

# Choix des méthodes de contrôle non destructif applicables aux assemblages soudés (Partie 2)

# Méthodes de surface

## Contrôle par Courants de Foucault

- ▶ Les courants de Foucault sont des courants induits créés dans une masse conductrice, soit par la variation au cours du temps d'un champ magnétique extérieur traversant ce milieu (le flux du champ à travers le milieu), soit par un déplacement de cette masse dans un champ magnétique.

- ▶ Principe :



Applicable sur assemblages bout à bout et d'angle, sous réserve d'avoir des sondes adaptées (inducteur).

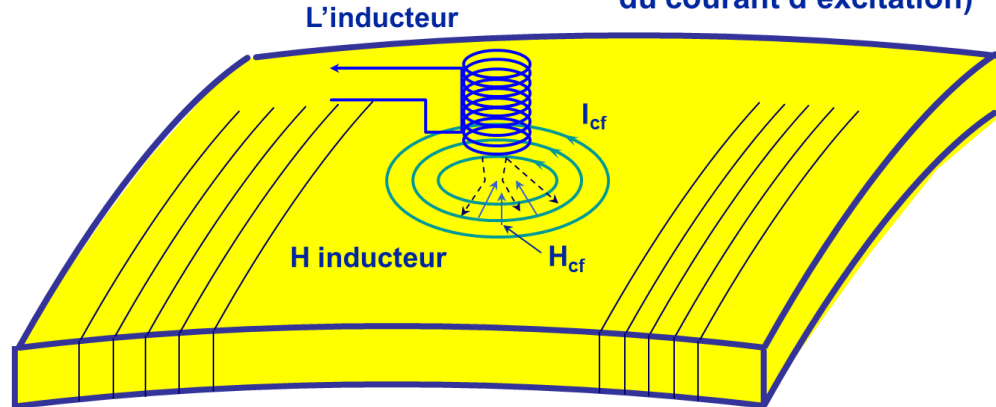
Attention, les matériaux doivent être électriquement conducteur.

L'orientation du défaut par rapport à la direction du contrôle a une incidence sur la sensibilité de détection.

# Méthodes de surface

**1. L'EXCITATION**  
(un courant électrique)

**3. LA REVELATION**  
(un courant récupéré différent  
du courant d'excitation)



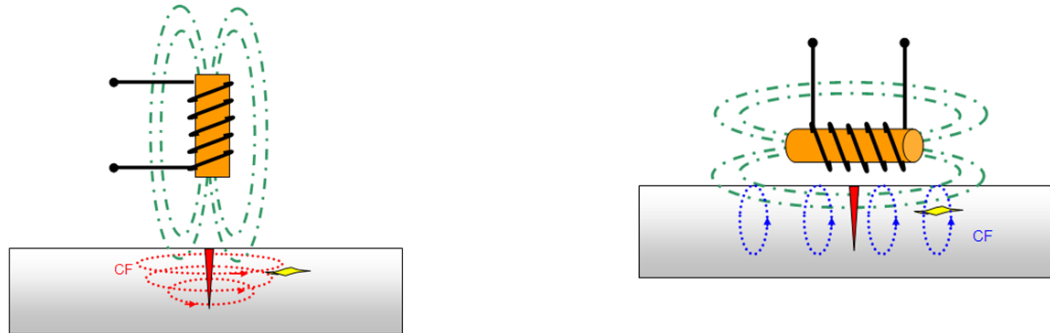
**2. LA PERTURBATION**  
(un courant de Foucault perturbé par un défaut)

# Méthodes de surface

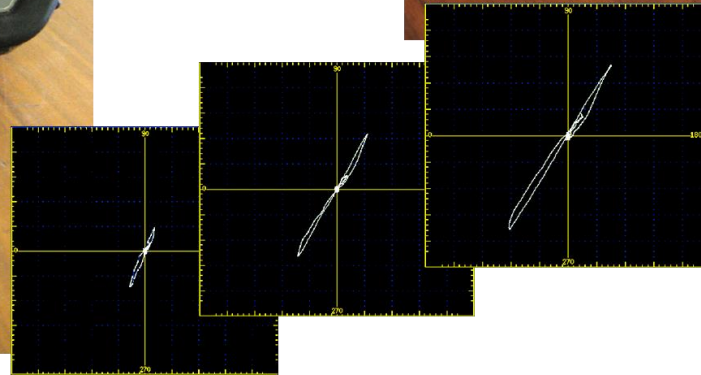
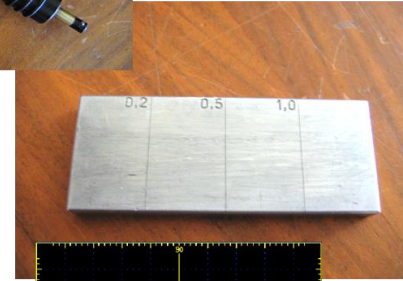
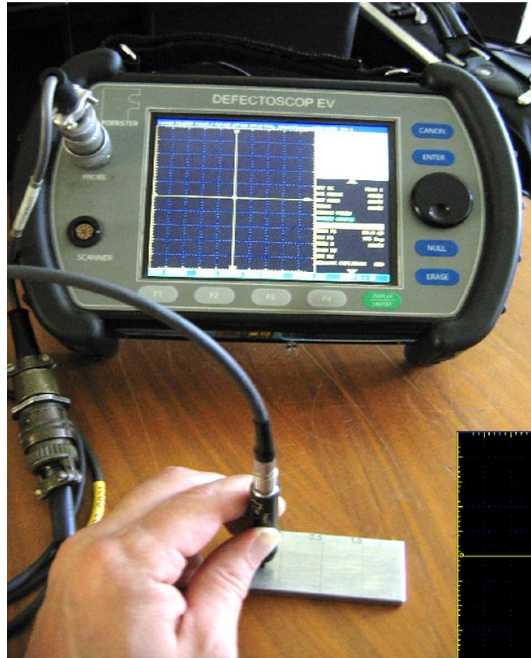
- ▶ Les défauts dans les pièces contrôlées sont détectés grâce aux variations d'impédance de la (ou des) bobine et visualisés dans un plan complexe



