

## **Essais par ultrasons multiéléments des joints soudés dans des tuyaux en polyéthylène (PE)**

Fredrik HAGGLUND<sup>1</sup>, Malcolm A. SPICER<sup>1</sup>, Mike J. TROUGHTON<sup>1</sup>

<sup>1</sup>TWI Ltd, Granta Park, Great Abington, CB21 6AL, Cambridge, UK;

Phone: +44 (0) 1223 899000, Fax +44 (0) 1223 890952;

fredrik.hagglund@twi.co.uk, malcolm.spicer@twi.co.uk, mike.troughton@twi.co.uk

### Résumé

Pour contrôler des joints soudés de type bord-à-bord (BF : butt fusion) dans des tuyaux PE de différentes nuances et de différentes tailles, une méthode fiable de contrôle non destructif est requise.

Le principe des joints soudés de type bord-à-bord induit une zone de fusion relativement petite et les solutions de contrôle sont souvent limitées par l'existence d'un bourrelet de soudure externe. Ce bourrelet limite le placement de la sonde pour le contrôle de la soudure.

Les différentes nuances de PE mettent en évidence une forte atténuation et une vitesse de propagation réduite de l'onde ultrasonore qui compliquent le contrôle des tuyaux plus épais.

Dans cet article, les techniques par ultrasons multiéléments sont présentées et leurs capacités sont évaluées. Ces techniques utilisent des sabots d'eau dédiées pour générer des faisceaux inclinés et ainsi couvrir la soudure dans le tuyau PE. Des techniques ont été développées pour des tuyaux ayant des diamètres extérieurs compris entre 220 et 710 mm et des épaisseurs comprises entre 14 et 45mm. Les paramètres de la sonde et du sabot ont été optimisés pour cette gamme de tuyaux. Les résultats présentés montrent la capacité de détecter des défauts plans d'un diamètre compris entre 1,5 et 8 mm dans cette gamme de tuyaux avec une solution de contrôle par ultrasons multiéléments, et les défis surmontés en travaillant avec ce type de matériau.

Mots clés: Contrôle par ultrasons multiéléments, contrôle de tuyaux plastiques, joints soudés de type bord-à-bord

### **1. Introduction**

Les tuyaux en polyéthylène (PE) sont utilisés pour les canalisations de gaz et d'eau depuis des décennies. En raison de la haute résistance de ce matériau à la corrosion et à la contamination, il apparaît hautement souhaitable de remplacer les tuyaux en acier carbone par du PE dans les applications critiques telles les centrales nucléaires [1]. Cependant, les autorités de régulations exigent que les joints soudés soient inspectés sur tout leur volume et actuellement aucun équipement n'en est capable. Par conséquent, il est nécessaire d'avoir une méthode d'essais non destructifs (END) fiable pour l'inspection des raccords de tuyaux en PE de diverses nuances et de différentes tailles.

Bien qu'il existe des normes européennes pour l'inspection des soudures de tuyaux en plastique, on constate sur le marché un manque d'équipements spécialisés pour ces contrôles. La meilleure méthode actuelle pour le contrôle des soudures dans les tuyaux en acier de grand diamètre est celle des tests par ultrasons. L'une des principales raisons pour laquelle cela n'est pas mis en œuvre dans l'industrie des tubes en plastique, est due au fait que le plastique est un matériau difficile à contrôler en raison de ses propriétés acoustiques de haute atténuation et de faible vitesse de propagation.

Plusieurs études ont été menées pour développer des méthodes NDE fiables pour le contrôle des joints soudés de type bord-à-bord (BF). Elles ont été réalisées avec différentes techniques en utilisant des sondes ultrasonores conventionnelles [2,3]; y compris le mode pulse-echo, tandem, les ondes rampantes et la diffraction en temps de vol (TOFD). Récemment, le travail a été étendu à l'utilisation du contrôle par ultrasons multiéléments (PAUT) [4-7] pour contrôler les joints BF.

Il existe des équipements de contrôle par ultrasons pour l'inspection des tuyaux en plastique commercialisés en Amérique du Nord et en Corée du Sud [8,9]. Cependant, aucun de ces systèmes ne

fournit de solution complète. L'équipement américain est limité aux joints BF et utilise des méthodes TOFD conventionnelles plutôt que des techniques multiéléments, et il ne s'applique pas aux configurations de soudure plus complexes. L'équipement coréen est limité aux joints de type électrofusion (EF) et n'enregistre pas les données du contrôle.

Le travail présenté dans ce papier est issu du projet TestPEP, projet financé par l'UE, pour le développement et la validation d'une méthode de CND automatisée pour tester les joints soudés dans les tuyaux en PE.

Le projet mettra au point des procédures, des techniques et des équipements d'essais non destructifs par ultrasons multiéléments pour le contrôle des joints soudés dans les tuyaux en PE. Dans cet article, les progrès dans le développement des techniques d'inspection pour les joints BF dans différentes tailles de tuyaux sont présentés. Pour évaluer les joints, plusieurs techniques ultrasonores individuelles doivent être appliquées pour couvrir complètement les zones de fusion des soudures. Un développement complet des techniques a été entrepris, et les techniques ont été évaluées sur des échantillons. Les résultats sont présentés concernant la détection sur les échantillons de tuyaux et une première évaluation de la capacité de ces techniques d'inspection.

## **2. Matériaux et équipement**

Dans cette section, les propriétés acoustiques du polyéthylène (PE) utilisé dans les tuyaux sont décrites, ainsi que la configuration de la soudure examinée dans ce document. L'échantillon d'essai, l'équipement tel que les sondes, les sabots et le scanner conçu et fabriqué sont également présentés.

### *2.1 Matériau et configuration de la soudure*

Le PE est un matériau compliqué à contrôler en raison de la faible vitesse de propagation des ondes et de son atténuation élevée. Les ondes transversales ne sont pas exploitées dans le PE en raison des propriétés du matériau, et les ondes longitudinales sont le seul mode de contrôle. La vitesse des ondes longitudinales variera en fonction de la qualité du PE, mais aussi des différents lots de matériaux de tuyauterie. On considère aussi que la vitesse peut varier en fonction de l'épaisseur de paroi du tuyau et également de l'angle de réfraction des ondes qui traversent la structure cristalline [10]. Cela implique que pour des solutions d'inspection précises, les propriétés acoustiques doivent être déterminées pour chaque catégorie de tuyaux.

