

# DÉTECTION ET DIMENSIONNEMENT DES PERTES D'ÉPAISSEURS EN RACINE DE SOUDURE

## DETECTION AND SIZING OF WELD ROOT THICKNESS LOSSES

Th. KNOOK  
EDF/DTG, 21 Avenue de l'europe, 38040 Grenoble

### Résumé

Sur les tuyauteries en salle des machines des centrales nucléaires du parc EDF, la sensibilité particulière des soudures à la corrosion-érosion a été soulevée et un bilan des cas de dégradations, ainsi qu'un important programme d'expertises de pièces déposées contenant des soudures affectées a été réalisé 2005/2006. Ces expertises montrent des cas de dégradations en racine de soudure et/ou à proximité des racines. La forme de ces dégradations est, entre autre, liée à la teneur en chrome du métal déposé ainsi qu'à la teneur en chrome du métal de base des composants adjacents.

La détection et dimensionnement de ces dégradations par des moyens classiques comme les mesures d'épaisseurs par ultrasons, pose parfois des problèmes du fait de la présence de la soudure. Afin de palier à ce problème, EDF/DTG a engagé des essais de validation d'autres méthodes de CND permettant de détecter et dimensionner les pertes d'épaisseur en racine des soudures et dans la zone adjacente.

Cette présentation montre les résultats des essais réalisés par la radiographie numérique (RN) et les ultrasons basés sur la méthode TOFD. Ces méthodes ont été choisies car complémentaires l'un à l'autre dans certains cas, selon la géométrie des composants, l'encombrement sur site ainsi que les conditions d'intervention. La présentation décrit les résultats des essais réalisés et les performances de ces méthodes.

### Abstract

*After recent events in NPP, EDF/DTG re-examined its existing inspection strategy of Flow Accelerated Corrosion (FAC) for the secondary loop of its NPPs. Welds, which are not yet taken into account by the predictive software BRT-CICEROTM, have been identified as a weak point. An inventory of the welds inspections and a program of metallurgical examinations on field components have been established. The use of classical Non Destructive Examination techniques like ultrasonic or radiography is not efficient enough for the detection and dimensioning of weld root degradation. This is the reason why EDF/DTG qualified two specific inspection methods. These NDE techniques are the ultrasonic technique TOFD (Time of Flight of Diffraction) and digital radiography. The test program permitted to establish the accuracy and limits of both methods. Field application of both methods is planned in 2008.*

## INTRODUCTION

Le présent document décrit le déroulement et les résultats des essais réalisés dans le cadre de la validation de la méthode de contrôle ultrasonore TOFD (Time Of Flight of Diffraction) et radiographie numérique (RN) pour la détection et dimensionnement des pertes d'épaisseur au niveau de la racine des soudures et à proximité.

Les essais ont été réalisés suivant un programme préétabli et comprend une phase d'essais sur des blocs et tubes étalons et une phase d'essais sur des composants avec des défauts réels.

## DESCRIPTION DE LA PROBLEMATIQUE

Sur les tuyauteries en salle des machines de nos centrales, la sensibilité particulière des soudures à la corrosion-érosion a été soulevée lors de la Revue Technique « corrosion/érosion » fin 2004 qui a fait suite à l'accident de MIHAMA au Japon. Un bilan des cas de dégradation de soudure survenus sur le Parc EDF ainsi qu'un important programme d'expertises de pièces déposées contenant des soudures affectées ont été réalisés par le laboratoire d'EDF (CEIDRE) en 2005/2006.

Ces expertises montrent des cas de dégradations en racine de soudure et/ou à proximité des racines. La forme de ces dégradations est fortement liée à la teneur en chrome du métal déposé et celle du métal de base des composants adjacents.

La recherche de ces dégradations peut être réalisée par plusieurs méthodes de contrôles non destructifs dont la Radiographie Numérique et les ultrasons basés sur la méthode TOFD. Les deux méthodes sont complémentaires dans certains cas, selon la géométrie des composants, l'encombrement sur site ainsi que les conditions d'intervention.

## PRINCIPE DE MESURE PAR TOFD

La technique de contrôle appelée Time Of Flight of Diffraction (TOFD) est basée sur le principe des ondes diffractées à la différence des ultrasons basés sur la réflexion. Le TOFD utilise les ondes longitudinales (OL) dont le principe est illustré dans l'annexe 1.

Le couple de transducteurs émetteur-récepteur « remplit » le volume à contrôler avec des ondes ultrasonores. Dans l'ensemble des ondes émis on trouve :

l'onde latérale de surface (A), qui passe juste en dessous de la surface de l'émetteur vers le récepteur suivant le chemin le plus court (ligne droite) et les ondes de diffraction (B,C et D) générées par un défaut ou la face opposée.

Quand une onde rencontre l'extrémité d'un défaut, celle-ci émet à son tour des ondes diffractées OL dans toutes les directions (forme sphérique), ce qui permet une latitude importante dans la position des transducteurs. L'émission de l'onde OL diffractée ainsi créée ne dépend pas de la position du défaut (*comme avec les US classiques en mode réflexion*). Il suffit que le défaut se trouve dans le faisceau émetteur, d'où l'intérêt d'utiliser des transducteurs petits mais avec un faisceau ouvert (divergent) et un gain important (50 à 60 dB).

Le défaut émet également un signal diffracté en son autre extrémité ce qui permet de dimensionner une indication en hauteur.

La face opposée émet également une onde diffractée permettant de déterminer l'épaisseur de la pièce ou, pour notre application, le ligament restant.

Dans l'utilisation du TOFD deux caractéristiques de cette technique doivent être prises en compte par l'opérateur :

Le TOFD ne permet pas de faire la distinction entre un défaut plan ou un défaut volumique. Ceci explique, entre autre, pourquoi le TOFD n'est pas encore appliqué à grande échelle pour le contrôle volumique des soudures. La plupart des codes et normes applicables, utilisent la notion plan/volumique dans la détermination des critères d'acceptabilité. La norme européenne définissant les critères d'acceptation (EN15617) est en cours de validation.

Le TOFD permet de prendre en compte la notion « dimension » des défauts, car la technique permet de « mesurer » la hauteur et la longueur de celui-ci. Le dimensionnement est réalisé sur les signaux HF non redressés basés sur l'inversion du signal et non pas sur son l'amplitude.

Le TOFD est une technique ultrasons et donc sensible à la structure métallurgique des soudures. De ce fait, les contrôles des soudures en aciers austénitiques sont exclus du champ d'application du présent programme.

Les différentes formes géométriques complexes des pièces peuvent être pris en compte mais nécessitent des essais et/ou simulations dans certains cas. (soudures proches des divergents par exemple).

## **METHODOLOGIE DE VALIDATION**

Pour la validation de la technique TOFD un programme d'essais a été établi. Ce programme consiste à faire des mesures du ligament restant sur des blocs avec défaut artificiel de dimensions connues et de comparer les mesures obtenues avec les dimensions réelles. La précision de la méthode est déterminée à partir des essais sur ces blocs. Des essais complémentaires sur des composants réels sont ensuite réalisés pour vérifier les paramètres d'essais sur des composants avec des défauts réalistes.

## **DESCRIPTION DES BLOCS D'ESSAIS**

Pour les essais de démonstration des performances, 5 blocs d'essais ont été réalisés dont 4 plans et 1 avec un plan incliné à 27°. L'épaisseur des 4 blocs plans a été choisie en fonction des épaisseurs à contrôler et en respectant les recommandations de la norme CEN/TS 14751. Elle varie de 6 à 35mm. Le bloc n°5 comporte une partie inclinée à 27° pour représenter un assemblage tube/divergent.

Le défaut implanté dans chacun des blocs représente l'usure de la soudure localisée à sa racine dont la forme est un cône avec un angle de 60° et un rayon au sommet de 2,5 mm.

Le défaut artificiel, démarre à environ 25 mm du bord du bloc et se termine à l'autre à environ 50% de l'épaisseur. Les défauts artificiels ainsi que les dimensions globales des blocs ont été mesurées après usinage. La forme des blocs est indiquée en annexe 2.

## **DESCRIPTION DES COMPOSANTS REELS**

Après les essais sur les blocs de référence, des essais complémentaires ont été réalisés sur des composants avec des défauts d'usure réels en racine de soudure et/ou des pertes d'épaisseurs.

Les schémas des deux composants utilisés sont indiqués en annexe 3.

Le composant n° 1 comporte une extrémité d'un robinet soudée sur un divergent, lui-même soudé sur un tube droit.

Le composant n° 2 comporte un divergent soudé sur un tube droit. Ce composant présente une usure au niveau de la racine de la soudure.

Afin de pouvoir comparer les épaisseurs mesurées par le TOFD avec celles des composants, ceux-ci ont fait objet d'une vérification dimensionnelle sur un banc métrologique. Sur chaque composant, le relevé métrologique est réalisé sur 24 génératrices (tous les 15°) avec un pas de 1 mm avec une précision sur la mesure de l'épaisseur des parties courantes hors soudures de +/- 0,05 mm en absolu.

Pour la détermination du ligament restant au niveau de la soudure du composant n°1, un relevé de profil a été réalisé tous les 15° sur une empreinte de la zone et à l'aide d'un rugosimètre à débattement important.

## **PARAMETRES INFLUENTS DANS LA MESURE PAR TOFD**

Pour la détermination de la précision des mesures il est nécessaire d'évaluer les paramètres influents. Pour la mesure du ligament restant par le TOFD, les paramètres suivants sont pris en compte dans les essais :

- La vitesse de propagation des ultrasons dans l'acier au carbone
- La géométrie des composants à contrôler
- L'épaisseur à contrôler
- La forme et position des défauts
- La distance entre les transducteurs et le décentrage du défaut entre les transducteurs
- La fréquence et l'angle d'incidence des transducteurs

D'autres paramètres influents comme l'état de surface, la qualité des transducteurs (bande passante, amortissement, etc,..), la qualité de couplage, le réglage du base temps et le gain sont pris en compte de façon globale dans la détermination de la précision car considérés, soit négligeables, soit correctement maîtrisés par les procédures.

### a. Vitesse de propagation

La vitesse de propagation des ultrasons dans l'acier non allié dépend de sa composition chimique, son mode d'élaboration, les contraintes internes ainsi que de la fréquence même des ultrasons. Pour les ondes longitudinales (OL) dans l'acier au carbone, la vitesse peut varier entre 5870 et 5970m/s. Pour les contrôles on applique la valeur de référence de 5920 +/- 50m/s.

Pour l'influence sur les mesures réalisées par le TOFD cette variation de +/- 0,8% est prise en compte dans la détermination de l'incertitude totale.