*Pour qu'une discontinuité soit détectable, il faut qu'elle perturbe la répartition des courants de Foucault, ceci dépend notamment de son orientation !*



# Méthodes de surface



# Méthodes de surface

- ▶ Le choix de la fréquence de travail est déterminant pour la discrimination des indications
- ▶ Les défauts doivent être débouchant ou proches de la surface. La profondeur de détection dépendra du matériau et de la fréquence utilisée
- ▶ La phase et l'amplitude des indications varient en fonction de la profondeur et de leur volume
- ▶ Obligation d'avoir des échantillons de référence pour la plupart des applications afin de calibrer les outils en début d'examen afin de pouvoir interpréter les variations d'impédance mesurées

# Méthodes de surface

## ► Applications :

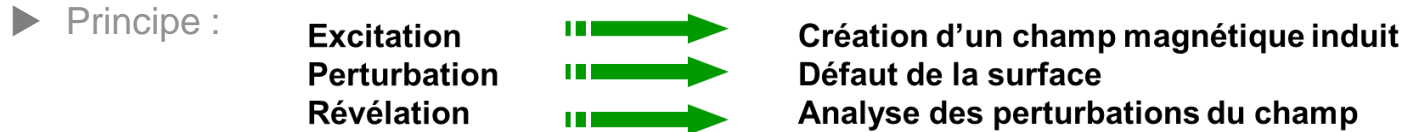
- Recherche de discontinuité plane, fissure, manque de fusion
- Mesure d'épaisseur de tubes, de zones corrodées
- Mesure d'épaisseur de couche, tri de métaux (multicouche)
- Contrôle de profondeur de trempe, cémentation, traitement thermique

# Méthodes de surface

## Contrôle par ACFM

**Alternating Current Field Measurement (mesure du champ magnétique induit produit par un courant alternatif)**

► La technique ACFM utilise les variations d'un champ magnétique induit par un courant alternatif dans un matériau conducteur pour détecter les fissures de fatigue.



Applicable sur assemblages bout à bout et d'angle, sous réserve d'avoir des sondes adaptées, ce procédé peut être mis en œuvre sur des surfaces peintes.

Attention, les matériaux doivent être ferromagnétiques.

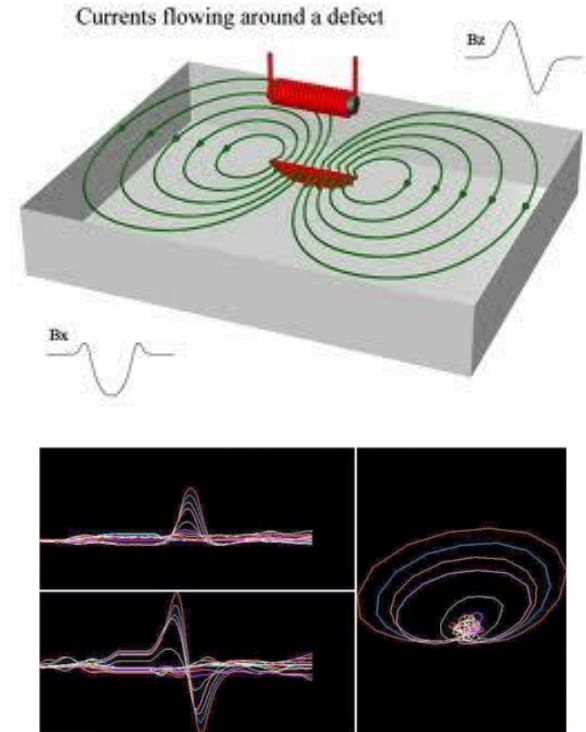
Pour être détecté, la fissure doit déboucher en surface, et présenter des dimensions minimales d'environ 10 mm de long, et 5 mm de profondeur.

Destiné exclusivement à la recherche de fissure de fatigue.



# Méthodes de surface

- ▶ La technique ACFM utilise :
  - ▶ un calculateur électronique qui injecte un courant alternatif à la surface du matériau à contrôler, par l'intermédiaire d'une sonde adaptée au milieu d'intervention.
  - ▶ Le courant traverse le matériau et génère un champ magnétique induit, perpendiculaire au sens du courant.
  - ▶ En présence d'un défaut, le champ magnétique induit sera perturbé. La sonde mesure les perturbations aux extrémités du défaut selon deux directions X et Z.



# Méthodes de surface

- ▶ Développée depuis 1992 pour l'offshore, pour rechercher à l'origine des défauts de soudure sous revêtement
- ▶ La présence d'un revêtement est prise en compte par la méthode
- ▶ Principe intermédiaire entre magnétoscopie et courants de Foucault
- ▶ Destiné exclusivement à la recherche de fissure de fatigue, cela en fait un moyen de contrôle périodique pour le suivi en service d'installations ou structures chargées de manière cyclique



# Méthodes de surface



## Méthodes de surface

# Inspection périodiques de grues portuaires par ACFM



# Méthodes Volumiques

## Contrôle par Ultrasons

- ▶ Examen Non Destructif qui permet de détecter des discontinuités surfaciques et internes en générant des vibrations mécaniques de haute fréquence (ultrasons) dans la pièce et à observer les échos réfléchis.



Applicable sur assemblages bout à bout et d'angle.

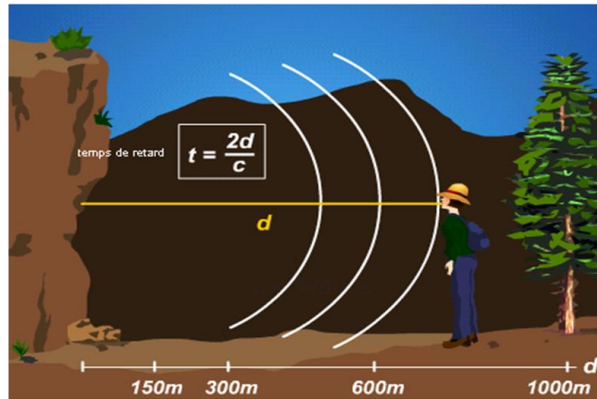
Les assemblages doivent être à pleine pénétration. Des techniques sont en cours de développement pour travailler sur des pénétrations partielles.