Les premiers travaux ont porté sur la détermination des propriétés ultrasonores d'un tuyau en PE générique [11], montrant que la vitesse dépendait légèrement de la fréquence et que l'atténuation dépendait fortement de la fréquence. Les nuances de PE concernés par cette étude sont le PE80 et le PE100. Les tuyaux d'un diamètre extérieur (OD) de 355 mm ont été fabriqués à partir de PE80 et les tuyaux avec des OD de 220 mm et 450 mm, à partir de PE100. Les vitesses des ondes longitudinales ultrasonores ont été déterminées dans différentes parties du tuyau. Elles ont été calculées en mesurant le temps de vol des signaux ultrasonores dans des échantillons conçus spécialement, en utilisant des techniques d'inter-corrélation. La vitesse moyenne globale de l'onde longitudinale pour le PE80 était de 2349,5 m/s avec un écart-type de 0,75% de la valeur moyenne. La valeur moyenne globale pour le PE100 était de 2385,8 m/s avec un écart-type de 0,75%. L'atténuation dans le matériau PE est très élevée et dépend de la fréquence, mesurée à 0,5 dB/mm à 2 MHz et à 1,1 dB à 4 MHz.

Le joint BF est créé en utilisant une plaque chauffante pour faire fondre les extrémités de deux tuyaux qui sont ensuite fusionnés ensemble par pression appliquée pendant un certain temps (figure 1 (a)). Le processus crée ensuite un bourrelet de soudure de l'excédent de matériau sur les surfaces interne et externe du tuyau (Figure 1 (b)).

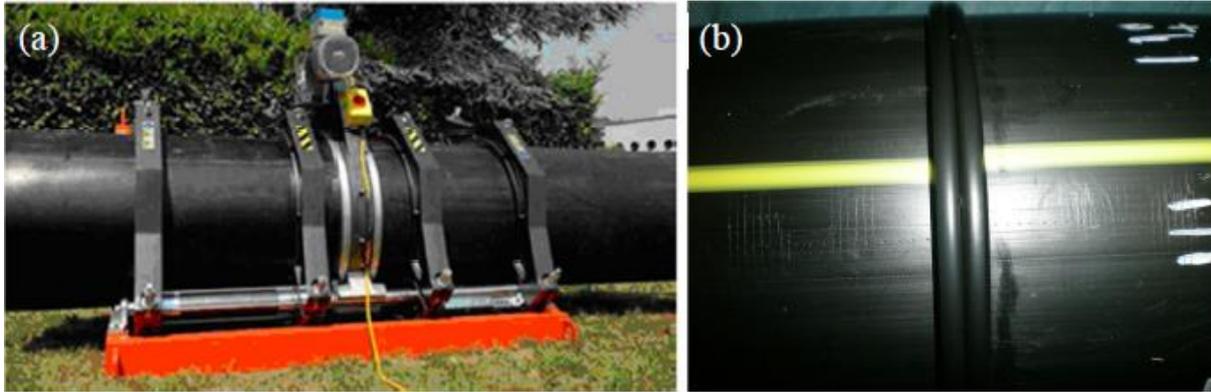
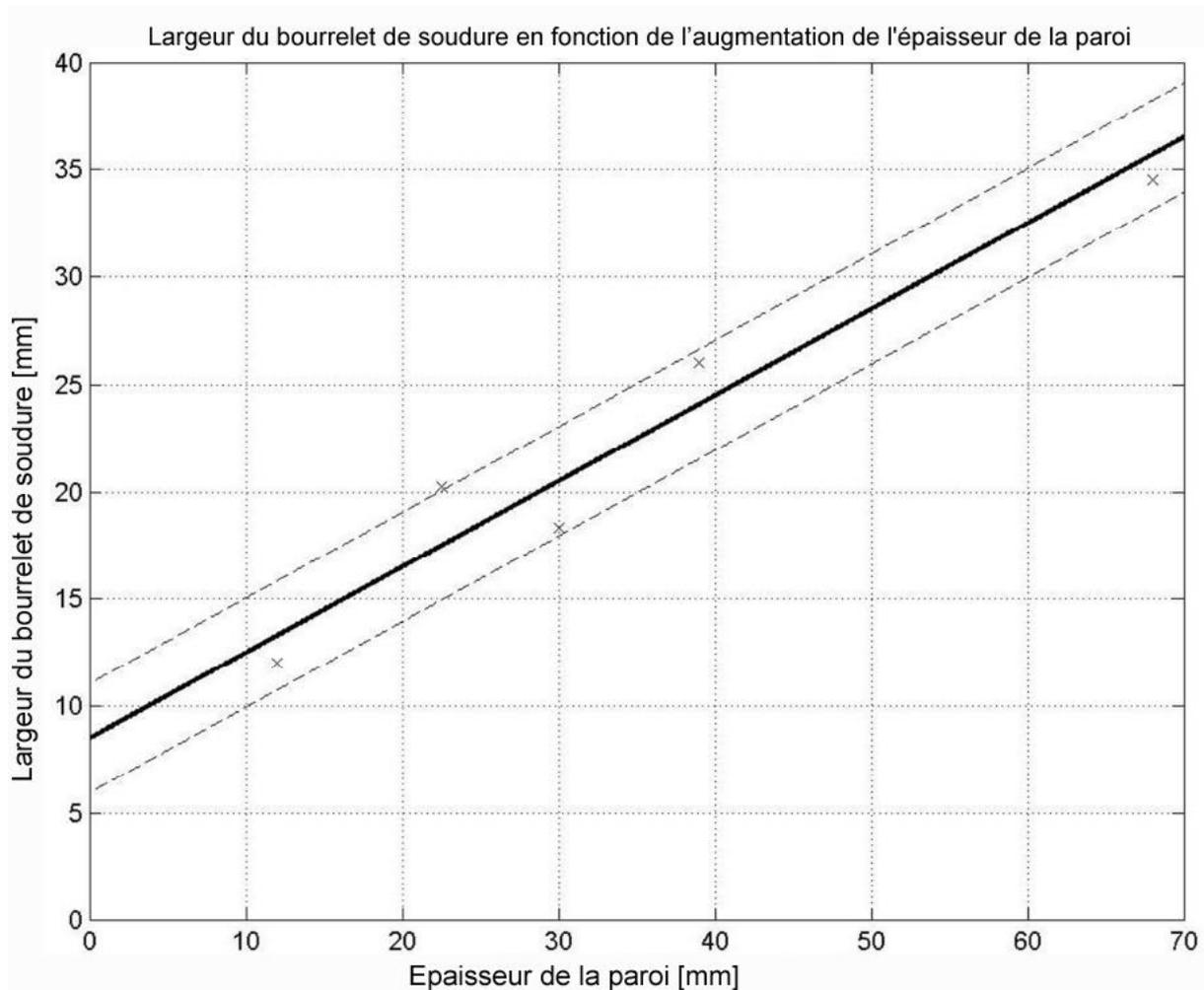


Figure 1 :Joint soudé de type bord-à-bord d'un tuyau en PE. (a) Un système de soudage sur site et (b) une soudure complète avec le bourrelet de soudure externe.