### b. Géométrie des composants

Pour le contrôle par TOFD, la géométrie des composants peut poser des problèmes pour ce qui concerne les petits diamètres. On considère que le contrôle peut être effectué sans restrictions pour des diamètres supérieurs à 3 pouce (env. 76mm). Pour des diamètres plus petits il est nécessaire d'utiliser des transducteurs avec des semelles rectifiées. (cf Fig 1)

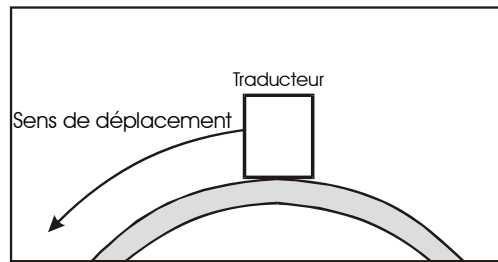


Fig 1 : Traducteur TOFD sur surface courbée

Le problème rencontré sur les tuyauteries de faible diamètre est la perte du couplage par le basculement des traducteurs.

La forme de la tuyauterie dans le sens longitudinal doit également être prise en compte dans les essais, ainsi que le contrôle à proximité d'un divergent (traducteur sur une pente). Pour ce qui concerne les contrôles à proximité d'un divergent, un bloc spécifique a été réalisé (cf annexe 2), et des essais complémentaires ont été réalisés sur ce bloc dont les résultats sont en cours de dépouillement.

c. Épaisseur à contrôler.

L'épaisseur à contrôler peut avoir une influence sur la précision de mesure du ligament restant. Ce paramètre est pris en compte dans les essais sur les 4 blocs dont l'épaisseur varie entre 6 et 35 mm. En application de la norme CEN/TS 14751 les blocs de référence doivent avoir une épaisseur entre 0,8 et 1,5 x l'épaisseur à contrôler.

Le domaine d'application des essais présentés couvre les épaisseurs de 4 à 43,8 mm.

d. Forme et position des défauts.

La forme mais surtout la position du défaut par rapport aux traducteurs peut avoir une influence sur la précision de la mesure. Pour cela ce paramètre est pris en compte dans les essais par des acquisitions avec « offset » par rapport au centre du défaut. La zone couverte par le TOFD peut être vérifiée par l'outil TOFD-Tools distribué par la société Bell Technologie Ltd en utilisant la courbe « Locus ». (cf Fig 2)

La courbe « Locus » indique pour une hauteur de défaut considérée l'ensemble des points avec un temps de parcours identique entre les traducteurs. Les courbes « Locus » forment des ellipses 'concentriques' sous les traducteurs.

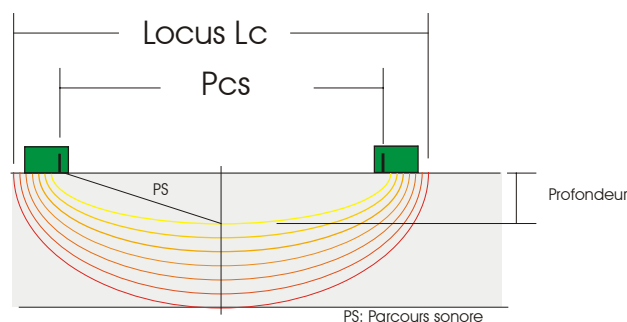


Fig 2 : Courbes Locus

e. Distance entre les traducteurs.

La distance entre les traducteurs (Pcs) détermine avec l'épaisseur et l'angle d'incidence, le point de « focalisation » du signal (point d'énergie sonore maximale). Pour le contrôle d'usure en racine des soudures il est recommandé de déterminer la configuration de telle façon que ce point se trouve au plus près de la racine de la soudure (cf Fig. 3). L'incidence de ce paramètre est vérifiée lors des essais.

Le terme « focalisation » n'est pas à interpréter comme pour des traducteurs ultrasons focalisés. Il s'agit simplement du point de convergence des deux faisceaux sur l'axe nominal des traducteurs.

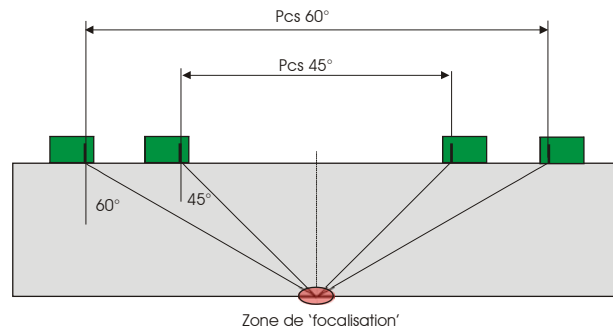


Fig 3 : Zone de 'focalisation'

#### f. Fréquence et angle d'incidence des traducteurs.

L'angle d'incidence des traducteurs détermine avec l'épaisseur et la distance entre les traducteurs le point de « focalisation » du signal (cf Fig3). L'influence de ce paramètre est vérifiée lors des essais dans le cadre des recommandations de la norme CEN/TS 14751 qui indique la fréquence à utiliser selon l'épaisseur à contrôler.

Un angle faible (45° par expl) permet d'avoir un faible écartement entre les traducteurs ce qui est bénéfique pour le signal latéral de surface (parcours plus court). Par contre la fréquence entre le faisceau central (à 45°) est légèrement modifiée pour les ondes en bord du faisceau (expl l'onde de surface).

Un angle très ouvert (70° par expl) peut poser des problèmes pour des très faibles épaisseurs car l'onde de surface et l'onde de fond seront très proches et peuvent être confondues.

L'optimisation du couple traducteurs est à réaliser pour chaque configuration d'inspection selon l'épaisseur à contrôler, la largeur du cordon de soudure et la géométrie des pièces. L'objectif étant d'assurer que le point de « focalisation » se trouve au plus près de la zone à contrôler (la racine de la soudure).

## DESCRIPTION DES ESSAIS

Sur chaque bloc plusieurs essais ont été réalisés afin de prendre en compte les différents paramètres influents et les configurations possibles du tandem des traducteurs en terme de fréquence, angle d'incidence et distance entre les traducteurs. Des essais avec un déplacement latéral du tandem TOFD (offset) ont été réalisés pour vérifier l'incidence sur la qualité de contrôle d'un défaut non centré par rapport aux traducteurs.

La configuration des différents essais est indiquée dans l'annexe 4.

La vérification de la chaîne de mesure est réalisée conformément aux prescriptions de la norme CEN/TS 14751. Le réglage de la base temps est effectué directement sur les blocs d'essais.

## RESULTATS DES ESSAIS

Les résultats d'un des essais sont indiqués en annexe 5 et 6. Les tableaux et les graphiques associés montrent les valeurs du ligament restant mesuré par TOFD, comparées aux valeurs réelles ainsi que les incertitudes. Celles-ci sont déterminées pour la méthode seule et avec la prise en compte de l'incertitude de la variation de la vitesse ultrasonore.

## DETERMINATION DE L'INCERTITUDE DE MESURE

L'incertitude de la mesure par TOFD est déterminée uniquement par les résultats des essais réalisés sur les blocs d'essais. Les mesures sur les composants réels sont analysées afin de vérifier l'applicabilité de la technique sur site.

Incertitude totale

Pour le calcul de l'incertitude de mesure totale il est nécessaire de rajouter l'influence de la vitesse des ultrasons qui varie d'environ 5870 à 5970 m/s dans les aciers au carbone ( $\pm 0,8\%$ ). La variation de 0,8% est considérée comme une valeur de  $2\sigma$

L'expression de l'incertitude totale devient alors :

$$I = \pm \sqrt{\frac{A^2}{3} + \sigma^2 + \left(\frac{0,8\% \times e}{2}\right)^2}$$

A = différence entre la valeur cible et la moyenne des mesures

$\sigma$  = écart type des mesures.

e = épaisseur considérée.

0,8% = Variabilité à  $2\sigma$  de la vitesse des ultrasons dans l'acier au carbone A42 – A48.

## RESULTATS DES MESURES SUR BLOCS D'ESSAIS

Les résultats obtenus sur les 4 blocs d'essais sont représentatifs pour le contrôle des épaisseurs de 4 à 44mm.

L'analyse des résultats obtenus sur ces blocs et avec les transducteurs choisis suivant les recommandations de la CEN/TS 14751, permet de faire les observations suivantes :

Le contrôle du ligament restant est possible sur des tôles de 6 à 35 mm pour un défaut de 0 à 50% de l'épaisseur. La meilleure précision de la mesure du ligament restant est obtenue avec le tandem de transducteurs positionnés de façon symétrique par rapport au défaut. Un faible offset n'a pas ou peu d'influence notable sur la précision. La précision de la mesure se dégrade avec l'augmentation de l'offset.

Pour le bloc de 6 mm, l'incertitude totale est évaluée à  $\pm 0,15$  mm avec un offset de 0 à 6 mm. Le ligament restant minimal pouvant être déterminé est estimé à 1,8mm.

Pour le bloc de 11 mm, l'incertitude totale est évaluée à  $\pm 0,24$  mm avec un offset de 0 à 12 mm.

Pour le bloc de 20 mm, l'incertitude totale est évaluée à  $\pm 0,32$  mm avec un offset de 0 à 12 mm.

Pour le bloc de 35 mm, l'incertitude totale est évaluée à  $\pm 0,38$  mm avec un offset de 0 à 20 mm.

## RESULTATS CONTROLE SOUDURES COMPOSANTS

Les essais réalisés sur les composants confirment les résultats obtenus sur les blocs d'essais. Les valeurs obtenues par le TOFD et les mesures métrologiques sont cohérentes au regard des incertitudes des deux méthodes de mesures (métrologie et TOFD) et montrent qu'un endommagement faible à significatif est facilement détecté et dimensionné par la méthode TOFD.

## IDENTIFICATION DES LIMITES ET DOMAINE D'APPLICATION

Lors d'un contrôle du ligament restant au niveau d'une soudure, les points suivants doivent être respectés : Dans la mesure où la position exacte du défaut n'est pas forcément centrée entre les traducteurs il est nécessaire de faire plusieurs acquisitions complémentaires avec un décalage (offset) de part et d'autre de la soudure.

La séparation des traducteurs doit être adaptée pour pouvoir placer les traducteurs de part et d'autre du cordon de soudure avec un espace suffisant pour faire des contrôles avec un offset latéral. (Cf tableau en conclusion).

Les résultats des essais décrits dans ce document peuvent être utilisés lors d'un contrôle sur site dans les configurations suivantes :

- Épaisseurs de la tuyauterie entre 4 et 43.75 mm
- Diamètre de la tuyauterie : Supérieur à 75 mm. (Pas de limite supérieure)
- Contrôle du ligament restant des soudures bout à bout des tuyauteries en acier au carbone faiblement allié
- Contrôle des soudures circulaires (en attendant des essais sur des soudures longitudinales)
- Configuration des traducteurs (angle d'incidence, fréquence) selon la norme CEN/TS 14751.
- Écartement des traducteurs (Pcs) selon l'épaisseur à contrôler et selon le tableau indiqué en conclusion « configurations recommandées »
- Prise en compte des valeurs minimales des différentes acquisitions.