Détection de discontinuité dans toute l'épaisseur, les défauts à caractère « plan » (manque de fusion, fissure etc...) sont plus facilement mis en évidence s'ils sont orientés perpendiculairement au parcours des ondes ultrasonores

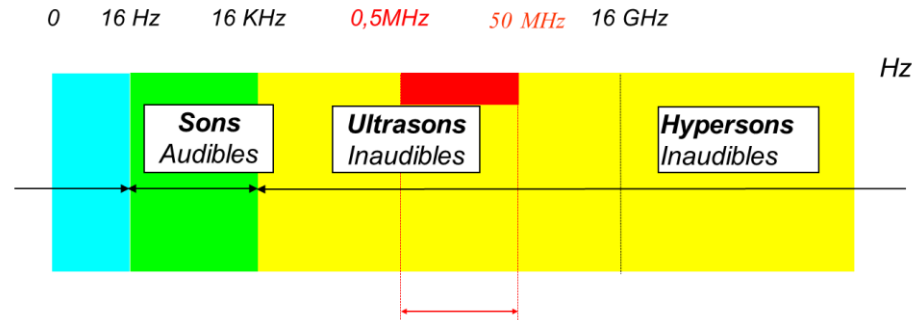
La méthode est sensible à la structure du matériau (structure austénitique limite la mise en œuvre aux épaisseurs > 6 à 8 mm)

# Méthodes Volumiques

- ▶ L'écho est un phénomène de réflexion sonore.
  - ▶ Le son émis par l'observateur se propage à 340m/s dans l'air.
  - ▶ Il est réfléchi sur la falaise.
  - ▶ L'écho parvient au niveau de l'observateur avec un retard qui dépend de la vitesse de propagation du son (c) et de la distance(d) entre « l'émetteur » et le « réflecteur ».



**Le contrôle par ultrasons repose sur le même principe physique**



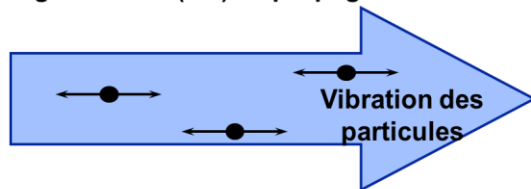
**DOMAINE D'UTILISATION DES U.S. POUR LE C.N.D**  
**En pratique 0,5 à 10 MHz**

# Méthodes Volumiques

## Les principaux modes de propagations des ondes sont de 2 sortes :

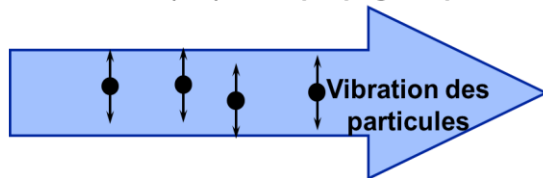
### Ondes longitudinales

Les ondes longitudinales (OL) se propagent dans les solides et les liquides



### Ondes transversales

Les ondes transversales (OT) ne se propagent que dans les solides

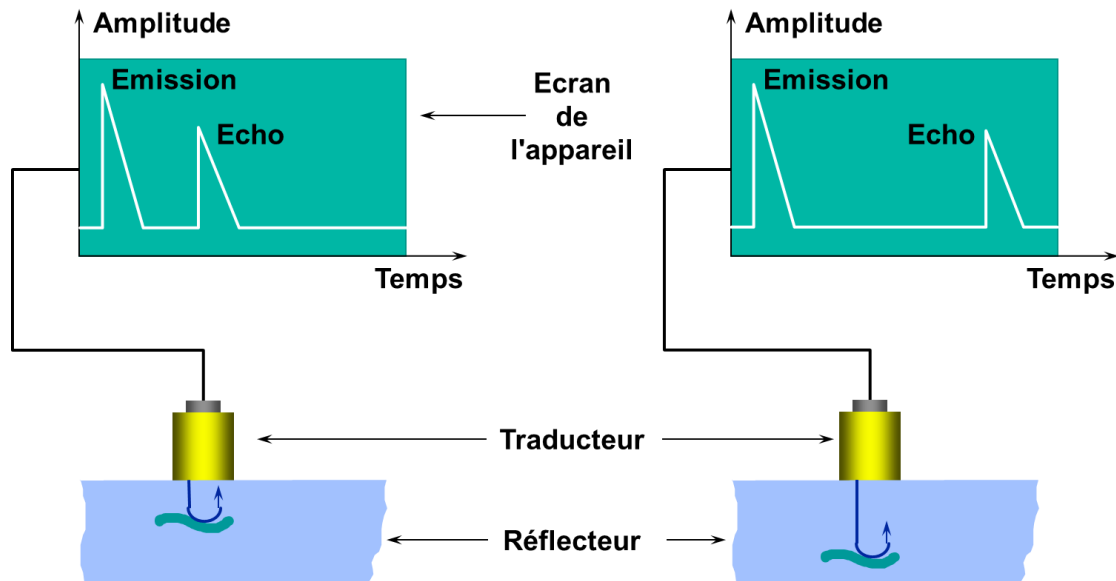


Avec différentes vitesses suivant la nature des matériaux :

Matériau	VL (m/s)	VT (m/s)
<i>Eau</i>	1480	-
Huile légère	1340	-
Cuivre (recuit)	4750	2300
<i>Acier (1 % C)</i>	5940	3220
Aluminium	6300	3100
Altuglass	2680	1100

# Méthodes Volumiques

- ▶ Contrôle échographique (visualisation d'une indication)
- ▶ Ondes longitudinales (mesure d'épaisseur)



L'écart entre l'écho d'émission et l'écho de retour correspond au temps nécessaire pour que l'onde parcourt la distance aller et retour du palpeur (traducteur) au défaut.