Une très mauvaise soudure peut-être détectée par l'inspection visuelle du bourrelet de soudure externe. Cependant, le bourrelet peut être intact, sans déformation, et la soudure peut contenir des défauts. Dans certaines industries et certains pays, le bourrelet de soudure est retiré à la fin du cycle de soudage. Cependant, dans certains cas, en particulier dans l'industrie des services publics, le bourrelet de soudure est gardé intact. Les techniques développées dans cette étude visent l'inspection des joints BF avec bourrelet de soudure intact, ce qui aura des implications pratiques sur les techniques de contrôle développées et les sélections de sonde et de sabots, d'autant plus que la largeur du bourrelet de soudure variera en fonction de la géométrie et des procédures de soudage (figure 2).



**Figure 2.** Largeur moyenne du bourrelet de soudure en fonction de l'épaisseur de la paroi du tuyau. La distance entre l'avant du sabot de la sonde et l'axe de la soudure doit être supérieure à la demi largeur du bourrelet de soudure.

## 2.2 Echantillon de test

Pour le développement des techniques de contrôle des joints BF, des échantillons contenant des défauts usinés ont été utilisés, couvrant la gamme des tuyaux de diamètres extérieurs compris entre 220mm et 450mm.

Les trous à fond plat (TFP) ont été jugés pertinents pour évaluer la performance des techniques proposées. Les TFP, utilisés pour évaluer les techniques tandem et balayage sectoriel, ont été usinés aux extrémités du tube. La disposition des TFP pour le tuyau de 220mm de diamètre extérieur est représentée sur la figure 3 (a), et les TFP usinés dans les tuyaux sont donnés dans le tableau 1. La figure 3 (b) montre la position de la sonde lors du contrôle des TFP. Les TFP sont à une profondeur de 40 mm de l'extrémité du tuyau et la sonde est positionnée à 47 mm du bord du tuyau, laissant les 7 mm supplémentaires pour figurer la moitié du bourrelet de soudure.

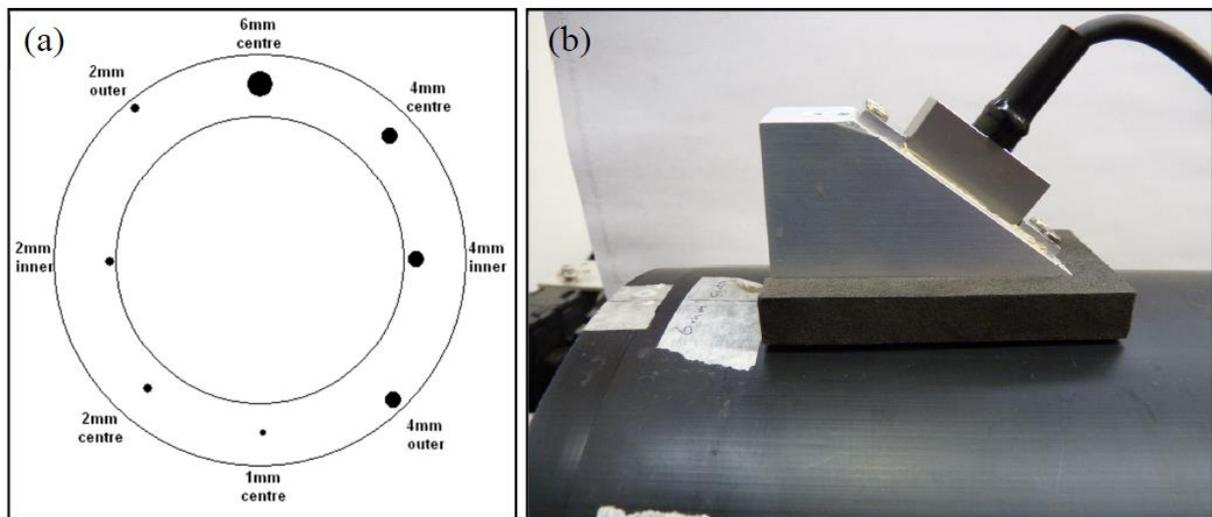


Figure 3 (a) Disposition des TFP dans l'épaisseur du tuyau. (b) Position de la sonde contrôlant les TFP.

220mm OD 14mm thick	450mm OD 28mm thick	355mm OD 33mm thick	710mm OD 45mm thick
6mm centre	6mm outer	6mm outer	8mm outer
	6mm centre	6mm centre	8mm centre
	6mm inner	6mm inner	8mm inner
4mm centre	8mm outer	8mm outer	6mm outer
4mm inner	8mm centre	8mm centre	6mm centre
4mm outer	8mm inner	8mm inner	6mm inner
1.5mm centre	2mm outer	2mm outer	4mm outer
	2mm half outer	2mm half outer	4mm half outer
	2mm centre	2mm centre	4mm centre
	2mm half inner	2mm half inner	4mm half inner
	2mm inner	2mm inner	4mm inner
2mm centre	4mm outer	4mm outer	2mm outer
	4mm half outer	4mm half outer	2mm half outer
	4mm centre	4mm centre	2mm centre
	4mm half inner	4mm half inner	2mm half inner
	4mm inner	4mm inner	2mm inner

Tableau 1 Diamètre et position des TFP dans les quatre tailles de tuyaux

### 2.3 Sondes, sabot d'eau et scanner

Deux jeux de sondes linéaires ont été utilisés pour l'évaluation des techniques d'inspection. Pour les tuyaux de plus petite taille, des sondes de 4MHz, 32 éléments ont été utilisées et pour les plus grands tuyaux une sonde de 2MHz, 32 éléments. Des faisceaux inclinés dans le matériau sont nécessaires pour inspecter les joints BF. La capacité de déviation angulaire étant limitée avec ces sondes multiéléments, des sabots d'angles ont été exploités pour minimiser la déviation appliquée aux faisceaux. De nouveaux prototypes de sabot en eau ont été conçus et fabriqués pour le contrôle de tuyaux en plastique. Ils sont composés d'une boîte à eau pouvant être inclinée et dotée d'une face ouverte sur la pièce à contrôler. Les avantages de l'utilisation d'un sabot d'eau sont une faible atténuation et un rapport de vitesse permettant la réfraction des faisceaux inclinés vers la zone de fusion. Des angles élevés sont requis car le bourrelet de soudure empêche le positionnement optimal des sondes. Les sabots avec sondes sont présentés sur la figure 4, la sonde 4MHz en (a) et la sonde 2MHz en (b). La figure montre également le joint d'étanchéité flexible qui est utilisée pour maintenir efficacement l'eau dans le sabot de la sonde.

