

Inspection ultrasonore de fissure axiale dans les tuyaux de grande épaisseur

Frédéric Dupont-Marillia,
 Department of mechanical engineering
 École de technologie supérieure
 1100, rue Notre-Dame Ouest
 Montreal, Quebec
 Canada
 Nucleom
 8695, rue Pascal-Gagnon
 Saint-Léonard, QC H1P 1Y5
 E-mail : frederic.dupont@pulets.ca

Mohammad Jahazi, Pierre Belanger
 Department of mechanical engineering
 École de technologie supérieure
 1100, rue Notre-Dame Ouest
 Montreal, Quebec
 Canada
 E-mail : mohammad.jahazi@etsmtl.ca
 pierre.belanger@pulets.ca

Résumé

Dans le domaine industriel, le contrôle non destructif par ultrasons suit des normes strictes et permet de garantir l'intégrité de pièces de divers matériaux. Dans le cas de tuyaux, l'inspection est constituée de plusieurs étapes permettant de mesurer l'épaisseur, et de détecter les fissures orientées axialement ou suivant l'axe circonférentiel. Le cas de la détection des fissures axiales est une étape difficile à mettre en place pour certaines dimensions en raison de la géométrie de la pièce. Pour cette raison, il est généralement spécifié dans les normes que le diamètre extérieur ne doit pas excéder deux fois le diamètre intérieur. Dans cette étude, la propagation des différents modes est simulée afin de déterminer les combinaisons et les configurations possibles pour ce type d'inspection. Dans ce travail, il est démontré que l'utilisation de plusieurs angles de sabot est une option fiable. Finalement, les simulations ont été comparées aux expérimentations afin de confirmer cette méthodologie.

Abstract

Ultrasonic non-destructive inspection is generally used in the industry to warrant the component integrity by following strict standards. Pipe inspection is usually done in several steps: thickness measurements, and crack detection, axial and circumferential orientations. The detection of axial cracks may become challenging due to pipe geometry. Indeed, it is generally specified in the standards that the outer diameter should not exceed twice the inner diameter. In this study, the propagation of different modes is simulated to determine the different possible combinations and configurations for this type of inspection. It is shown that the combination of several wedge angles was a reliable option. Finally, simulations were compared with experiments in order to confirm the method.

Les aciers forgés de hautes performances sont couramment utilisés dans l'industrie pour de nombreuses applications critiques. Leur qualité est une préoccupation majeure, car elle permet de garantir les performances de résistance et la fiabilité de la pièce finale. Durant le processus de forgeage, et des traitements thermomécaniques associés, des défauts tels que des fissures et hétérogénéités peuvent être introduits[1], [2]. Par conséquent, des essais non destructifs (CND) sont généralement réalisés au moyen de différentes techniques, dont les ultrasons. Dans le cas d'une inspection ultrasonore, la modification de l'impédance acoustique introduite par un défaut lié à une modification du matériau conduit à la génération d'un écho ultrasonore. Si la vitesse de propagation de l'onde est connue, le temps de vol (ToF) peut être utilisé pour calculer la distance entre la sonde et le défaut[3].

La taille du défaut peut alors être estimée en utilisant une correction de l'amplitude renvoyée par le réflecteur en fonction de la distance appelée DAC[4]. Celle-ci est préalablement établie lors de l'étape d'étalonnage au moyen d'un bloc de calibration généralement certifié. Dans le cas d'une inspection de blocs de grandes dimensions, l'inspection est effectuée en utilisant l'incidence normale dans le but de réduire la distance parcourue, et par conséquent limiter l'atténuation. Par conséquent, les ondes de compressions, aussi appelées longitudinales, sont utilisées. Cependant, deux limitations doivent être prises en compte : (1) lorsque la fissure est trop proche du fond de la pièce, les échos du fond et du réflecteur peuvent se chevaucher et rendre ainsi la détection du défaut difficile, et (2) dans le cas d'une fissure orientée suivant l'axe d'inspection, l'écho généré est de très faible amplitude.

En effet, la surface de réflexion représentée par un coin de la fissure est presque nulle. Pour éviter ces problèmes, les sabots à angles sont généralement utilisés. Comme l'axe de propagation devient incliné, les précédentes limitations ne sont plus applicables, car la fissure est détectée par conversion de mode. Ce principe est illustré sur la figure 1.