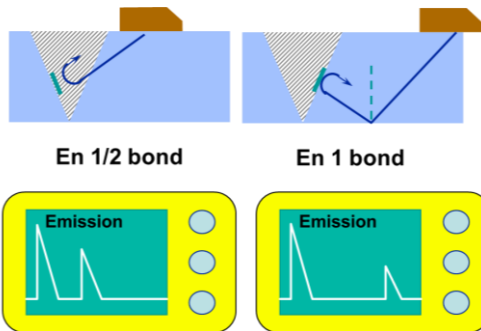
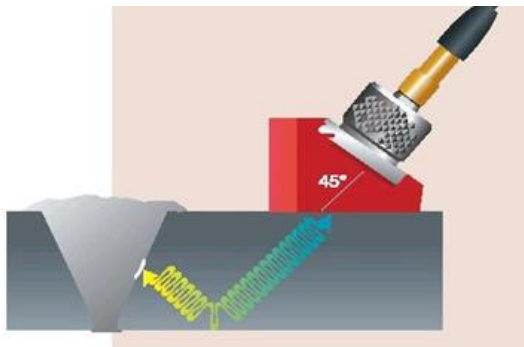
Cela permet de connaître la profondeur à laquelle est situé le défaut dans l'épaisseur

Si l'onde ne rencontre aucun obstacle (autre que la surface opposée) on mesure l'épaisseur du matériau



# Méthodes Volumiques

## ► Contrôle par Ondes Transversales (Contrôle des soudures)



L'angle donné par le palpeur est fixe  
Un mouvement de balayage en X et Y du traducteur permet de déplacer l'onde le long de la soudure

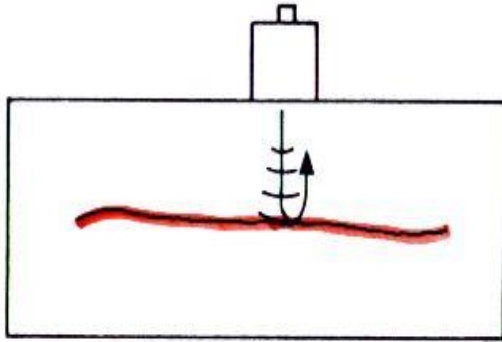
Il s'agit de rechercher les signaux d'échos réfléchis par les discontinuités rencontrées au travers de l'épaisseur. L'orientation du défaut perpendiculairement aux ondes US est nécessaire pour une bonne réflexion de l'onde donc de détection du défaut.

Il faudra donc utiliser différents angles et directions de contrôle (accès sur chaque face) pour s'assurer d'avoir balayer la totalité des orientations de défaut, en fonction des types d'assemblage (pour un contrôle à 100%)

Pour assurer la transmission des ondes du palpeur à la pièce, il est nécessaire de passer par un milieu de couplage (couplant = eau, huile, gel de couplage)

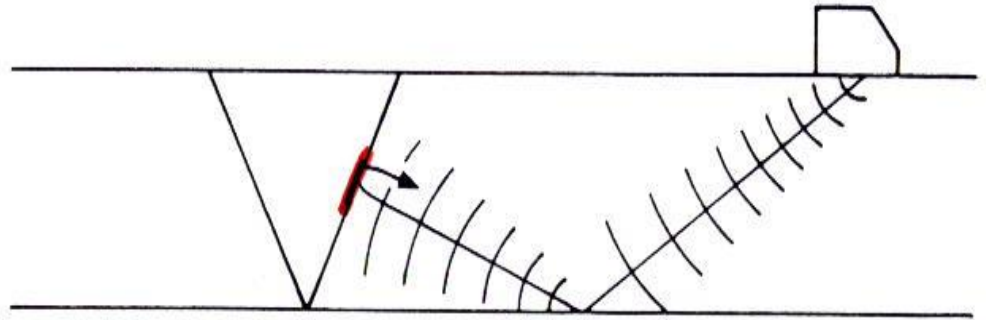
Les discontinuités à proximité des surfaces peuvent ne pas être détecté, il est nécessaire de croiser avec une méthode surfacique

# Ultrasons



Ondes

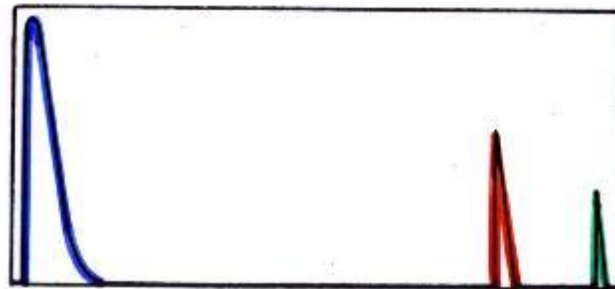
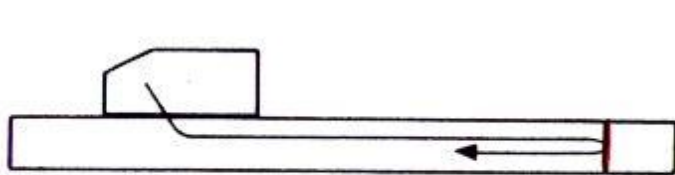
longitudinales



Ondes

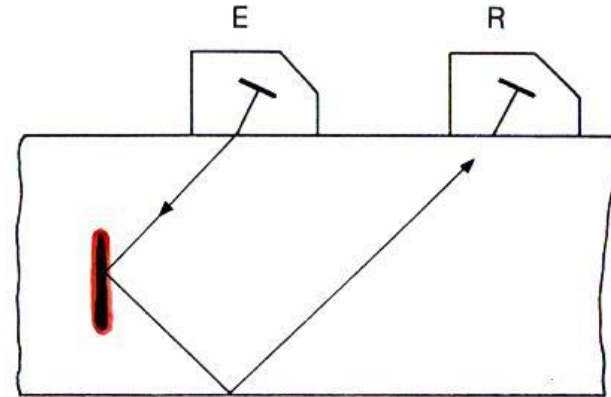
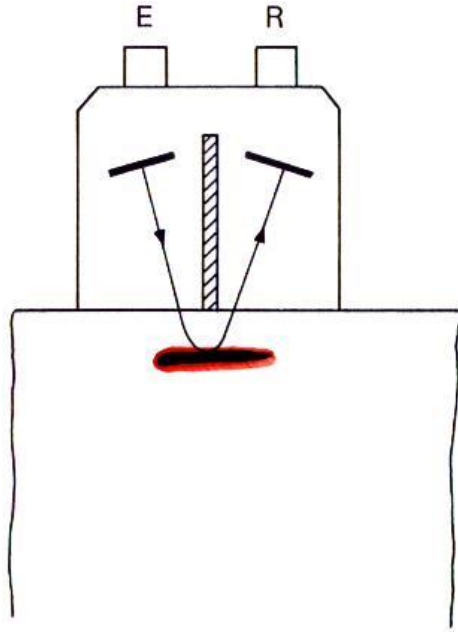
transversales