## CONCLUSION TOFD

Les essais réalisés sur les blocs d'essais et composants réels confirment la faisabilité d'un contrôle du ligament restant en racine de soudure et à proximité à l'aide de la technique TOFD et ceci dans les configurations indiquées par la norme CEN/TS 14751.

Dès lors que le couple de traducteurs est correctement choisi par rapport à l'épaisseur à contrôler et en respectant les prescriptions de cette norme en ce qui concerne les angles et fréquences à utiliser, la précision de la mesure du ligament restant dépend principalement de la position du couple traducteurs par rapport au centre du défaut et de l'épaisseur contrôlée. (fig 4).

La variation de la vitesse des ultrasons de +/- 50 m/s a également une influence sur l'incertitude qui est de 0,8% de l'épaisseur contrôlée.



Afin de couvrir une largeur maximale avec la plus grande précision, il est nécessaire d'effectuer un scan en position centrale par rapport à l'axe de la soudure, puis deux scans avec un offset maximal par rapport au cordon de soudure. De ces 3 scans les valeurs minimales sont ensuite à prendre en compte pour la détermination du ligament restant minimal (fig 5).

En résumé et pour l'ensemble des épaisseurs considérées dans les essais, les précisions applicables sur la mesure du ligament restant au niveau de la racine de la soudure sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

**Configurations recommandées :**

Épaisseur (mm)	Fréquence Recommandée MHz (Norme)	Angle faisceau recommandé $\alpha^\circ$ (Norme)	Distance PCS Optimale mm (Essais)	Incertitude totale (mm)	Zone couverte (mm) avec 3 scans
4 à 7,5	10 - 15	60° - 70°	32	< 0,15	28
7,5 à 13,5	10 - 15	60° - 70°	55	< 0,25	50
13,5 à 25	5 - 10	60°	70	< 0,32	50
25 à 43,8	3 - 5	60°	100	< 0,40	80

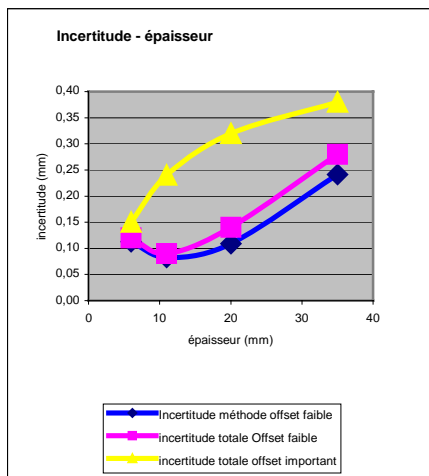


Fig 4 : Incertitude de mesure en fonction de l'épaisseur contrôlée

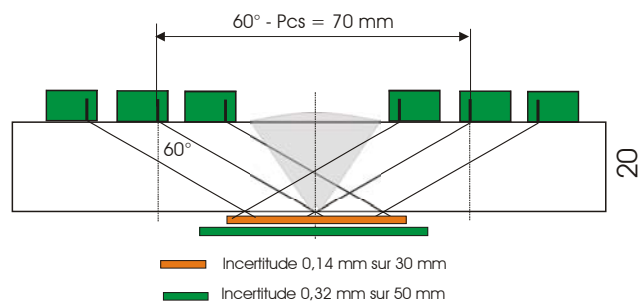


Fig 5 : Incertitude – zone contrôlée

## PRINCIPE DE MESURE PAR RADIOGRAPHIE NUMERIQUE

La radiographie numérique (RN) est une technique de contrôle non destructif basée sur les mêmes principes que la radiographie classique. La différence réside dans le détecteur qui, dans le cas de la radiographie classique est composé d'un film argentique, et dans le cas de la radiographie numérique d'un écran photostimulable (plaque phosphore).

Le principe de l'écran photostimulable est basé sur les propriétés de certaines molécules (phosphores) à capturer une énergie (image latente) lors d'une exposition à un flux de photons 'X' ou gamma. Après exposition, l'écran est « lu » au moyen d'un balayage par un faisceau laser à haute résolution qui stimule les électrons piégés. C'est la phase photo-stimulation. Ceci entraîne une luminance située dans le spectre visible qui peut être mesurée à l'aide d'un photomultiplicateur, numérisée et ensuite stockée dans la mémoire de l'ordinateur en fonction de la position du faisceau laser sur l'écran.

Après avoir été « lu », l'écran peut être effacé à l'aide d'une source de lumière blanche intense, qui provoque le retour à l'état initial de toutes les molécules phosphores.

Le nombre de photons lumineux mesurés est proportionnel au nombre d'électrons piégés qui est proportionnel au nombre de photons 'X' ou gamma qui ont interagi avec l'écran. Ceci permet de révéler sous la forme d'une image numérique la dose réelle reçue sur l'écran. Du fait de la proportionnalité de ces mécanismes, la courbe caractéristique des écrans photostimulables est une droite linéaire, contrairement à celle d'un film argentique qui a la forme d'un 'S'. Cette caractéristique explique notamment la latitude importante dans le temps d'exposition.

Après la numérisation de l'image, l'opérateur dispose d'outils numériques de mesure et de traitement permettant de faire des améliorations de contraste, de zoomer, effectuer des mesures d'épaisseur, etc. Les images numérisées sont sauvegardées sous la forme primitive (fichier source non modifiable) et sous les formes modifiées.

### **Nota important :**

*Il est important de noter que l'utilisation de la RN permet de réduire sensiblement la durée d'exposition et/ou l'activité de la source mais en aucun cas elle ne permet de faire des contrôles sur des épaisseurs plus importantes que la radiographie classique. Le pouvoir de pénétration des rayons 'X' ou gamma, dépend de l'énergie de ces rayons et non de l'activité de la source.*

*La limite de l'application de la RN pour les mesures d'épaisseur est directement liée à l'énergie de la source de rayonnement utilisée (tubes à rayons 'X', sources Se, Ir ou Co).*

## METHODOLOGIE DE VALIDATION

Pour la validation de la technique RN un programme d'essai a été établi. Ce programme consiste à faire des mesures d'épaisseurs sur des tubes d'essais et à comparer les résultats obtenus avec les valeurs réelles. La détermination de la précision de la méthode est réalisée à partir des essais sur les différents tubes d'essais selon la plage d'utilisation. Des essais complémentaires sur des composants réels ont ensuite été réalisés pour vérifier les paramètres d'essais sur des composants réalistes ainsi que les limites d'utilisation.

## DESCRIPTION DES TUBES D'ESSAIS

Les tubes d'essais pour la démonstration des performances des contrôles par radiographie numérique sont des tubes avec des épaisseurs en gradins. Afin de couvrir les diamètres et épaisseurs contrôlables en radiographie numérique, 2 tubes à gradins ont été fabriqués avec un diamètre extérieur de 220 et 150 mm. (cf schémas en annexe 7)

Le tube 1 a un diamètre externe de 150 mm et une longueur totale de 150mm. Ce tube est usiné à l'extérieur et à l'intérieur afin d'obtenir 3 épaisseurs différentes.

Les diamètres internes sont successivement : 140, 142 et 146 mm. La longueur de chaque gradin est de 50 mm. Les épaisseurs des gradins sont : 2, 4 et 5 mm.

Le tube 2 a un diamètre externe de 220 mm et une longueur totale de 150 mm. Le tube est usiné à l'extérieur et à l'intérieur afin d'obtenir 3 épaisseurs différentes.

Les diamètres internes sont successivement : 190, 200 et 210 mm. La hauteur de chaque gradin est 50 mm.

Les épaisseurs des gradins sont : 5, 10 et 15 mm.

## DESCRIPTION DES COMPOSANTS REELS

Les schémas des deux composants utilisés sont indiqués en annexe 3

Le composant n° 1 comporte un bout d'un robinet soudé sur un divergent, lui-même soudé sur un tube droit.

Le composant n° 3 comporte un divergent soudé sur une bride en acier inoxydable.

## PARAMETRES INFLUENTS

Pour la détermination de la précision des mesures il est nécessaire d'évaluer les paramètres influents. Pour la mesure d'épaisseur par la RN les paramètres suivants sont pris en compte dans les essais :

- Distance détecteur – objet
- Distance source – détecteur
- Résolution du détecteur
- Épaisseur de l'objet
- Diamètre de l'objet
- Position du calibre
- Présence du calorifuge
- Présence d'eau

La taille de la source peut également constituer un paramètre influant mais celle-ci n'est pas prise en compte lors des essais. L'influence éventuelle de la structure métallographique (isotrope homogène / pouvoir d'absorption), n'est pas prise en compte non plus car considérée comme négligeable quant aux résultats recherchés. Pour les paramètres influents liés à l'équipement les exigences de la norme EN 14785 sont appliquées.

Les paramètres influents sont illustrés dans le schéma en annexe 8.

- Distances Détecteur - Objet - source

La distance du détecteur par rapport à l'objet et par rapport à la source (cf schémas annexe 7 à 10) est un paramètre influent et pris en compte lors des essais.

La distance Source – Objet est variée entre la position minimale de tir de 4 x le diamètre de l'objet et 7 x le diamètre de l'objet.

La distance 'détecteur' – objet est variée entre la position en contact avec l'objet et en contact avec le calorifuge. L'épaisseur du calorifuge utilisée lors des essais est de 100 mm.

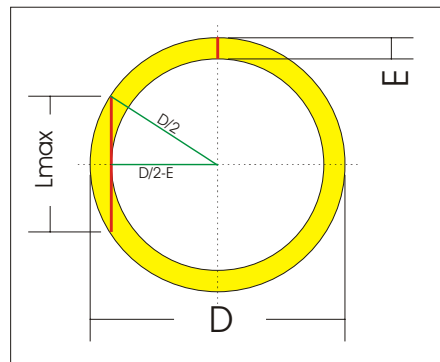
- Résolution du détecteur

La résolution ou la sensibilité des détecteurs utilisés est un paramètre influent. Pour les essais 2 types de détecteurs sont utilisés. Des détecteurs dits « rapides » (type IPC2), et des détecteurs dits « haute résolution » ou lente (type IPS) ont été testés lors des essais.

- Géométrie des pièces à contrôler

Le diamètre et l'épaisseur de la pièce à contrôler ont une influence sur la précision de mesure de l'épaisseur et sont pris en compte dans les essais par l'utilisation de tube d'essais à gradins. Le paramètre essentiel pour la réalisation des tirs est la longueur totale traversée par les rayons.

Ce paramètre appelé L-max est déterminé de la façon suivante :



$$L_{\max} = 2 \times E \sqrt{\frac{D}{E} - 1}$$

- Position du calibre

Lors des mesures d'épaisseur un calibre est positionné de façon visible sur l'image. La position du calibre est variée par rapport à la présence ou non d'un calorifuge. Pour l'ensemble des tirs le calibre est placé contre l'objet ou le calorifuge dans le même plan que la source.

