

# DEVELOPPEMENT ET EVALUATION D'UN SYSTEME D'INSPECTION ULTRASONORE MULTIELEMENTS DE JOINTS SOUDES DE TUYAUX EN POLYETHYLENE

*Mike Troughton, Malcolm Spicer et Fredrik Hagglund, TWI Ltd, Cambridge, RU*

## Résumé

Le développement d'un système de contrôle par ultrasons multiéléments spécialement conçu pour inspecter les joints soudés de type bord-à-bord (BF : butt fusion) et de type électro-fusion (EF) dans des tuyaux en polyéthylène (PE) de diamètres allant jusqu'à 1000 mm (39 pouces) est décrit, y compris le développement des techniques d'inspection et de l'équipement. Plusieurs essais sont présentés qui ont permis d'évaluer le système d'inspection prototype à la fois en laboratoire et sur le terrain.

Cet article décrit un projet de recherche Européen, appelé TestPEP, qui a impliqué 17 organisations de sept pays, pour concevoir, fabriquer et valider un système par ultrasons multiéléments (PAUT) robuste pour l'inspection sur site de joints soudés sur des tuyauteries PE. Cette technique couvre les soudures bord-à-bord (BF), ou avec des bagues de raccord (EF) pour diverses géométries de tuyaux (coudes, réducteurs et formes en tés).

## Introduction

La pratique courante en Europe pour garantir la qualité des joints BF et EF dans les tuyaux PE lors de l'installation consiste à enregistrer les paramètres de fusion utilisés, ainsi qu'une inspection visuelle du joint fondu et un test de pression hydrostatique à court terme, complétés par des essais destructifs sur un échantillon prélevé sur le même joint. Cependant, l'inspection visuelle est limitée à la surface externe du joint; elle ne peut fournir de preuve de défauts enfouis ou d'une fusion froide (fusion incomplète ou partielle causée par une pénétration inadéquate de la chaîne moléculaire et une co-cristallisation à l'interface, entraînant une fragilité en cas d'effort mécanique à court terme). Cependant, des travaux antérieurs à TWI [1,2] ont montré que des variations de pression hydrostatique provoqueraient des dégradations uniquement sur des joints BF et EF contenant des défauts grossiers. De plus, si un défaut existe dans un joint soudé, il y a peu de chance qu'il soit inclus dans un échantillon prélevé pour des essais mécaniques. Enfin, tester mécaniquement un joint et le remplacer par un joint de qualité inconnue ne garantit pas l'intégrité du pipeline.

L'examen volumétrique non destructif (END) peut fournir une analyse complète de l'ensemble du joint sans affecter la qualité de ce joint. C'est donc la seule technique qui a le potentiel d'assurer l'intégrité des joints réalisés sur une tuyauterie PE. Cependant, pour ce faire, la technique NDE doit être capable de détecter tous les types de défauts possibles, susceptibles de dégrader l'intégrité d'un joint.

Au cours des dernières années, les techniques ultrasonores multiéléments (PAUT) ont été considérées pour évaluer l'intégrité des joints BF [3-7] et EF [8-10]. Cependant, ceux-ci ont été limités à une gamme réduite de tailles de tuyaux et/ou n'ont pas considéré de critères d'acceptation des défauts.

## Techniques d'inspection

Les joints de soudure bord-à-bord (BF) et les joints par électro-fusion (EF) nécessitent des techniques d'inspection différentes. Dans les joints BF, l'interface de jonction est perpendiculaire à la surface du tuyau et nécessite l'utilisation de faisceaux ultrasonores inclinés pour détecter les défauts qui peuvent être présents à l'interface. Afin d'obtenir une couverture complète de l'épaisseur de zone soudées, quatre techniques différentes ont été utilisées (figure 1): tandem, onde rampante, balayage sectoriel et diffraction en temps de vol (TOFD).