# Ultrasons



## Ondes de surface (Lamb)

# Ultrasons



## Transducteur émetteur/récepteur

# Méthodes Volumiques

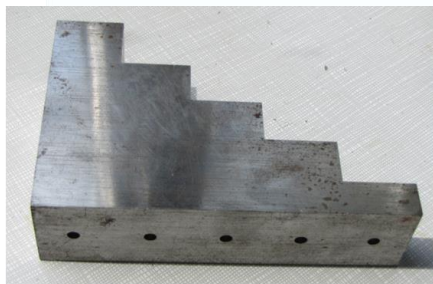
- ▶ Etalonnage ou calibrage nécessaire pour caler les paramètres à mettre en œuvre, utilisation de cales dédiées diverses :



Bloc n°1 selon ISO 2400



Bloc n°2 selon NF EN ISO 7963

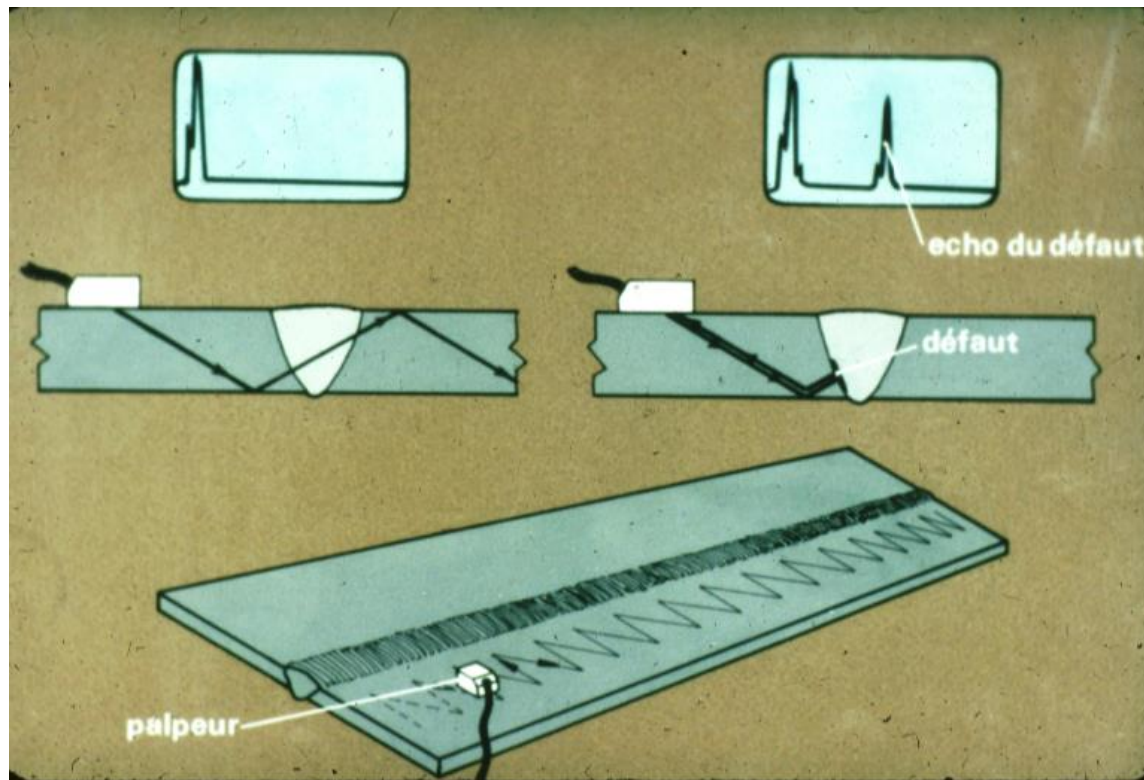


Cale à gradins avec trous à fond plat (TFP)