- Présence du calorifuge

La présence du calorifuge est prise en compte dans les essais sur les tubes d'essais. Les caractéristiques du calorifuge utilisé sont identiques à celles utilisées sur le parc EDF. La tôle de protection est en aluminium.

- Présence d'eau

La présence d'eau est prise en compte dans les essais par remplissage du composant 1.

## DESCRIPTION DES ESSAIS

Pour la démonstration des performances de la méthode RN en ce qui concerne la détection et dimensionnement des défauts de perte d'épaisseur, deux types d'essais sont réalisés. Les premiers essais sont réalisés sur les tubes d'essais à gradins, les deuxièmes sur des composants déposés comportant des défauts réels.

Sur les tubes d'essais les mêmes essais ont été réalisés. Pour chaque tube le temps d'exposition est déterminé en prenant en compte les caractéristiques de la source, les épaisseurs à traverser, les différentes distances entre la source, l'objet et le détecteur ainsi que sa sensibilité et la présence ou non des filtres.

Les essais sont réalisés avec les deux types de détecteurs et dans le respect de la norme EN 14784-2. Les différentes configurations d'essais sont indiquées dans le tableau ci-dessous :

Conf.	Distance Détecteur Objet	Distance Source Objet Tube 150 (mm)	Distance Source Objet Tube 220 (mm)	Position source	Position calibre	Présence Calorifuge
A	Contact	600	1100	Centré sur l'objet	Centré à 5 mm de l'objet	Non
B	Contact	900	1600	Centré sur l'objet	Centré à 5 mm de l'objet	Non
C	Contact	600	1100	Centré entre calibre et l'objet	Centré à 5 mm de l'objet	Non
D	Contact	900	1600	Centré entre calibre et l'objet	Centré à 5 mm de l'objet	Non
E	100 mm	600	1100	Centré sur l'objet	Centré à 5 mm du calo.	Oui
F	100 mm	900	1600	Centré sur l'objet	Centré à 5 mm du calo.	Oui
G	100 mm	600	1100	Centré entre calibre et le calo.	Centré à 5 mm du calo.	Oui
H	100 mm	900	1600	Centré entre calibre et le calo.	Centré à 5 mm du calo.	Oui

Tableau 1 : Configurations des tirs sur les tubes d'essais

Pour chaque tube d'essais 16 tirs sont réalisés soit au total 32 tirs seront réalisés sur les tubes d'essais.

Pour chaque tir, l'épaisseur du gradin est déterminée à l'aide du système d'acquisition et les résultats obtenus sont vérifiés par rapport aux mesures mécaniques de chaque gradin. A chaque fois ou cela a été possible, l'épaisseur a été mesurée à droite et à gauche du tube.

Sur les deux composants réels les configurations des tirs est indiqué dans le tableau ci-dessous.

Conf.	Distance Détecteur Objet	Distance Source - Objet Composant 1 Soudure A	Distance Source - Objet Composant 1 Soudure B	Distance Source - Objet Composant 2	Position source	Position calibre	Présence Calorifuge
A	Contact	700	900	650	Centré sur l'objet	Centré à 5 mm de l'objet	Non
B	Contact	1200	1600	1600	Centré sur l'objet	Centré à 5 mm de l'objet	Non
C	Contact	700	900	650	Centré entre calibre et l'objet	Centré à 5 mm de l'objet	Non
D	Contact	1200	1600	1600	Centré entre calibre et l'objet	Centré à 5 mm de l'objet	Non
E	100 mm	700	900	650	Centré sur l'objet	Centré à 5 mm du calo.	Oui
F	100 mm	1200	1600	1600	Centré sur l'objet	Centré à 5 mm du calo.	Oui
G	100 mm	700	900	650	Centré entre calibre et le calo.	Centré à 5 mm du calo.	Oui
H	100 mm	1200	1600	1600	Centré entre calibre et le calo.	Centré à 5 mm du calo.	Oui
A	Contact	700	900	/	Centré sur l'objet	Centré à 5 mm de l'objet	En eau
B	Contact	1200	1600	/	Centré sur l'objet	Centré à 5 mm de l'objet	En eau

Tableau 2 : Configurations des tirs sur les composants réels

Pour chaque tir les résultats sont analysés et les valeurs des mesures d'épaisseurs par RN sont comparées avec celles obtenues à l'aide des mesures tridimensionnelles.

## MISE EN ŒUVRE DES ESSAIS

Les tirs ont été réalisés dans un bunker mis à disposition pour les essais encadrés par une personne de niveau 3 radiographie selon la norme EN 473. Le dépouillement des résultats à été réalisé par un technicien de la société GE, fournisseur du système d'acquisition.

Pour les essais le matériel et logiciel suivants ont été mis en œuvre :

Détecteurs : IP C - IP C2 et IP S (IP C2 est la 2<sup>ème</sup> génération de films IP C)

Scanners : CR50P et CR50XP (marque GE)

Software : Rhythm

Source gamma :  $\text{Ir}^{192}$

Activité :  $^{15}\text{Ci}$  (555Gbpq)

Dimensions source : 2x1 mm

Calibres : 32mm et 30mm

## DETERMINATION DE L'INCERTITUDE DE MESURE

L'incertitude de la mesure par RN est déterminée par les essais réalisés sur les tubes d'essais. Les mesures sur les composants réels sont analysées afin de vérifier l'applicabilité de la technique sur site.

Au final, l'incertitude s'exprime sous la forme  $I = \pm \sqrt{\frac{A^2}{3} + \sigma^2}$  avec un facteur d'élargissement

égal à 1, autrement dit il y a 68% de «chance» pour que la valeur de la grandeur mesurée soit comprise dans l'intervalle +/- I autour du résultat de mesurage (hypothèse loi normale). Avec un facteur d'élargissement égal à 2, donc une incertitude égale à +/- 2 x I, la probabilité serait de 95%, à +/- 3 x I elle serait de 99.7%.

A = différence entre la valeur cible et la moyenne des mesures

$\sigma$  = écart type des mesures.

## RESULTATS DES ESSAIS

Les mesures réalisées sur les tubes et composant n°1 sont indiquées en annexes 10. Sur les tubes d'essais de 150 et 220 mm, 17 tirs radio ont été réalisés et sur les 3 gradins, 84 mesures ont été réalisées.

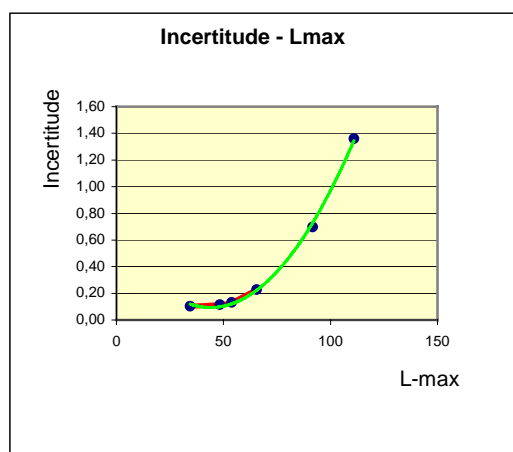
Les mesures réalisées sur le composant n°1 sont indiquées en annexe 10. Sur ce composant, 30 tirs ont été réalisés et plusieurs centaines de mesures ont été réalisées.

## ANALYSE DES RESULTATS SUR TUBES D'ESSAIS

L'analyse des résultats obtenus sur les tubes d'essais dans les configurations d'essais indiqués sous § 20 permet de faire les observations suivantes :

- La configuration des tirs (A à H) n'a pas ou peu d'influence notable sur la précision de la mesure.
- La résolution du détecteur n'a pas une influence notable sur l'incertitude
- Les tirs en position centrée ont des erreurs plus faibles que les tirs décentrés (mesure du point éloigné)
- L'incertitude est directement liée à la valeur de L-max.
- La présence du calorifuge ne gêne pas la réalisation des mesures
- L'incertitude des mesures calculée suivant la formule indiquée sous § 22 et toutes configurations confondues est indiquée dans le tableau ci-dessous :

Diam. (mm)	Epais (mm)	L-max (mm)	Nb mes	Moye n (mm)	Écart Type (mm)	Écart min (mm)	Écart max (mm)	Incert. (mm)
150	2	34	29	2,095	0,087	-0,03	0,34	0,10
150	4	48	29	4,02	0,115	0,17	0,28	0,12
150	5	54	29	5,03	0,13	-0,33	0,32	0,13
220	5	66	30	5,07	0,225	-0,28	0,84	0,23
220	8	82	*	*	*	*	*	*
220	10	92	30	10,22	0,69	-0,91	1,88	0,70
220	11	96	*	*	*	*	*	*
220	12	100	*	*	*	*	*	*
220	13	104	*	*	*	*	*	*
220	15	111	30	15,13	1,36	-2,49	3,74	1,36



\* Essais non encore réalisés.

## ANALYSE DES RESULTATS SUR COMPOSANTS REELS

Les résultats obtenus sur les composants réels confirment ceux obtenus sur les tubes d'essais en ce qui concerne les incertitudes par rapport à la longueur traversée « L-max ».

Le graphique en annexe 10 montre la courbe de tendance d'erreurs toutes configurations confondues (non incluant les essais en eau). Le graphique montre que l'écart entre la mesure métrologique et le mesure par RN monte avec l'augmentation de la valeur L-max. Ces résultats sont cohérents avec les valeurs obtenus sur les tubes d'essais.

Il faut noter qu'il est très difficile de déterminer les incertitudes des mesures sur les composants réels car deux mesures (RN et métrologie) doivent être comparées dont la correspondance est difficile à assurer.

Les essais montrent également que la précision des mesures se dégrade dès lors qu'on s'éloigne de plus de 100 mm du plan de positionnement de la source. Bien que cette dégradation soit observée, elle n'est pas chiffrée en détail.

## IDENTIFICATION DES LIMITES

Lors d'un contrôle d'épaisseur d'une tuyauterie les points suivants doivent être vérifiés :  
Détermination de la longueur L-max. La limite L-max pour des contrôles avec une source Ir 192 est de 95mm environ. Au-delà de cette valeur l'incertitude devient importante (> 0,7mm)  
Les dégradations ne sont pas forcément homogènes sur le diamètre de la tuyauterie contrôlée. Lors d'une inspection sur site 2 tirs à 90° sont à réaliser a minima, permettant d'évaluer les épaisseurs sur 4 génératrices. Les images doivent également être analysées sur les niveaux de gris afin de détecter d'autres zones affectées. D'autres tirs peuvent ainsi être nécessaires afin d'assurer les mesures dans l'ensemble des zones affectées.

Les mesures d'épaisseur peuvent être réalisées avec la précision annoncée en §24 dans la zone de  $\pm 100$  mm de part et d'autre du plan de tir. Au-delà de cette zone il est recommandé de faire des tirs complémentaires.

