

**INSPECTION ET EXPERTISE DES CONDUITES FORCÉES : À LA  
RECHERCHE DE TECHNIQUES « TOUT TERRAIN »**  
*INSPECTION AND ASSESSMENT OF PENSTOCKS : LOOKING FOR  
“ALL-TERRAIN” TECHNICAL SOLUTIONS*

J. Delemontez - P. Bryla – D. Filliard  
EDF / Division Technique Générale  
21, avenue de l'Europe  
BP 41  
38040 GRENOBLE CEDEX 9

**Résumé**

EDF production hydraulique exploite environ 300 km de conduites forcées en acier réparties sur quelques 600 installations. L'âge moyen élevé de ces conduites et la diversité des configurations rencontrées implique un effort important au niveau de la maintenance et des inspections pour maintenir ce parc dans un état opérationnel. Les dégradations apparaissant au cours du temps et qui affectent principalement les épaisseurs des tôles sont maintenant bien identifiées et les inspections en cours ont pour but de les détecter pour prévenir les indisponibilités des installations. A côté des techniques traditionnelles de mesures par ultrasons, des techniques telles que les courants de Foucault pulsés et le TOFD ont été testées sur des maquettes d'essais puis mises en œuvre à l'occasion d'inspections en service. La validation de ces techniques complémentaires permet de doter l' « inspecteur » des différents outils de mesure pour mener à bien son diagnostic sur les différents cas de figure rencontrés et de se préparer le cas échéant à une automatisation des inspections.

**Abstract**

*EDF hydraulic power generation is operating about 300 km of penstocks made of steel which represent around 600 power-stations. The age of those installations is against 60 years in average, that's why it is necessary to order inspection and works to maintain the operational level. The main defects that appears during the life time of the penstocks are wall thickness losses and the aim of the in-service inspection is to find and localize these defects to avoid large outages of the power installation. Near the traditional ultrasonic measurements, some new ndt solutions such as TOFD and pulsed eddy current were first tested on special mock-ups then implemented on the field during in-service inspection. The validation of these ndt solutions in the field of the penstock inspections is very useful for the inspector to complete the assessment of the many cases and to prepare to possible automatic inspections.*

## INTRODUCTION

EDF production hydraulique exploite environ 300 km de conduites forcées en acier réparties sur quelques 600 installations. L'âge moyen de ces installations qui est de l'ordre de 60 ans implique de les surveiller et de les entretenir afin de garantir la sûreté et leur disponibilité. Cela implique de connaître précisément l'état de ces ouvrages et de mettre en œuvre les techniques d'inspections les plus adaptées afin de permettre un diagnostic d'état le plus pertinent possible. L'objet de cette communication est de présenter les efforts faits en terme d'inspection des conduites forcées par EDF pour remplir cet objectif.

## CONTEXTE

### Des conditions d'examen multiples et variées

Les caractéristiques de conception des conduites forcées font de chaque ouvrage un objet d'examen unique. En effet, les paramètres suivants varient d'une conduite à l'autre :

- paramètres géométriques : ce sont les épaisseurs, les diamètres extérieur et intérieur, les longueurs de tôles. Une singularité est que ces paramètres varient sur une même conduite compte tenu des variations de pression hydraulique entre le sommet et le bas de l'ouvrage,
- paramètres métallurgiques : l'étalement des conceptions dans le temps (plus de cent ans) entraîne la coexistence d'aciers de propriétés mécaniques et métallurgiques variées (tôle en acier à faible limite d'élasticité renforcé par système de frettes pour les ouvrages anciens aux viroles en aciers à haute limite élasticité qui sont maintenant incontournables pour les ouvrages les plus récents)
- caractéristiques d'assemblages : pour les plus anciens ouvrages, ce sont les conceptions rivetées qui dominent : joints circulaires et axiaux - comme illustré en Figure 1 - aujourd'hui le soudage de tôles de fortes épaisseurs ne représentant plus un problème sur le chantier,
- caractéristiques d'édification : les ancrages et appuis au relief sont réalisés par des interfaces en béton disposés à intervalles réguliers, caractéristiques topologiques : l'adaptation au relief géologique induit des pentes, des variations de pentes et quelquefois des changements de direction qui varient aussi bien d'un ouvrage à l'autre que sur un même ouvrage, la mise en place de tronçons enterrés peut être également rendu nécessaire,
- historique de l'ouvrage : les conditions d'entretien et d'exploitation induisent par exemple un état des revêtements internes et externes anti-corrosion très dispersés selon les ouvrages. Les remplacements partiels de tronçon peuvent également laisser subsister sur une conduite des caractéristiques d'assemblages différentes. Les sollicitations subies (pressions, agressions géologiques,...) sont aussi propres à chaque ouvrage.

La liste de ces paramètres est non-exhaustive et doit être pris en compte par les inspecteurs et ingénieurs pour établir le diagnostic de santé de l'ouvrage.



