

## Utilisation de capteur ultrason multiélément 1.5D pour le contrôle de défauts longitudinaux sur tube à fort rapport épaisseur/diamètre.

Michel VAHE<sup>1</sup>, Raphaël MICHEL<sup>1</sup>, Sylvain DEUTSCH<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Vallourec Research Center France, 60 Route de Leval - BP20149  
59620 Aulnoye-Aymeries, France

<sup>2</sup> TECNATOM METALSCAN, Parc d activités Val de Bourgogne,  
71240 Saint-Loup-de-Varennes, FRANCE

### RESUME

Vallourec est leader mondial des solutions tubulaires premium. Dans le cadre de son activité de production de tubes en acier, l'usine de Saint Saulve effectue un contrôle ultrason automatique afin de garantir à ses clients l'absence de défauts sur tout le volume de ses produits.

Une solution de contrôle utilisant des capteurs ultrasons multiéléments 1.5D capable de détecter des défauts longitudinaux, en particulier sur des tubes à fort rapport épaisseur/diamètre a été étudiée. Cette méthode doit permettre de réaliser cette inspection en un passage avec une cuve, contre un passage avec deux cuves et un temps de cycle doublé pour les solutions actuelles et de s'affranchir de toute optimisation mécanique.

Cet article présente la démarche adoptée afin de valider cette méthode. Après avoir dimensionné une sonde grâce à la simulation numérique, des essais ont été d'abord réalisés en laboratoire afin de valider le concept dans des conditions optimales. Enfin, en partenariat avec notre fournisseur Metalscan, nous avons poursuivi ces essais en usine afin de déterminer ses performances dans un environnement industriel avec des tubes de production.

Les performances mesurées sont au moins équivalentes à celles obtenus avec les équipements actuels, avec des temps d'inspection potentiellement réduits par 2. Cette méthode est donc validée pour un emploi industriel.



## 1 INTRODUCTION

Les tubes produits par Vallourec passent une série de contrôles non destructifs avant d'être expédiés aux clients afin d'assurer l'absence de défauts et la conformité de nos produits aux différents standards applicables. Différentes méthodes de CND complémentaires peuvent être appliquées : courants de Foucault, flux de fuite, magnétoscopie, ressuage ou encore ultrasons (UT). Cette dernière, la plus utilisée au sein du groupe, possède des caractéristiques qui la rendent particulièrement adaptée au contrôle industriel des tubes : elle est surfacique et volumique, rapide, performante et automatisable. Elle est de plus utilisable sur la totalité de la gamme dimensionnelle proposée par Vallourec.

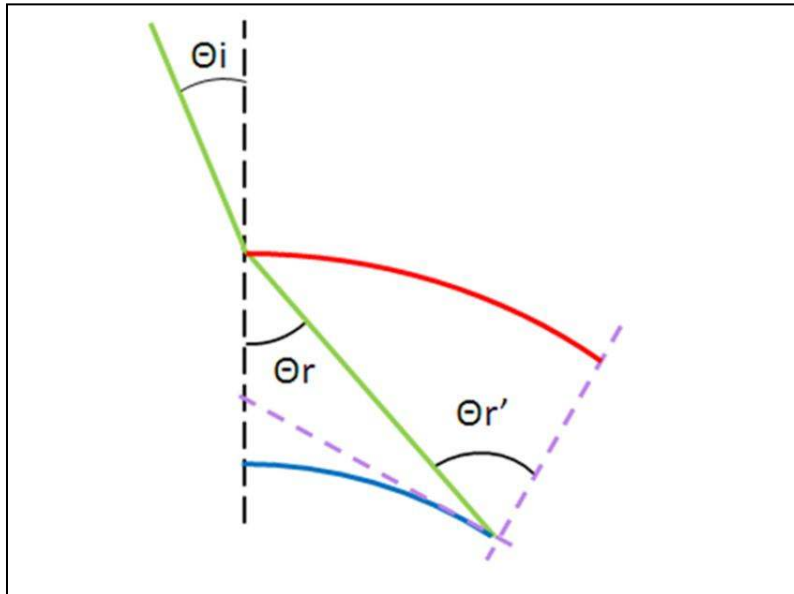
Plusieurs types de capteurs ultrasons existent afin de réaliser ces contrôles: capteur conventionnel monoélément, sonde multiélément linéaire (1D) ou matriciels (2D). Les capteurs monoélément sont simples, peu onéreux mais ne proposent pas la flexibilité qu'offrent les sondes multiéléments.

La tuberie de SSV possède plusieurs bancs de contrôle ultrason automatiques. L'un d'eux est limité par sa technologie conventionnelle. Pour des dimensions particulières, quand le rapport épaisseur sur diamètre est supérieur à 0.2, deux passages sont nécessaires afin d'assurer un contrôle complet des surfaces internes et externes. Cela ralentit fortement les cadences de productions.

Avec notre partenaire Metalscan, fournisseur de la partie acoustique sur ce banc, nous avons donc cherché à remplacer les capteurs conventionnels actuels par des capteurs multiéléments 1.5D, intermédiaires entre les capteurs linéaires et matriciels. Le gain en flexibilité apporté par ces capteurs, détaillés dans cet article, permettront de réaliser un contrôle complet des tubes à fort e/D en un passage.

## 2 Pourquoi les tubes à fort rapport e/D sont-ils problématiques ?

L'inspection des défauts de surface est réalisée par des ondes transversales avec la méthode « pulse-echo », en immersion. Pour les défauts longitudinaux, on définit plusieurs angles lors de ce type de contrôle :

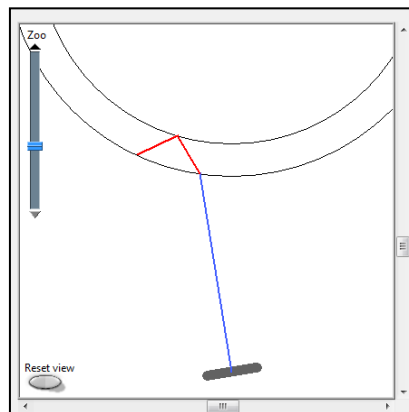


$\Theta_i$  : angle d'incidence

$\Theta_r$  : angle réfracté

$\Theta_r'$  : angle d'attaque (ici sur l'entaille longitudinale interne)

Dans cette méthode, on cherche à obtenir un angle d'attaque de l'ordre de  $40^\circ$  sur le défaut, localisé soit sur la surface interne, soit sur la surface externe. Afin d'atteindre la surface externe, l'onde rebondit généralement sur la surface interne, comme le montre le schéma suivant dans le cas des défauts longitudinaux :



**Figure 1 - Trajet acoustique pour la détection de défaut longitudinal pour un tube à faible e/D**

Pour des tubes fins, avec des rapports e/D faibles, la géométrie se rapproche d'une plaque où l'angle d'attaque sur un défaut localisé sur la surface interne est égal à celui localisé sur la surface externe. Plus ce rapport e/D augmente, plus on s'éloigne de cette situation plaque.

