

# CONTRIBUTION DE LA TECHNIQUE DES ONDES GUIDÉES ULTRASONORES (GWUT) À LA SURVEILLANCE DE LA CORROSION DES TUYAUTERIES D'USINES

## CONTRIBUTION OF ULTRASONICS GUIDED WAVES (GWUT) FOR THE CORROSION ASSESSMENT OF PIPEWORK

C. Laenen – CETE Apave Nord-Ouest - France  
T. Vogt – Guided Ultrasonics Limited - UK

### Résumé

La corrosion des tuyauteries et des canalisations de transport est un problème majeur pour les secteurs de la pétrochimie, de l'énergie et d'autres industries. Des exigences réglementaires récentes imposent le suivi périodique des tuyauteries pour atteindre les objectifs de sécurité. Fréquemment, les tubes sont calorifugés ne permettant de détecter la corrosion externe sans enlèvement du calorifuge, occasionnant ainsi des coûts élevés. Des situations particulièrement difficiles sont rencontrées pour l'inspection des parties non accessibles, comme les traversées de route en partie enterrées et pour les tuyauteries placées en fourreau ou caniveau où le contrôle ne peut être effectué sans excavation. Le contrôle au moyen des ondes ultrasonores guidées est une solution attractive pour contribuer à l'inspection des tubes à partir d'un seul point accessible de la tuyauterie. Les ondes ultrasonores en se propageant sur une longue distance permettent par scrutation volumétrique la détection de la corrosion dans toute la section. Cette technique est dorénavant applicable sur chantier, cet article présente la technologie et des cas représentatifs d'applications avec le système Wavemaker™ G3.

### Abstract

*Corrosion in process pipes and pipelines is a major problem in the petrochemical, utilities plants and other industries. New regulations request the inspection assessment of piping in order to gain safety. Frequently pipes are insulated which means that even external corrosion cannot be seen without removing the insulation, which can be prohibitively expensive. Particularly severe problems are encountered at road crossings or sleeved pipes entrance where the pipe cannot be inspected without major excavation. The Guided Waves Ultrasonic Technique provides an attractive solution to this problem because they can be excited at one location on the pipe and will propagate many metres along the pipe allowing screening corrosion detection. The technique is now applied on site, this paper discusses the basis of the technique and operational experience with the system Wavemaker™ G3.*

## 1 - INTRODUCTION

Les techniques conventionnelles de mesures de l'épaisseur de paroi donnent des valeurs précises au point où est réalisé la mesure, c'est-à-dire directement sous le palpeur d'ondes longitudinales. Bien que la mesure soit fiable et quantitative, elle ne donne l'information limitée à un endroit précis sans connaître l'état des zones avoisinantes.

Les mesures sont réalisées par expérience sur les points singuliers de la configuration de la ligne comme sur les coudes où peut se développer la corrosion mais ceci n'est pas toujours le cas. Les mesures ponctuelles ne peuvent donner une vue représentative de l'ensemble des composants tubulaires d'une tuyauterie.

La corrosion généralisée avec amincissement uniformément distribué est parfois constatée, mais la corrosion localisée comme l'érosion par turbulences et sous les dépôts peut se former à n'importe quel endroit de la tuyauterie. Ces dommages sont très difficiles à détecter par des mesures ponctuelles en utilisant les procédures classiques, par exemple il est courant de faire des mesures sur 4 points autour de la circonférence.

Dans le cas de stagnation de liquide ou d'un fluide à deux phases, la corrosion peut se développer sous la forme d'un sillon qui sera éventuellement éloigné de la zone quadrillée par la mesure. Dans les raccords de type coude, la mesure ne couvre pas la totalité de la surface du composant.

Un autre type d'endommagement des tuyauteries est la corrosion sous calorifuge pouvant se manifester sur n'importe quelles zones de la surface externe. L'analyse des risques doit prendre en compte également les parties non facilement inspectables des tuyauteries pour limiter les incidents des installations en service.