*Figure 1 : exemple de conduite forcée de conception rivetée (1907)*

## **Objectifs des diagnostics et expertises**

La sûreté et la performance des installations constitue un enjeu primordial pour la production hydraulique. EDF s'est donc engagé récemment sur un programme pluri-annuel baptisé « SuPerHydro » (Sûreté et Performance de l'hydraulique) portant sur les composants sensibles des ouvrages dont font bien évidemment partie les conduites forcées. Ainsi, après avoir classé et priorisé chaque ouvrage, un programme d'inspection spécifique est défini.

Il va consister à recueillir l'ensemble des données d'entrée nécessaires pour établir le diagnostic d'état de l'ouvrage. Ces données – qui sont listées dans des guides de diagnostic établis par les ingénieries d'EDF- sont principalement les suivantes :

- caractéristiques métallurgiques,
- propriétés mécaniques,
- sollicitations subies au cours du temps,
- pressions interne et externes,
- état des joints (soudés, rivetés),

- ...
- et pertes d'épaisseurs.

C'est ce dernier point qui fait l'objet d'une attention particulière lors des inspections. En effet, la corrosion n'épargne pas les conduites forcées malgré les précautions prises lors de la conception (revêtements interne et externe anti-corrosion). Ces revêtements subissent des dégradations au cours du temps et peuvent laisser place à des mécanismes de corrosion affectant les parois interne et externe des conduites.

La corrosion qui affecte les conduites forcées se présente sous forme de pertes d'épaisseurs localisées que l'on peut – selon l'expérience acquise – classer en deux catégories :

- Pertes d'épaisseurs localisées orientées selon l'axe ou génératrice de la conduite comme illustré en [Figure 2](#),
- Pertes d'épaisseurs localisées en forme de colonies de cratères de densité et d'étendue variable.



*Figure 2 : exemple de perte d'épaisseur localisée affectant les conduites forcées.*

Ces pertes d'épaisseurs affectent aussi bien la paroi externe que la paroi interne des conduites.

Le but de l'inspection est donc d'identifier et de quantifier ces pertes d'épaisseur qui seront prises en compte ensuite dans les calculs de tenue mécanique de l'ouvrage. L'expérience d'EDF montre qu'il convient de s'intéresser aux pertes d'épaisseur dès qu'elles affectent 20% de l'épaisseur nominale.

## **TECHNIQUES D'INSPECTION**

### **Mesures d'épaisseurs standards**

La technique de mesure traditionnelle des pertes d'épaisseurs est bien entendu la mesure par ultrasons. En pratique, elle est mise en œuvre sur les conduites forcées selon le schéma suivant :

- inspection ciblée des zones sensibles (par exemple interfaces acier/béton),
- examen par sondage en partie courante des viroles.

Ces mesures sont réalisées en général depuis l'extérieur à l'aide de mesureurs d'épaisseur portatifs. Pour les conduites dont le diamètre est suffisant, elles sont complétées par des mesures par l'intérieur. Lors des examens ciblés, l'opérateur procède alors à un maillage de la zone en général par pas de 5cm. Il peut être amené en fonction de ses observations sur le terrain à affiner le maillage voire à étendre les mesures sur des zones suspectes.

En complément, des appareils avec visualisation de type A-SCAN peuvent être déployés, ponctuellement pour confirmer une perte d'épaisseur annoncée lors de l'examen de premier niveau.

Pour une exploitation plus fine des résultats, il convient de prendre en compte les incertitudes de mesure. En tant que unité d'ingénierie d'expertise et de mesure, la DTG D'EDF a intégré dans son référentiel technique l'application de la norme NF ENV 13005 (G.U.M) qui décrit une démarche pour le calcul des incertitudes de mesure. C'est sur ce modèle que celles-ci ont été établies pour les mesures d'épaisseurs sur les conduites forcées telles que présentées sur le graphe de la Figure 3.