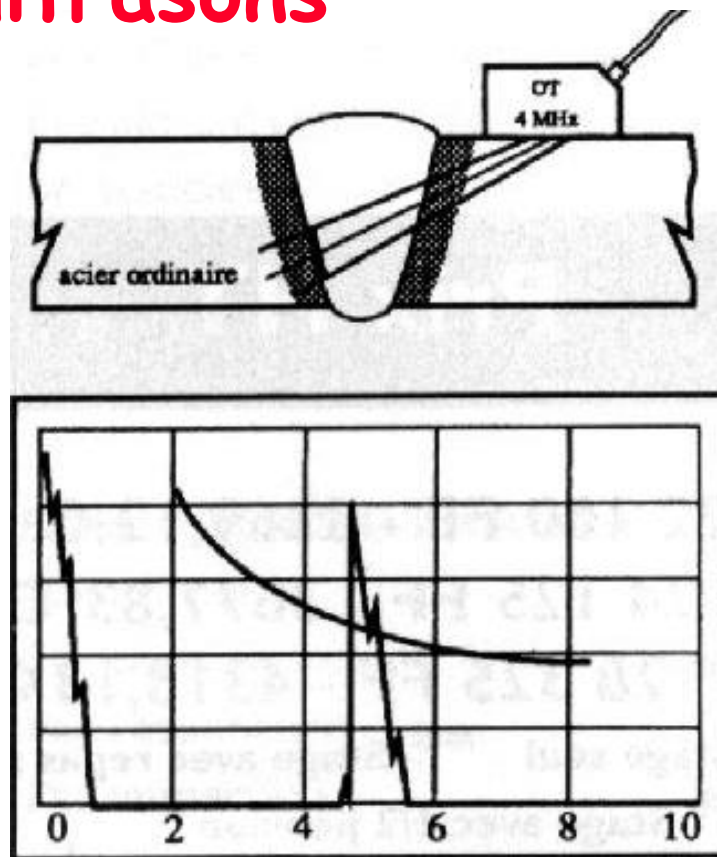
Cale IS avec trou percés latéralement

# Protocole ultrasons



**Source PSA**

# Protocole ultrasons

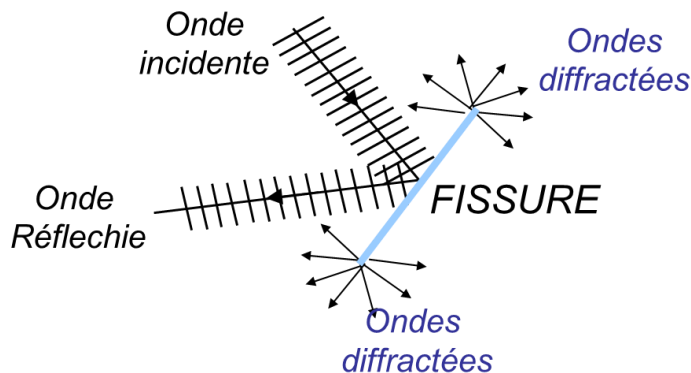


# Méthodes Volumiques

## Variante au procédé UT classique = Procédé T.O.F.D.

«Time Of Flight Diffraction » Technique de diffraction du temps de vol utilisée comme méthode de détection et de dimensionnement des discontinuités»

- ▶ Cette méthode permet de récupérer les ondes diffractées au extrémités d'un défaut

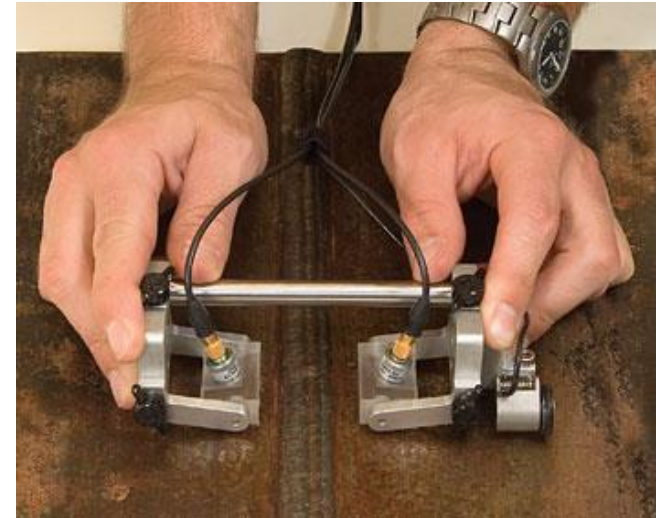
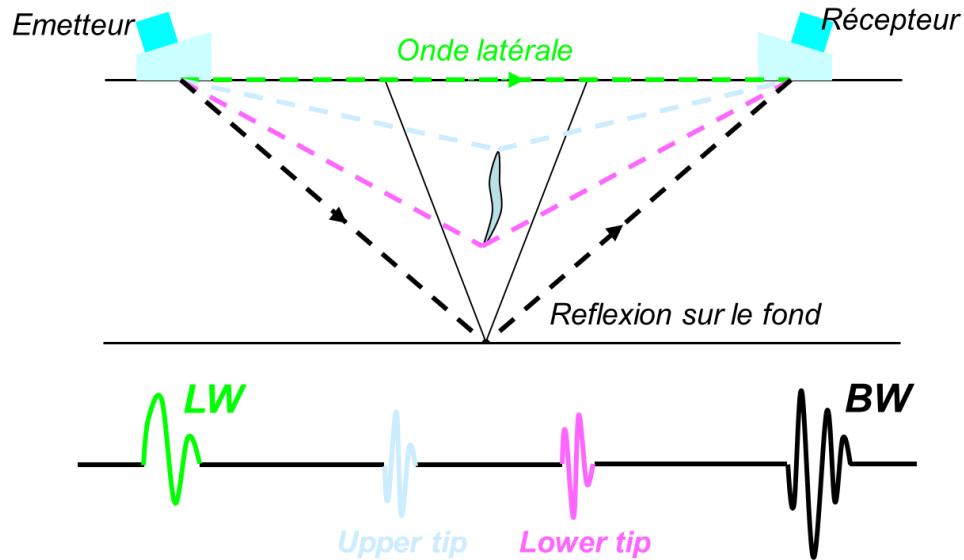


- ▶ Quel que soit leur direction
- ▶ Même de faible énergie
- ▶ Indépendamment de l'angle d'incidence de l'onde qui les génère



# Méthodes Volumiques

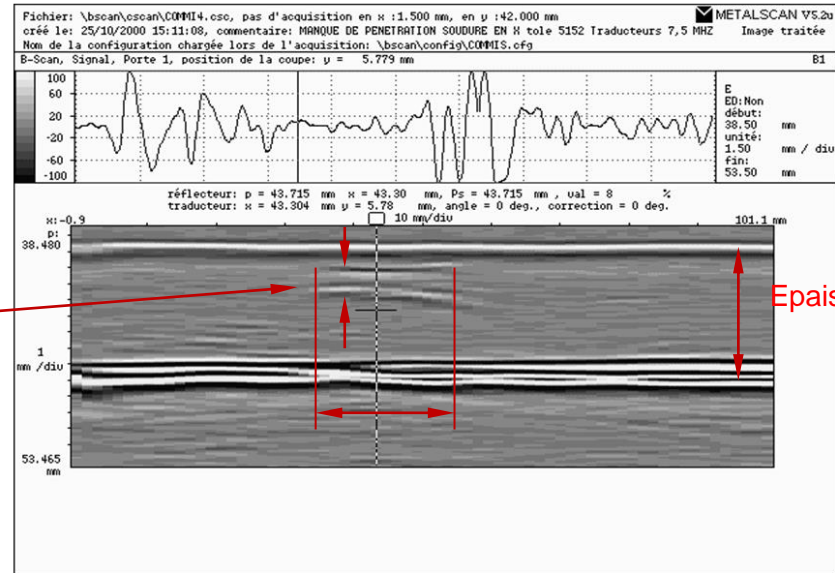
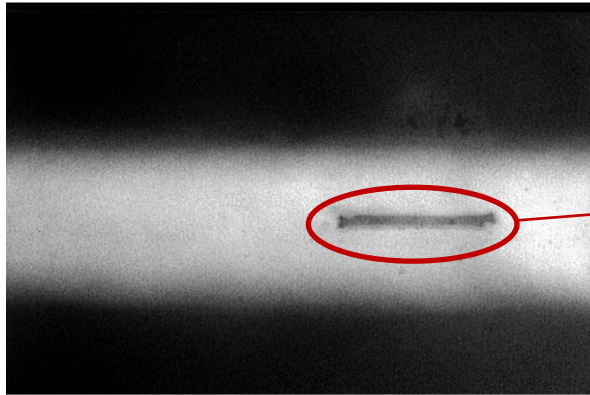
- ▶ Mise en œuvre d'un palpeur émetteur et d'un palpeur récepteur
- ▶ Emission d'un faisceau d'onde au travers d'une tranche d'épaisseur