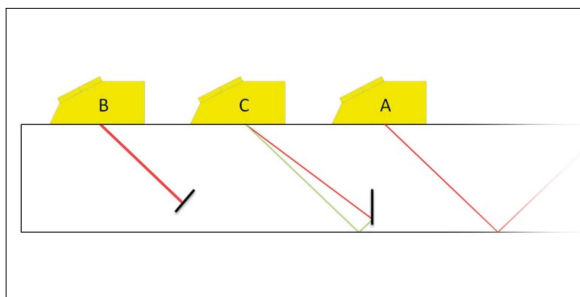


Fig. 1: Contrôle non destructif par ultrasons avec un sabot incliné : A) aucun défaut (aucun écho renvoyé vers le transducteur); B) détection directe, et C) détection utilisant une réflexion de la paroi arrière
Ultrasonic inspection with angled wedges: A) no defect, and thus no echo reflected back to the transducer; B) direct detection, and C) detection using a back wall reflection

La figure 1A montre comment la réflexion de la paroi arrière est réfléchiée par la sonde lors de l'utilisation d'un sabot à angle. La détection des fissures en angle peut être effectuée en mode direct (figure 1B) ou en utilisant la conversion de mode (figure 1C). Avec cette dernière approche, les inspections peuvent être effectuées en combinant des ondes longitudinales et des ondes de cisaillement. Il est aussi possible d'utiliser le sabot à angle pour limiter le nombre de modes qui se propagent avant l'interaction avec les défauts. En effet, lorsque l'angle du sabot dépasse l'angle limite de réfraction pour le mode de cisaillement, seul le mode longitudinal peut se propager.

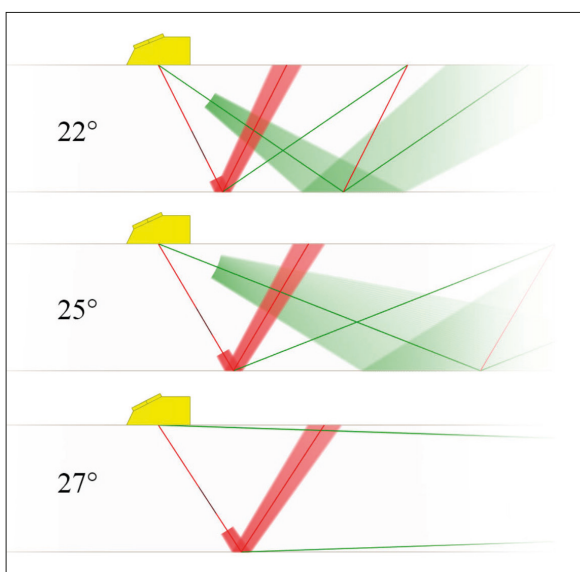


Fig. 2: Effet de l'angle du sabot incliné sur les modes de propagation. La ligne verte correspond au mode de cisaillement et la ligne rouge correspond au mode longitudinal
Effect of the wedge angle on propagating modes. The green line corresponds to the longitudinal mode and the red line corresponds to the shear mode

Sur la figure 2, pour un angle supérieur à l'angle d'incidence critique du mode longitudinal et inférieur à celui de l'angle de cisaillement, les ondes de cisaillement sont réfléchies à la surface et seules les ondes longitudinales sont réfractées dans le milieu. Ce cas est représenté sur la figure 2 avec un sabot incliné de 27°.

Dans le cas d'une inspection de tuyaux, la même méthodologie est applicable pour détecter les fissures contenues dans le plan circonférentiel. En effet, du point de vue de l'inspection, la géométrie de la coupe d'un tuyau est similaire à celle d'un bloc rectangulaire, car elle présente deux surfaces planes et parallèles (figure 3A). En revanche, pour détecter les fissures contenues dans le plan axial la sonde doit être positionnée perpendiculairement à l'axe principal du tuyau, induisant une réflexion sur une surface courbée (figure 3B).