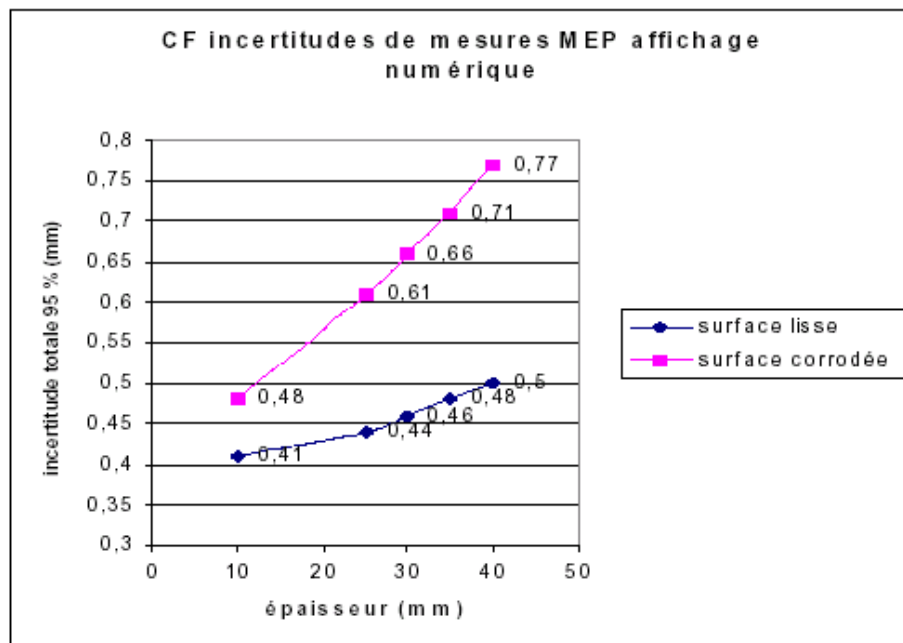


Figure 3 : incertitudes de mesure d'épaisseur par ultrason

Dans le cas où l'inspecteur doit effectuer sa mesure sur une surface affectée par de la corrosion – c'est le cas par exemple lors de l'inspection par l'extérieur de conduites de petit diamètre ou également lors de la mesure par l'intérieur au droit des interfaces acier/béton – il peut s'avérer nécessaire de prendre en compte l'influence de l'état de la surface lors de la phase d'interprétation des mesures. La mesure peut effectivement être affectée avec l'état dégradé de la surface : ce phénomène est illustré par les déformations et perturbations du faisceau acoustique observées lors des simulations avec le logiciel CIVA ® et présentées en Figure 4.

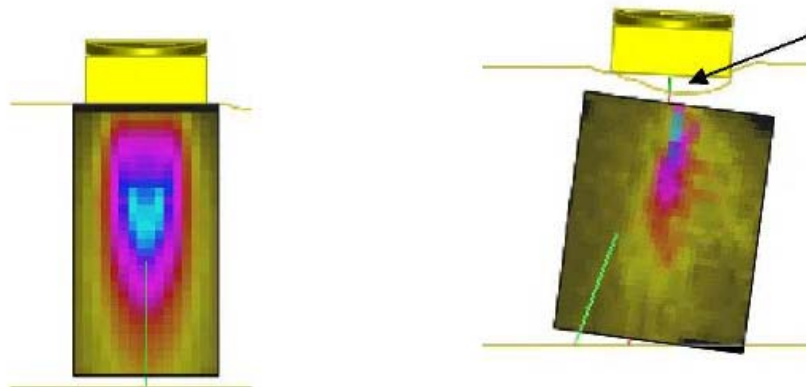


Figure 4 : influence de l'état de la surface d'examen sur la mesure ultrason - calculs Civa® par EDF RetD Renardières

Lorsque des colonies de cratères affectent plus particulièrement la paroi interne des conduites sous le revêtement, il peut être intéressant pour le diagnostic d'avoir une vision plus précise de la corrosion : des techniques de prises d'empreintes peuvent alors être mises en œuvre. Accompagnée d'une profilométrie laser ou optique, il révèle une cartographie précise de ce type de corrosion comme illustré en Figure 5. Les zones en bleu sur la cartographie indiquent des cratères de corrosion qui atteignent 2 à 3 mm pour une épaisseur nominale de 8 mm.

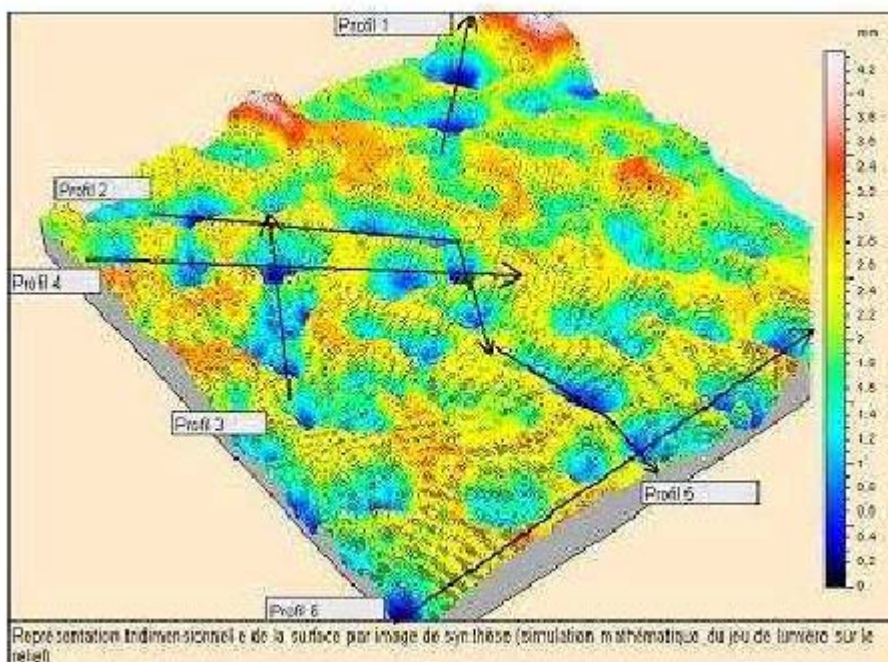


Figure 5 : exemple d'une cartographie de la corrosion interne au droit d'une interface acier/béton

## Techniques complémentaires aux mesures traditionnelles

Si les mesures traditionnelles par ultrason - couplées à l'expérience des inspecteurs et des ingénieurs chargés du diagnostic – ont rempli parfaitement leur rôle et leurs objectifs, il n'en demeure pas moins qu'elles peuvent bénéficier de l'appui d'autres techniques ultrasonores innovantes. C'est le cas avec les techniques TOFD et multi-éléments dont l'applicabilité opérationnelle dans des conditions industrielles difficiles a fait l'objet d'améliorations constantes par les fabricants et qui laisse aujourd'hui la possibilité d'intervention dans des conditions difficiles.

