



## CERN - TS Department

EDMS Nr: 473747

Group reference: TS-MME

TS-Note-2004-034

5 May 2004

### TECHNIQUES DE CONTRÔLES NON DESTRUCTIFS

J-M. Dalin

#### Abstract

La construction du LHC et des expériences nécessite un contrôle permanent de la qualité de la matière première utilisée et des assemblages par soudage, brasage ou collage des divers composants. Pour la vérification des matériaux et des assemblages de fabrication, il est souvent hors de question de recourir à des méthodes qui altéreraient les parties à contrôler. Les techniques de Contrôles Non Destructifs (CND), dont celles les plus employées au CERN font intervenir la transmission d'ondes sonores (contrôle par ultrasons) ou de rayons pénétrants (radiographie X ou gamma), représentent un moyen de détection souvent quantitatif de défauts applicable au contrôle qualité de production. Ces deux techniques complémentaires nous permettent de déceler des discontinuités (dans la matière de base, fissuration ou dédoublement, manque de compacité... ; dans les assemblages, présence d'inclusions, manque de brasure ou de fusion dans les joints soudés, cavités...). Après un bref aperçu des principes physiques régissant les deux techniques, des exemples récents de contrôles appliqués au LHC et aux expériences seront exposés.

## 1 INTRODUCTION

Les méthodes de Contrôle Non Destructif (CND) prennent toute leur importance lors de la construction d'ensembles complexes comme ceux réalisés au CERN pour la construction du LHC et des expériences qui le jalonnent. Chaque fois que la prise d'échantillonnage n'est plus possible et que le contrôle des matériaux et des assemblages reste essentiel pour leur qualification, les contrôles par ressuage (PT), magnétoscopie (MT), ultrasons (US) ou radiographie (RT) deviennent des outils incontournables et sont prévus par l'assurance qualité qui accompagne la fabrication.

En raison de la demande sans cesse croissante de ces différentes inspections, le laboratoire de métallurgie du CERN, qui a entre autres comme vocation la définition et le suivi des plans de contrôle qualité, s'est doté de moyens importants en ce qui concerne l'évaluation non destructive par ultrasons et s'est fixé comme objectif d'acquérir une expertise en radiographie X et gamma.

Il convient d'expliquer sommairement la physique des deux procédés avant de montrer en quoi ils sont complémentaires. Enfin, les applications récentes les plus significatives seront décrites.

## 2 LE CONTRÔLE PAR ULTRASONS

Il utilise, comme tout système sonore, les vibrations mécaniques à des fréquences allant de 0.1 MHz à 100 MHz. Les ondes ultrasonores sont utilisées par certains mammifères comme les baleines ou les dauphins qui s'en servent pour communiquer à des distances parfois très importantes ou par d'autres pour se diriger : c'est le cas des chauves souris.

La première utilisation industrielle des ultrasons date de la fabrication des sonars maritimes (P. Langevin, 1918). Elle est directement issue de la découverte de la "piézoélectricité" par P. et M. Curie (1880) qui permet de générer une vibration mécanique et de la transmettre à un matériau. Depuis, les ultrasons sont utilisés en médecine, dans l'électronique ou le contrôle des matériaux.

### 2.1 Théorie des ondes ultrasonores

#### 2.1.1 Différents types d'ondes ultrasonores

Les ondes ultrasonores se déplacent avec une célérité différente en fonction du matériau ou du milieu qu'elles traversent selon la formule :  $C = (E/\rho) \cdot [(1 - \nu) / ((1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu))]^{1/2}$  où E = module d'élasticité,  $\rho$  = masse volumique et  $\nu$  représente le coefficient de Poisson.

La célérité C dans l'eau vaut 1500 m/s, dans le plexiglas 2500 m/s, dans le cuivre 4600 m/s et dans les aciers de construction 5900 m/s.

L'impédance acoustique (Z) d'un matériau est le produit de sa masse volumique et de la célérité du son :  $Z = \rho \cdot C$ .

Plusieurs modes de propagation coexistent, définis en fonction de la relation entre la direction du parcours de l'onde et le sens de vibration des atomes constituant le matériau :

- Les ondes longitudinales sont des ondes de compression, la direction de vibration des atomes est parallèle à la direction de propagation de l'onde US. Elles se propagent à une vitesse  $C_l$  qui dépend du milieu, et dans tous les milieux (solides, liquides, gaz).
- Les ondes transversales sont des ondes de cisaillement, la direction de vibration des particules est perpendiculaire à la direction de propagation des ondes US. Elles se propagent à une vitesse  $C_t$  mais uniquement dans les solides ou dans les liquides très visqueux. Pour un matériau donné,  $C_t \approx 0.5 C_l$ .
- Les ondes de surfaces (ou de Rayleigh) résultent de la superposition des ondes transversales et des ondes longitudinales. Elles se propagent comme une vague à la surface du milieu. Pour un matériau donné, leur vitesse de propagation est :  $C_s \approx 0.9 C_t$ . Ces ondes ne pénètrent pratiquement pas à l'intérieur du métal et on peut les considérer comme inexistantes au delà de quelques longueurs d'ondes de profondeur.