Angle d'incidence pour obtenir un angle d'attaque de $40^\circ$ sur ...							
Rapport e/D	0.01	0.02	0.05	0.10	0.15	0.20	0.30
... entaille interne	16,8	16,5	15,4	13,6	11,9	10,2	6,8
... entaille externe	17,1	17,1	17,1	17,1	17,1	17,1	17,1

Dans la pratique, pour des rapports  $e/D$  inférieurs à 0,2, un bon compromis pour l'angle d'incidence peut être trouvé pour l'inspection des entailles internes et externes. Cependant, au-delà de cette limite, on s'aperçoit qu'aucun compromis satisfaisant n'est possible. Deux tirs distincts sont donc nécessaires avec des angles d'incidence différents : un premier dédié à l'inspection de la surface interne, un second à l'inspection de la surface externe.



*Figure 2 - Trajets acoustiques pour la détection de défauts longitudinaux pour un tube à fort  $e/D$*

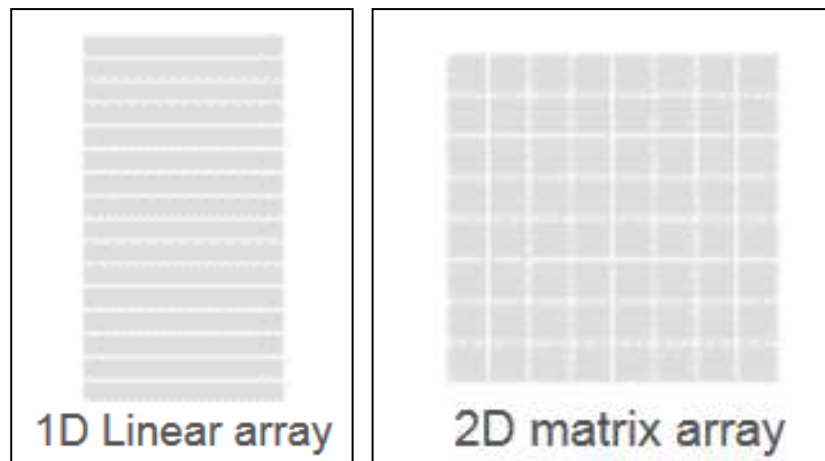
ci-dessus, les deux tirs permettent des angles d'attaque de  $40^\circ$  soit sur une entaille longitudinale externe (à gauche), soit sur une entaille longitudinale interne (à droite). Pour réaliser l'inspection de défauts longitudinaux sur des tubes à fort  $e/D$ , il est donc nécessaire de réaliser deux inspections distinctes avec deux angles d'incidence différents.

Cela entraîne un ralentissement des cadences de production dommageable pour la rentabilité de la tuberie de Saint-Saulve.

### 3 Que définit-on par capteur multiélément 1.5D ?

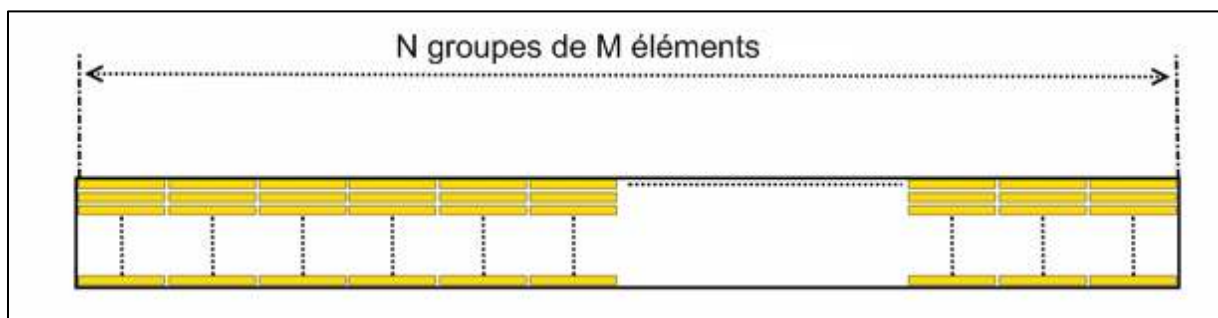
Les capteurs multiéléments les plus répandus sont les capteurs linéaires (1D). Les éléments sont repartis sur un seul axe. Ces capteurs sont déjà utilisés dans le contrôle automatique par ultrason au sein de Vallourec depuis 2001. Leur capacité de déflexion électronique est limitée dans la direction du capteur uniquement.

A l'inverse, les sondes matricielles (2D) ont des éléments repartis sur deux axes. Ces sondes ont donc la capacité de réaliser des déflexions électroniques dans toutes les directions.



*Figure 3 - Schéma de l'organisation des éléments dans des sondes multiéléments 1D et 2D*

On définit un capteur multiélément 1.5D comme intermédiaire aux capteurs 1D et 2D. Comme montré ci-dessous, les éléments sont repartis sur deux axes, comme un capteur 2D, mais les capacités de déflexion sont celles d'un capteur 1D, dans une unique direction. Un capteur 1.5D peut être vu comme plusieurs capteurs 1D juxtaposés les uns aux autres.



*Figure 4 - Schéma de l'organisation d'un capteur 1.5D*

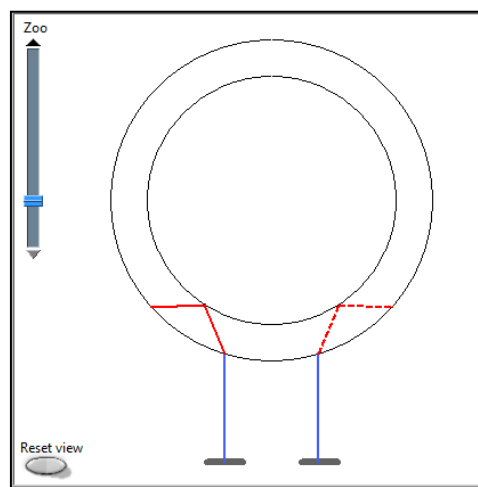
Avec un capteur 1.5D, on obtient un capteur relativement simple (faible nombre d'éléments, cristaux relativement gros), avec la capacité de réaliser une déflexion électronique perpendiculaire à l'axe du capteur.