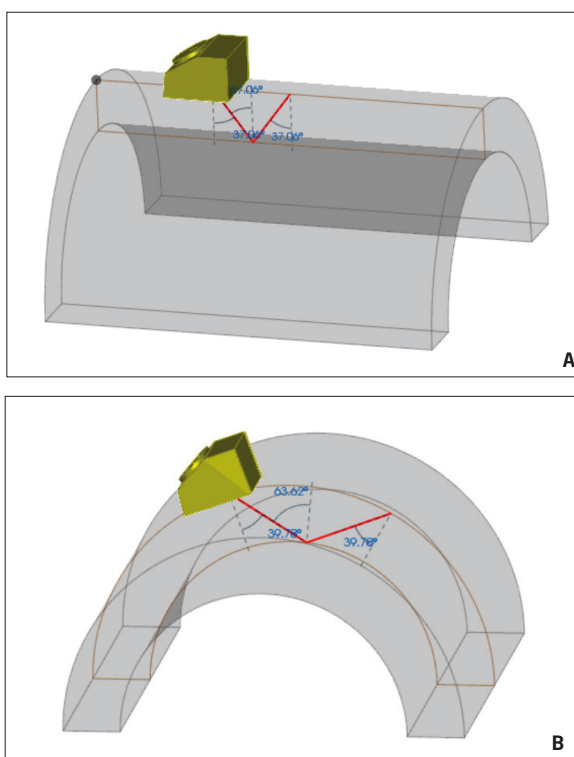


Fig. 3: Recherche de fissure circonférentielle (A) et axiale (B) dans des tuyaux
Inspection configuration for circumferential (A) and axial (B) crack detection

Ce type d'inspection est encadré par les normes ASTM E317/A388/E428, ASME Section V (applicable par SNT-TC-1A). D'après ces normes, il est recommandé d'utiliser des blocs étalons pour effectuer une courbe d'amplitude en fonction de la distance à partir de deux réflecteurs positionnés sur la surface interne et externe du tuyau. Ces réflecteurs sont utilisés pour tracer une référence à l'aide des indications en appliquant un gain et une compensation pour que les deux échos soient à 75% de la hauteur totale de l'écran.

Cette méthode d'inspection est limitée par un critère sur le diamètre externe du tuyau qui ne doit pas être supérieur à deux fois le diamètre interne [5]. Ce travail a pour objectif d'étudier cette limitation géométrique et de fournir toutes les données nécessaires à la mise au point des inspections de ce type de pièces.

Dans cette optique, les principaux modes ainsi que plusieurs ratios de diamètre externe/interne sont étudiés afin de déterminer les modes les plus adaptés en fonction des diamètres et de la localisation des défauts dans le tuyau. Dans un premier temps, des simulations seront effectuées puis confirmées pour plusieurs configurations par des mesures expérimentales et enfin une conclusion sera donnée.

Matériel et Méthode

Méthode

La courbure du tuyau peut nécessiter un sabot courbé afin d'adapter la surface de contact. La sonde génère des ondes longitudinales, mais la réflexion peut être utilisée pour introduire des ondes de cisaillement à l'interface entre le sabot et le matériau. En outre, dans le tuyau inspecté par ultrasons, la courbure de la surface externe modifie l'angle maximum réfracté. De la même manière, la courbure de la surface interne modifie la trajectoire de l'onde et de l'angle réfléchi (Figure 4).

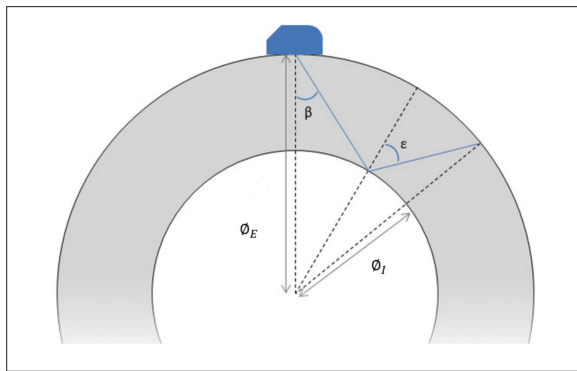


Figure 4: Schéma des angles induits pour la propagation des ondes ultrasonores lors de la recherche de fissure axiale dans un tuyau
Angles of the ultrasonic wave propagating for axial crack detection axial in a pipe

L'angle de réfraction maximal (β_{max}) peut être déterminé à l'aide de la géométrie et du temps de propagation (t)[6] :

$$\beta_{max} = \sin^{-1} \left(1 - \frac{t}{2(\phi_E)} \right)$$

De plus, l'angle réfléchi (ϵ) sur le diamètre interne est exprimé à l'aide de l'angle de réfraction (β), du temps de propagation (t) et du diamètre externe[7]:

$$\sin \epsilon = \left[\frac{1}{1 - \frac{2t}{\phi_E}} \right] \sin \beta$$

Ces interactions ont été calculées en utilisant CIVA, un logiciel spécialisé dans les simulations de contrôle non destructif et de calcul de champ ultrasonore[8]–[10]. Les vitesses de propagations des ondes longitudinales et transversales (cisaillement) ont été fixées d'après la littérature[11], à respectivement 5 900 m/s et 3 200 m/s ainsi que 0,11 dB/mm pour l'atténuation à une fréquence de 2 MHz.