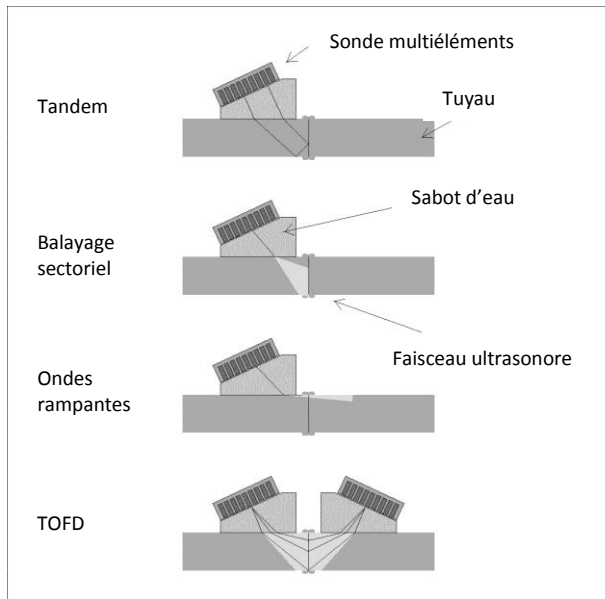


Figure 1. Techniques d'inspection utilisées sur joint BF.

La technique tandem utilise la moitié des éléments du transducteur pour émettre les ultrasons et l'autre moitié pour la réception. La technique est adaptée à la détection des défauts plans verticaux; cependant, la couverture est limitée à une zone située approximativement entre la mi-épaisseur et la surface interne.

La technique du balayage sectoriel utilise tous les éléments du transducteur pour créer des faisceaux sur une plage angulaire choisie. Cette technique donne une vue d'ensemble du joint, elle couvre une grande partie de la zone soudée, à l'exception de quelques millimètres près de la surface externe du tuyau.

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

La technique TOFD couvre toute la zone de fusion et utilise la diffraction en directe pour détecter les défauts verticaux. La configuration TOFD utilisée en mode pitch-catch utilise deux transducteurs d'angle avec une grande ouverture pour transmettre et recevoir des faisceaux couvrant l'ensemble du joint.

Dans les joints EF, l'interface soudée est parallèle à la surface du tuyau et un balayage linéaire en incidence normale ( $L0^\circ$ ) est utilisé, les ultrasons étant focalisés à l'interface entre le tuyau et la bague de raccord EF (Figure 2).

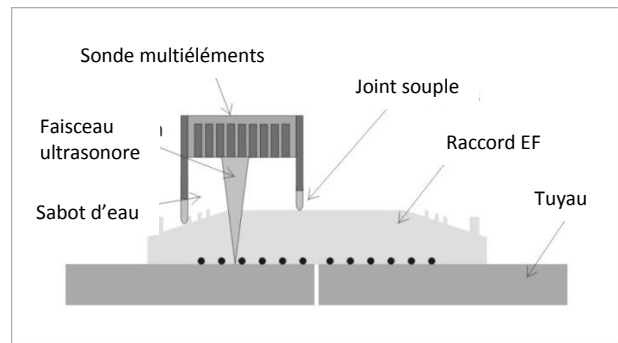


Figure 2. Technique d'inspection utilisée sur joint EF.

La bobine de fil chauffant étant située au-dessus de l'interface de fusion, une résolution suffisante est requise pour distinguer le fil et l'espace entre les enroulements.

## Equipement pour l'inspection

Le système d'inspection multiélément (PAUT) rassemble plusieurs composants: un transducteur multiéléments, qui produit les faisceaux ultrasonores et détecte les signaux réfléchis par tout défaut dans le joint; un sabot de sonde, qui garantit que les ultrasons sont transmis dans le tuyau ou le raccord PE à l'angle correct et avec une perte d'énergie minimale; un support de sonde, qui assure un bon contact entre le sabot de la sonde et le tube/raccord sur toute sa circonférence; un scanner, qui porte l'ensemble sonde et support autour du tuyau, sans mouvement dans la direction axiale, et enregistre les positions selon la circonférence; et un système d'acquisition multiéléments, qui envoie des signaux électriques aux éléments du transducteur et analyse les signaux en retour.

Dans ce projet, la conception de chacun de ces composants a été optimisée pour l'inspection des tuyaux PE. La spécification des sondes pour l'inspection des joints BF, en termes de dimensions, de fréquence ultrasonore, de nombre d'éléments et de pas, a été développée en fonction de la capacité de détecter des trous à fond plat et des entailles de différentes tailles, pour différentes valeurs d'épaisseur et de diamètre de tuyaux. La spécification des sondes pour l'inspection des joints EF a été élaborée en fonction de la capacité à détecter le fil chauffant dans des bagues de raccord EF non fonctionnées de différentes tailles. Il a été constaté que la gamme de diamètres de tuyaux de 110 à 1000 mm (4 à 39 pouces) peut être contrôlée en utilisant seulement quatre sondes différentes (deux pour les joints BF et deux pour les joints EF). Les sondes multiéléments ont été conçues et fabriquées selon les spécifications développées ci-dessus.