Afin de vérifier les plus values apportées par ces techniques, des tests élémentaires sont réalisés préalablement sur des échantillons de tôles contenant des défauts calibrés représentatifs des dégradations recherchées comme l'illustre par exemple la [Figure 6](#). Ces tests sont complétés par des mesures sur des échantillons prélevés sur des conduites forcées.



*Figure 6 : échantillon représentatifs de colonies de cratère en paroi interne*

Concernant la technique TOFD, les essais réalisés ont montré l'aptitude de la technique à caractériser des pertes d'épaisseurs localisées avec une très bonne précision.

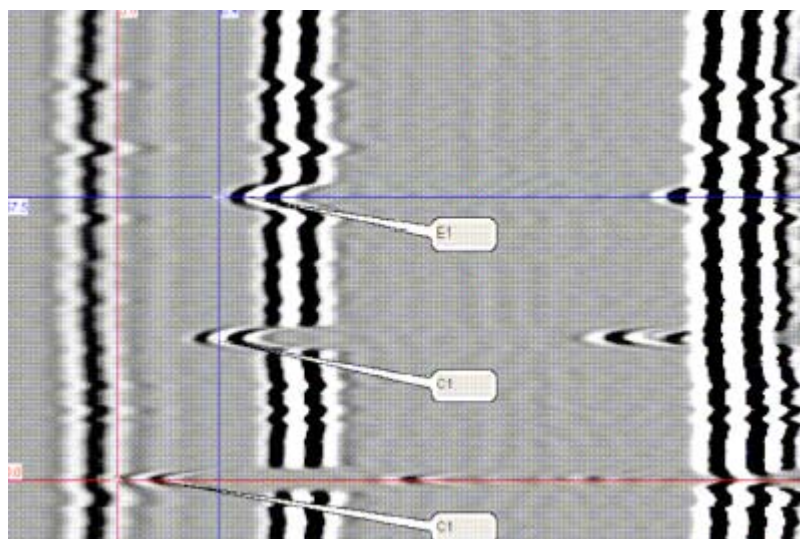


Figure 7 : mesure TOFD de cratères de corrosion  $\varnothing 20$  mm et de profondeur 1, 3 et 5 mm – image de type B

L'apport de l'imagerie est une aide précieuse pour l'inspecteur et elle permet de restituer des informations plus précises de l'état de corrosion affectant la zone de la conduite inspectée.

L'emploi d'équipements portatifs plus sophistiqués et disponibles avec la technologie des capteurs ultrasons multi-éléments permet également la restitution plus fine des corrosions rencontrées lors de l'inspection par une description en imagerie type B et C avec une onde longitudinale droite, voir [Figure 8](#).