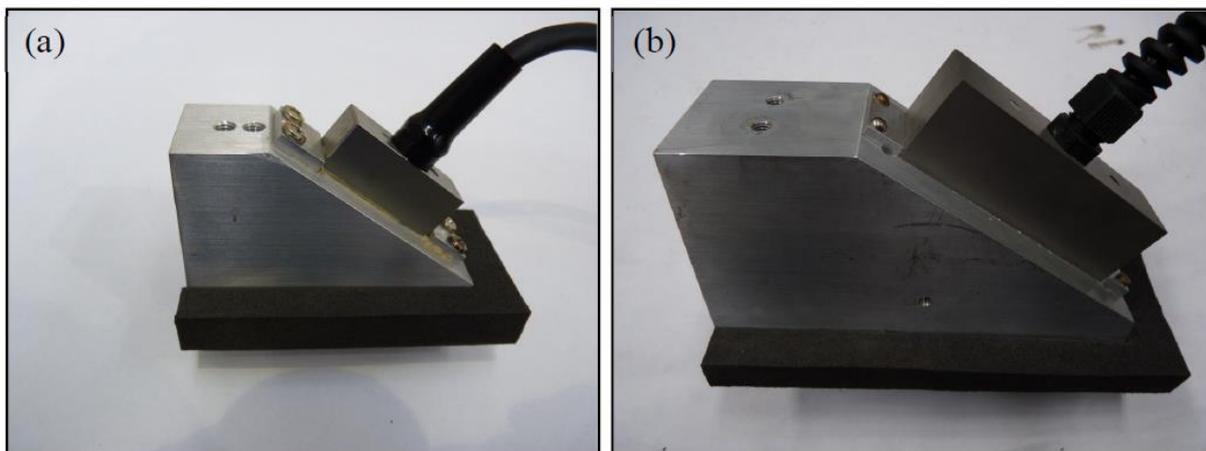


Figure 4. Sonde et sabot d'eau incliné. (a) Sonde 4MHz et (b) sonde 2MHz.

Un scanner spécifique a été conçu pour le contrôle des tuyaux soudés (figure 5). Le scanner comprend un chariot maintenu en position autour du tuyau par plusieurs maillons et un mécanisme de réglage. Ce système modulaire doit permettre au scanner de contrôler les tuyaux d'un diamètre extérieur de 90mm à 1m. Le chariot porte le codeur et le support pour les porte-sondes. Les figures 5 (a) et 5 (b) présentent le système de scanner modulaire et les deux supports de sonde pour les joints BF. Les sondes sont maintenues en contact avec le tuyau à l'aide de ressorts, et le couplage est assuré avec une alimentation continue en eau.

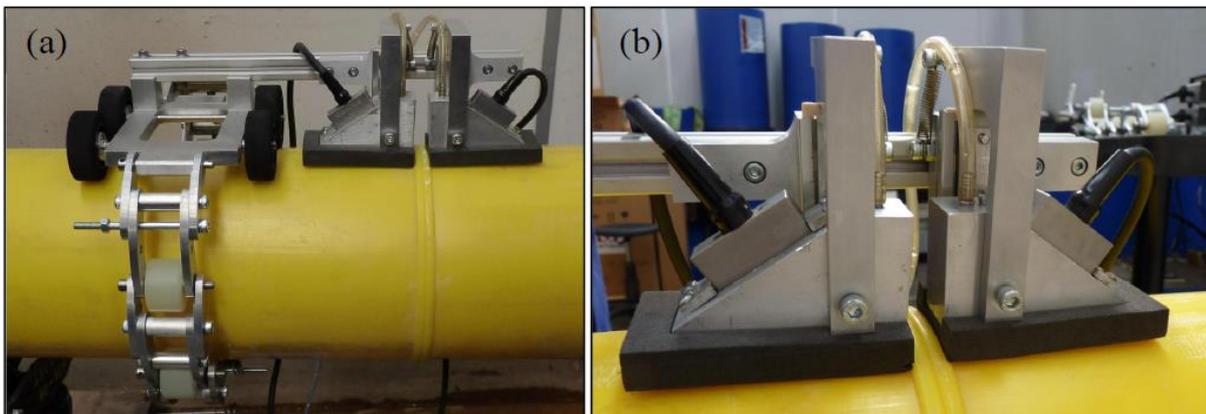


Figure 5 (a) Le scanner modulaire avec les sondes 4 MHz. (b) Porte-sondes BF.

### 3. Techniques de contrôle

Pour l'inspection des joints BF, quatre techniques différentes ont été étudiées; le tandem; le balayage sectoriel; les ondes rampantes et la diffraction en temps de vol (TOFD). Les techniques sont dans la plupart des cas complémentaires, tant en termes de couverture que de types de défauts détectés.

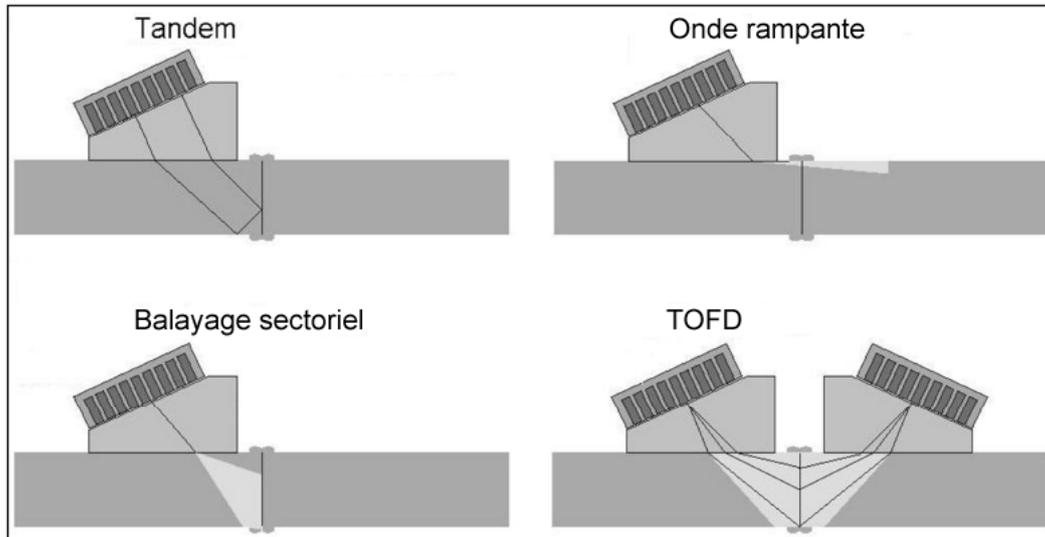


Figure 6 Schémas des techniques de contrôles appliquées pour les joints BF.