L'examen non destructif par la technique des ondes ultrasonores guidées permet de contribuer au challenge de l'inspection des tuyauteries calorifugées sans dépose majeure du calorifuge et pour les parties difficiles d'accès. La technique est actuellement particulièrement appréciée pour les tuyauteries en partie enterrées comme des traversées de routes et la surveillance des pipelines à partir de fouilles espacées.

Le système fonctionne en émettant des ondes de basses fréquences (en général de 15 – 70 kHz) se propageant sur la longueur de la tuyauterie. Les variations de la section du tube conduisent à une réflexion des ondes ultrasonores, ces réflexions sont analysées pour déterminer la position des anomalies et estimer les dimensions des événements ayant causé ces variations.

Les positions des zones de corrosion et des composants comme les soudures et les coudes sont déterminées avec précision à partir du point unique de mesure où est installé l'élément capteur.

La technique doit être considérée comme un outil de détection par scrutation des zones de corrosion localisée pouvant exister sur une tuyauterie ou canalisation. Une grande longueur des tubes et accessoires est inspectée rapidement dans son volume de métal et sur toute l'épaisseur de paroi pour identifier et positionner les problèmes potentiels.

La technique ne permet pas directement de mesurer l'épaisseur résiduelle mais de relever des amincissements par estimation de la variation de section que la corrosion soit interne ou externe ou combinée.

Lorsque les zones où des problèmes sont identifiées, une inspection complémentaire par les techniques conventionnelles est ensuite réalisée pour quantifier avec précision les dimensions des anomalies. La technique est idéale pour inspecter des grandes longueurs de tuyauteries (> 10 mètres).

La technologie des ondes ultrasonores guidées applicable à l'examen des tubes de section cylindrique résulte des travaux de recherche et développement [1-2] conduit en partie par l'université britannique « Imperial College London » dans les années 1990. Des instruments et capteurs spécifiques sont dorénavant commercialisés pour la pratique industrielle de la technique.

## **2 - BASE DE LA THEORIE**

A la différence des ondes de compression et de cisaillement largement utilisées en contrôle par ultrasons conventionnels, il existe de nombreux modes de propagation des ondes guidées et ils sont en général dispersifs ou la célérité change en fonction de la fréquence.

Des ondes se propageant sur de longues distances existent depuis longtemps et sont appelées les ondes de Lamb. Guidées par des pièces en forme de plaques ou de cylindres comme des tubes, elles se propagent parallèlement depuis la surface du métal. Ce terme s'est généralisé aux ondes guidées se propageant dans des directions principales.

Plusieurs publications présentent l'utilisation des ondes guidées dans les contrôles non destructifs.

La sensibilité d'un essai est fonction du niveau du signal et de celui du bruit de fond formé par les modes de conversion. Le mode préférentiel choisi est celui ayant une forme uniforme lors de la propagation dans toute la section du tube. Ceci permet d'avoir une sensibilité égale de mesure de la section traversée à tous les points rencontrés et ceci autour de la circonférence.

Pour la majorité des applications à la détection de la corrosion des tubes, il est utilisé le mode de Torsion T (0.1).

Ce mode permet d'inspecter 100 % du volume du tube, d'avoir une célérité constante avec la gamme de fréquences et ne pas être affecté dans la plupart des cas par les liquides contenus dans les tuyauteries en service.

A chaque changement de la section de la tuyauterie, il y a une réflexion des ondes guidées. L'amplitude de la réflexion dépend de la variation de section à chaque point d'acquisition du signal le long du tube. Les soudures, les brides sont des réflecteurs importants retournant vers le capteur et sont visibles sur toute la circonférence.

Une soudure bout à bout présente en général une surépaisseur du cordon en passe de finition et de pénétration constituant une variation positive de la section, une partie de l'énergie ultrasonore est alors réfléchiée mais continue à être transmise en subissant une atténuation exponentielle par la distance.