# Méthodes Volumiques

- ▶ Le traitement informatique des informations permet de reconstituer une image correspondant à une coupe verticale de la soudure (dans le sens longitudinal)
- ▶ Le dimensionnement et positionnement dans l'épaisseur devient possible

## Cliché radiographique



# Méthodes Volumiques

- ▶ Aide à l'interprétation des indications de défauts
- ▶ Adaptée à la recherche de défauts plans et volumique en MF, ZL et ZAT  
Détermination précise de la position transversale du défaut, calcul précis de la taille, hauteur et longueur
- ▶ Traçabilité des contrôles effectués par l'enregistrement des scans
- ▶ Travail par une seule face d'accès, gain de temps d'exécution du contrôle
- ▶ Mise en œuvre sur des installations en service possible
- ▶ Méthode combinant les techniques des UT manuels avec la formation d'une image concurrençant les techniques radiographiques
- ▶ Méthode mécanisable

# Méthodes Volumiques

- ▶ Applicable sur des épaisseurs comprises entre 6 et 300 mm
- ▶ Attention présence de zones mortes en surface et en fond (sur une bande d'épaisseur de 2 à 3 mm sur chaque face, il est nécessaire de coupler ces méthodes avec une méthode surfacique)
- ▶ Une formation complémentaire des opérateurs est nécessaire
- ▶ L'équipement mis en œuvre est spécifique
- ▶ La méthode est fortement influencé par la structure du matériau et des perturbations peuvent apparaitre sur les acier inoxydables austénitiques

# Méthodes Volumiques

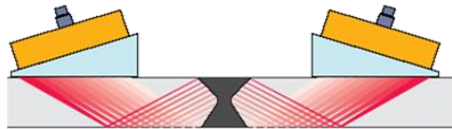
## Variante au procédé UT classique = UT Multiéléments (Phased Array)

Le transducteur est composé de plusieurs transducteurs séparés dont la gestion informatisée permet l'obtention de certaines configurations de faisceau acoustique

- ▶ Plusieurs petits éléments piézoélectriques (16, 32, 64 ...)
- ▶ Eléments pilotés électroniquement et indépendamment les uns des autres en Émission / Réception
- ▶ Application de lois de retard à chaque voie (Émission / Réception)

Un transducteur conventionnel est défini par son ouverture, sa focalisation, son angle de réfraction  
Sur un transducteur multiéléments l'ensemble de ces paramètres peuvent être modifiés électroniquement

- ▶ Balayage linéaire



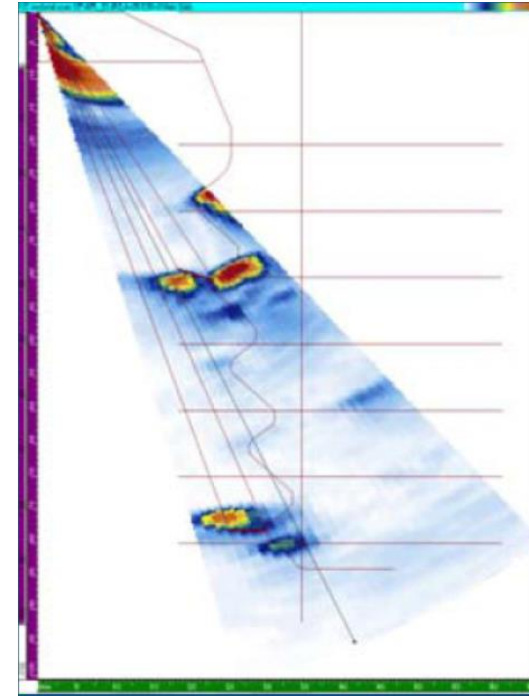
- ▶ Balayage sectoriel de 45° à 70°



INTERET : éviter le mouvement perpendiculaire à la soudure indispensable pour couvrir toute l'épaisseur en UT conventionnels

# Méthodes Volumiques

- ▶ Gain de temps lors de l'acquisition (remplacement du balayage mécanique par un balayage électronique)
- ▶ Amélioration de la précision de la mesure grâce :
  - ▶ Au nombre de points de mesure
  - ▶ À la focalisation du faisceau
  - ▶ A la possibilité d'optimiser les paramètres du transducteur à la zone d'inspection
- ▶ Réduction du nombre de transducteurs
- ▶ Meilleure corrélation des données durant l'analyse
  - ▶ Pas de variation de couplage ou de position d'un transducteur virtuel à l'autre
  - ▶ Possibilité de superposer le profil de la pièce sur l'imagerie
- ▶ Enregistrement et archivage des données (traçabilité des cartographies)
- ▶ Méthode candidate pour le remplacement de la radiographie



*Représentation S-Scan*

# Méthodes Volumiques

- ▶ Préparation obligatoire et complexe de la configuration
- ▶ Interprétation complexe nécessitant
  - ▶ Une solide expérience
  - ▶ Une maîtrise des logiciels d'acquisition et d'analyse
- ▶ Préparation nécessaire et soignée des zones de sondage pour éviter les pertes de couplage
- ▶ Compétence du contrôleur (nécessité de formation)
- ▶ Normalisation en cours
- ▶ Coût du matériel (en baisse)

