L'analyse des signaux produits est donc relativement complexe et l'opérateur doit être habitué à cette technique pour être efficace, c'est-à-dire réalisant un contrôle rapide et fiable.

❖ **la résolution**

Un défaut ponctuel de dimensions micrométriques dévie toutes les lignes de courants qui s'approchent de lui. Si l'émetteur fait une surface de l'ordre du millimètre carré, les courants induits parcourent une surface au moins égale voire plus grande que celle-ci. Par conséquent, le défaut micrométrique correspond à une réponse qui s'étend sur plusieurs millimètres carrés, ce qui a pour conséquence de détériorer nettement la résolution spatiale d'une sonde à courant de Foucault.

❖ **l'effet de peau**

L'équation précédent fait apparaître une décroissance exponentielle sur l'amplitude des courants : ceux-ci sont localisés à une faible profondeur. Ce phénomène, appelé effet de peau, a pour conséquence la difficulté voire l'impossibilité de détecter un défaut situé à une distance très supérieure à l'épaisseur de peau δ . En effet, les courants induits ont une amplitude inférieure à 95% de l'amplitude maximale au-delà d'une profondeur supérieure à 3δ .

❖ **le positionnement**

L'induction des courants de Foucault est fonction du couplage entre la sonde et la pièce. Si celui-ci varie au cours de la mesure ou n'est pas celui attendu, la mesure sera faussée. Un décollement ou une inclinaison de la sonde par rapport à la surface de la pièce sont les deux principaux problèmes de positionnement rencontrés, qui conduisent à une variation parasite de l'impédance mesurée. En particulier, le contrôle des surfaces non planes peut ainsi poser problème si la sonde ne se conforme pas à la surface.

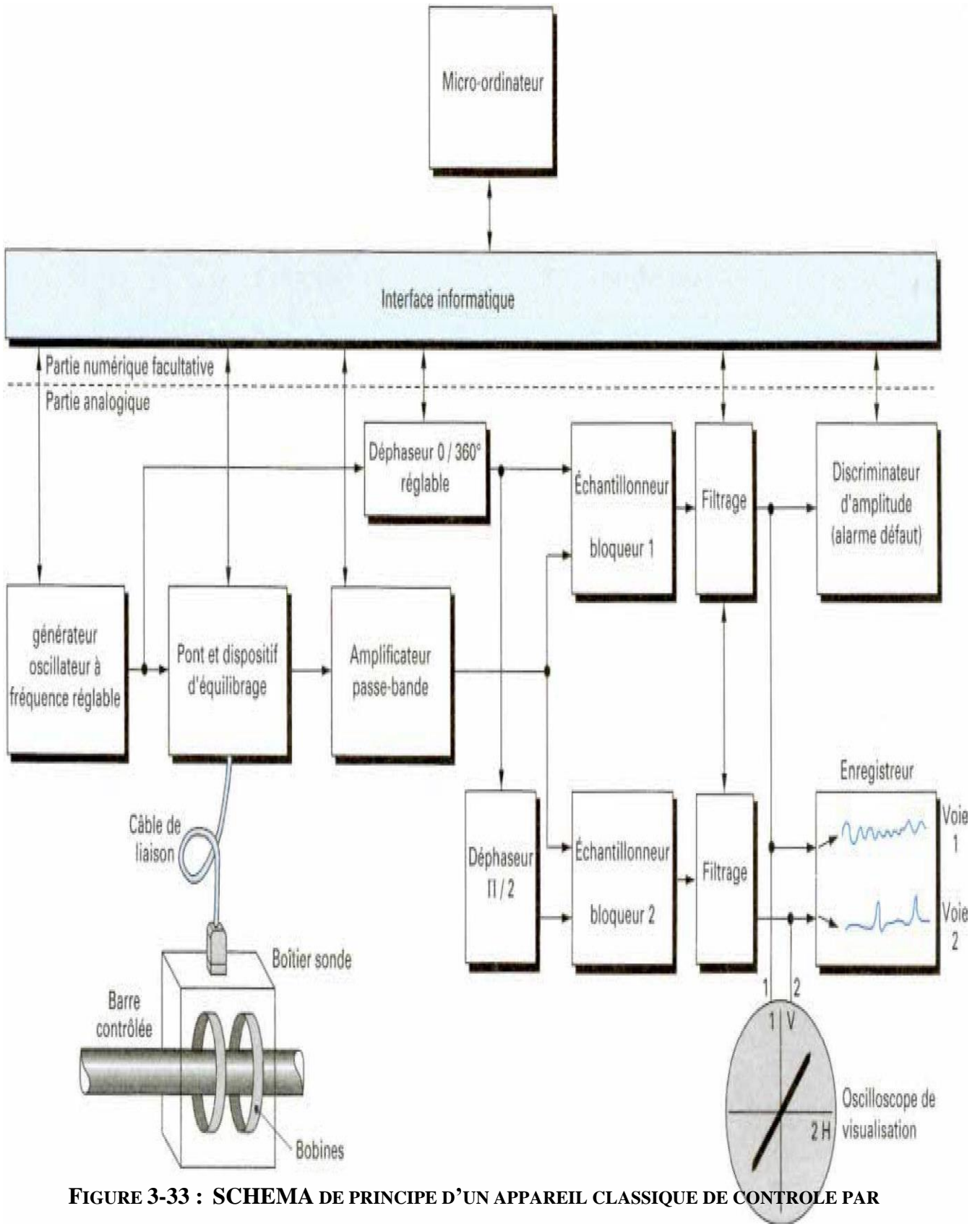


FIGURE 3-33 : SCHEMA DE PRINCIPE D'UN APPAREIL CLASSIQUE DE CONTROLER PAR COURANT DE FOUCAULT

4. Synthèse

La présentation de ces méthodes ne serait pas complète sans une synthèse comparative selon les critères énoncés à la sous-section Ainsi, le tableau suivant présente une vue d'ensemble des qualités et défauts de chacune de ces techniques.

	Rapidité	Coût	Reproductibilité	Fiabilité	Sensibilité	Résolution
Ressuage	++	++	-	-	--	-
Radiographie	++	-	+	+	-	-
Ultrasons	+	+	-	-	++	+
Flux magnétique de fuite	+	+	-	-	++	+
Courants de Foucault	+	+	++	+	+	-

TABLEAU 3-4 : COMPARATIF DES PRINCIPALES TECHNIQUES DE CND