Afin d'assurer le couplage acoustique avec la surface irrégulière des bagues de raccord EF et de permettre le balayage sectoriel de faisceaux pour l'inspection des joints BF, les sabots de la sonde sont constitués de boîtes à eau

ouvertes, munies d'une jupe d'étanchéité flexible pour maintenir l'eau dans le sabot en appui sur le tuyau ou la bague de raccord EF. L'angle des sabots pour l'inspection des joints BF a été optimisé pour minimiser la déviation électronique par les éléments de la sonde. Des photographies d'ensembles sonde/sabots sont montrées sur les figures 3 et 4.

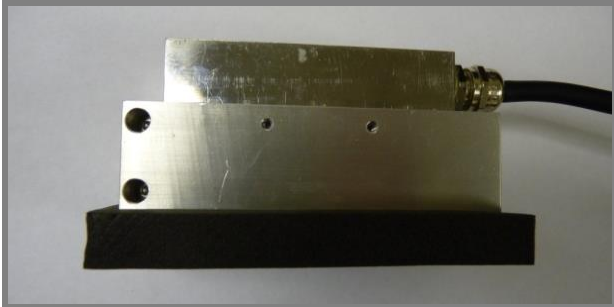


Figure 3. Assemblage sonde/sabot d'eau en incidence normale pour inspecter des joints EF de petit diamètre.



Figure 4. Assemblage sonde/sabot d'eau incliné pour inspecter des joints BF de petit diamètre.

Des supports de sondes montés sur ressorts ont été conçus pour s'adapter aux différents ensembles sonde/sabot porté par le même système de déplacement mécanique. Le scanner se compose d'un chariot embarquant un encodeur pour enregistrer les positions autour du tuyau et les supports de sonde, et d'une série de maillons pour guider et maintenir le chariot autour du tuyau (figures 5 et 6).

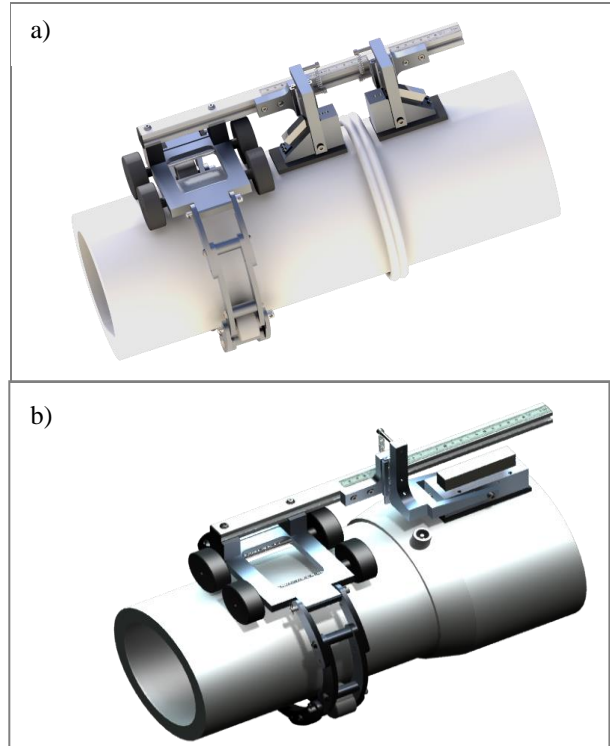


Figure 5. CAO du système TestPEP sans encodeur sur le chariot pour : a) joints BF, and b) joints EF.



Figure 6. Prototype TestPEP sur un joint BF, avec un encodeur monté sur le chariot.

Dans le cadre du projet TestPEP, un nouvel équipement de contrôle par ultrasons multiéléments, conditionné pour une exploitation sur chantiers, a été conçu et fabriqué (Figure 7), avec les caractéristiques suivantes:

- Electronique ultrasons et carte PC intégrées;
- Accès à distance à l'application logicielle (ethernet ou WiFi);
- Protection IP67 pour une immersion totale dans l'eau;
- 100 Go de mémoire interne pour le stockage de données;

- Deux batteries rechargeables permettant jusqu'à six heures d'utilisation continue.