- Les ondes de plaques (ou de Lamb) correspondent à des ondes de Rayleigh appliquées à des plaques de fine épaisseur. Elles se propagent à une vitesse  $C_L$ . La formation des ondes de Lamb dépend de la fréquence du transducteur, de l'épaisseur du matériau à contrôler et de l'angle d'incidence de l'onde.

### 2.1.2 Longueur d'onde, période et fréquence

La période est le temps au bout duquel un phénomène se répète identique à lui-même. La fréquence correspond au nombre de périodes par unité de temps. La longueur d'onde est la distance au bout de laquelle un phénomène se répète identique à lui-même. La relation qui lie la période (T) à la fréquence (F) est:  $T = 1/F$ . La relation qui lie la période T à la longueur d'onde est  $\lambda = C \cdot T$  d'où la relation donnant la longueur d'onde dans un matériau donné en fonction de la fréquence du palpeur utilisé :  $\lambda = C/F$ .

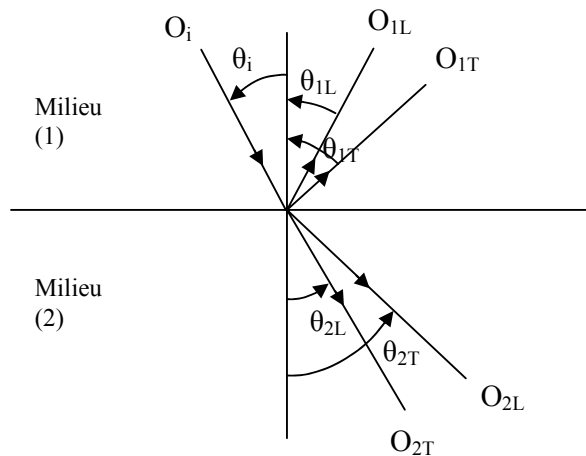
## 2.2 La loi de SNELL-DESCARTES

Lorsqu'une onde ultrasonore passe d'un milieu à un autre (notion d'interface) avec un angle d'incidence différent de  $0^\circ$  il y a réfraction et réflexion d'ondes longitudinales et transversales (Fig.1).

$O_i$  : Onde incidente

$O_{1L}$  : Onde Réfléchie Longitudinale     $O_{2L}$  : Onde Réfractée Longitudinale

$O_{1T}$  : Onde Réfléchie Transversale     $O_{2T}$  : Onde Réfractée Transversale

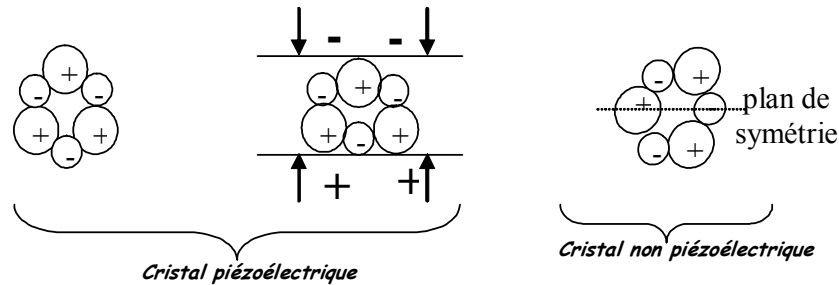


**Fig.1:** Transmission des ondes en incidence oblique

On a la relation suivante :  $\sin\theta_i/C_i = \sin\theta_{1L}/C_{1L} = \sin\theta_{1T}/C_{1T} = \sin\theta_{2L}/C_{2L} = \sin\theta_{2T}/C_{2T}$ .  $C_x$  est la célérité de l'onde dans les différents milieux.

## 2.3 La piézoélectricité

C'est la propriété qu'ont certains matériaux de se déformer sous l'effet d'une charge électrique mais également (et c'est très important pour notre application) d'émettre un signal électrique sous l'effet d'une contrainte mécanique. Pour être nantis de cette propriété, les matériaux piézoélectriques doivent posséder un arrangement atomique particulier qui fait qu'en polarisant deux faces parallèles d'une pastille issue de ces matériaux, les ions positifs et négatifs créent une contraction dans un sens et une dilatation dans l'autre (Fig. 2).