#### 4 Pourquoi un capteur multiélément 1.5D est-il utile à l'inspection des défauts longitudinaux ?

Les normes demandent à ce que les défauts soient inspectés par les deux flancs :

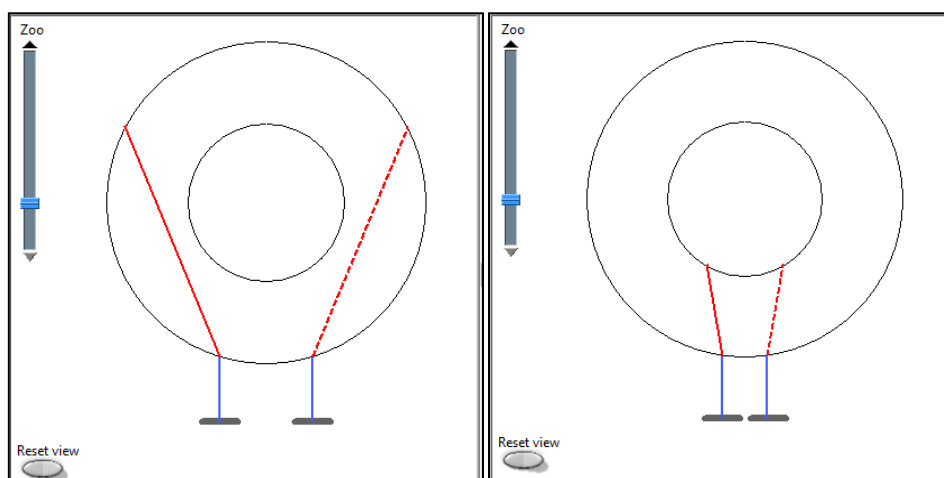
**NF EN ISO 10893-10( §5.3) :** « *Sauf accord contraire entre acheteur et producteur, le contrôle doit être réalisé par passage du faisceau ultrasonore selon deux directions opposées de propagation des ondes pour le type de contrôle demandé, dans le sens horaire et antihoraire pour les imperfections longitudinales et avant/arrière pour les imperfections transversales.* »

Avec des bancs de technologie conventionnelle ou multiélément 1D, il est donc nécessaire d'avoir deux capteurs symétriques avec des angles d'incidence opposés pour réaliser complètement le contrôle.



**Figure 5 - Trajets acoustiques pour l'inspection de défauts longitudinaux dans le sens horaire ET antihoraire**

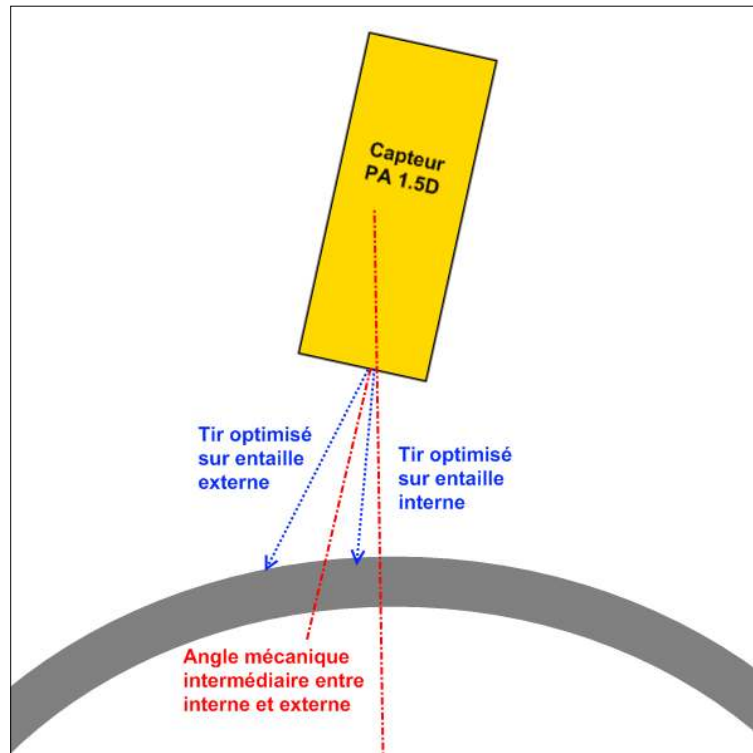
Dans le cas des tubes à fort rapport e/D, il est nécessaire de disposer de deux jeux de deux capteurs positionnés pour détecter soit les entailles internes, soit les entailles externes.



**Figure 6 - Trajets acoustiques pour l'inspection de défauts longitudinaux dans le sens horaire ET antihoraire pour fort e/D**

Dans la pratique à Saint-Saulve, il est donc nécessaire d'utiliser deux cuves d'inspection pour réaliser le contrôle des tubes à fort  $e/D$ . Ceci double quasiment le temps de cycle et ralentit fortement les cadences de production de l'usine de Saint-Saulve.

Grâce aux capteurs 1.5D, nous aurions cependant la capacité de réaliser les deux angles d'incidence avec un unique capteur, comme montré ci-dessous :



**Figure 7 - Dispositif utilisant un capteur PA1.5D pour l'inspection d'entailles longitudinales antihoraires**

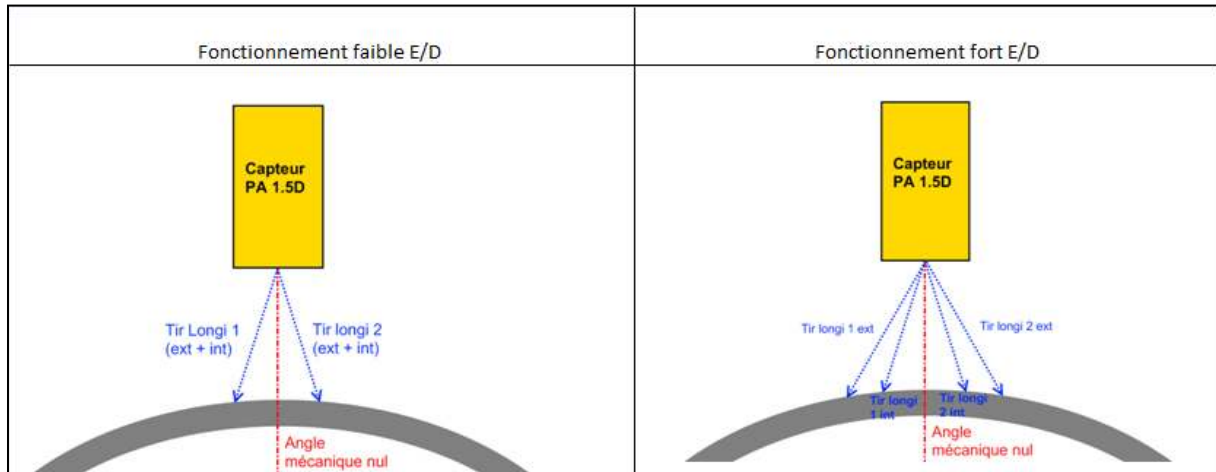
Ici, on règle un angle mécanique approximatif intermédiaire entre l'incidence optimale pour l'entaille externe et celle pour l'entaille interne. On vient ensuite régler l'angle d'incidence optimale grâce aux déflexions électroniques.

L'angle mécanique approchant les angles d'incidence optimaux, les déflexions électroniques resteraient faibles. Les cristaux piézoélectriques seraient relativement larges et peu nombreux. Cette solution ne nécessite donc qu'un nombre de voies électroniques limitées.