## CONCLUSION RN

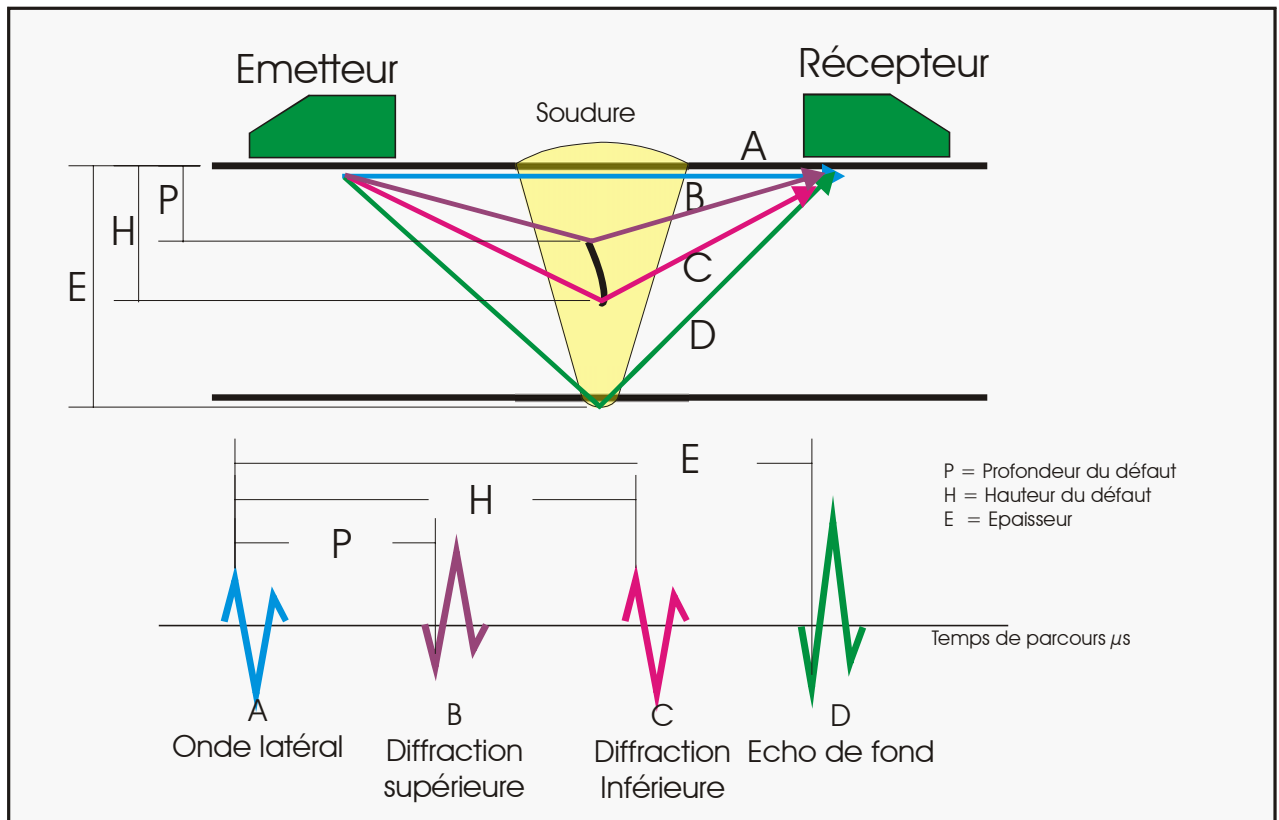
Les résultats des essais mettent en évidence qu'un contrôle de l'épaisseur à l'aide de la technique RN est réalisable dans les configurations indiquées par la norme EN 14785. Le paramètre essentiel à maîtriser pour les contrôles à l'aide de cette technique est la longueur totale de matière traversée par les rayons. Cette longueur « L-max » doit être considérée comme **paramètre essentiel** et permet de déterminer d'une part la faisabilité du contrôle par rapport au diamètre et l'épaisseur de la pièce à contrôler en fonction de la source utilisée et d'autre part, l'incertitude de la mesure.

- La résolution du détecteur n'a pas une influence notable sur la qualité de mesure et l'utilisation de détecteurs dits « rapides » convient aux mesures d'épaisseurs sans restriction.
- La configuration des tirs (cf annexes 9) n'a qu'une influence mineure sur l'incertitude de mesure. Néanmoins et afin d'optimiser les contrôles sur site les tirs doivent être réalisés (dans la mesure du possible) dans les configurations suivantes :
  - Distance source à Objet égale à 4 à 7 fois le diamètre.
  - Position de la source centrée par rapport au tube afin de pouvoir contrôler l'épaisseur sur 2 parois à la fois. Cette position permet de diminuer le nombre de tirs par élément. (Configuration A, B, E et F)
  - Pour chaque élément 2 tirs doivent être réalisés à 90° a minima. En cas de doute sur une zone par interprétation des niveaux de gris, des tirs complémentaires doivent être réalisés à 45° par exemple.
- La présence ou non de calorifuge ne gêne pas le contrôle et l'influence sur l'incertitude de mesure est négligeable \*.
- La présence d'eau dans la tuyauterie n'empêche pas le contrôle mais l'influence sur l'incertitude de mesure et les limites doit faire objet d'essais complémentaires à cause de l'absorption d'énergie. Des essais complémentaires sont prévus en 2008.
- Pour les petits diamètres (< 50mm) le contrôle peut être réalisé à l'aide d'un tube à rayon X (L-max dépend de la puissance du tube). Le tableau en annexe 11 permet de déterminer la source à utiliser par rapport au L-max.
- Le tableau en annexe 12 indique les incertitudes de mesures obtenues expérimentalement en fonction des valeurs L-max correspondant à chaque couple « diamètre – épaisseur ».Le tableau est applicable pour une utilisation d'une source Ir192.

\* Des essais complémentaires sont prévus pour mieux déterminer les limites de la méthode en cas de présence de calorifuge ainsi que l'eau à l'intérieur des tubes.

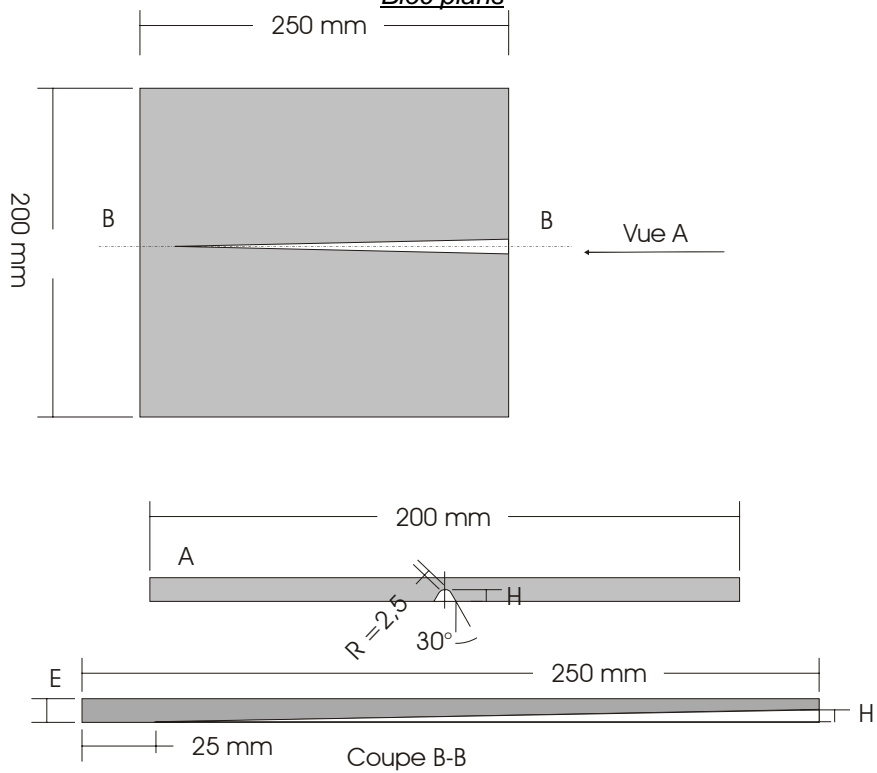


Annexe 1 : Principe du TOFD.



Annexe 2 : Blocs d'essais

Bloc plans



Rugosité : Gorge usinée :  $< Ra\ 3,2$ . Les parties hors gorge :  $< Ra\ 6,3$ .

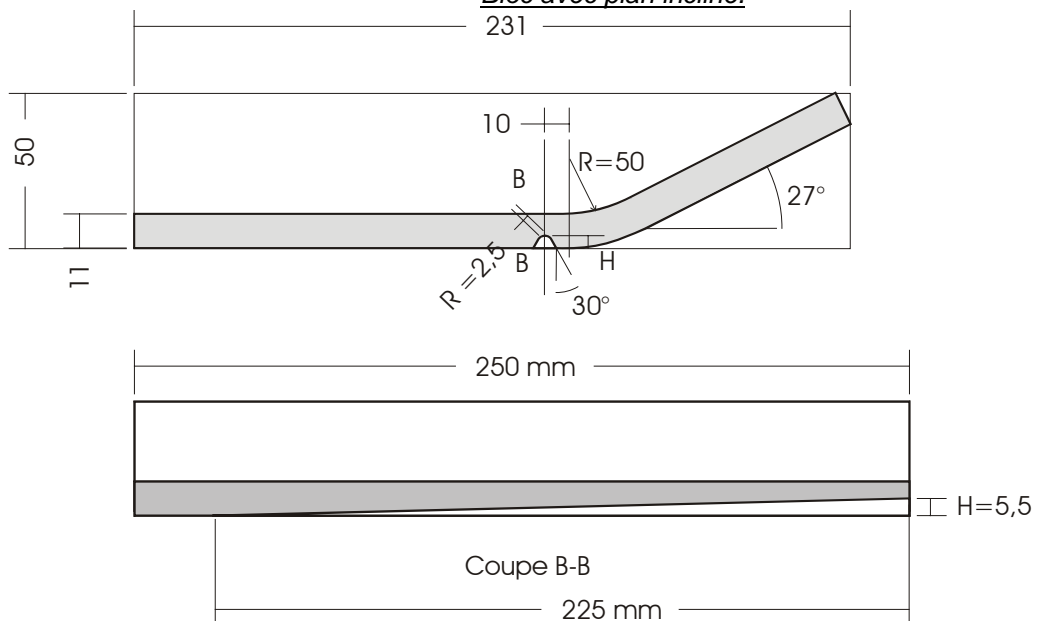
Pour  $E = 6\text{ mm}$  :  $H = 4,2\text{mm}$

Pour  $E = 11\text{ mm}$  :  $H = 5,5\text{mm}$

Pour  $E = 20\text{ mm}$  :  $H = 10,0\text{mm}$

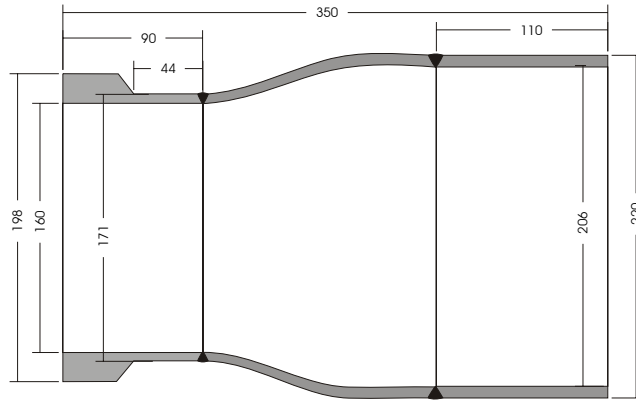
Pour  $E = 35\text{ mm}$  :  $H = 17,5\text{mm}$

Bloc avec plan incliné.