Le balayage sectoriel utilise tous les éléments du traducteur pour créer une ouverture, qui produit des faisceaux inclinés sur la plage angulaire voulue. Cette technique produit une image globale du joint, en couvrant une grande partie de la zone soudée, à l'exception de quelques millimètres près de la surface externe du tuyau.

La technique tandem (ou self-tandem en multiéléments) utilise une moitié des éléments du traducteur pour émettre les ultrasons et l'autre moitié pour la réception. Cette technique est adaptée pour détecter les défauts plans verticaux; mais la couverture est limitée à une zone plus proche de la surface interne.

La technique des ondes rampantes couvre la région proche de la surface externe du tuyau, qui n'est pas couverte par les deux premières méthodes. Cette technique produit des ondes de compression avec un angle élevé, se propageant immédiatement sous la surface d'inspection, pour détecter les défauts proches de la surface et débouchant.

La technique TOFD couvre a priori toute la zone soudée. La technique utilise la diffraction pour détecter les défauts verticaux. La configuration TOFD utilisée sur ce projet est une technique pitch-catch qui utilise deux traducteurs d'angle fortement divergents pour transmettre et recevoir des faisceaux couvrant l'ensemble du joint.

### 4. Résultats

Ce paragraphe présente les résultats obtenus avec les méthodes balayage sectoriel et tandem sur des échantillons de tubes de différents diamètres externes et de différentes épaisseurs. Les tuyaux ont tous des TFP insérés dans une extrémité avec différents diamètres et à différentes positions (voir Table 1). Tous les TFP sont circulaires, mais peuvent apparaître comme elliptiques sur certains schémas en raison du changement de rapport longueur-hauteur utilisé pour l'affichage.

Les illustrations de ce paragraphe présentent 3 images; un schéma de la coupe transversale du tuyau; les résultats de contrôle avec la technique de balayage sectoriel; et les résultats avec la technique du tandem. A gauche du schéma de la coupe, deux barres indiquent la couverture théorique de chaque technique. La barre noire indique la couverture directe de la technique de balayage sectoriel et la barre grise foncée indique la couverture directe de la technique de tandem. Le gris clair sur les extrémités des barres indique la propagation des faisceaux contribuant à la couverture. La couverture réelle

pendant l'inspection varie toujours dans une certaine mesure en fonction du désalignement de la sonde, de sa position, et de la variation de la pression appliquée sur la sonde.

#### 4.1 Taille de tuyau: 220mm de diamètre extérieur et 14mm d'épaisseur

La figure 7 présente les résultats de contrôle pour un tuyau PE100 de 220 mm de diamètre externe et de 14mm d'épaisseur. Le résultat du contrôle montre que la technique du balayage sectoriel a détecté tous les TFP. Avec la technique en tandem, six des huit TFP ont été détectés.

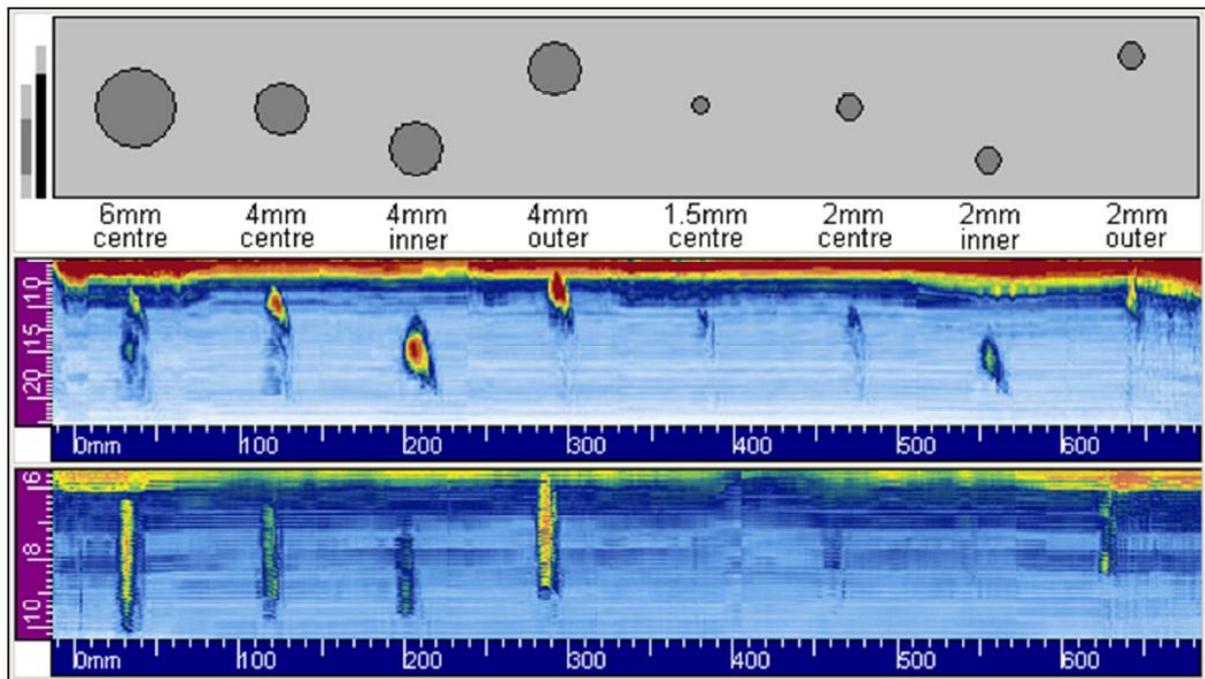


Figure 7 schéma de la coupe transversale du tuyau de 220 mm de diamètre extérieur et de 14mm d'épaisseur avec les TFP, et les résultats des techniques de balayage sectoriel et tandem.

#### 4.2 Taille de tuyau: 450mm de diamètre extérieur et 28mm d'épaisseur

Sur la figure 8, les résultats du contrôle pour un tube PE100 de 450 mm de diamètre extérieur et de 28 mm d'épaisseur sont donnés. La technique du balayage sectoriel a réussi à détecter tous les TFP, tandis que la technique tandem a détecté de manière fiable 10 des 16 TFP. Des indications faibles sont discernées pour certains des autres TFP. Les TFP non détectés sont les plus proches de la surface externe.