Un balayage manuel est effectué à partir de la surface extérieure du tuyau suivant l'axe circonférentiel de 0° à 180° (figure 3B). Pour les simulations CIVA, les modes sont analysés afin de différencier les différentes contributions. Par souci de simplicité, les abréviations suivantes sont utilisées pour l'identification des ondes dans la suite de cet article :

- L = Onde longitudinale
- T = Onde de cisaillement
- X = Onde longitudinale ou transversale (combinaison)
- rb = Réflexion sur la surface externe
- rs = Réflexion sur la surface interne
- d = Réflexion sur le défaut

Par exemple, un écho avec l'étiquette LrsLrbLdT aurait le chemin suivant: onde longitudinale, réflexion sur la surface interne sans conversion, puis réflexion sur la surface externe sans conversion, et enfin, une réflexion sur le défaut avec une conversion en onde de cisaillement.

Matériel

Simulation

Plusieurs configurations ont été simulées pour une fréquence centrale d'émission de 2,25 MHz (généralement utilisé pour ce type d'inspection) et des angles d'incidence variant entre 5° et 30° . Dans les géométries étudiées, le diamètre interne est fixé à 88,9 mm alors que le diamètre externe est défini comme un rapport entre les deux diamètres. Dans les cas étudiés, les ratios varient de 1,25 à 3,33 (voir tableau 1).

Bloc ID	1	2	3	4	5	6
Ratio diamètre externe / interne	3,33	2,50	2,00	1,66	1,43	1,25

Tabl. 1: Rapport diamètre interne en fonction du diamètre externe pour les blocs étudiés dans les simulations
Internal diameter versus external diameter ratio for the blocks studied in the simulations

Les angles de sabot supérieurs à 30° ne sont pas considérés, car les simulations préliminaires ont démontré que le défaut de la surface interne ne pouvait plus être détecté après cet angle.

Expérimentation

La sonde utilisée pour les mesures et la modélisation est un transducteur mono élément avec une fréquence centrale de 2,25 MHz (Olympus A403S-SB) et une dimension nominale de 12,7 x 25,4 mm. Celle-ci est associée à un sabot à angle variable (Olympus ABWX-2001). En raison des dimensions des tuyaux, l'utilisation d'un sabot conventionnel non courbé est possible, car la courbure est négligeable comparé à la surface du sabot.

Huit blocs de calibrations ont été usinés en forme de demi-tuyaux, avec une largeur de 203,2 mm. Le diamètre interne est fixé à 88,9 mm et le diamètre externe varie entre 231,78 mm et 479,42 mm. Les dimensions sont données dans le tableau 2.

	Diamètre interne	Diamètre externe
Bloc	mm	
45072-3T1	88,9	231,78
45072-2T1		282,57
45092-3B1		479,42

Tabl. 2: Dimensions des échantillons
Samples dimensions

Des encoches ont été usinées face à face sur les surfaces extérieure et intérieure du demi-tuyau à trois positions (figure 5).

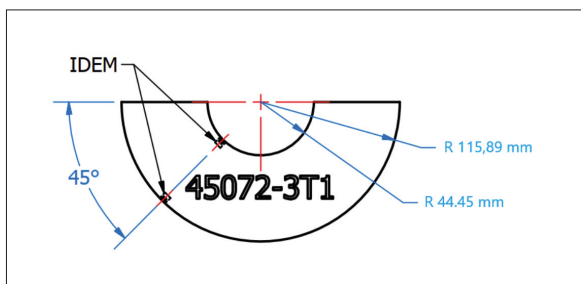
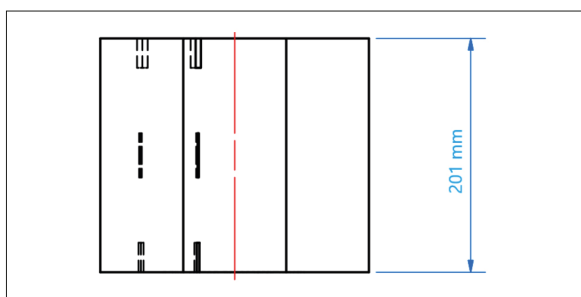
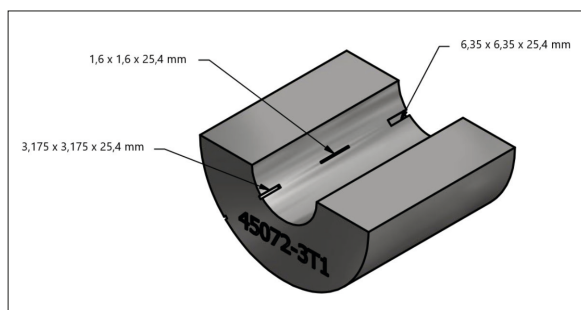