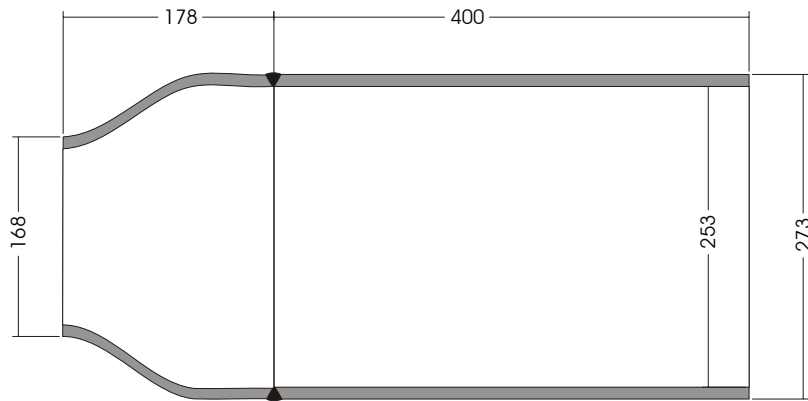


Annexe 3: Composants réels

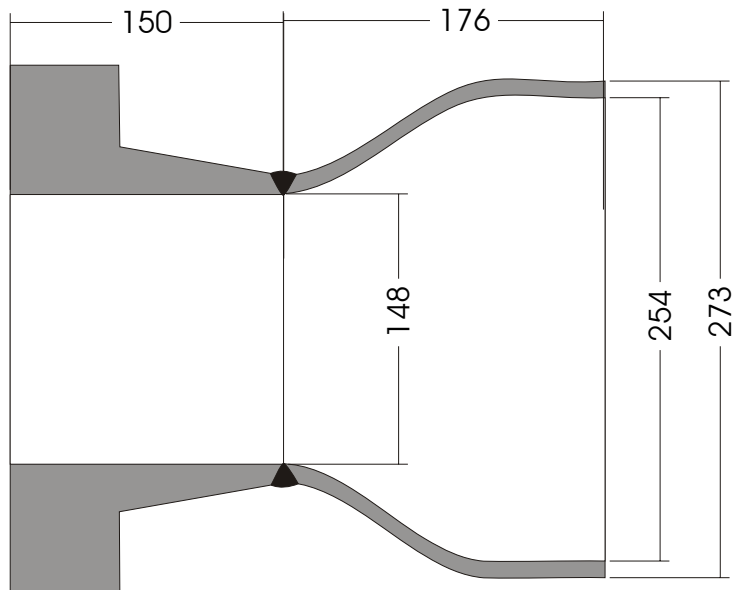
Composant n°1



Composant n°2



Composant n°3



Annexe 4: Configuration des essais:

PARAMETRES DES ESSAIS BLOC 6 MM.

Angle	Freq. MHz	Focal (mm)	PCS (mm)	Position Traducteurs
70°	15	6	32	Centré
70°	15	6	32	Offset de 2 mm
70°	15	6	32	Offset de 4 mm
70°	15	6	32	Offset de 6 mm
60°	10	6	20	Centré
60°	10	6	20	Offset de 2 mm

PARAMETRES DES ESSAIS BLOC 11 MM.

Angle	Freq. MHz	Focal (mm)	PCS (mm)	Position Traducteurs
70°	15	10	55	Centré
70°	15	5,5	30	Centré
70°	15	10	55	Offset de 6 mm
70°	15	10	55	Offset de 12 mm
60°	10	10	36	Centré
60°	10	10	36	Offset de 3 mm
60°	10	7,5	26	Centré
45°	10	10	20	Centré
45°	10	10	20	Offset de 3 mm
45°	10	10	20	Offset de 4 mm
45°	10	10	20	Offset de 6 mm

PARAMETRES DES ESSAIS BLOC 20 MM.

Angle	Freq. MHz	Focal (mm)	PCS (mm)	Position Traducteurs
60°	10	20	70	Centré
60°	10	20	70	Offset de 5 mm
60°	10	20	70	Offset de 10 mm
60°	10	17	60	Centré
60°	10	17	60	Offset de 5 mm
60°	10	13	46	Centré
60°	6	17	60	Centré
60°	6	17	60	Offset de 5 mm
60°	6	17	60	Offset de 10 mm
45°	10	20	40	Centré
45°	10	20	40	Offset de 4mm
45°	10	20	40	Offset de 5 mm
45°	10	20	40	Offset de 10 mm

PARAMETRES DES ESSAIS BLOC 35 MM.

Angle	Freq. MHz	Focal (mm)	PCS (mm)	Position Traducteurs
60°	6	35	120	Centré
60°	6	35	120	Offset de 10 mm
60°	6	35	120	Offset de 20 mm
60°	6	29	100	Centré
60°	6	29	100	Offset de 10 mm
60°	6	23	80	Centré
50°	6	35	84	Centré
50°	6	35	84	Offset de 10 mm
50°	6	35	84	Offset de 20 mm
45°	10	35	70	Centré
45°	10	35	70	Offset de 5 mm
45°	10	35	70	Offset de 10 mm
45°	10	35	70	Offset de 20 mm
45°	10	30	60**	Centré
45°	10	30	60*	Offset de 5 mm
45°	10	30	60**	Offset de 10 mm
45°	10	35	70*	Offset de 20 mm

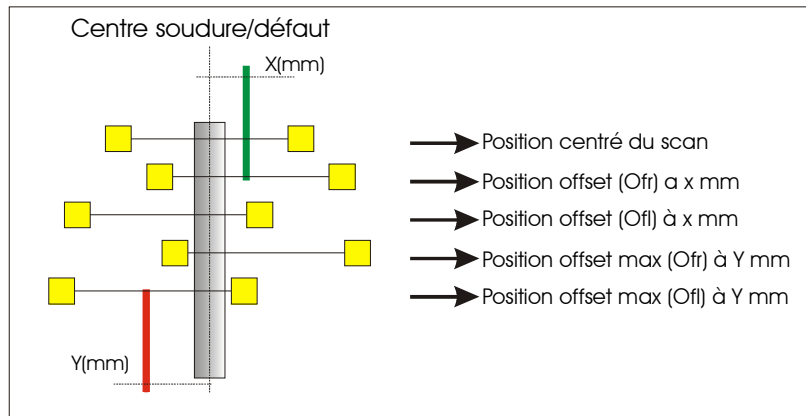
## PARAMETRES DES ESSAIS COMPOSANT N° 1

Soudure	Angle	Freq. MHz	Focal (mm)	PCS (mm)	Position Traducteurs
1	60°	10	10	36	Centré sur soudure
2	70°	15	7	38	Centré sur soudure
2	70°	15	7	38	Offset à droite 6mm
2	70°	15	7	38	Offset à gauche 6mm
2	70°	15	5,5	30	Centré sur soudure
2	60°	10	7	24	Centré sur soudure

## PARAMETRES DES ESSAIS COMPOSANT N° 2

Angle	Freq. MHz	Focal (mm)	PCS (mm)	Position Traducteurs
70°	15	10	55	Centré sur soudure
70°	15	10	55	Offset à droite de 6 mm
70°	15	10	55	Offset à gauche de 6 mm
70°	15	10	55	Offset à droite de 12 mm
70°	15	10	55	Offset à gauche de 12 mm
70°	15	5,5	30	Centré sur soudure
60°	10	10	36	Centré sur soudure
60°	10	10	36	Offset à droite de 3 mm
60°	10	10	36	Offset à gauche de 6 mm
60°	10	7,5	26	Centré sur soudure