Les réflexions sont classifiées comme mode axialement symétrique. Une corrosion localisée avec perte de l'épaisseur de métal est une situation où des ondes non axialement symétriques seront formées. Elles se propageront en retour vers le capteur pour être analysées avec le mode symétrique. Cette conversion de mode non symétrique est un élément clé pour la stratégie d'identification des anomalies.

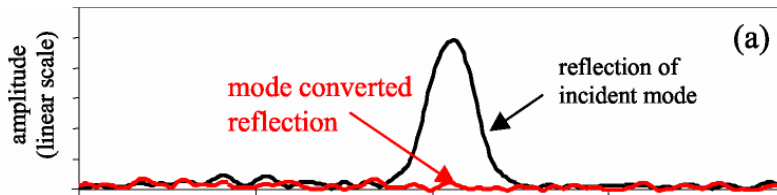


Figure 1 – Signal type événement symétrique comme une soudure

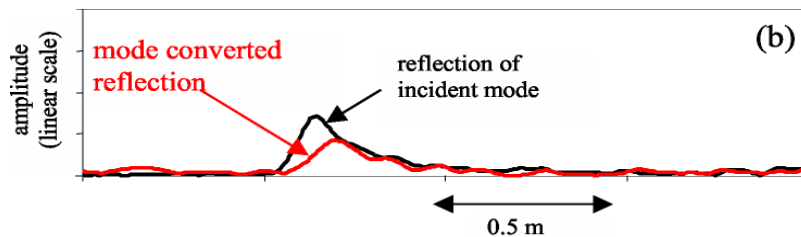


Figure 2 - Signal type événement non-symétrique comme une corrosion

Les éléments orientés perpendiculairement à la propagation des ondes en mode de torsion comme les supports soudés, les piquages sont détectés et affectent la distance parcourue. Ils rendent complexe l'interprétation en introduisant des signaux non symétriques, autour de ces zones.

Les revêtements de protection contre la corrosion de type brai bitumeux réduisent par l'atténuation des ondes la distance de parcours le long de la tuyauterie.

### 3 – SYSTEME DE CONTROLE

Le système choisi par le CETE Apave Nord Ouest est l'instrument commercialisé par Guided Ultrasonics Ltd, modèle Wavemaker G3 avec la fonction avancée de focalisation EFC [3].

L'instrument électronique fonctionnant sur batterie est connecté avec des câbles sur un anneau comportant des palpeurs multiéléments enroulé autour de la tuyauterie. L'acquisition de la mesure est effectuée à partir d'un ordinateur portable relié par un câble de type USB.

A chaque diamètre nominal des tubes correspond un anneau capteurs spécifique. Il existe des anneaux rigides pour les tubes de petits diamètres (figure 3). Pour les diamètres allant de 6" à 36", des anneaux souples raccordables sont utilisés (figure 4).

Un montage par ressort ou par une chambre mise en pression assure le bon contact et le maintien de chacun des capteurs sur la surface métallique.

L'arrangement des modules contenant les capteurs émetteur-récepteur est organisé en fonction du diamètre et de la longueur souhaitée pour les investigations (figure 5). La configuration permet d'ajuster le régime des fréquences. Par exemple pour un diamètre de tube de 8" (219 mm), 24 modules de 2 capteurs seront installés autour du tube.



*Figure 3 – Anneau rigide pour un tube Ø 4", en deux demi-parties contenant les capteurs*



*Figure 4 – Anneau souple et instrumentation d'acquisition*

Les ondes guidées sont envoyées de part et d'autre de l'anneau se propageant ainsi dans les 2 directions à partir du point d'installation.

Une zone de longueur environ 500 mm est requise pour la mise en place de l'anneau capteur. Aucune préparation particulière de la surface n'est nécessaire sauf l'enlèvement des revêtements épais et le brossage des oxydes ou les écailles de peinture. Un tube peint peut être examiné directement. L'enlèvement du calorifuge est limité au seul point d'installation de l'anneau.