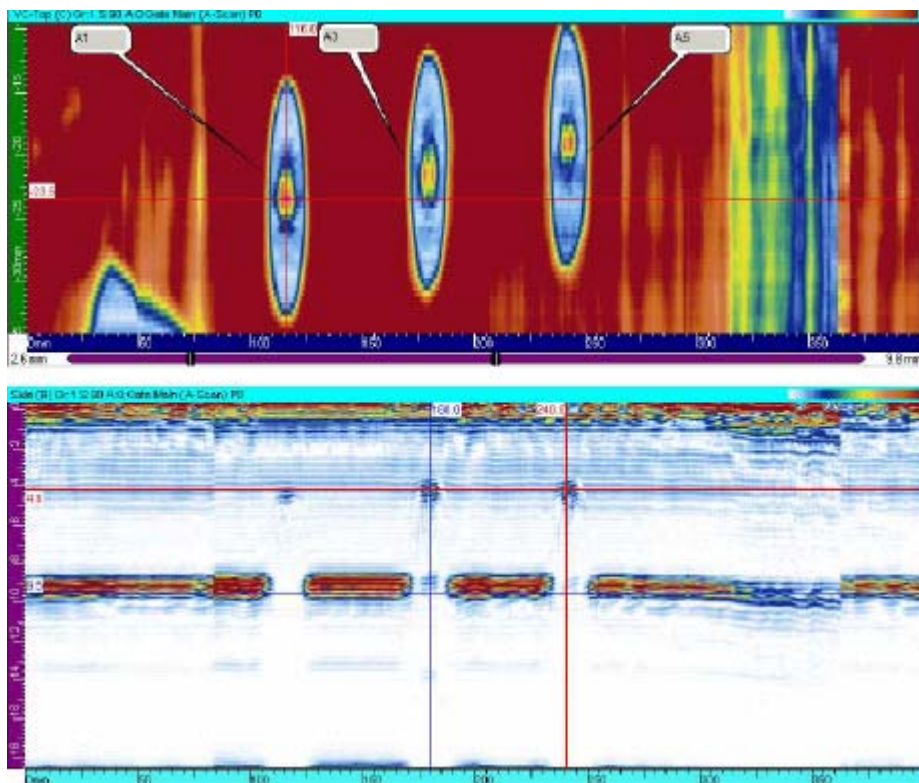


Figure 8 : imagerie ultrason  $0L0^\circ$  de type C (en haut) et B (en bas) de cratères de corrosion  $\varnothing 20$  mm et de profondeur 5 mm

La particularité de la technique TOFD est l'utilisation de transducteurs d'angle très divergents fonctionnant en émetteur-récepteur séparés. Cette caractéristique ainsi que le type d'imagerie associée lui confère la possibilité de restituer simultanément l'information de mesure d'épaisseur (présence d'un écho de fond continu associé à l'onde latérale) ainsi que la présence de défauts présents dans la tôle de la zone examinée. Ainsi des défauts liés au mode de fabrication (forgeage, laminage) sont parfaitement visibles par cette technique. Lors des mesures de premier niveau, ces défauts peuvent constituer de véritables écrans à la propagation des ondes droites générées par les mesureurs d'épaisseurs traditionnels et indiquer une fausse perte d'épaisseur à l'inspecteur. La technique TOFD permet de lever facilement le doute et de contribuer positivement au résultat final de l'expertise. Au cours de l'année 2007, elle a ainsi été mise en œuvre plusieurs fois avec succès sur des conduites forcées, voir [Figure 9](#).



Des progrès conséquents sont apportés par ces techniques complémentaires permettent de préciser et valider les résultats obtenus lors des mesures d'épaisseurs de premier niveau. Bien qu'elles augmentent la productivité des mesures (un simple balayage remplace de nombreux points de mesure manuels), elles nécessitent néanmoins :

- une préparation locale de la surface à inspecter,
- des opérateurs formés et spécialisés pour la mise en œuvre de l'équipement et l'interprétation des signaux.

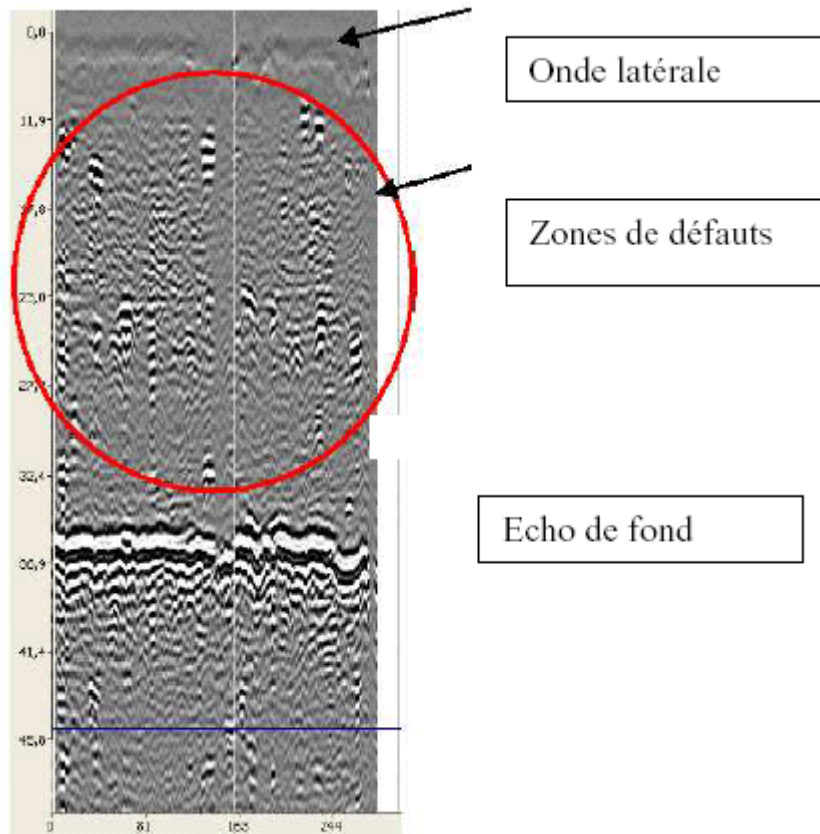


Figure 9 : imagerie TOFD permettant de confirmer l'épaisseur nominale de la conduite(35 mm) ainsi que la présence de défauts dans la tôle dont la plus forte densité se situe à la profondeur 23 mm)

## Vers des techniques de mesures plus exhaustives

### Technique Incotest ®

Cette technique repose sur la mise en œuvre de courants de Foucault basse fréquence en régime impulsionnel. Le principe est l'analyse du temps de décroissance du signal de réponse obtenu qui est proportionnel au carré de l'épaisseur de l'échantillon observé, le régime impulsionnel conférant un pouvoir de pénétration plus important que pour le régime continu des courants de Foucault traditionnel. Après calage sur une référence donnée (épaisseur connue ou mesure par ultrason), le système donne une indication sur la perte d'épaisseur localisée en paroi externe ou interne sans toutefois pouvoir les discriminer.