Fig. 5: Schéma du bloc 45072-3T 1
Sketch for sample 4572-3T1

Les encoches utilisées pour cette étude ont des dimensions variables, mais la largeur est fixée à 25,4 mm. Pour déterminer si un écho est lié à une encoche, la sonde est déplacée suivant l'axe principal du tuyau. Lorsque l'écho persiste, la réflexion est associée à la géométrie du bloc alors que dans le cas contraire, elle est liée à une entaille.

Expérimentation

Étude des différents modes

Les premières investigations ont permis de démontrer que seules deux réflexions devaient être calculées, car au-delà de ce nombre, l'onde était trop atténuée. Pour cette raison, les modes calculés sont les suivants : 1) Détection directe en utilisant les modes L ou T; 2) Détection avec une réflexion sur le diamètre interne de la pièce (LrbL et TrbT) et possiblement une conversion (LrbT et TrbL) et 3) Une combinaison de mode permettant un maximum de deux réflexions sur les diamètres externe et interne (XrdXdX avec X = L ou T). Ces combinaisons de modes et de chemins de propagations sont présentées schématiquement sur la figure 6.

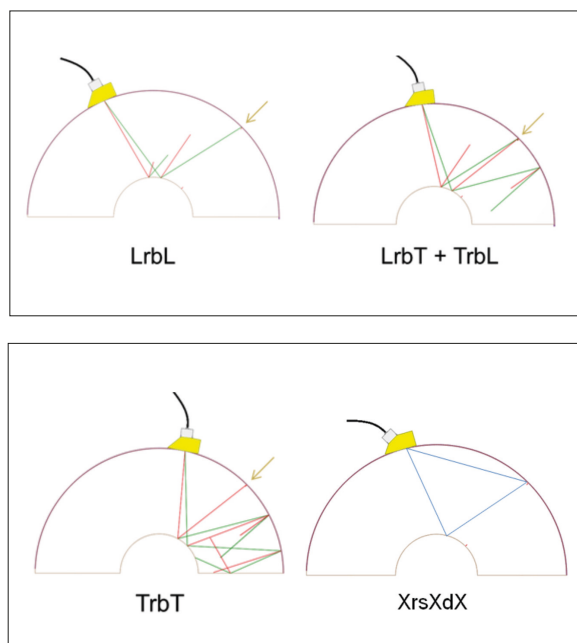


Fig. 6: Possibilité de combinaison chemins et de modes pour la détection de défauts
Path possibilities for external and internal surface defect detection

Les six géométries modélisées et les quatre angles d'incidence ont été utilisés pour générer 24 simulations, dans lesquelles l'amplitude maximale a été extraite pour chaque mode et chemin répertorié précédemment. Afin de comparer les amplitudes simulées entre elles, une amplitude de référence a été définie. Les différentes amplitudes sont reportées dans le tableau 3, page suivante. Les amplitudes inférieures -40 dB ne sont pas prises en compte car elles sont sous le niveau de bruit acceptable pour les mesures expérimentales.

Ce tableau fournit un résumé complet des résultats pour les 6 blocs. La comparaison des différents résultats conduit aux observations suivantes:

- Lorsque le diamètre externe diminue, les amplitudes des échos des défauts sur les surfaces externe et interne augmentent. Cela traduit le fait que les défauts se retrouvent illuminés par les champs ultrasonores L et/ou T, dépendamment de l'angle du transducteur.
- Lorsque l'angle du sabot augmente, l'amplitude de l'écho

associé à l'encoche interne diminue pour le mode L et augmente pour le mode T.