La zone située directement sous l'anneau n'est pas incluse dans l'essai. En cas de contrôle de toute la longueur d'une ligne, on assure une superposition entre les différents points.

Les anneaux rigides sont utilisables jusqu'à une température de 120°C et les anneaux souples jusqu'à 70°C permettant le contrôle des tuyauteries en service dans ces conditions.

Le seul couplage est le bon contact sec des capteurs sur la surface, aucun gel ou liquide n'est requis pour la transmission des ondes basses fréquences.



*Figure 5 – Arrangement des modules capteurs sur un anneau souple*

#### **4 – LONGUEURS INSPECTEES**

La technique des ondes guidées est avant tout une méthode permettant d'effectuer une scrutation du volume de métal sur une longueur de la tuyauterie pour rechercher rapidement les pertes de section par la corrosion. La technique ne mesure pas directement l'épaisseur résiduelle.

Il est difficile de prédire la longueur inspectée par un essai sans connaître la tuyauterie. La longueur inspectée interprétable est généralement connue lorsque l'acquisition est réalisée. La corrosion et les dépôts affectent par atténuation le signal comme les revêtements de surface.

La géométrie de la tuyauterie dirige en particulier la fin de l'essai. Les ondes ne se propagent pas au-delà d'une bride boulonnée. Il est possible de passer un coude mais après un deuxième coude le signal est dégradé. Les piquages ne gênent pas trop la transmission des ondes mais perturbent l'interprétation des données du signal par le bruit de fond.

Les soudures sont de bons réflecteurs qui serviront à l'opérateur d'étalonner la courbe d'amplitude-distance DAC. Les supports soudés selon les dimensions en relation avec le diamètre du tube réduisent la distance parcourue par les ondes [4]. Dans le meilleur des cas, ils peuvent avoir peu d'effet et la détection de la corrosion en bordure des supports est possible

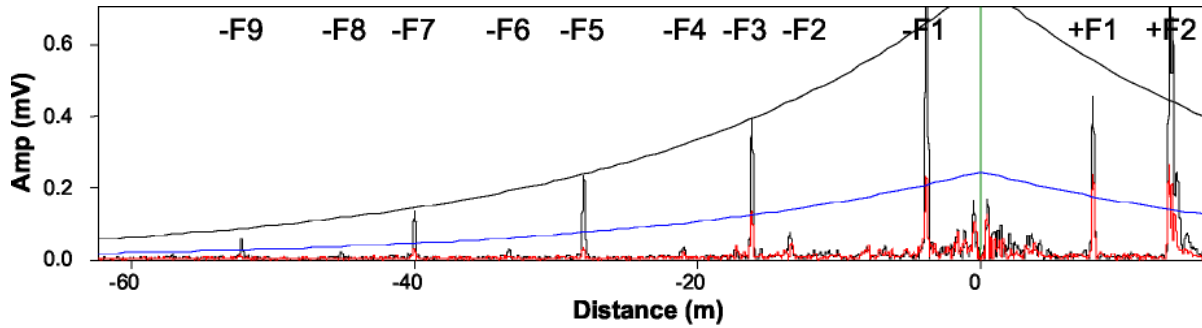


Figure 6 – Acquisition type des réflecteurs en affichage échelle linéaire selon la longueur

Le tableau présenté sur la figure 7 indique les longueurs moyennes pouvant être inspectées à partir de la position de l’anneau de part et d’autre de celui-ci.

Conditions	Longueur inspectée par direction
Longue tuyauterie, simples supports, faible corrosion	50 – 100m
Tuyauterie de process, calorifugée, en bon état général	20 – 50 m
Tuyauterie de process, calorifugée, corrodée	15 – 30 m
Tuyauterie recouverte par un revêtement épais	5 – 25 m
Tuyauterie recouverte par un revêtement de brai, épais et mou	2 – 10 m
Tuyauterie enterrée, sol non humide	2 – 20 m
Tuyauterie noyée en fourreau de béton	1 – 2 m

Figure 7 – Longueurs moyennes pouvant être inspectées à partir de la position de l’anneau.