**Fig.2** : Cristallographie des matériaux piézoélectriques

Les principaux matériaux piézoélectriques sont: le quartz (difficile à mettre en œuvre à cause de sa taille délicate dans le plan cristallin voulu), le sulfanate de lithium, le niobiate de lithium ou encore le sel de Rochelle.

## 2.4 La ferroélectricité

Sous l'effet d'un champ électrique intense, une pastille ferroélectrique se dilate mais ne se contracte pas. Le phénomène de ferroélectricité correspond à un allongement de la maille dans la direction du champ appliqué. Les céramiques polycristallines à grains fins, pour lesquelles la réorientation des dipôles est très difficile à température ambiante, sont maintenues à hautes températures. Elles sont ensuite refroidies lentement en maintenant un champ électrique intense ce qui "gèle" de nombreux domaines, polarisant ainsi la pastille. Les céramiques ont l'avantage d'être faciles à obtenir et peuvent prendre des formes complexes. Cependant si la température dépasse le point de Curie la pastille perd ses propriétés piézoélectriques et redevient ferroélectrique. Les deux principales céramiques ferroélectriques utilisées pour la fabrication de transducteurs sont : le titanate de baryum ( $\text{TiBO}_3$ ) et le PZT.

## 2.5 Fabrication et caractéristiques d'un transducteur (palpeur)

Le transducteur (pastille piézo ou ferroélectrique) : la principale caractéristique d'un palpeur est la fréquence à laquelle son élément actif (transducteur) émet les ondes ultrasonores. C'est l'épaisseur de cet élément qui donne la fréquence du palpeur selon la formule  $f_r = C/2e$ , où  $f_r$  = fréquence de résonance de la pastille et  $e$  son épaisseur.

L'amortisseur limite les ondes ultrasonores dans le temps, il diminue la vibration du transducteur (élément piézoélectrique) en absorbant les vibrations émises par sa face arrière. Il est constitué de morceaux de caoutchouc mélangé à de la poudre de tungstène. De son efficacité dépend la résolution du palpeur.

La semelle est réalisée en matériau très dur pour le contrôle direct et en plexiglas ou en résine rigide pour le contrôle par immersion. Son but est de ne pas abîmer la face avant du transducteur et d'empêcher les perturbations du spectre en fréquence d'un palpeur large bande. Elle doit être très minutieusement collée au transducteur afin de ne pas altérer la transmission des vibrations.

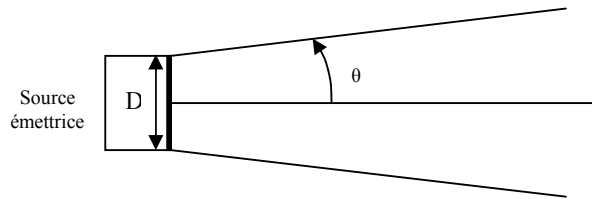
Le boîtier peut être de toutes formes et dimensions mais doit en tous cas assurer une manipulation confortable et une mise à la masse électrique efficace de la pastille piézoélectrique.

## 2.6 Le faisceau ultrasonore

Un palpeur peut être assimilé à un diaphragme circulaire dont chaque point de la surface génère une vibration ultrasonore élémentaire. Si l'on se place en un point de l'espace devant cette source, la vibration résultante est la somme de toutes les vibrations élémentaires émises par l'ensemble de la surface du disque émetteur formant ainsi un faisceau qui, à cause de phénomènes de diffraction n'a pas les mêmes caractéristiques en tout point.

## Le phénomène de divergence du faisceau ultrasonore

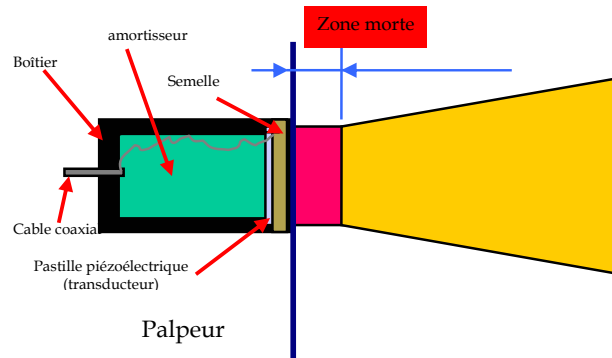
A longue distance la distribution de l'intensité acoustique reçue en fonction du sinus de l'angle  $\theta$  par rapport à la normale à la surface du transducteur peut être exprimée à l'aide d'une fonction de Bessel du 1<sup>er</sup> ordre.