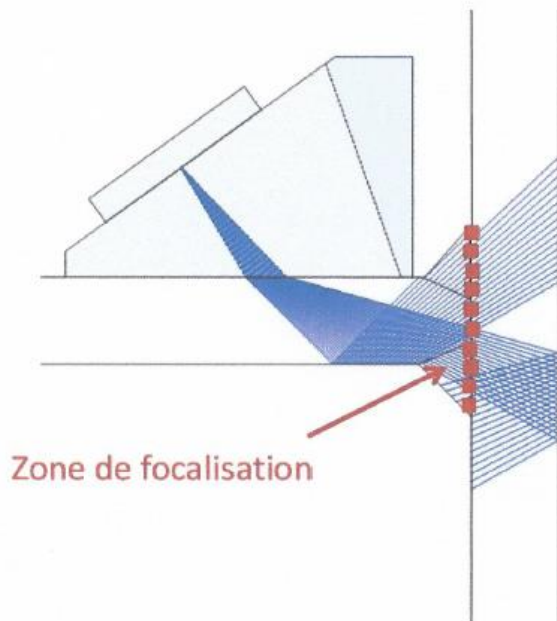
# Ultrasons multiéléments



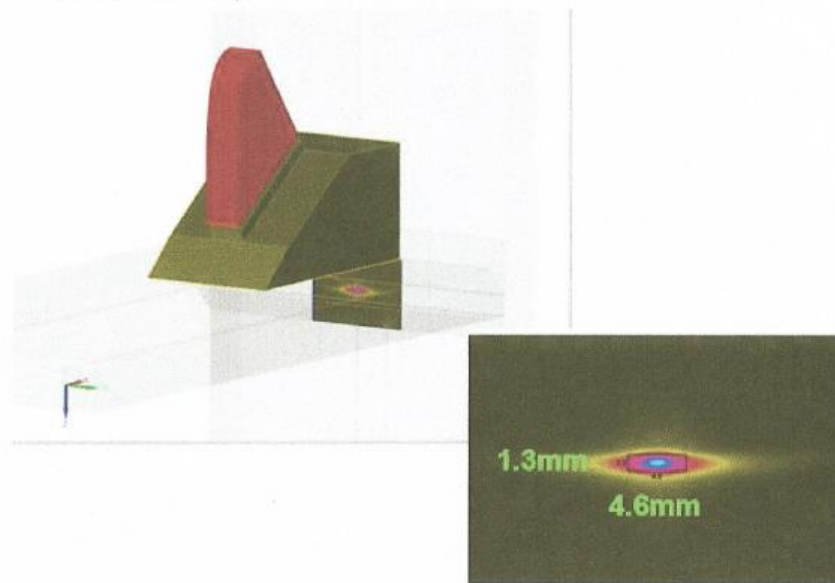


## Solution proposée

### Méthode proposée : la technologie des ultrasons multiéléments



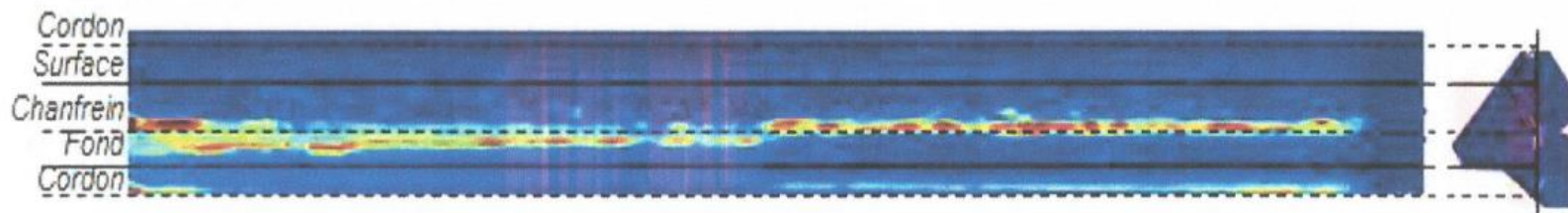
- Balayage angulaire
- Focalisation dans le plan du talon (réduction de la tache focale)



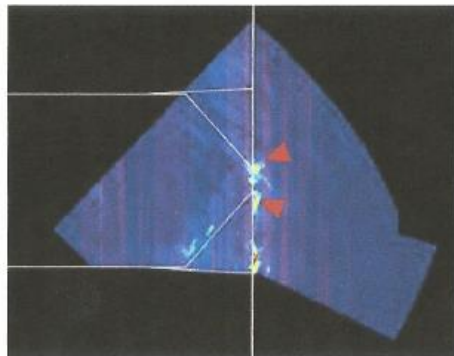
## Principales caractéristiques du démonstrateur

### Création de vues adaptées au contrôle des soudures en T

- ▶ Vue globale : projection dans un plan de coupe parallèle au plan de joint



- ▶ Vue en coupe



### Type de défauts détectés

- ▶ Manque de pénétration (en plus du talon non pénétré)
- ▶ Manque de fusion en racine, en bord de chanfrein et entre passes
- ▶ Fissuration en racine ou dans la gorge

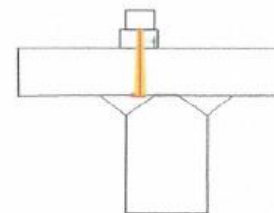
**Taille de défauts détectables/mesurables : ~ 2 mm ( $\pm 1,5$  mm)**

### Contrôle réalisable aussi par l'arrière de la soudure (si accessible)

- ▶ Meilleure précision (~ 0,5 mm)

### Cas du contrôle des faibles épaisseurs (< 10 mm)

- ▶ Technologie ultrasonore applicable jusqu'à 6 mm
- ▶ Pour les plus faibles épaisseurs : recours à d'autres méthodes de contrôle (surfaiques)
  - ▶ Thermographie IR active



## Avantages/inconvénients

### Avantages

- ▶ Rapidité du contrôle
- ▶ Analyse simplifiée (CAO superposée à l'image ultrasonore)
- ▶ Traçabilité
- ▶ Précision du contrôle
- ▶ Capacité à détecter tous les défauts recherchés

### Inconvénients

- ▶ Nécessité d'avoir accès sur une des tôles soudées (contact avec la pièce)
- ▶ Utilisation d'un matériaux couplant (gel, eau, ...)
- ▶ Formation des opérateurs

# Ondes guidées



# Ultrasons TOFD

(Time Of Flight Diffraction)



# Ultrasons TOFD

(Time Of Flight Diffraction)



# Ultrasons TOFD

(Time Of Flight Diffraction)