Cette technique est notamment mise en œuvre dans l'industrie pétrolière et elle a fait également l'objet d'essais pour la détection de corrosion-érosion dans des tuyauteries calorifugées par l'EPRI aux États-Unis. La possibilité d'utilisation de sonde de grand diamètre laisse entrevoir la possibilité de réaliser des mesures avec un rendement en terme de surface couverte intéressant pour les conduites forcées revêtement en place. Elle présente l'intérêt d'être moins sensible à l'état de la surface et ne nécessite a priori pas de préparation de surface contrairement aux techniques ultrasonores. Elle a donc fait l'objet de tests en grandeur réelle dès 2003 sur quelques conduites forcées du parc EDF.

Ces tests ont permis de conclure quant à la faisabilité opérationnelle des mesures notamment avec les « grandes sondes » permettant de couvrir un tronçon de conduite en quelques heures là où un maillage par ultrasons manuel nécessiterait beaucoup plus de temps. Néanmoins, ces tests n'ont pas répondu complètement à la démonstration de la capacité à détecter des pertes d'épaisseurs localisées puisque les mesures réalisées complétées par celles traditionnelles aux mesureurs ultrasons ne révélèrent aucune perte d'épaisseur significative.

Courant 2007, des essais complémentaires de cette technique ont été réalisés sur les maquettes et échantillons de tôles contenant des défauts de corrosion artificiels et réels - tels que présentés auparavant - en utilisant les « grandes sondes » et les sondes dites « de contact » dont la zone d'influence est plus petite, voir [Figure 10](#).



*Figure 10 : essais de la technique Incotest ® de PS&I /RTD sur un échantillon réel de conduite forcée*

Les résultats de détection obtenus sur des colonies de cratères sont présentés dans la graphie de la [Figure 11](#) ci-dessous. On voit que seules les petites sondes (50 x 50 mm et diam. 120 mm) sont capables de détecter ce type de pertes d'épaisseur (20 % de l'épaisseur nominale) avec une sensibilité proche de la limite de détection (fixée à 5% de l'épaisseur nominale).

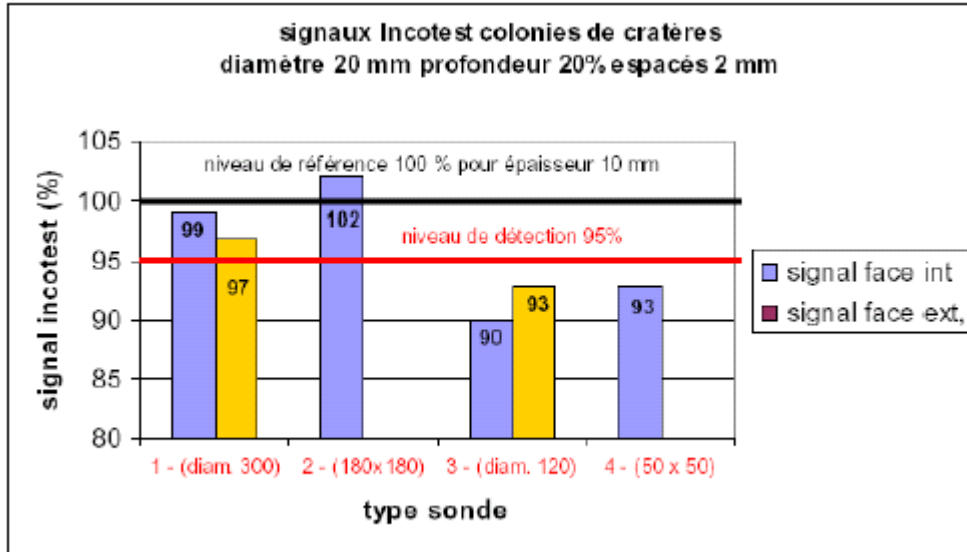


Figure 11 : signaux Incotest® obtenu pour des colonies de cratères  $\varnothing 20$  mm et de profondeur 2 mm en paroi interne

Des résultats analogues sont obtenus pour de pertes d'épaisseurs cette fois ci orientée préférentiellement selon l'axe de la conduite, voir Figure 12 ci-dessous.