En appliquant séquentiellement les lois de retard appropriées, on peut donc réaliser les inspections nécessaires avec deux capteurs seulement, contre 4 précédemment. Une seule cuve serait nécessaire dans ce cas-là, les cadences d'inspection ne seraient donc pas dégradées par des rapports  $e/D$  forts avec ce dispositif.

Nos premières investigations nous ont cependant permis d'identifier une deuxième solution utilisant des capteurs 1.5D, placés cette fois-ci à la perpendiculaire de la surface du tube.

Il est possible d'inspecter le sens horaire et antihoraires en utilisant uniquement les déflexions électroniques (deux pour les tubes fins, quatre pour les fort e/D).



Un seul capteur pourrait ici remplacer les quatre capteurs conventionnels, avec les mêmes avantages de cadence que précédemment.

Le bénéfice de cette méthode, outre la réduction du nombre de capteur, est le positionnement perpendiculaire du capteur. On a ici l'assurance d'un angle mécanique nul, vérifiable en utilisant un tir « droit » (sans déflexion électronique). Cela améliore la fiabilité et la connaissance des réglages utilisés.

Cette solution nécessite cependant des déflexions électroniques plus fortes, donc des éléments plus petits et des électroniques plus puissantes.



## 5 Comment valider l'utilisation d'un capteur multiélément 1.5D ?

### 5.1 Dimensionnement d'une sonde par simulation numérique.

La première étape de validation du concept a été le dimensionnement d'un capteur adapté aux besoins de l'usine Vallourec de Saint-Saulve :

- Gamme dimensionnelle :
  - Diamètre de 31.8 à 127 mm
  - Epaisseur de 3 à 20 mm
- Longueur active du capteur de 60mm
  - En usine, la longueur active des capteurs actuels est de 120mm. Nous avons réduit à une « demi-longueur » pour limiter les coûts de réalisation du capteur.

Afin de garantir un angle d'incidence de l'ordre de  $17^\circ$  sur la surface du tube, il est nécessaire que le capteur multiélément puisse garantir une déflexion électronique à l'émission jusqu'à  $12^\circ$ .

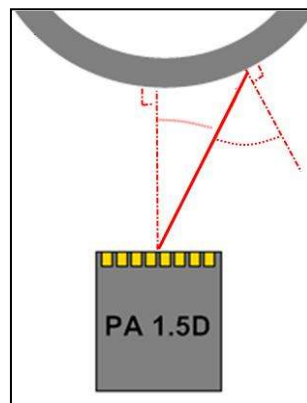
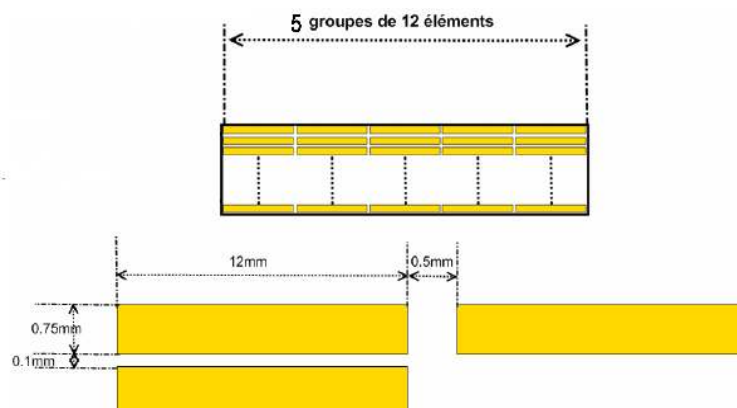


Figure 8 - Différence entre angle d'émission et angle d'incidence liée à la courbure du tube

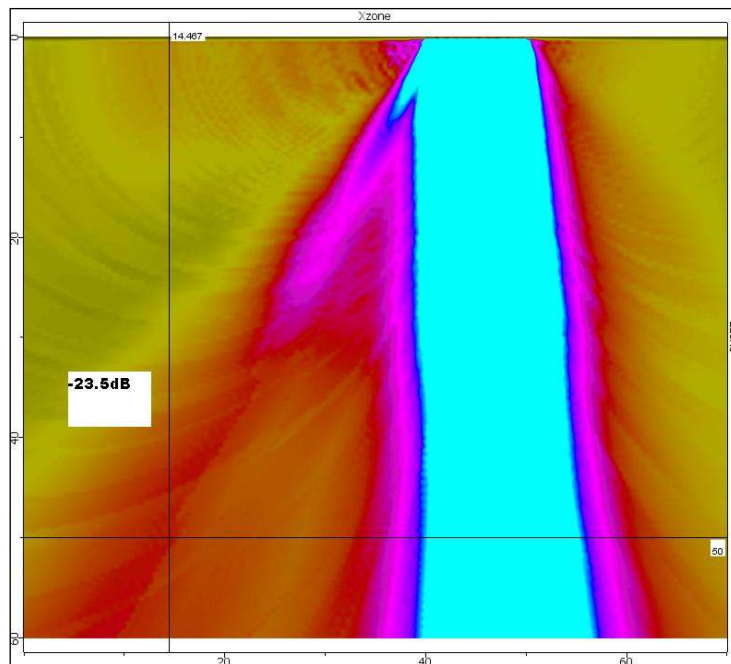
Le capteur est dimensionné avec les paramètres suivants :

#### Caractéristiques acoustiques :

- Piezo-composite
- Fréquence centrale : 3 MHz +/- 10%.
- Bande passante relative à -6dB : > 60%
- Adaptation acoustique : eau
- Eléments :
  - Nombre : 120 ou 60 (10x12 ou 5x12 éléments)
  - Pitch Y 0.85 mm, espace inter-éléments X : 0.1 mm
  - Pitch X 12.5 mm, espace inter-éléments Y : 0.5 mm
  - Plane.



Les simulations de champs dans l'eau par **CIVA** ont permis de valider le dimensionnement du capteur. Le lobe secondaire simulé est en effet 23.5dB inférieur au lobe principal.



*Figure 9 – Champ acoustique simulé dans l'eau pour une déflexion électronique de 12° (couleurs saturées)*

Une sonde dimensionnée avec ces caractéristiques pourrait donc effectuer une déflexion électronique suffisante pour permettre la détection de défauts longitudinaux tout en gardant un angle mécanique nul.

Afin de respecter les longueurs actives « industrielles », un capteur complet serait composé de 120 éléments. Le nombre de voies électroniques nécessaires reste donc limité et acceptable avec un design de capteur tel que présenté ici.

## 5.2 Essai de validation en cuve à eau

La deuxième étape de validation consiste en des essais réalisés au *VRCF (Vallourec Research Center France)* dans une cuve à eau avec la sonde précédemment dimensionnée sur différentes dimensions représentatives de la gamme de l'usine de Saint-Saulve.