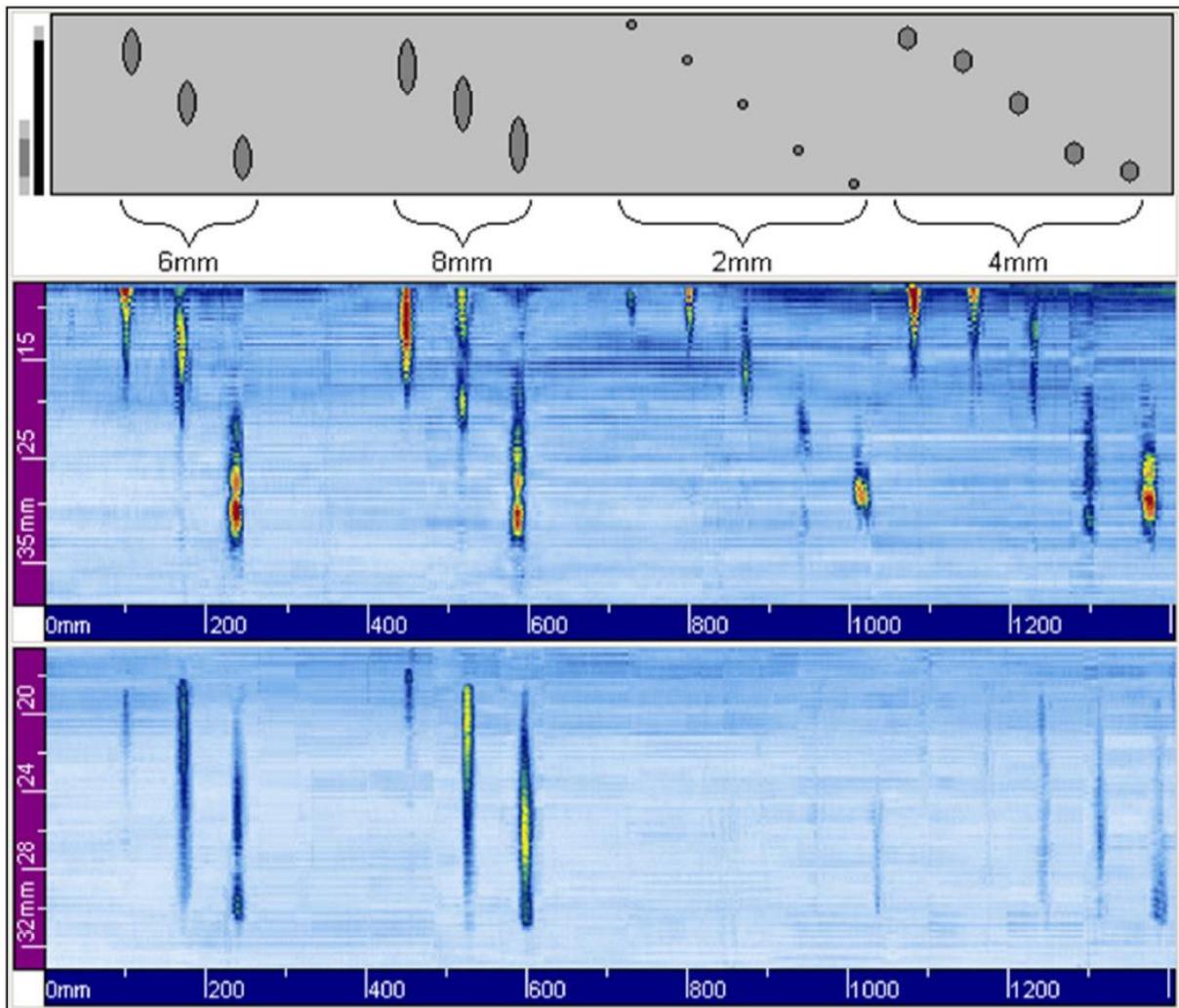


Figure 8 Schéma de la coupe transversale du tuyau de 450 mm de diamètre extérieur et de 28mm d'épaisseur avec les TFP, et les résultats des techniques de balayage sectoriel et tandem.

#### 4.3 Taille de tuyau: 355mm de diamètre extérieur et 33mm d'épaisseur

La figure 9 présente les résultats de contrôle pour un tube PE80 de 355 mm de diamètre extérieur et de 33 mm d'épaisseur. La technique du balayage sectoriel a réussi à détecter dix des 16 TFP, tandis que la technique du tandem a détecté de manière fiable huit des 16 TFP. Des indications faibles sont repérées pour certains des autres TFP et les TFP non détectés sont à nouveau les plus proches de la surface externe.