Les conditions peuvent être classifiées idéales, bonnes ou mauvaises pour réaliser l’examen. Dans certains cas, des réglages particuliers sont nécessaires pour les situations mauvaises et pour étendre la longueur du contrôle en faisant appel à l’expérience de l’opérateur. Un niveau de confiance des résultats est évalué et indiqué dans le rapport d’examen.

Les performances classiques sont une longueur de 20 à 30 mètres depuis chacune des directions de l’anneau. La figure 8 montre le rapport généré par le logiciel, la zone inspectée est définie par les limites d’affichage et confirmée par l’opérateur en fonction de l’atténuation et du niveau de bruit de fond.



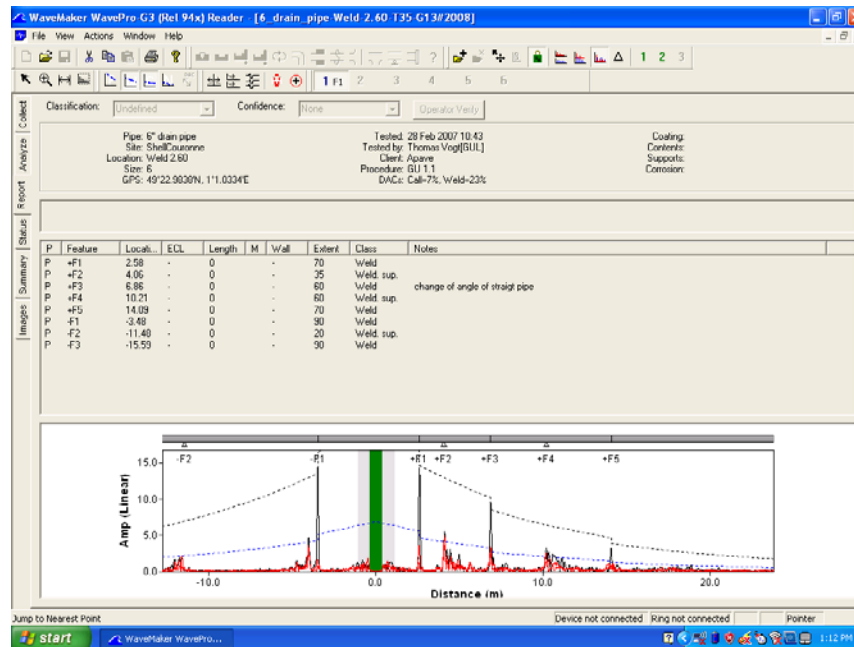


Figure 8 –Rapport d'examen indiquant les événements et la longueur inspectée

## 5 - APPLICATIONS INDUSTRIELLES DE LA TECHNIQUE GWUT

La technique des ondes guidées GWUT offre la possibilité en inspectant de grande longueur de tuyauterie de rechercher des corrosions internes, externes ou combinées sur une plus grande étendue par rapport aux mesures ponctuelles. Le système Wavemaker G3 est un outil END particulièrement intéressant pour sa rapidité d'installation et les possibilités d'inspecter plusieurs mètres depuis une seule position.

Il faut cependant bien prendre en compte les limites de la technologie car plusieurs conditions existantes peuvent limiter la distance d'inspection et introduire des perturbations affectant le signal.

Ces paramètres sont par exemples : les revêtements de surface, la rugosité du métal, les dépôts, l'humidité du calorifuge, la nature du sol des parties enterrées, les vibrations et la viscosité des fluides présents dans les tuyauteries.

La technique est fréquemment mise en œuvre pour inspecter des parties difficiles d'accès des réseaux de tuyauterie comme les parties en fourreau, les traversées de route et les tuyauteries aériennes implantées en rack.