Tous les essais suivent la même démarche :

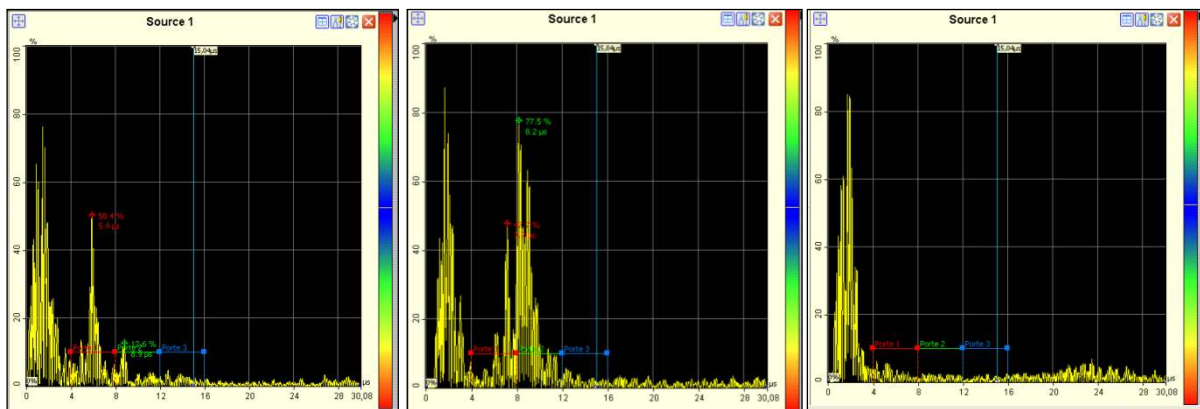
1. Réglage de l'angle mécanique à 0° en optimisant le troisième écho d'interface d'un tir droit.
2. Réglage de la colonne d'eau aux valeurs requises (similaires à celles utilisées en usine).
3. Balayage électronique afin de déterminer l'angle optimal d'inspection des entailles longitudinales internes et externes.



*Figure 10 - Montage mécanique dans la cuve à eau. Une ouverture est faite afin de pouvoir usiner l'entaille interne.*

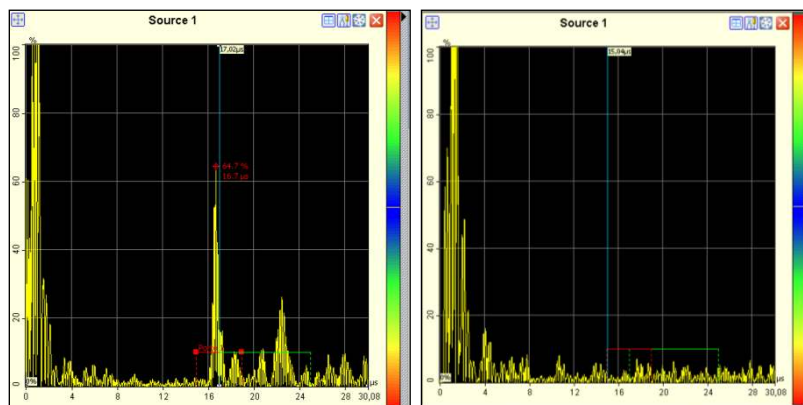
Voici quelques résultats issus des essais en cuve :

- Tube 1 : diamètre 38mm ; épaisseur : 4mm (rapport e/D de 0.11)

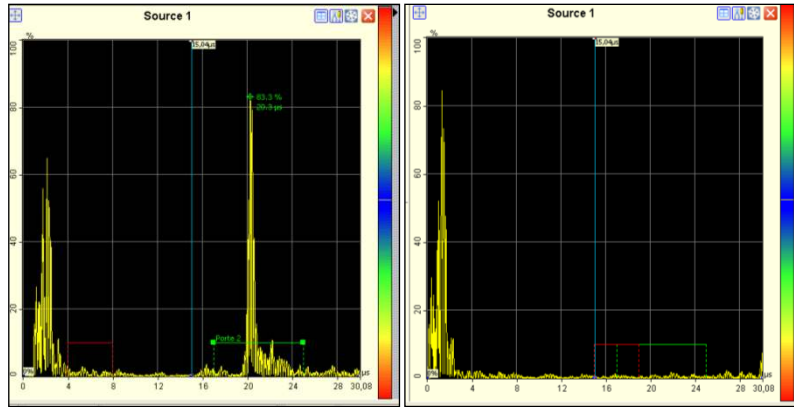


*Figure 11 - Tube 38 x 4 - Entailles interne (gauche) externe (milieu) sans entaille (droite) pour un angle d'incidence de 16.6°*

- Tube 2 : diamètre 38mm ; épaisseur : 9.7mm (rapport e/D de 0.26)



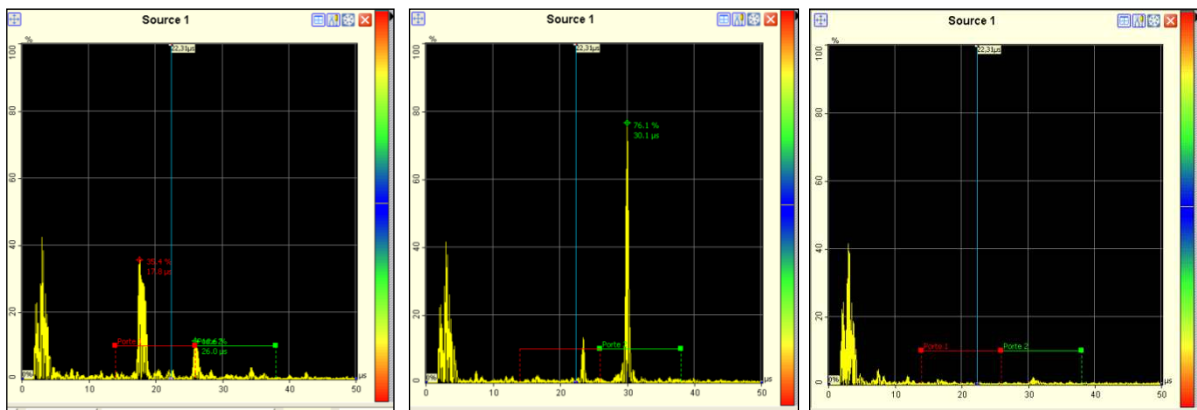
*Figure 12 - Tube 38 x 9.7 mm - Entaille interne (gauche) sans entaille (droite) pour un angle d'incidence de 10.4°*



*Figure 13 - Tube 38 x 9.7 mm - Entailles externe (gauche) sans entaille (droite) pour un angle d'incidence de 17.5°*

Pour le tube 38x9.7, le rapport e/D est de 0.26. Nous sommes donc dans une configuration « tube lourd », deux tirs différents sont nécessaires à la bonne détection des entailles internes ou externes.