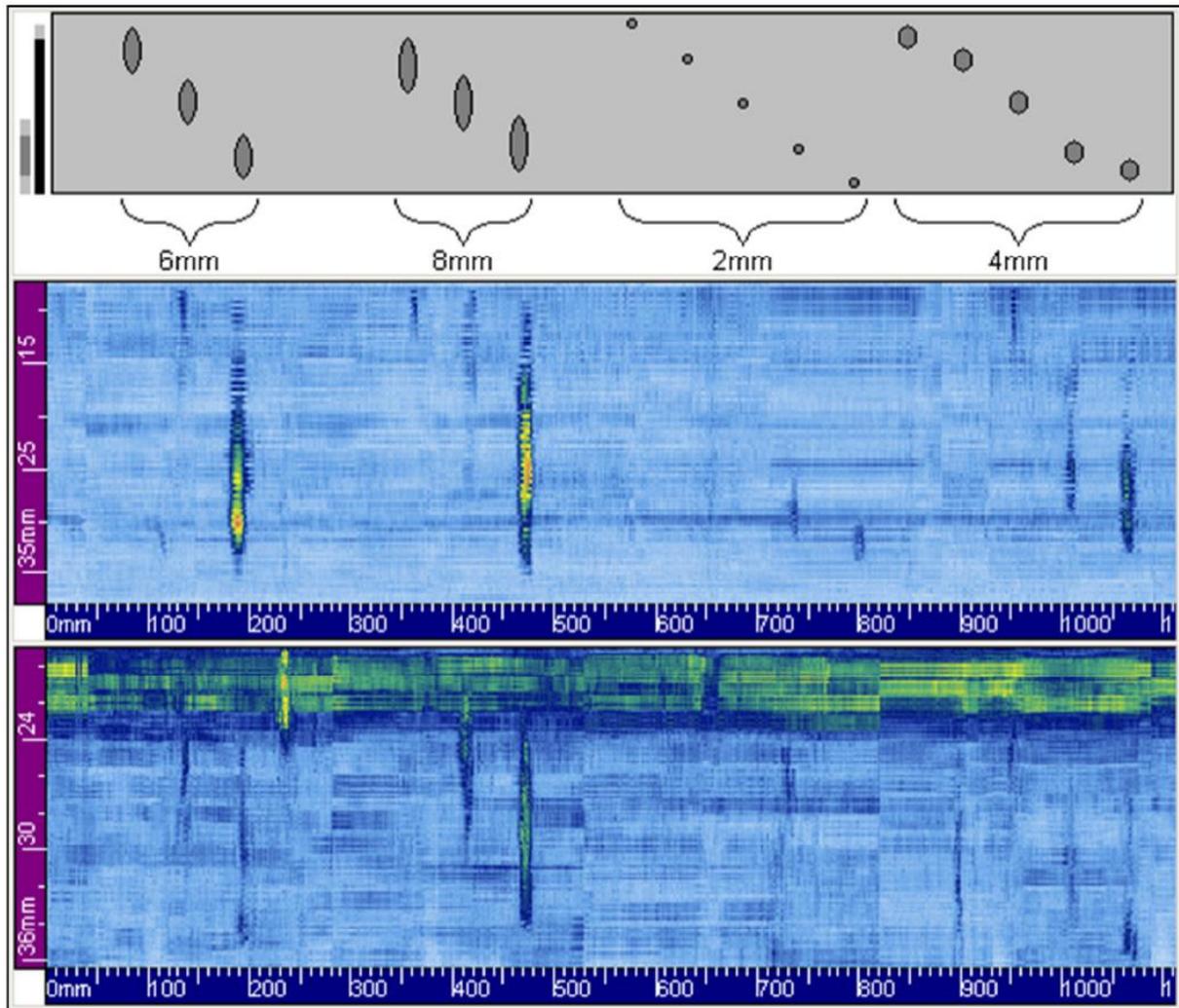


Figure 9 Schéma de la coupe transversale du tuyau de 355 mm de diamètre extérieur et de 33mm d'épaisseur avec les TFP, et les résultats des techniques de balayage sectoriel et tandem.

#### 4.4 Taille de tuyau: 710mm de diamètre extérieur et 45mm d'épaisseur

La figure 10 présente les résultats de contrôle pour un tube PE100 de 710 mm diamètre extérieur et de 45 mm d'épaisseur. La technique du balayage sectoriel a réussi à détecter 15 des 16 TFP, tandis que la technique du tandem a détecté de manière fiable sept des 16 TFP.

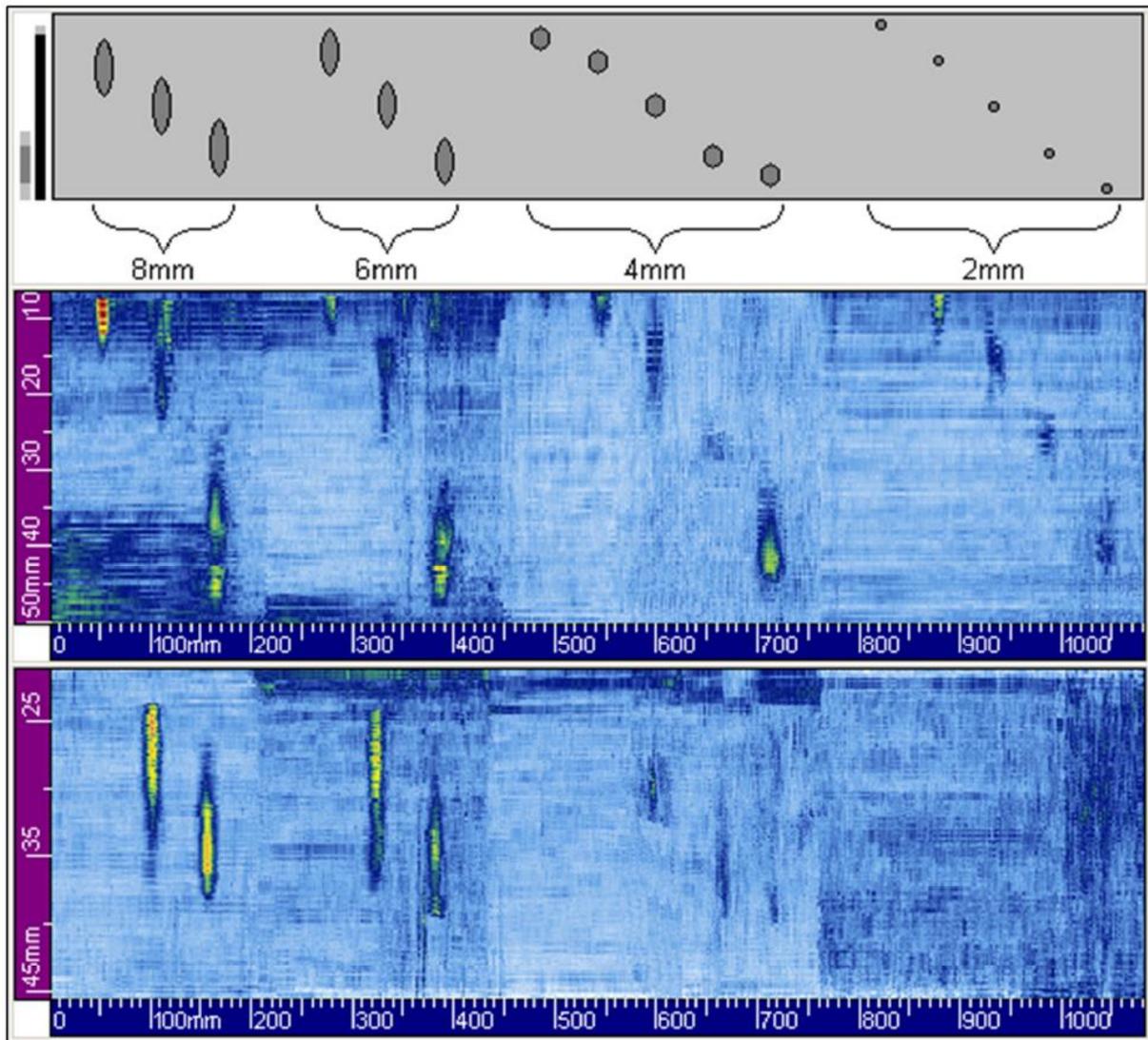


Figure 10 Schéma de la coupe transversale du tuyau de 710mm de diamètre extérieur et de 45mm d'épaisseur avec les TFP, et les résultats des techniques de balayage sectoriel et tandem.