Quelques exemples sont présentés ci-dessous :

- La figure 9 montre des tuyauteries de distribution de produits pétroliers dont une partie passant au-dessus d'un bassin est noyée dans des fourreaux en béton. Cette zone est difficilement contrôlable par les techniques conventionnelles. Le béton atténue brutalement la transmission des ondes guidées, cependant la détection de corrosion dans la partie entrant dans le fourreau a été détectée et le signal obtenu présenté sur la figure 10.





Figure 9 – Tuyauteries noyées dans un fourreau en béton examinée par GWUT

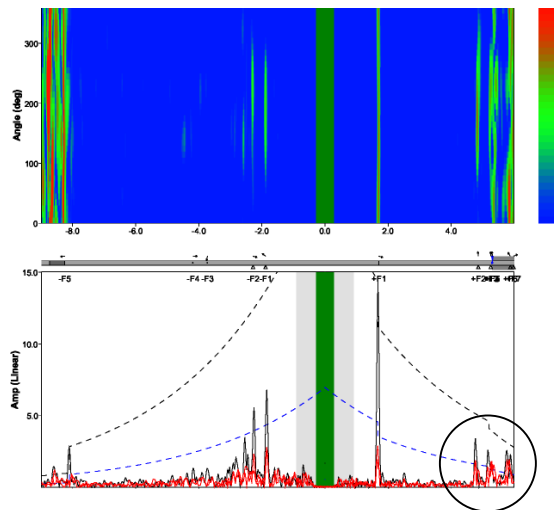


Figure 10 – Détection de la corrosion du tube à l'entrée du fourreau en béton

- La figure 11 montre des tuyauteries de distribution de produits pétroliers, le calorifuge a été partiellement enlevé pour permettre la mise en place de l'anneau capteur. L'acquisition présentée sur la figure 12 montre les zones de corrosion sévère détectées.



Figure 11 – Inspection GWUT sur des lignes en caniveau

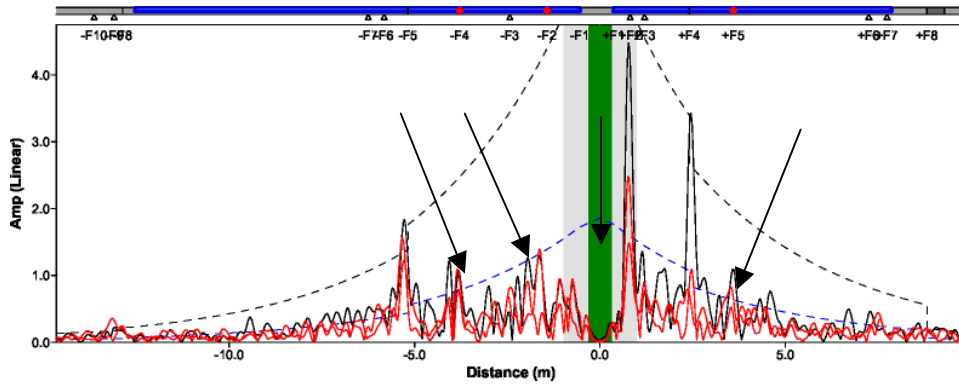


Figure 12 – Affichage du signal après analyse et indication des corrosions

- La figure 13 montre une vue rapprochée d'une zone où un signal de corrosion a été relevé à proximité d'un support soudé. Cette zone est rendue difficile d'interprétation en raison de l'atténuation des ondes se propageant dans le cordon de soudure du support extérieur. Néanmoins, une corrosion a été détectée après le support illustrée par l'acquisition présentée sur la figure 14.