Figure 7. CAO de l'équipement ultrasons TestPEP.

### Validation des procédures d'inspection

Les procédures d'inspection ont été validées en inspectant des joints BF et EF dans des tuyaux de diamètre allant jusqu'à 710 mm (28 pouces), et contenant des défauts connus, incluant la présence de particules, de la fusion froide et de défauts plans (25  $\mu\text{m}$  d'épaisseur, 1-50 mm de diamètre). Ces joints ont été réalisés en laboratoire par des opérateurs de soudage qualifiés, à partir de tuyaux et bagues de raccord disponibles dans le commerce, conformément à la procédure de soudage DVS 2207-1.

Les figures 8 et 9 montrent des images ultrasonores d'un joint SDR11 EF de 225 mm (9 pouces) contenant un défaut plan de 2 mm (0,08 pouce) de diamètre (fig. 8), et où le tube n'a pas été complètement inséré dans le raccord (fig. 9). Les deux types de défauts apparaissent clairement. Les figures 10 et 11 montrent des images provenant d'un joint EF sur tuyau SDR17 de 450 mm (18 pouces) avec soudure correcte (fig.10) et avec présence de fusion froide (fig.11), où le temps de soudage a été réduit à 50% de la valeur recommandée par le fabricant. La ligne détectée au-dessus des échos de fils chauffants indique la limite de la zone de fusion dans la bague de raccord EF [9]. La distance entre la limite de la zone de fusion et les indications du fil chauffant peut donc être utilisée pour détecter des fusions froides [9,11, 12].

La figure 12 représente un balayage sectoriel sur un joint BF sur tuyau SDR11 PE100 de 355 mm (14 pouces) contenant un défaut plan de 4 mm (0,16 pouce) situé à l'interface soudée.

Des procédures ont été développées qui permettent de détecter les défauts suivants, dans les deux types de joints BF et EF:

Figure 12 shows a sector pulse-echo image from a 355 mm (14 inch) SDR11 PE100 BF joint containing a 4 mm (0.16 inch) planar flaw at the fusion interface.

- Défauts plans/absence de fusion (diamètre supérieur à 1 mm (39 mils));
- Particules fines (inférieure à 22  $\mu\text{m}$  (0,9 mils));
- Particules grossières (150-300  $\mu\text{m}$  (6-12 mils));
- fusion froide;
- inclusions (diamètre supérieur à 1 mm (40 mils));
- sous-pénétration dans les bagues de raccord EF.

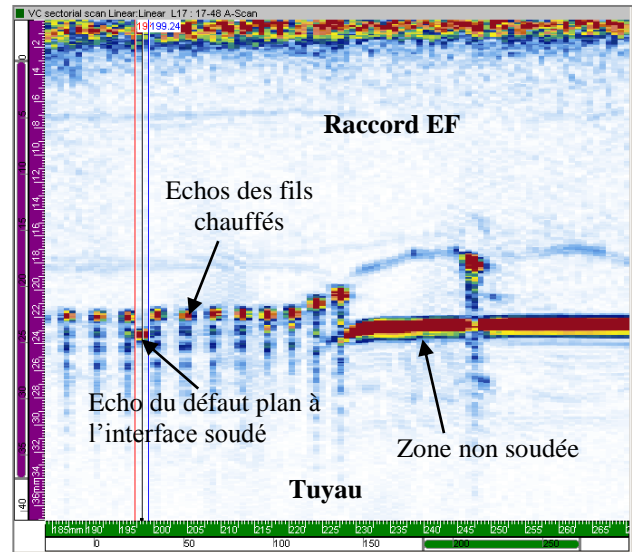


Figure 8. Image ultrasonore d'un joint EF sur tuyau SDR11 de 225 mm de diamètre, contenant un défaut plan de 2 mm à l'interface soudé.