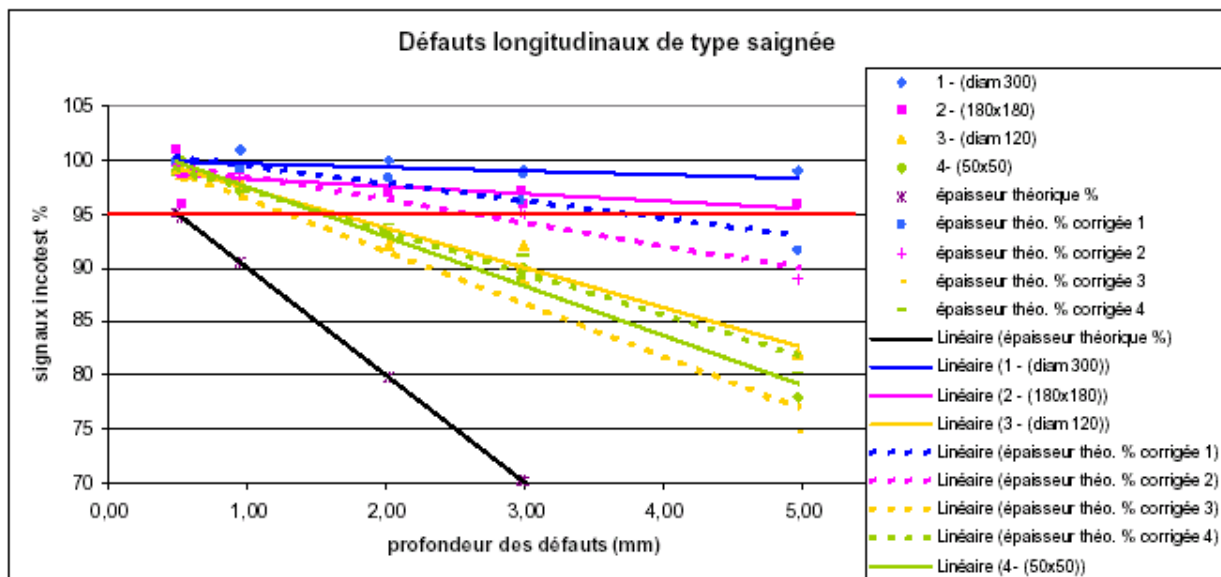


Figure 12 : signaux Incotest® obtenu pour des défauts de type rainure de profondeur comprise entre 1 et 5 mm.

Pour interpréter ces résultats, il est intéressant d'exprimer les pertes d'épaisseur non pas en pourcentage de l'épaisseur nominale de la paroi mais plutôt en pourcentage de la zone d'influence du capteur courants de Foucault. Ainsi, la superposition sur le graphe de la Figure 12 des lignes de mesures (lignes continues) et celles des pertes d'épaisseurs en pourcentage de la zone d'influence du capteur considéré (lignes pointillées) révèle un bon accord entre les mesures et cette modélisation : cela confirme que la technique est avant tout plus adaptée pour détecter des pertes d'épaisseur dont l'étendue est au moins aussi grande que la zone d'influence du capteur.

## Inspection Télé-opérée

EDF procède déjà depuis quelques années à des inspections automatisées télévisuelles de tronçons de conduites forcées. De nombreux équipements existent sur le marché et ont été développés pour l'inspection des canaux d'assainissement et des réseaux de distribution (eau, gaz, chaleur à distance). Ils sont utilisables pour les conduites forcées car ils sont dotés des capacités de motricité et de franchissement nécessaires. Les caméras embarqués possèdent des résolutions très fines et sont complétées - pour les outillages les plus performants - par des systèmes laser permettant de mesurer les indications dans les trois dimensions.



Figure 13 : inspection télévisuelle d'une conduite forcée à l'aide d'un « crawler » d'Inspector systems – visualisation des lignes de rivet

Néanmoins, selon l'expérience acquise par d'EDF, l'inspection télévisuelle ne suffit pas à donner un diagnostic complet surtout vis-à-vis des pertes d'épaisseur qui pourraient être masquées par le revêtement interne. Pour pouvoir envisager une utilisation à grande échelle, il convient de compléter l'inspection télé-opérée par un moyen de détection et de mesure des pertes d'épaisseur. Des outillages du type « piston instrumenté » existent sur le marché mais ne sont pas utilisables sans modifications majeures compte tenu des particularités des conduites forcées :

- variation de diamètre interne sur un même tronçon,
- obstacles constitués par les lignes de rivets (marches de 20 mm),
- site d'introduction et de récupération de l'outillage unique,
- présence du revêtement interne,
- inspection sans mouvements de fluide.

Toutefois, on observe l'émergence sur le marché d'outillage dotés de capacité de mesure d'épaisseur dont le concept semble plus favorable à une utilisation dans les conduites forcées : c'est le cas du robot de type chenille « crawler » développé par Inspector systems et Applus/RTD, voir [Figure 14](#). Cet outillage utilise la technique ultrason par immersion et la mesure est réalisée à l'aide d'une couronne de 32 capteurs ultrason.



Figure 14 : robot de type chenille avec technique ultrasonore par immersion- crawler Inspector ApplusRTD

La technique de mesure a préalablement été validée sur des maquettes d'essais d'EDF (non revêtues) et a donné des résultats satisfaisant en terme de détection de colonies de cratère, voir [Figure 15](#).