Figure 13 – Corrosion externe à proximité d'un support soudé

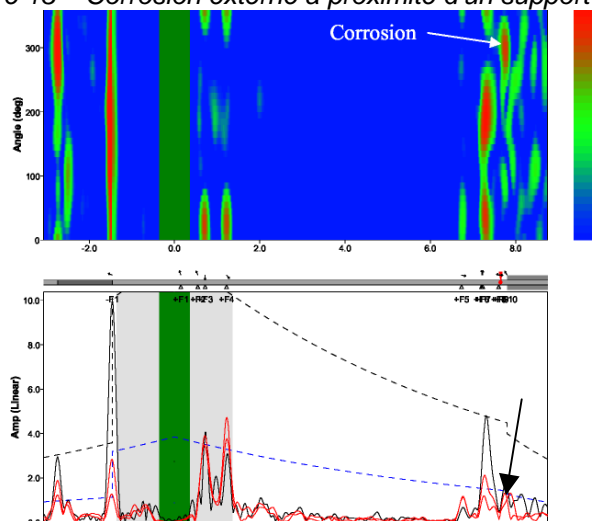


Figure 14 – Affichage des échos et représentation C-Scan de la zone figure 13

- La figure 15 montre l'inspection en fouille d'une tuyauterie de gros diamètre traversant une route. L'anneau a été positionné pour inspecter la partie enterrée non accessible.



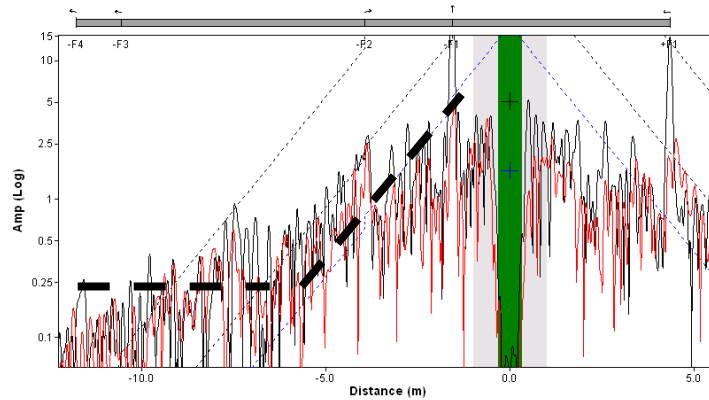
Figure 15 – Anneau souple pour l'inspection d'un tube de diamètre 30"

## 6 - CLASSIFICATION DES DEFAUTS

La technique des ondes guidées GWUT doit être considérée en premier lieu comme un outil de détection de la corrosion. Il est cependant possible d'estimer un pourcentage approximatif de la perte de section du tube et de déterminer la position et l'étendue autour de la circonférence de la corrosion. Une fonction d'affichage C-SCAN du signal après focalisation aide à l'analyse des données.

Le système Wavemaker G3 est configuré pour mesurer des pertes d'épaisseur dans la section du tube sur toute la longueur sélectionnée. La variation de la section est comprise entre 5 et 10 % par rapport à la section nominale. A partir de la courbe d'étalonnage DAC, créée depuis l'acquisition soit à partir des réflecteurs des brides (100 % d'amplitude) et surtout des soudures correspondant approximativement à 25 % de changement de la section, le programme établit une courbe DAC d'appel correspondant à 10 % de changement de section. Il s'agit du niveau type choisi pour considérer et classer les anomalies.

Le logiciel permet d'affiner ces niveaux d'étalonnages à partir des données réelles par exemples des dimensions des cordons de soudures et du niveau de bruit de fond. Un affichage en échelle log d'une acquisition enregistrée permet de séparer le bruit de fond des signaux et de pouvoir dans certains cas de les séparer (figure 16 d'une corrosion sévère).



16 – Exemple de séparation du bruit de fond des échos de défauts en échelle Log

La position dimensionnelle des événements (soudures, supports...) et des zones de corrosion est déterminée avec précision depuis l'emplacement de l'anneau placé sur le tube.