- Une faible inclinaison du sabot (inférieure à 5 degrés) permet une bonne détection l'encoche interne pour les modes L, T, LdLrLrLbL, LrLrLdLdL et LrLdLrLbL. Cette configuration est bien adaptée à l'inspection de la surface interne seule.
- Pour un angle de sabot de 20°, l'encoche de la surface externe peut être détectée 1) après réflexion sur la surface interne avec une conversion de mode (LrbT / TrbL pour les blocs 4, 5 et 6) et 2) sans conversion en utilisant le mode (TrbT pour les blocs 2, 3, 4, 5 et 6).
- Pour un angle de sabot de 30°, le mode de L ne peut pas être utilisé. En revanche le mode T permet une bonne détection de l'encoche interne et l'encoche externe en utilisant une réflexion sur le diamètre extérieur. Pour les blocs 4, 5 et 6, les amplitudes entre les encoches internes et externes sont respectivement -40 dB, -31 dB et -30 dB.

D'après ces résultats, il est possible d'inspecter les tuyaux dont le diamètre externe est supérieur à deux fois le diamètre interne. La méthode la plus simple consiste à effectuer deux inspections séparées en discrétisant la pièce en deux zones suivant la hauteur. Pour cela un angle de 5° ou 10° sera préféré. Dans le cas où l'inspection doit être effectuée en un seul scan, il est possible de recourir à un sabot de 30° et d'utiliser une réflexion. Cette méthode a, en revanche, des limitations liées à l'atténuation, car l'amplitude de l'écho de l'encoche sur la surface externe est très faible.

Confirmation expérimentale

Comme mentionné précédemment, il est préférable d'utiliser des angles de sabot de 5° et 10°. Les mesures ont donc été effectuées en suivant ces recommandations pour les trois blocs présentés dans la section matériel de cet article.

Bloc	Angle	Défaut interne		Défaut externe			Défaut interne
		L	T	LrbT / TrbL	LrbL	TrbT	XdXrsXrbX
id	°	dB	dB	dB	dB	dB	dB
1	5	-42.7	-38.9	NA	NA	NA	-56
2	5	-38.6	-42	NA	NA	NA	-52.5
3	5	-35.7	NA	NA	NA	NA	-53
4	5	-31	NA	NA	NA	NA	-49
5	5	-28	-47	NA	NA	NA	-47
6	5	-21	-43	NA	NA	NA	-40
1	10	-47	-41	NA	NA	NA	-56
2	10	-42	-37	-78	NA	NA	-54
3	10	-39	-34	-65	NA	NA	-52.3
4	10	-35.4	-34	-59	NA	NA	-49.5
5	10	-33.7	-34	-60	-69	NA	-47.5
6	10	-28	-34	-66	-56	NA	-40
1	20	-51.3	-44.2	NA	NA	NA	NA
2	20	-50	-40	NA	-55	-60	NA
3	20	-48	-34.6	NA	-43	-58.6	NA
4	20	-46	-28.6	-50	NA	-58	NA
5	20	-40.4	-24.7	-43	NA	-59	NA
6	20	-37.2	-21.9	-52.5	NA	-58.7	NA
1	30	NA	NA	NA	NA	NA	NA
2	30	NA	NA	NA	NA	NA	NA
3	30	NA	-44	NA	NA	NA	NA
4	30	NA	-25	NA	NA	-65	NA
5	30	NA	-9	NA	NA	-40	NA
6	30	NA	0	NA	NA	-30	NA

Tabl. 3: Amplitude du défaut en fonction du chemin ultrasonore et de l'angle du sabot
Amplitude as a function of modes, defect, geometry, and wedge angle

Pour chaque écho en lien avec les encoches, la position est reportée. Les résultats comparés aux mesures CIVA sont présentés dans le tableau 4.

Blocs	Experimentation			Simulation		
	1	2	3	1	2	3
45072-3T1	86 mm	158 mm	178 mm	87 mm	160 mm	177 mm
45072-2T1	184 mm	238 mm		190 mm	236 mm	
45092-3B1	118 mm	218 mm		120 mm		218 mm

Table 4: Comparaison des positions des échos détectés entre l'expérimentation et les simulations
Comparison of echo positions from experiments and simulations

La différence maximale entre les simulations et les expérimentations est inférieure à 6 mm. Afin d'identifier le chemin ultrasonore utilisé, une analyse modale est effectuée à partir de CIVA. Étant donné que les positions des échos sont très similaires entre les mesures et les simulations, il est possible d'extrapoler ces résultats aux mesures expérimentales. Les identifications des modes sont présentées dans le tableau 5.