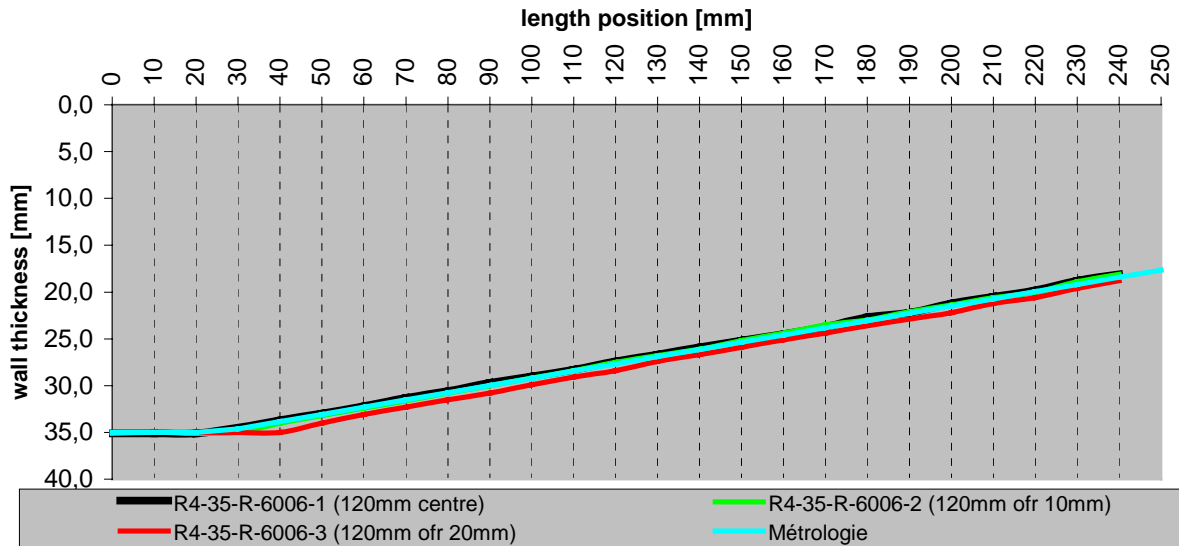
## POSITION DES TRADUCTEURS



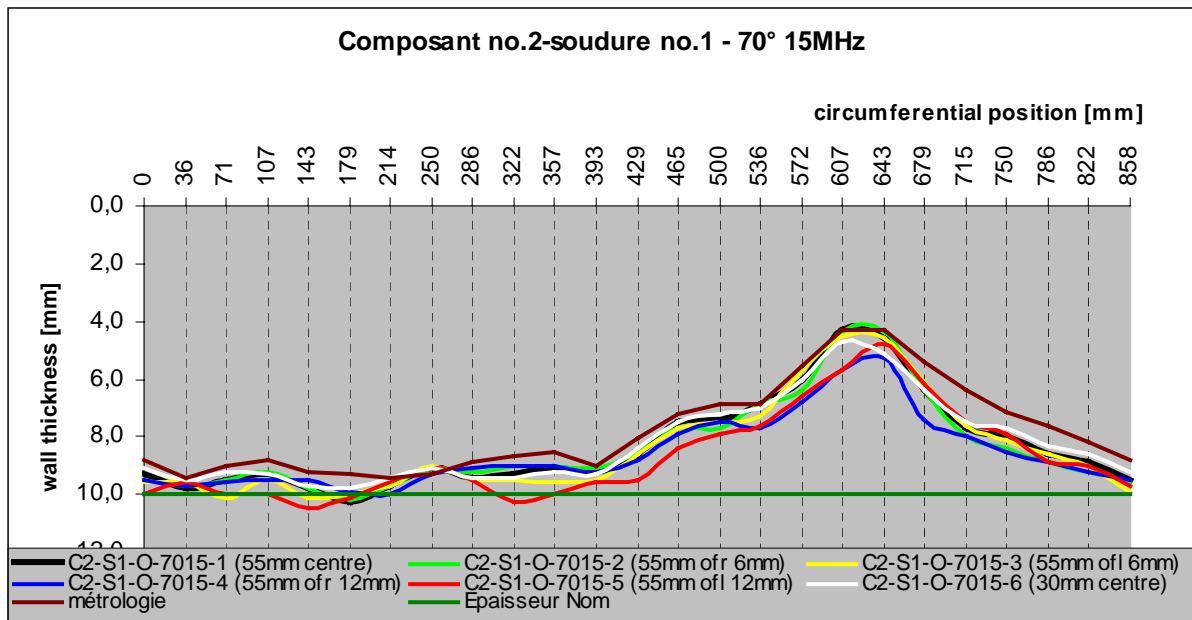
*Définition de l'offset du couple traducteurs par rapport au centre de la soudure*

Annexe 5: Exemple de résultats mesures  
 Bloc 35 mm : Traducteurs 60° - 6 MhZ et PCS 80, 100 et 120mm

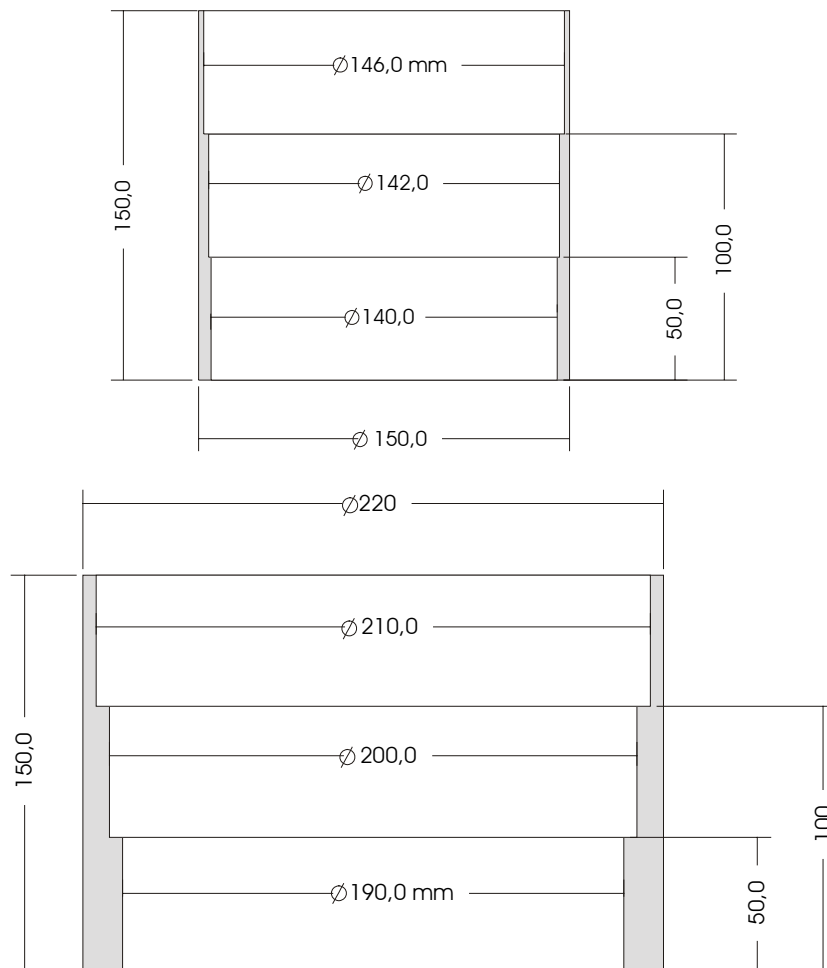
**Bloc d'essais no.4: 35 mm**



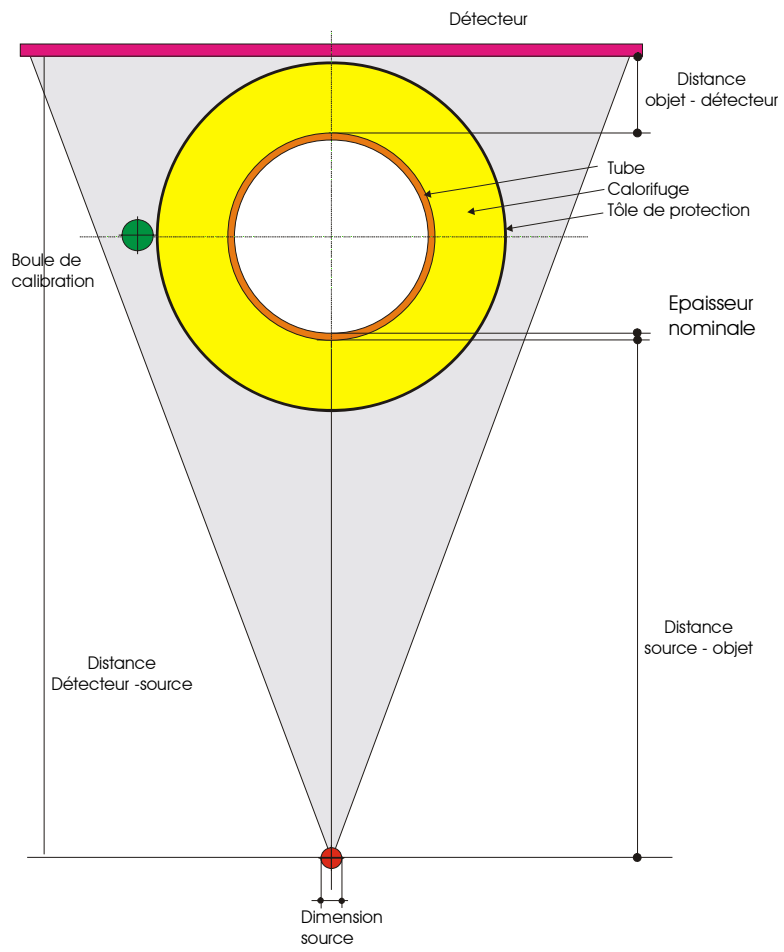
Annexe 6: Exemple de résultats mesures :  
 Composant n° 2 : Traducteurs 75° - 15 MhZ PCS 30 et 55 mm