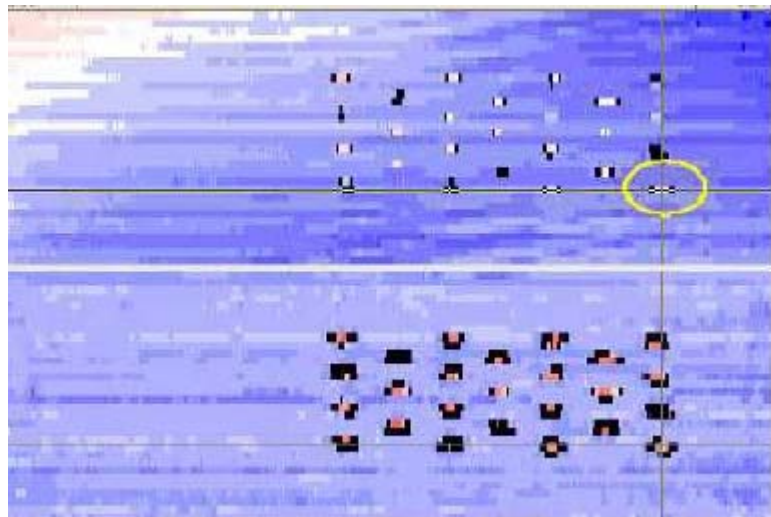


Figure 15 : cartographie des épaisseurs révélant une colonie de cratère  $\varnothing 20$  mm et de profondeur 2 mm en paroi interne

Un test en grandeur réelle a ensuite été réalisé sur un tronçon de conduite forcée jugé favorable à l'expérimentation, voir [Figure 14](#) représentant le crawler dans son site d'introduction.

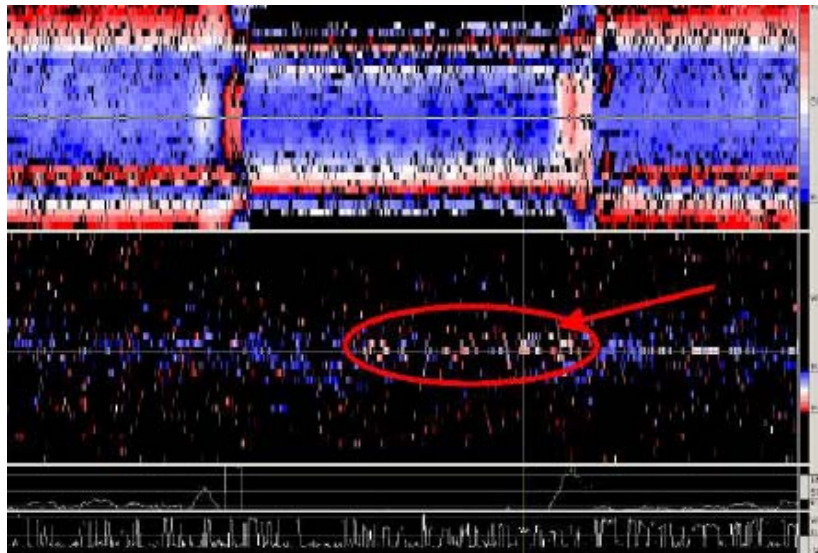


Figure 16 : zone de perte d'épaisseur révélée par le crawler en génératrice inférieure.

Quelques 90 m'ont été inspectés à l'aide de l'outillage. Malgré les perturbations induites par le revêtement interne de la conduite (absorption, réflexions multiples), il a été possible de mesurer l'épaisseur moyenne sur tout le tronçon et de mettre en évidence quelques pertes d'épaisseurs significatives - qui ont été corrélées avec les mesures ultrason traditionnelles-tel que présenté en figure 16.

## CONCLUSION

A côté des techniques de mesure traditionnelles par ultrason qui demeurent incontournables pour un diagnostic efficace, il apparaît indispensable de mettre à disposition des inspecteurs des techniques complémentaires de façon à consolider et affiner le diagnostic des conduites forcées. Cette démarche d'introduction de nouveaux moyens de contrôle – qui a déjà donné des résultats probants - oblige EDF à définir exactement ses objectifs en terme de dégradations recherchées. Même si l'exhaustivité du contrôle n'est pas atteinte, les progrès réalisés en terme de zones couvertes et en terme d'informations recueillies permettent d'alimenter les calculs de tenue mécanique en réduisant les incertitudes. Parallèlement, les efforts doivent se poursuivre pour se doter de moyens permettant un examen exhaustif des ouvrages tel que les inspections télé-opérées qui prennent en compte les difficultés de mise en œuvre et de mesure propre aux conduites forcées. La priorité est accordée aux techniques de mesure permettant un examen à travers le revêtement interne.

### Remerciements aux entreprises partenaires :

**APAVE**  
**CETIM**  
**INSPECTOR SYSTEM**  
**PS&I / ApplusRTD**  
**ROV DEVELOPPEMENT**  
**SN LUZIESA**  
**Worldsonic - MCI**