Bloc	ECHO		
	1	2	3
	modes		
45072-3T1	LdL (54.4%) LrbTdL (22.4%) LdTrbL (13.6%)	LrbLrsLdL (35.1%) LdLrsLrbL (30.8%) LrbTdLrsLrbL (12.9%)	LrbLrsTdTrbL (15.8%) TrbTdLrsLrbL (15.3%) LrbLrsLdTrbT (12%)
45072-2T1	TrbTdL (21.4%) TdTrbL (15.5%) LdTrbT (13.8%)	TdLrbT (23.3%) TrbLdLrbT (22.6%) TdTrbT (15.3%)	
45092-3B1	LdL (57.1%) LrbTdL (18.4%) LdTrbL (11.3%)	LrbLrsLdL (38.1%) LdLrsLrbL (36.1%) LrbTdLrsLrbL (19.5%)	

Table 5: Analyse modale effectuée à l'aide de CIVA sur les échos détectés expérimentalement
Modal analysis with CIVA software to explain propagation in blocks

Dans le cas de l'écho numéro 3, il est observé que la double conversion peut être utilisée pour l'inspection des pièces dont le diamètre externe se rapproche de deux fois le diamètre interne. Ce résultat confirme les critères présents dans les normes d'inspection. En revanche pour les échos numéro 1 et 2, il apparaît que l'inspection reste possible en utilisant plusieurs configurations d'inspections avec différents angles de sabots.

Conclusion

Cette étude permet de confirmer la limitation généralement appliquée dans les normes actuelles pour la détection de fissure axiale dans les tuyaux. En effet, il apparaît que, si le diamètre externe du tuyau excède deux fois celui du diamètre interne, l'amplitude de l'écho d'un potentiel défaut détecté par conversion sur le diamètre interne serait trop faible pour être mesuré.

En revanche, il a été démontré que d'autres combinaisons de configurations pouvaient être utilisées pour inspecter l'entière de la pièce et ainsi garantir sa qualité. Pour cela, différents angles et modes de propagations ont été étudiés. En raison des dimensions de la pièce, il apparaît que l'utilisation des modes directs est une bonne alternative. Il faut en revanche effectuer deux scans avec des angles différents et donc deux calibrations distinctes.

Références bibliographiques

- [1] M. Arentoft and T. Wanheim, "The basis for a design support system to prevent defects in forging," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 69, no. 1-3, pp. 227-232, Sep. 1997
- [2] G. Banaszek and A. Stefanik, "Theoretical and laboratory modelling of the closure of metallurgical defects during forming of a forging," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 177, no. 1-3, pp. 238-242, Jul. 2006
- [3] R. Demirli and J. Saniie, "Model-based estimation of ultrasonic echoes. Part II: Nondestructive evaluation applications," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 48, no. 3, pp. 803-811, May 2001
- [4] R. A. Roberts, "Understanding the dip-in-DAC," 2001, vol. 557, pp. 876-882
- [5] J. Krautkrämer and H. Krautkrämer, *Ultrasonic Testing of Materials*. Springer Science & Business Media, 2013
- [6] E. Lloyd, "An ultrasonic short-pulse shear-wave method for measuring the depth of surface-breaking cracks," *Br. J. Non-Destructive Test.*, vol. 17, no. 6, pp. 172-175, 1975
- [7] R. Long, J. Russell, and P. Cawley, "Ultrasonic phased array inspection using full matrix capture," *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, vol. 54, no. 7, pp. 380-385, Jul. 2012
- [8] P. Calmon, S. Mahaut, S. Chatillon, and R. Raillon, "CIVA: An expertise platform for simulation and processing NDT data," *Ultrasonics*, vol. 44, pp. e975-e979, Dec. 2006
- [9] O. Diligent, "Results of the 2004 UT Modeling Benchmark Obtained with the CIVA Software Developed at the CEA," 2005, vol. 760, pp. 1843-1850
- [10] C. Poidevin, L. Roumilly, G. Cattiaux, T. Sollier, and F. aux Roses, "Simulation de la réponse ultrasonore de défauts réalistes dans CIVA," *Actes du congrès COFREND*, Toulouse, 2008
- [11] J. D. N. Cheeke, *Fundamentals and applications of ultrasonic waves*. CRC press, 2012