#### 4.5 Résumé des résultats de contrôle

Le tableau 2 présente les résultats de détection des techniques évaluées. Dans l'ensemble, la technique du balayage sectoriel a détecté 49 TFP sur 56 (88%) et la technique tandem a détecté 31 TFP sur 56 (55%). Les capacités de détection inférieures obtenues avec la technique tandem sont liés à une couverture de zone de couverture réduite. Tous les TFP détectés par la technique tandem ont également été détectés par la technique de balayage sectoriel. Si les TFP situés en dehors de la zone de couverture théorique sont ignorés, les capacités de détection pour les deux techniques d'inspection sont supérieures aux résultats globaux; 91% pour le balayage sectoriel et 84% pour la technique tandem. Le pourcentage de TFP non détectés est généralement dû à des tailles plus petites et souvent plus proches de la surface externe.

Table 2 Résumé des résultats de contrôle

TFP (taille)	Technique	220mm OD	450mm OD	355mm OD	710mm OD
1.5mm	Balayage sectoriel	1/1	-	-	-
	Tandem	0/1	-	-	-
2mm	Balayage sectoriel	3/3	5/5	2/5	4/5
	Tandem	2/3	1/5	1/5	0/5
4mm	Balayage sectoriel	3/3	5/5	3/5	5/5
	Tandem	3/3	3/5	2/5	3/5
6mm	Balayage sectoriel	1/1	3/3	2/3	3/3
	Tandem	1/1	3/3	2/3	2/3
8mm	Balayage sectoriel	-	3/3	3/3	3/3
	Tandem	-	3/3	2/3	2/3
Total	Balayage sectoriel	8/8	16/16	10/16	15/16
	Tandem	6/8	10/16	8/16	7/16

## 5. Discussion

Les techniques par ultrasons multiéléments développées dans le cadre de ce projet visent à être intégrées dans un équipement de CND pour les contrôles sur site d'une gamme de tuyaux en PE de différentes nuances et dimensions. Par conséquent, les performances peuvent devoir être optimisées pour chaque cas individuel. Une autre partie du projet consiste à concevoir et fabriquer des sondes et des sabots pour des configurations de joints spécifiques et des tailles de tuyaux différentes. De plus, les capacités de détection évaluées dans cet article ne prennent pas en compte l'ensemble du système, seulement les deux techniques étudiées. Il convient également de noter que seules quelques TFP de même taille et de même position ont été inspectées et que les formes et les emplacements des TFP n'ont pas été vérifiés. Afin d'obtenir davantage de données statistiquement correctes, il serait utile d'effectuer une étude expérimentale plus quantitative sur un échantillon de plus grande taille.

## 6. Conclusions

Des techniques d'inspection ont été développées pour les joints soudés de type bord-à-bord (BF) avec des diamètres extérieurs compris entre 220 et 710 mm et des épaisseurs comprises entre 14 et 45 mm. Les capacités des techniques ont été évaluées sur des échantillons contenant des défauts usinés sous la forme de trous à fond plat percés dans l'extrémité de tuyaux. Les capacités globales de détection sont de 88% pour la technique du balayage sectoriel et de 55% pour la technique tandem. Toutes les tailles de TFP ont été détectées par les deux techniques dans toutes les tailles de tuyaux. La raison principale des TFP non détectés est due au fait que leur emplacement se trouvait hors de la zone de couverture de la technique. Les capacités de détection dans la zone de couverture de chaque technique étaient de 91% pour la technique du balayage sectoriel et de 84% pour la technique tandem.

## Remerciements

Les travaux de recherche menant à ces résultats ont été financés par le septième programme-cadre de l'Union Européenne géré par l'Agence exécutive pour la recherche REA [PF7/2007-2013] en vertu de la convention de subvention no. 243791-2. Les informations contenues dans ce document sont fournies telles quelles et aucune garantie n'est donnée que les informations sont adaptées à un usage particulier. L'utilisateur utilise l'information sous sa propre responsabilité.

## Références

1. ASME Boiler and Pressure Vessel Code Case N-755, "Use of Polyethylene (PE) Plastic Pipe. Section III, Division I, and Section XI".
2. M.J. Troughton, "Welding with integrated non-destructive examination of polyethylene pipes", Plastics Pipes XI Conference, Munich, Germany, 3-6 September 2001.
3. I.J. Munns and G.A. Georgiou, "Ultrasonic and radiographic NDT of butt fusion welded polyethylene pipes", Insight, vol. 41, no. 5, May 1999.
4. C. Frederick, D. Zimmerman, and A. Porter, "High-density polyethylene piping butt fusion joint examination using ultrasonic phased array", Pressure Vessels and Piping, Prague, Czech Republic, 26-30 July 2009.
5. S L Crawford, S E Cumblidge, S R Doctor, T E Hall and M T Anderson, "Preliminary assessment of NDE methods on inspection of HDPE butt fusion piping joints for lack of fusion", PNNL, May 2008.
6. D. MacLennan, I.G. Pettigrew and C.R. Bird, "Plastic Fantastic? – An NDE inspection solution for HDPE butt welds", 18th World Conference in Non-Destructive Testing, Durban, South Africa, 16-20 April 2012.
7. C. Hekun, C. Zheng, C. Hong and F. Yang, "Ultrasonic phased array inspection on PE pipe heat fusion joints and electr-fusion joints", 18th World Conference in Non-Destructive Testing, Durban, South Africa, 16-20 April 2012.
8. B. Messer, M. Yarmuch and P. den Boer, "Novel High Resolution Defect Detection for Thermoplastic Butt -Welds", Pipeline and Gas Journal, March 2003.
9. H.J. Shin, Y.H. Jang, J.R. Kwon and E.J. Lee, "Nondestructive Testing of Fusion Joints of Polyethylene Piping by Real Time Ultrasonic Imaging". Plastics Pipes XII Conference, Milan, Italy, 19-22 April 2004.
10. J.Q. Zhao, L.Daigle and D. Beaulieu, "Effect of joint contamination on the quality of butt-fused HDPE pipe joints", Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 29, no. 5, pp. 787-798, October 2002.
11. L. Mazeika, R. Sliteris and A. Vladisauskas, "Measurement of Velocity and Attenuation for Ultrasonic Longitudinal Waves in the Polyethylene Samples", Ultragarsas, vol. 65, No. 4, 2010.