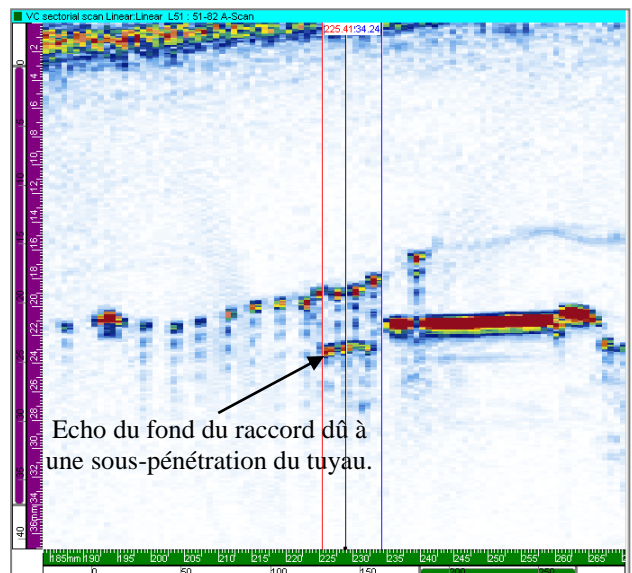


Figure 9. Image ultrasonore d'un joint EF sur tuyau SDR11 de 225 mm de diamètre, où le tuyau n'a pas été complètement inséré dans le raccord.

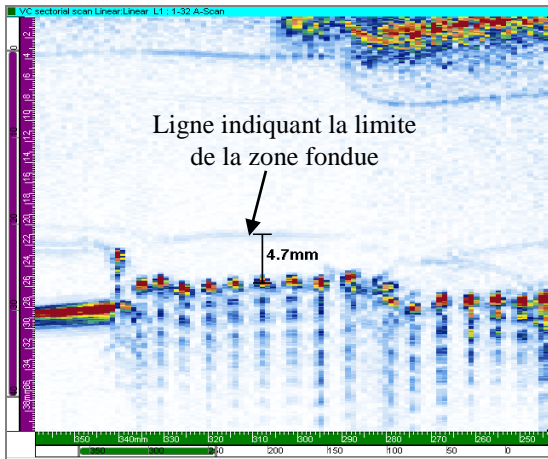


Figure 10. Image ultrasonore d'un joint EF de référence sur un tuyau de 450 mm.

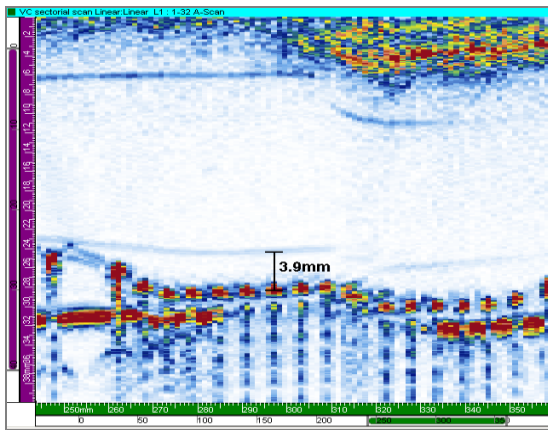


Figure 11. Image ultrasonore d'un joint EF sur un tuyau de 450 mm, où le temps de chauffage a été réduit de 50% pour provoquer une fusion froide.

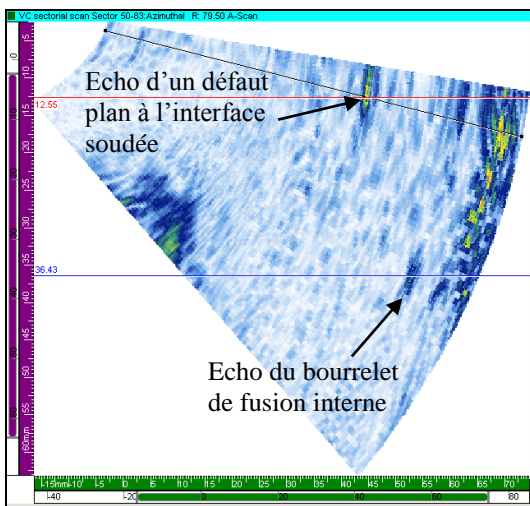


Figure 12. Ultrasonic image of a 355 mm SDR11 BF joint containing a 4 mm planar flaw at the fusion interface.

## Evaluation du système d'inspection prototype

E.ON Ruhrgas, en Allemagne, a fabriqué neuf joints EF dans des tubes mono-composites multicouches SDR11HexelOne® PE100 de 110 mm (4,3 pouces) de diamètre, dont certains contenaient des défauts et d'autres non. Ces joints ont été inspectés en aveugle au laboratoire et tous ont été évalués correctement. Par exemple, la figure 13 montre une image ultrasonore d'un joint où l'inspection a suggéré qu'il contenait une contamination particulière; E.ON Ruhrgas a confirmé que du sable avait été inséré à l'interface. On peut également voir sur cette image qu'il y avait des indications à l'intérieur de la paroi du tuyau, suggérant que la liaison entre les couches dans le tuyau en PE n'était pas parfaite.