- Tube 3 : diamètre 89mm ; épaisseur : 13.5mm (rapport e/D de 0.15)

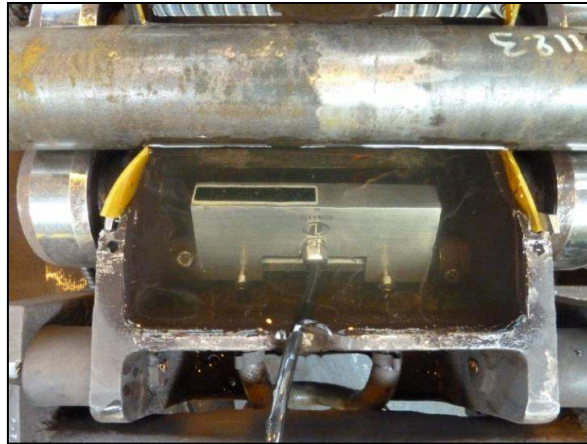


*Figure 14 - Tube 89 x 13.5 mm - Entailles interne (gauche) externe (milieu) sans entaille (droite) pour un angle d'incidence de 17.6°*

Ces premiers essais sont prometteurs, les signaux sont propres, le capteur offre des déflexions électroniques satisfaisantes.

### 5.3 Essai de validation en tour automatique

La troisième étape de validation est l'inspection sur des tours automatiques au centre de recherche afin de déterminer les performances acoustiques (signal sur bruit) en dynamique. Les tubes sont inspectés avec des paramètres similaires à ceux utilisés en usine (pointé de contrôle). Les essais sont réalisés avec la même tête de contrôle que celle utilisée en usine.



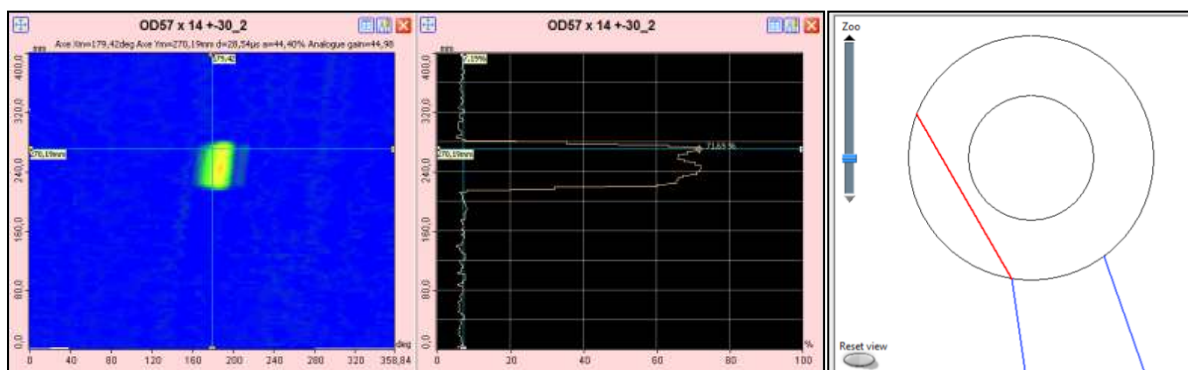
*Figure 15 - Sonde multiélément montée dans la tête de contrôle usinée avec un tube de référence*

Tous les essais suivent la même démarche :

1. Réglage de l'angle mécanique à  $0^\circ$  en optimisant le troisième écho d'interface d'un tir droit.
  - a. Pas de réglage de colonne d'eau.
2. Balayage électronique afin de déterminer l'angle optimal d'inspection des entailles longitudinales.
3. Inspection de la longueur complète du tube avec les paramètres déterminés précédemment. Les entailles sont inspectées dans les deux sens de contrôle (horaire + antihoraire).

Voici quelques exemples de résultats des acquisitions effectuées pour différents tubes de Saint-Saulve :

- Tube 1 : diamètre 57mm; épaisseur : 14mm (rapport e/D de 0.25)



*Figure 16 - Tube 57 x 14 - Entaille longitudinale externe (antihoraire) et le trajet associé pour un angle d'incidence de  $16.7^\circ$*

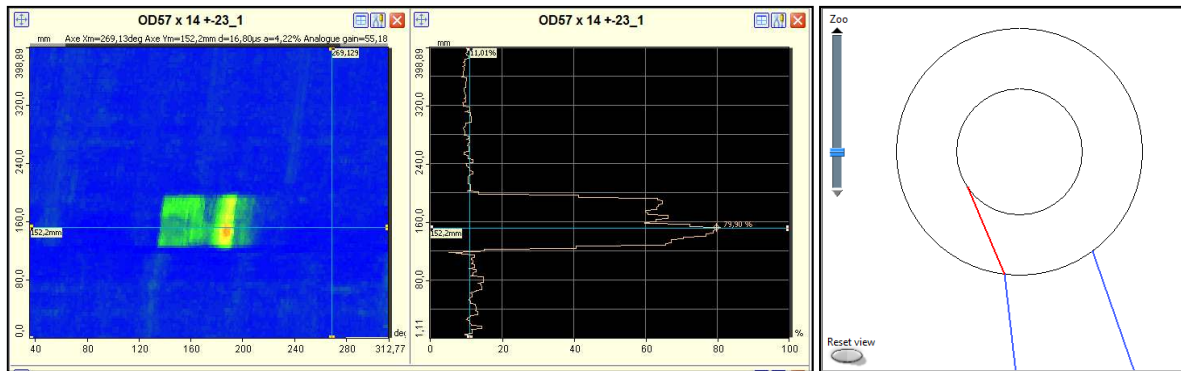


Figure 17 - Tube 57 x 14 - Entaille longitudinale interne (horaire) et le trajet associé pour un angle d'incidence de 13.2°

- Tube 2 : diamètre 70mm; épaisseur : 4.5mm (rapport e/D de 0.06)