### Annexe 7 : Tubes d'essais essais RN

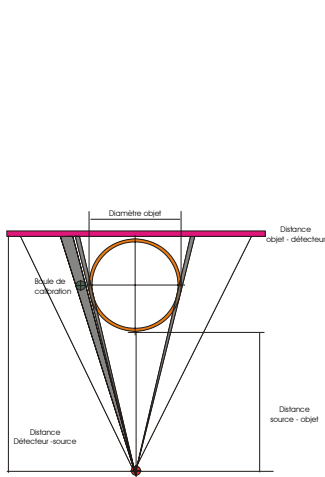


## Annexe 8 : Paramètres influents

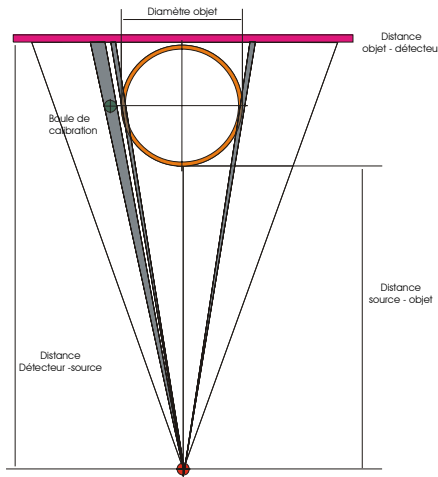




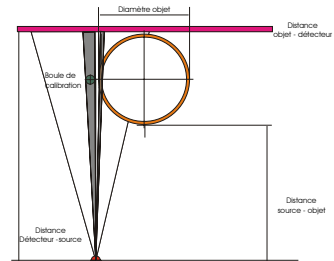
## Annexe 9: Configurations des tirs



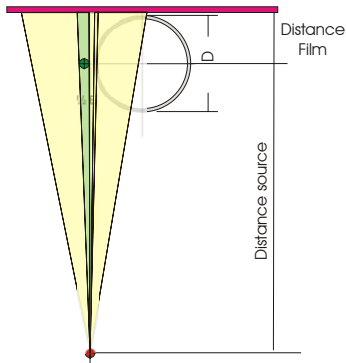
Configuration A



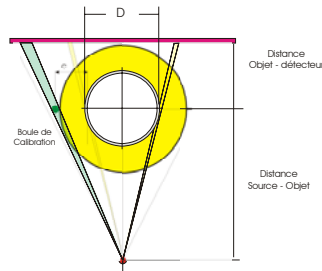
Configuration B



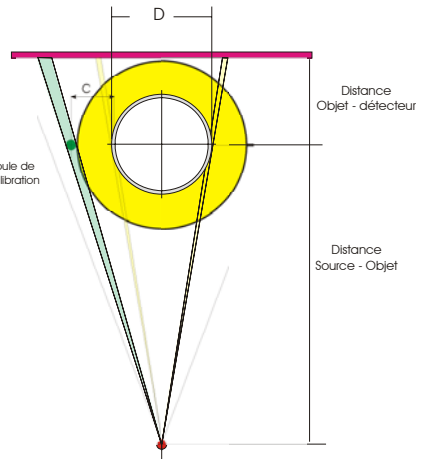
Configuration C



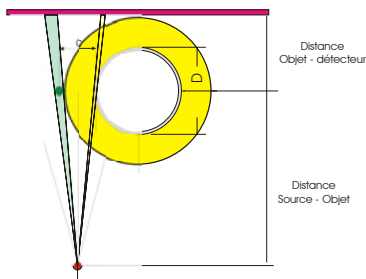
Configuration D



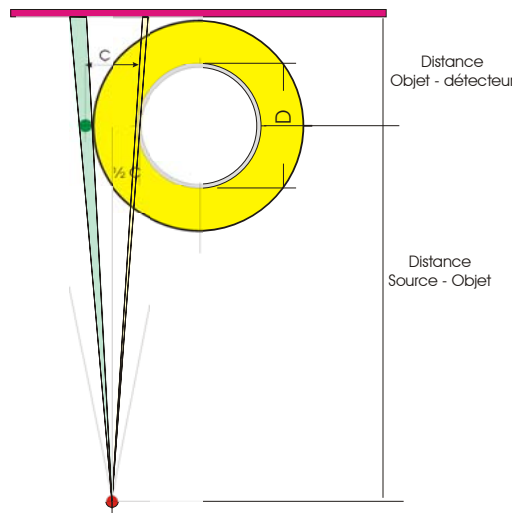
Configuration E



Configuration F

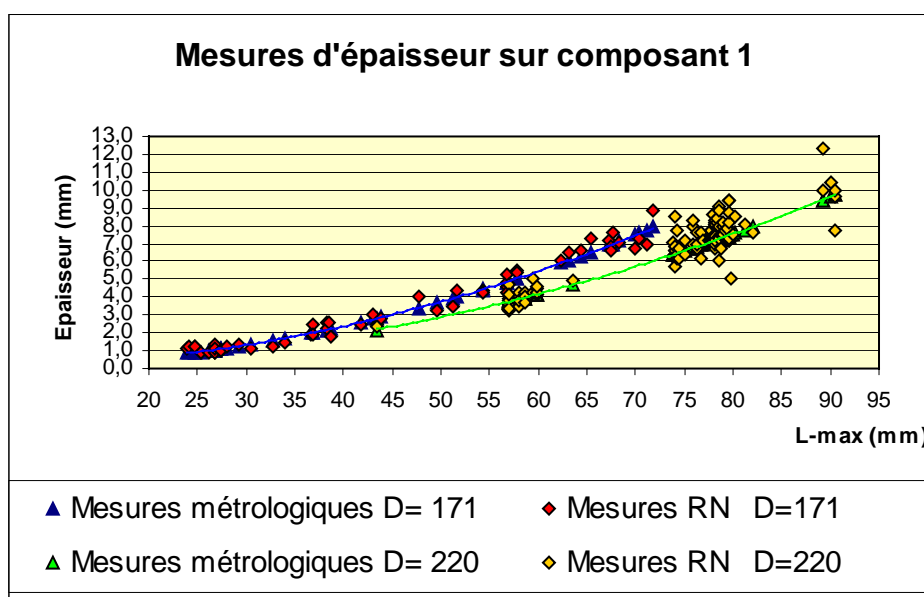
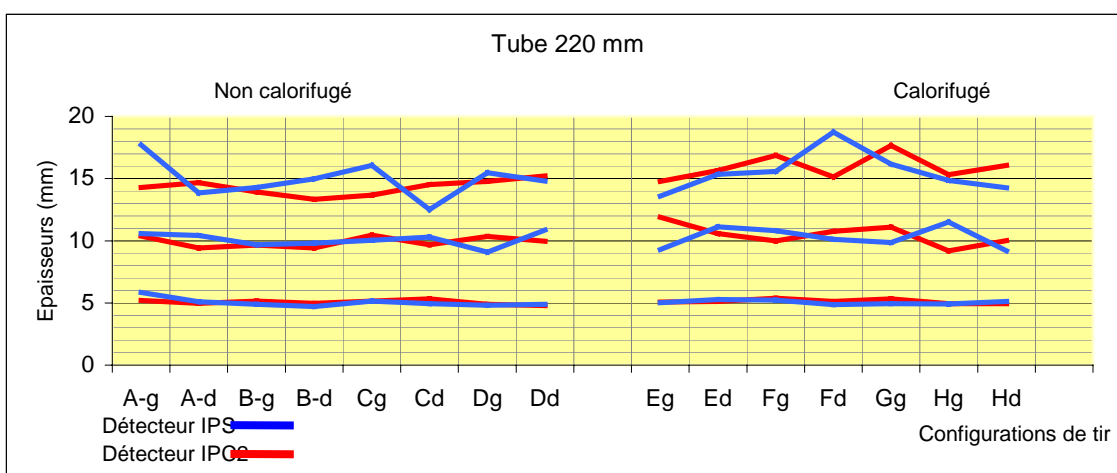
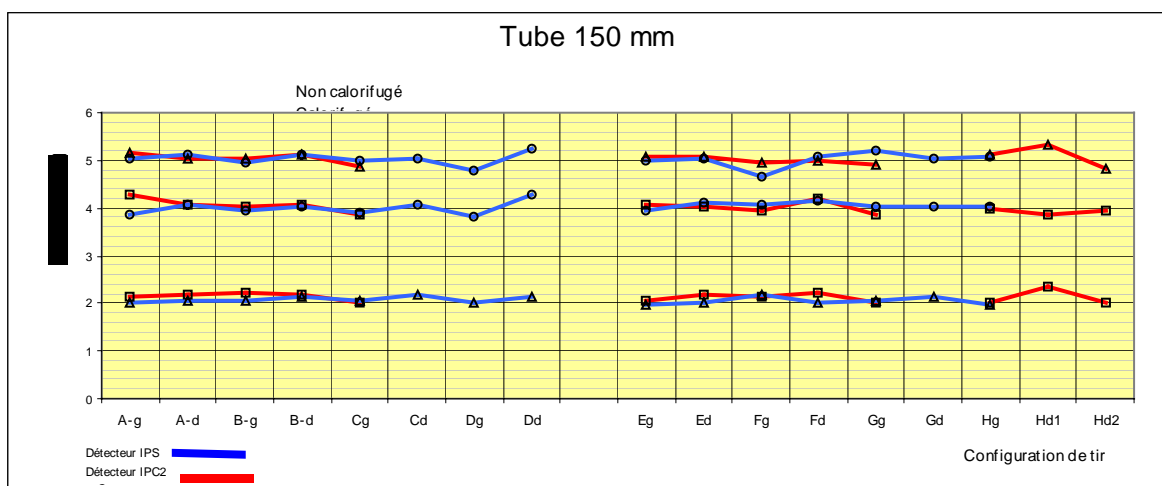


Configuration G



Configuration H

## Annexe 10. Résultats mesures RN



D= DIAMETRE AU NIVEAU DES SOUDURES

Annexe 11 : Estimation des limites d'utilisation de la RN avec différentes sources :

Source	Energie kv	Limites L-max (mm)*	Limites L-max estimé
Tube X	100	10	10
Tube x	200	20	20
Tube x	300	40	40
Tube x	400	50	50
Sélénium 75	~ 500	60	70
Iridium 192	~ 600	75	95**
Cobalt 60	~ 1400	120	145
		* Essais BAM	** essais DTG

Annexe 12/ Domaine d'application de la RN avec une source Ir192.

Epaisseur (mm)

30,0	35	49	60	69	77	85	98	107	120	132	143	151	162	171	180	196	211	224	237	250
29,0	36	49	60	69	77	84	97	106	118	130	141	149	160	169	177	193	207	221	234	246
28,0	37	50	60	69	76	83	96	104	117	128	139	147	158	166	175	190	204	217	230	242
27,0	37	50	60	68	76	82	95	103	115	126	137	144	155	164	172	187	201	214	226	238
26,0	38	50	59	68	75	82	93	101	114	124	135	142	153	161	169	184	197	210	222	233
25,0	39	50	59	67	74	81	92	100	112	122	132	140	150	158	166	180	194	206	218	229
24,0	39	50	59	66	73	80	91	98	110	120	130	137	147	155	163	177	190	202	214	225
23,0	40	50	58	66	72	79	89	97	108	118	128	135	145	152	160	173	186	198	209	220
22,0	40	50	58	65	71	77	88	95	106	116	125	132	142	149	156	170	182	194	205	216
21,0	40	49	57	64	70	76	86	93	104	114	123	129	139	146	153	166	178	190	201	211
20,0	40	49	57	63	69	75	85	92	102	111	120	126	136	143	150	162	174	185	196	206
19,0	40	49	56	62	68	73	83	90	100	109	117	124	132	139	146	159	170	181	191	201
18,0	40	48	55	61	67	72	81	88	97	106	114	121	129	136	142	155	166	176	186	196
17,0	40	47	54	60	65	70	80	86	95	104	112	117	126	132	139	150	161	172	181	190
16,0	39	47	53	59	64	69	78	84	93	101	109	114	122	129	135	146	157	167	176	185
15,0	39	46	52	57	62	67	75	81	90	98	105	111	119	125	131	142	152	162	171	179
14,0	38	45	51	56	61	65	73	79	87	95	102	107	115	121	127	137	147	156	165	173
13,0	37	44	49	54	59	63	71	76	84	92	99	104	111	117	122	132	142	151	159	167
12,0	37	43	48	53	57	61	69	74	81	88	95	100	107	112	118	127	136	145	153	161
11,0	36	41	46	51	55	59	66	71	78	85	91	96	103	108	113	122	131	139	147	154
10,0	35	40	45	49	53	57	63	68	75	81	87	92	98	103	108	117	125	133	140	147
9,0	33	38	43	47	51	54	60	65	71	77	83	87	93	98	102	111	119	126	133	140
8,0	32	37	41	45	48	51	57	61	67	73	78	82	88	92	97	105	112	119	125	132
7,0	30	35	39	42	45	48	54	57	63	69	74	77	82	87	91	98	105	111	117	123
6,0	29	32	36	39	42	45	50	53	59	64	68	72	77	80	84	91	97	103	109	114
5,0	26	30	33	36	39	41	46	49	54	58	62	66	70	73	77	83	89	94	99	104
4,0	24	27	30	32	35	37	41	44	48	52	56	59	63	66	69	74	80	84	89	93
3,0	21	24	26	28	30	32	36	38	42	45	49	51	54	57	60	65	69	73	77	81
2,0	17	20	22	23	25	27	29	31	34	37	40	42	45	47	49	53	56	60	63	66
	40	50	60	70	80	90	110	125	150	175	200	220	250	275	300	350	400	450	500	550
	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	>0,7	>0,7	1,3	>1,3
	35,0	39,0	43,0	47,0	51,0	55,0	59,0	63,0	67,0	71,0	75,0	79,0	83,0	87,0	91,0	95,0	99,0	103,0	107,0	111,0

D = (mm)

Inc. = (mm)

Lmax (mm)