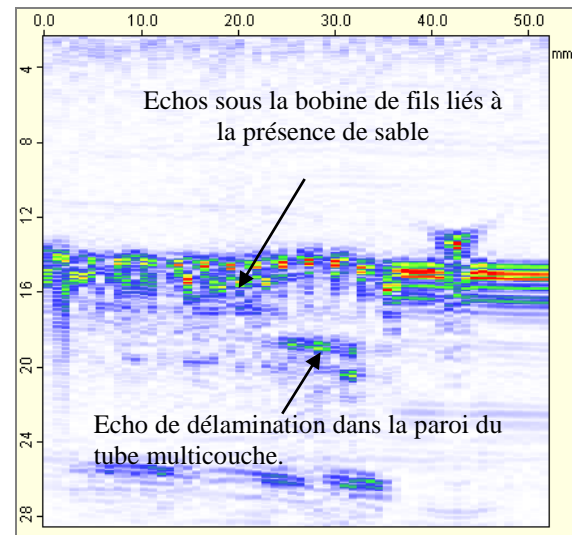


Figure 13. Image ultrasonore d'un joint EF, produit par E.ON Ruhrgas, contenant une contamination par le sable.

Des inspections ont été réalisées dans le nord du Pays de Galles, au Royaume-Uni, sur des joints EF réalisés sur une canalisation PE100 de 710 mm (28 pouces), installée pour une centrale hydroélectrique (Figure 14).



Figure 14. Inspection sur le terrain au nord du Pays de Galles.

Des inspections ont également été réalisées sur des joints BF dans un tuyau de gaz SDR21 PE80 de 355 mm (14 pouces) et sur des joints EF dans un tuyau de gaz SDR11 PE80 de 250 mm (10 pouces) dans une tranchée à Sheffield, au Royaume-Uni. Dans les deux cas, aucun défaut n'a été détecté et le système prototype a parfaitement fonctionné.

## Conclusions

Des techniques et procédures d'inspection par ultrasons multiéléments ont été développées pour détecter tous les principaux types de défauts pouvant survenir dans les joints BF et EF dans les tuyaux en PE (manque de fusion, contamination particulaire, fusion froide, sous-pénétration dans les raccords, inclusions et désalignement axial). Un système prototype a été conçu et fabriqué spécifiquement pour inspecter les joints soudés dans les tubes PE de diamètres compris entre 110 et 1000 mm (4 et 39 pouces) et les épaisseurs de paroi entre 10 et 60 mm (0,4 et 2,4 pouces). Ce système a été évalué à la fois en laboratoire et sur le terrain et d'excellents résultats ont été obtenus sur des joints contenant à la fois des défauts réels et artificiels.

## 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 fournie que les informations sont adaptées à un usage particulier. L'utilisateur de celui-ci utilise les informations à ses seuls risques et responsabilités.

## Références

1. C.I. Brown and M.J. Troughton, *Plastics Pipes XII Conference* (2004).
2. M.J. Troughton, C.I. Brown, J Hessel and M Piovano, *Plastics Pipes XIII Conference* (2006).
3. I.J. Munns and G.A. Georgiou, *Insight*, **41(5)**, 291 (1999).
4. M.J. Troughton, *Plastics Pipes XI Conference* (2001).
5. B Messer, M. Yarmuch and P. den Boer, *Pipeline and Gas Journal*, March (2003).
6. S.L. Crawford, S.R. Doctor and A.D. Cinson, *ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference*, PVP2009-77958 (2009).
7. C. Frederick, A. Porter and D. Zimmerman, *ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference*, PVP2009-77783 (2009).
8. H.J. Shin, Y.H. Jang, J.R. Kwon and E.J. Lee, *Plastics Pipes XIII Conference* (2006).
9. C. Bird, D. Caravaca and A. Raude, *Plastics Pipes XIII Conference* (2006).
10. D.S. Caravaca, C. Bird and D. Kleiner, *Insight*, **49(2)**, 83 (2007).
11. M. Troughton, M Spicer and F Hagglund, *ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference*, PVP2012-78860 (2012).
12. J Shi, J Zheng, W Guo and C Xu, *ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference*, PVP2012-78655 (2012).