A partir de ces données, une perte de la section est calculée en comparant l'amplitude du signal par rapport au niveau de la référence issu de la DAC et des tables de calcul. La notion de l'étendue de la distribution du changement de section autour de la circonférence est également prise en compte. La perte d'épaisseur de paroi en % peut aussi être estimée pour information.

Comme ce calcul est approximatif, les résultats sont classés en 4 catégories :

- Pas de perte de section (cat 3) - le système GWUT est très efficace pour déterminer quelles sont les parties sans évidence de corrosion sur 100 % de la circonférence. Les signaux sont situés sous la courbe d'appel où moins de 10 % de perte de section du métal a disparu.
- Indication mineure (cat 2) - les anomalies donnent un signal d'amplitude supérieure à la courbe d'appel de 10 % de perte de section avec des échos non symétriques peu amplifiés pouvant représenter 30-50 % de perte de l'épaisseur
- Indication majeure (cat 1) - les anomalies donnent un signal d'amplitude supérieure à la courbe d'appel de 10 % de perte de section avec des échos non symétriques dépassant cette courbe. Le signal correspond à une corrosion majeure pouvant pénétrer sur plus de 50 % de l'épaisseur.

La technique est relativement fiable pour les tubes peu corrodés. Lorsque la corrosion généralisée est uniformément répartie sur toute la longueur, le résultat indique une distribution éparse de la corrosion sans pouvoir quantifier une piqûre isolée mais indique la zone la plus sévèrement dégradée permettant d'expertiser la zone connue par les techniques conventionnelles.

## **7 - CERTIFICATION DES OPERATEURS**

Compte tenu de la technologie différente des ultrasons conventionnels et surtout de la complexité d'interprétation des résultats où la technique est très dépendante de l'opérateur et de son expérience, le fabricant concepteur Guided Ultrasonics Limited a mis en place une procédure spécifique de certification des opérateurs formés sous son contrôle. Les opérateurs de niveau 1 sont habilités pour les cas d'applications classiques et de niveau 2 pour les applications avancées. Une clé électronique est remise aux opérateurs certifiés permettant le démarrage du système et l'enregistrement pour tracer le nombre de journées d'utilisation et d'acquisitions réalisées. Un GPS intégré dans l'équipement permet la traçabilité géographique des interventions.

## **8 - CONCLUSIONS**

La technique non destructive avancée GWUT utilisant les ondes guidées est maintenant un outil industriel permettant la détection par scrutation de la corrosion sur les tuyauteries d'usines. La rapidité de mise en œuvre permet d'inspecter de grandes longueurs de tuyauteries dans une seule journée.

Le contrôle au moyen des ondes ultrasonores guidées devient une solution attractive pour contribuer à l'inspection des tubes à partir d'un seul point accessible de la tuyauterie. Les ondes ultrasonores en se propageant sur une longue distance permettent par scrutation volumétrique la détection de la corrosion interne, externe ou combinée.

La où des situations particulièrement difficiles pour l'inspection des parties non accessibles comme les traversées de route en partie enterrées sont rencontrées et pour les tuyauteries placées en hauteur sur rack, en fourreau et en caniveau, le contrôle peut alors être effectué.

## **REFERENCES**

[1] Alleyne, D.N., Pavlakovic, B., Lowe, M.J.S. and Cawley, P. (2001) 'Rapid long-range inspection of chemical plant pipework using guided waves', Insight, Vol 43, pp93-96,101.

[2] Cawley, P., Lowe, M.J.S., Alleyne, D.N., Pavlakovic, B. and Wilcox, P. (2003) 'Practical long range guided wave inspection - applications to pipes and rail', Materials Evaluation, Vol 61, pp66-74.

[3] Wavemaker G3 TM Advanced Focusing Capability Procedure Manual, 2007

[4] S K Yang, J.Lee, P.Lee, J Cheng (2006) The effect of the longitudinal welded support on the pipe for guided waves propagation, Asia Pacific NDT 12<sup>th</sup> PCNDT conference