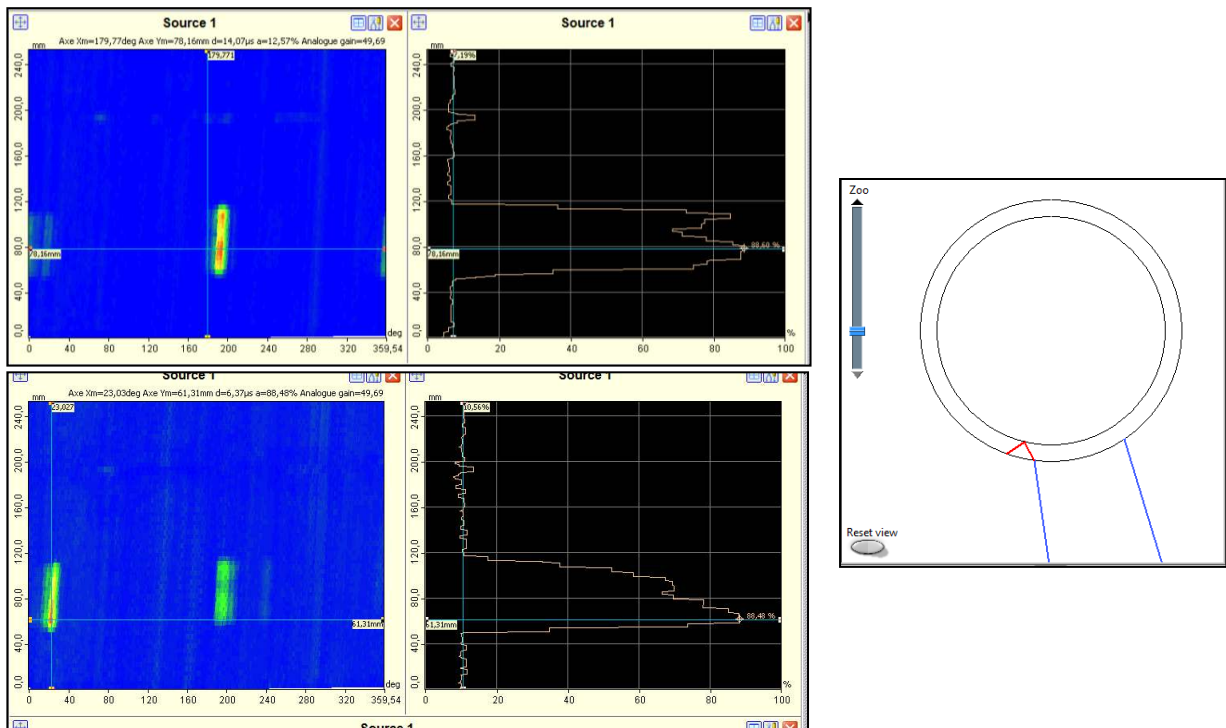


Figure 18 - Tube 70 x 4.5mm - Entaille longitudinale externe (haut) et interne (bas) et le trajet associé pour un angle d'incidence de 15.4°

Les performances déterminées sur les différentes dimensions sont satisfaisantes et compatibles avec la poursuite des essais en usines :

OD	WT	WT/OD	Total number of shots	SNR LOD 1	SNR LOD 2	SNR LID 1	SNR LID 2
57	8	0,14	2	19,0	17,7	20,1	19,0
57	14	0,25	4	20,2	26,8	13,0	17,2
70	4,5	0,06	2	18,2	22,0	14,1	18,9
70	9	0,13	2	19,6	19,2	20,4	18,3
70	15,7	0,22	4	32,1	33,0	15,9	15,9

Figure 19 - Table des performances pour les 5 dimensions testées.



## 5.4 Essai en usine.

La dernière étape de validation est une campagne d'essais à l'usine de Saint-Saulve directement du banc de contrôle automatique utilisé pour la production. Pour se faire, nous avons fait appel au fournisseur du banc, **Metalscan**, pour prêter une électronique multiélément dimensionnée pour la sonde 1,5D et de configurer son logiciel Lineview (automates, alarmes, activation module PA etc.) afin d'avoir une solution industrielle conviviale en usine. Toutes les lois de retard ont été calculées via la calculatrice intégrée dans Lineview.



*Figure 20 – Sonde installée dans le banc US de l'usine de Saint-Saulve (gauche) et équipement Metalscan dans la cabine*

Deux lots de tubes de production ont pu être inspectés lors des essais réalisés en usine :

- 108 tubes de dimensions 33.7 x 8mm (rapport e/D de 0.24)
  - 4 tirs nécessaires (angle d'incidence de +/-17° et +/- 10.3°)
  - Vitesse tangentielle de 1.7m/s pour un pointé de 1mm
- 59 tubes de dimensions 70 x 6.3 (e/D standard)
  - 2 tir nécessaires (angle d'incidence de +/-15.7°)
  - Vitesse tangentielle de 2.2m/s pour un pointé de 1mm

Pour chacun des lots, une fois l'angle optimal trouvé, le tube de calibration est inspecté 10 fois d'affilé afin de déterminer les performances acoustiques de la configuration (signal sur bruit et répétabilité).

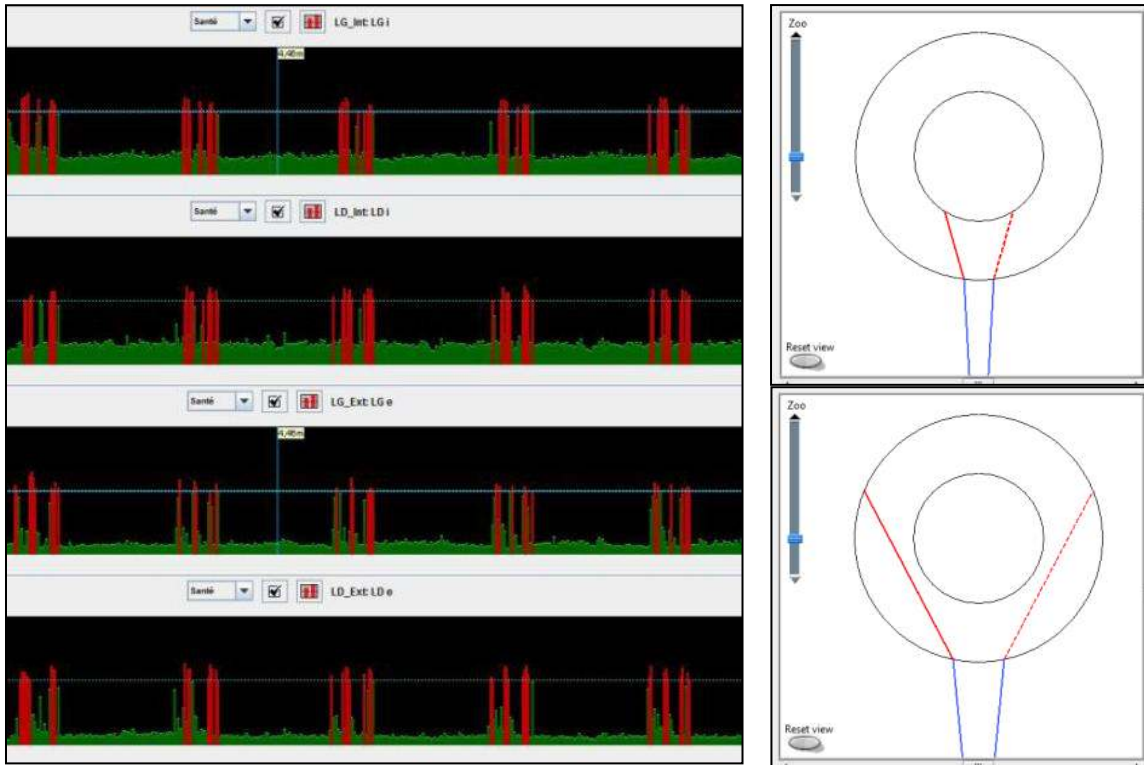


Figure 21 - Tube 33.7 x 8 - 10 passages d'affilé - Interne horaire (haut) & antihoraire (second) - Externe horaire (troisième) et antihoraire (bas) sur Lineview et les trajets associés



Figure 22 - Inspection d'un tube de production (sans défaut) sur Lineview

Dans la figure précédente, l'alarme de sortie de tube (à droite du scan) ne correspond pas à un défaut et est automatiquement inhibée par l'automate.