**Fig. 3:** Divergence du faisceau

D'après les tables numériques, ce demi angle  $\theta$  au sommet du cône de divergence (Fig. 3) est donné par la formule de Fraunhofer,  $\sin \theta = 1.22 \lambda/D$  où  $D$  est le diamètre de la pastille piézoélectrique.

A courte distance lorsque l'émetteur génère une onde ultrasonore, il y a une région proche de l'émetteur où l'on observe des phénomènes d'interférence qui rendent inexploitable les échos reçus. La longueur de cette zone, appelée zone proche ou zone morte ( $N$ ) est donnée par la relation:  $N = D^2 / 4\lambda$ .



**Fig. 4 :** Palpeur et faisceau ultrasonore.

### 2.7 Principe du contrôle

Le contrôle par ultrason consiste à monitorer la trajectoire d'une onde ultrasonore dans un matériau (Fig. 5). Le temps que met l'onde pour traverser la totalité de la pièce est calibré sur une cale de référence. Si un défaut apparaît, le temps de parcours de l'onde sonore correspond sur l'oscilloscope à un pic intermédiaire dont l'amplitude dépend du rapport entre la taille de la discontinuité et celle du diamètre du faisceau à cette profondeur.

### 2.8 Méthodologie du contrôle

Le contrôle peut être fait manuellement par contact direct du palpeur sur la surface de la pièce ou en immersion. Dans ce deuxième cas, la pièce est immergée dans de l'eau et le palpeur déplacé automatiquement au dessus de la zone à contrôler. La transmission de l'onde ultrasonore se fait à travers une hauteur d'eau constante. La technique de contrôle en immersion permet l'utilisation de palpeurs focalisés, ce qui augmente la résolution du contrôle.

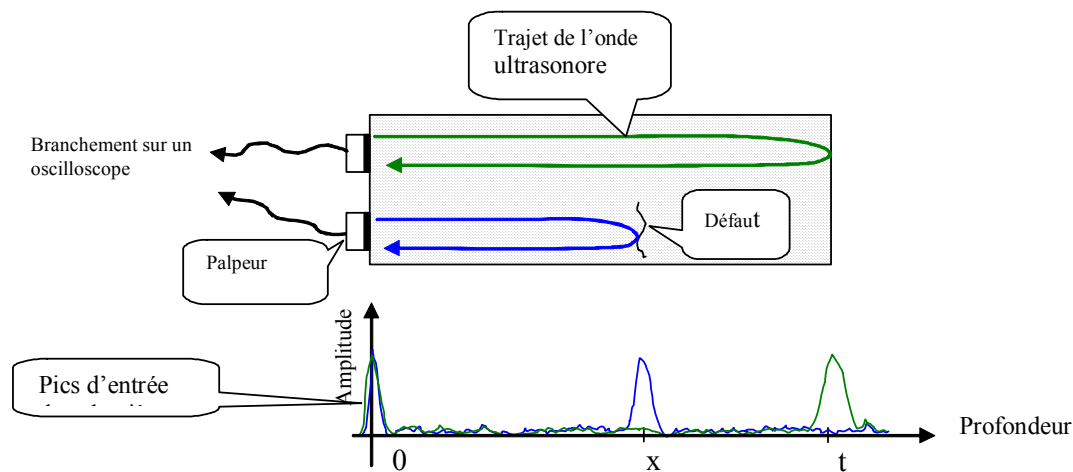


Fig. 5: Représentation schématique de la méthode de contrôle par réflexion.

## 2.9 Exemple d'application des contrôles par ultrasons

### 2.9.1 Par contact direct :

Outre les contrôles réguliers effectués lors de la réception au CERN de la matière première (cuivre OFE, acier inoxydable AISI 316LN ou 304L...) sous forme de blocs, de barres, d'ébauches ou de tôles, de nombreuses campagnes de contrôle de soudures sont régulièrement effectuées. Les soudures des supports des pied d'ATLAS n'ayant pas été contrôlées à la fabrication, elles l'ont été par nos soins à la réception des composants au CERN. Cette opération a demandé l'établissement d'une procédure spéciale permettant le contrôle de fortes épaisseurs en acier inoxydable en ondes transversales. Il en a été de même avec les soudures des supports du détecteur d'Alice qui est composé d'une structure tubulaire en acier inoxydable AISI 304L.

Une procédure spécifique et un suivi de contrôle lors de la production des tirants de CMS en alliage de titane ont été effectués en Russie afin de garantir la fiabilité de la production.

Pour les bobines de CMS, une opération récente a permis la poursuite du processus de fabrication en démontrant à l'aide des ultrasons qu'un défaut repéré lors du soudage des renforts n'avait pas d'influence sur le câble supraconducteur de la bobine.

### 2.9.2 En immersion

Cette technique nous permet principalement de réaliser le contrôle des assemblages brasés. Cela a été le cas pour les brasures des prises de température en cuivre sur les tubes en acier inoxydable de la ligne cryogénique du LHC.

Lors de développements récents, nous avons montré que l'interface de capillaires de refroidissement en acier inoxydable insérés dans des pièces de fonderie en aluminium (radiateurs ECAL d'ATLAS) pouvait être contrôlée. Lors de la mise au point du procédé, en collaboration avec la fonderie, nous avons participé à la définition du moule et amélioré de façon notable la qualité de la fabrication.

## 3 CONTRÔLE PAR RADIOGRAPHIE

Cette méthode fait intervenir les rayonnements ionisants traversant la pièce ou la soudure de part en part dans le but d'imprimer une empreinte sur un film photosensible.

Elle est tributaire de la loi exponentielle d'absorption (loi de Beer) des photons X ou des rayons gamma par la nature du matériau à traverser :  $I = I_0 e^{-\mu x}$ , où  $I$  est l'intensité après absorption,  $I_0$  représente l'intensité initiale,  $x$  l'épaisseur à traverser et  $\mu$  est le coefficient d'absorption linéaire caractéristique du matériau et de l'énergie du rayonnement.

### 3.1 Sources de rayonnement

Pour le rayonnement X, une source de rayons X d'une énergie comprise entre 40 keV et 400 keV est utilisée. Elle est employée dans le cas de contrôles de pièces peu épaisses constituées d'un matériau dont la densité n'est pas trop importante (maximum 100 keV : 15 mm d'acier).

Le rayonnement gamma est obtenu à l'aide d'isotopes qui sont véhiculés dans un appareil blindé (GAMS) muni d'une canne d'éjection par laquelle on amène la source près de la zone de contrôle. Les sources couramment utilisées sont :  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{170}\text{Tm}$ ,  $^{75}\text{Se}$  ou  $^{137}\text{Cr}$ . Leur activité est variable en fonction du temps. La décroissance suit la loi  $A_t = A_0/(2t/T)$ , où  $A_t$  = activité au temps t,  $A_0$  = activité initiale, T = période de l'élément et t = temps d'utilisation.

### 3.2 Les Films

La couche sensible des films est réalisée en gélatine renfermant des grains de bromure d'argent qui, lors du développement, se transforment en argent métallique. Plus la densité de rayonnement augmente, plus la zone exposée noircit.

Les films sont caractérisés par leur définition (netteté des contours et résolution spatiale), leur sensibilité (rapidité de réponse de la couche sensible) et leur granulation (homogénéité des grains de bromure d'argent dans la gélatine). Le temps d'exposition du film est tributaire de sa sensibilité et du courant du tube i. Le temps d'exposition décroît avec le carré de la distance selon la formule : facteur d'exposition =  $i \cdot t / D^2$ , où D est la distance source / film.

Les films sont livrés en cartouches hermétiques dans lesquelles sont incorporés les filtres et les écrans de blocages qui sont fait de plaques de plomb de 0.05 mm à 0.15 mm d'épaisseur selon l'utilisation que l'on doit en faire.

### 3.3 Types de contrôles réalisés par cette méthode

Alors que l'assemblage par soudage des divers éléments de la machine ou des expériences est en train de se réaliser, le contrôle par radiographie est quotidiennement utilisé pour qualifier les soudures TIG ou MIG pour l'assemblage de tubes ou de plaques dont les épaisseurs varient de 1 mm à 15 mm en acier inoxydable ou en cuivre. Les exemples les plus révélateurs sont : le suivi de fabrication des chambres LSS, la qualification des soudures des lignes cryogéniques, le contrôle de soudage des « BT integration 2 » pour ATLAS.

## 4 CONCLUSION

La radiographie et le contrôle par ultrasons sont des méthodes complémentaires qui permettent d'identifier, de positionner et de dimensionner les défauts afin de qualifier la matière ou les assemblages par rapport à des normes et en relation avec des critères définis dans les plans de contrôle qualité.

Les récents progrès réalisés au CERN dans le domaine des contrôles non destructifs par ultrasons, que ce soit grâce à l'acquisition de matériel récent ou par la formation du personnel (COFREND 3) à ces techniques, procurent au laboratoire de métallurgie une expertise au service de la machine ou des expériences qui évoluera dans les prochaines années vers un renfort des connaissances par une qualification dans les contrôles par radiographie.