Tube 33,7 x 8	Long interne		Long externe	
	Horaire	Antihoraire	Horaire	Antihoraire
Amplitude (%)	63,9	61,9	65,3	63,3
Bruit (%)	15	16,3	7,5	8,8
S/B (dB)	12,6	11,6	18,8	17,1

Figure 23 - Tube 33.7 x 8 – Sensibilité



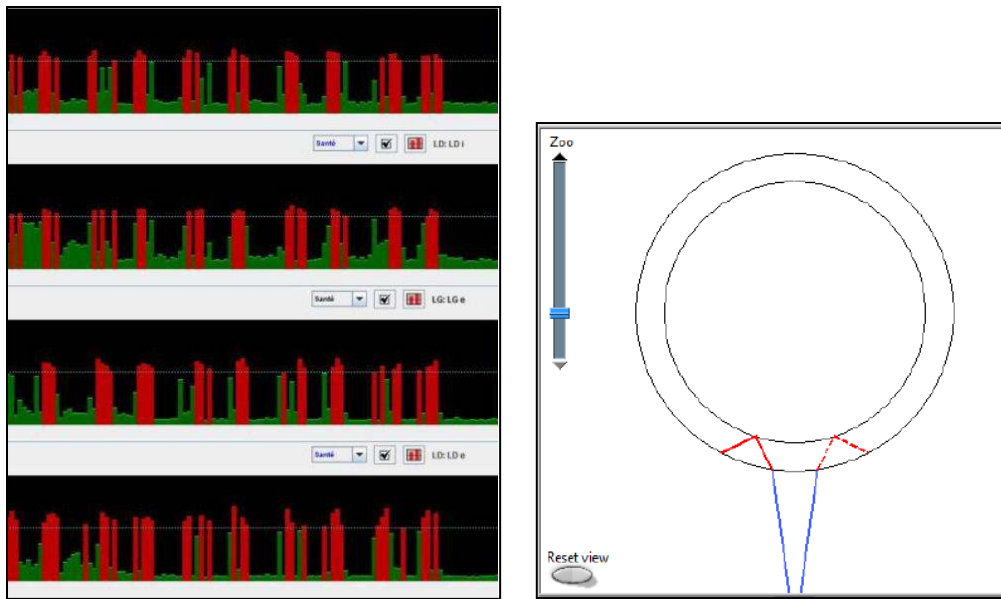


Figure 24 - Tube 70 x 6.3- 10 passages d'affilé - Interne horaire (haut) & antihoraire (second) - Externe horaire (troisième) et antihoraire (bas) sur Lineview et le trajet associé

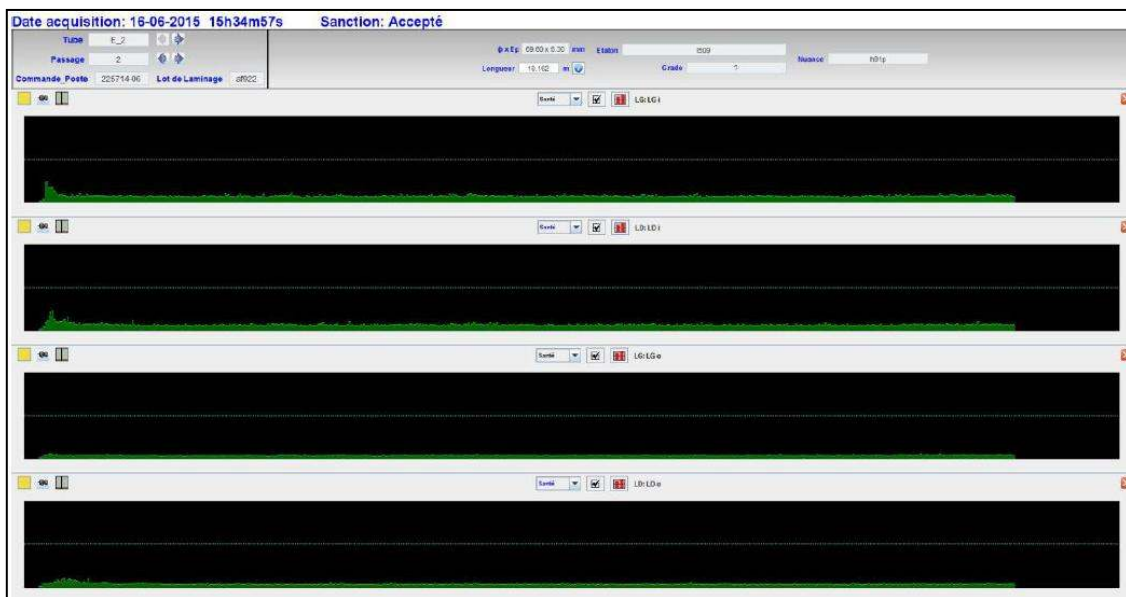


Figure 25 - Inspection d'un tube de production – sans défaut – sur Lineview

Tube 70x6,3	Long interne		Long externe	
	Horaire	Antihoraire	Horaire	Antihoraire
Amplitude (%)	60,8	64	62,8	69,6
Bruit (%)	8,8	11	7	6
S/B (dB)	16,8	15,3	19,1	21,3

Figure 26 - Tube 70 x 6.3 – Performance

Les deux lots de tubes ont après coup été inspectés avec l'équipement standard (capteurs conventionnels) sans détecter de défauts. Les deux contrôles ont donc montré des résultats similaires dans des conditions de productions.

## 6 CONCLUSION

La méthode d'inspection par ultrason de défauts longitudinaux par capteur multiélément 1.5D a donc été étudiée en suivant différentes étapes et validations successives :

1. Validation du concept et du design du capteur 1.5D par CIVA
2. Validation en statique puis en dynamique en laboratoire sur tubes de différentes géométries
3. Validation en dynamique en usine et comparaison avec les moyens de contrôles standards.

Nous avons donc montré que cette nouvelle méthode de contrôle offre des performances acoustiques satisfaisantes et au moins égales au contrôle effectué actuellement en usine.

Une solution multiélément 1.5D permet :

- Le remplacement des capteurs conventionnels par un capteur 1.5D unique.
  - Une seule cuve de contrôle nécessaire, contre deux précédemment.
  - Un système plus compact.
  - Des temps de réglage et de calibration plus court.
- De s'affranchir d'une optimisation mécanique lors du réglage (tout est piloté électroniquement).
- Un gain en flexibilité (angle d'incidence, focalisation).
- Pour les tubes à fort  $e/D$ , un temps de cycle divisé par deux.