

# TUBES ET COMPOSANTS DE REFORMAGE

Services complets pour le contrôle des tubes de reformage.



<b>Le contrôle des tubes de reformage</b>	4 – 5
<b>Inspection externe des tubes (LEO-Scan)</b>	6 – 9
<b>Inspection interne des tubes (LEO-iScan)</b>	10
<b>Surveillance de l'état des tubes de raccordement (pigtailes) de sortie</b>	11
<b>Inspection des extrémités supérieures</b>	12 – 13
<b>Evaluation de la durée de vie</b>	14 – 15
<b>Technologie</b>	16
<b>La tour d'essais FOERSTER</b>	17
<b>Dans le monde entier</b>	18 – 19



### Un nouveau nom pour une mission identique

Le contrôle non destructif des matériaux utilisés dans les usines pétrochimiques constitue un moyen essentiel pour assurer le fonctionnement sûr et efficace de celles-ci – en particulier les tubes catalyseurs de reformage coulés par centrifugation et leurs composants associés. Depuis de nombreuses années, les deux leaders dans ce domaine sont la société allemande Magnetische Pruefanlagen (MP) et la société américaine US Thermal Technology (USTT), opérant de l'autre côté du globe. MP était une filiale exclusive et une société importante du groupe FOERSTER, entreprise mondiale dont le siège social se trouve à Reutlingen en Allemagne. La société USTT a été un partenaire de longue date de MP pour les inspections de tubes en

occident de 1989 à 2020, lorsqu'elle a été acquise directement par FOERSTER. En 2021, MP a été intégré à l'Institut Dr. Foerster GmbH & Co. KG. Enfin, fin 2021, le groupe FOERSTER a finalisé l'acquisition de la division Syngas de Quest Integrity. Cette transaction comprenait le personnel technique et ses technologies d'inspection LOTIS et MANTIS.

Désormais regroupés sous l'égide de FOERSTER dans la Business Unit (BU) « Inspection », ces partenaires de l'expertise poursuivent ensemble l'important travail sur lequel le secteur compte depuis plus de 30 ans. Bien que leurs noms ont changé, la mission demeure la même : fournir des services complets pour tous vos besoins de contrôle des tubes de reformage.

### Rendre visible la qualité

Le groupe FOERSTER développe, fabrique et distribue des équipements et des systèmes pour le contrôle non destructif de matériaux en utilisant, entre autres méthodes, la technologie des courants de Foucault (CF). FOERSTER produit également des sondes à courants de Foucault hautement spécialisées et personnalisées pour la détection de fissures et le contrôle des microstructures.

Les résultats des tests peuvent être nettement améliorés en utilisant des capteurs personnalisés conçus spécifiquement pour les géométries complexes de composants à tester. Pour l'étalonnage des appareils de contrôle, FOERSTER réalise des défauts artificiels qui diffèrent en profondeur, en largeur et en longueur, ainsi que des blocs d'étalonnage standard.



Site de El Dorado Chemical, El Dorado, Arkansas ; membre de LSB Industries



**FOERSTER**

Parent Company of MP and USTT  
Owner of LOTIS and MANTIS Technology



Contrôle des tubes de reformage avec LEO-Scan

NOS SERVICES

# Le contrôle des tubes de reformage





Le principal objectif de la BU Inspection est de fournir à ses clients des services complets autour du contrôle des tubes de reformage. Nous réalisons des contrôles partout dans le monde pour des usines d'ammoniac, de méthanol, de fer à réduction directe (DRI) et d'hydrogène.

Les contrôles automatisés sont effectués par nos inspecteurs spécialisés en contrôle non destructif (CND), ils sont hautement qualifiés conformément à la norme EN ISO 9712. Ces inspecteurs sont des ingénieurs diplômés possédant de nombreuses certifications techniques de niveau 2 et 3 dans diverses disciplines, y compris les méthodologies par courants de Foucault. Parce que nous concevons, construisons et spécifions les équipements utilisés, les contrôles des tubes de catalyseur de reformage peuvent être exécutés de manière fiable même dans des conditions qui nécessitent une expertise technologique.

Nous recommandons à nos clients d'utiliser l'ensemble des techniques d'inspection applicables et appropriées proposées par FOERSTER afin d'assurer une surveillance rentable et fiable de l'ensemble de leur parc.

Cette approche exhaustive garantit aux tubes de reformage et à leurs composants un contrôle régulier à des intervalles appropriés tout au long de leur durée de vie. Lorsque les résultats de l'inspection l'indiquent, des mesures correctives rapides peuvent être prises pour maximiser la production, optimiser les temps d'arrêt et assurer un milieu de travail sécurisé.

**Les services comprennent**

- L'examen de référence des tubes de reformage (lorsqu'ils sont neufs, avant la mise en service)
- L'examen régulier des tubes de catalyseurs et de reformage tout au long de leur durée de vie (tous les 2 à 4 ans)
- L'évaluation de la durée de vie restante des tubes de reformage au moyen de méthodes non destructives
- Les essais destructifs des tubes de reformage à l'aide de tubes échantillon sélectionnés par l'intermédiaire de laboratoires tiers
- Le contrôle des contraintes et de la perméabilité magnétique des « pigtails » de sortie
- L'inspection du diamètre intérieur par courants de Foucault des extrémités supérieures
- Divers supports en fonction des besoins

LEO-SCAN

## Inspection externe des tubes (LEO-Scan)



Dans le but d'inspecter les tubes catalyseurs de reformage utilisés dans les reformeurs de méthane à vapeur, FOERSTER a mis au point et construit le système exclusif, LEO-Scan, permettant une inspection effectuée depuis l'extérieur des tubes à l'aide des techniques par courants de Foucault et laser.

L'ensemble du système LEO-Scan est monté sur un robot qui parcourt le tube. La construction spéciale de ce robot permet aux capteurs de contrôler du sol – selon la conception du reformer – jusqu'au toit du four. Incluant, le cas échéant les zones situées sous le sommet des conduits de gaz de combustion. Les sondes et les lasers sont montés près de la partie inférieure du robot, ce qui permet de prendre des mesures dans les zones les plus critiques du reformer à débit descendant, c'est-à-dire dans la partie la plus chaude du tube. Ce dispositif est également destiné à tester les reformeurs avec un espace entre tubes aussi étroit que 20 mm (0,79 pouce). Ceci permet l'inspection de four disposant d'espacements très serrés entre diamètres externes. D'autres configurations de robot et des sondes sont également disponibles pour tester les reformeurs à débit élevé. Aucun nettoyage des tubes n'est nécessaire.

Le système par courants de Foucault est étalonné avec un tube de reformage réel long de 0,4 m (15,75 pouces)

fendu sur la longueur et comportant un défaut artificiel réalisé par électroérosion (EDM) sur le diamètre interne du tube. L'étalonnage permet de vérifier à la fois l'identification des défauts et la pénétration de l'épaisseur totale de la paroi.

L'appareil LEO-Scan utilise un système laser à deux axes pour mesurer le diamètre externe des tubes sur toute leur longueur à l'intérieur du four. La mesure du diamètre externe, bien qu'elle ne soit pas l'outil d'inspection primaire, est un test secondaire important pour identifier le fluage. L'utilisation de lasers pour cette inspection garantit la répétabilité et permet d'enregis-

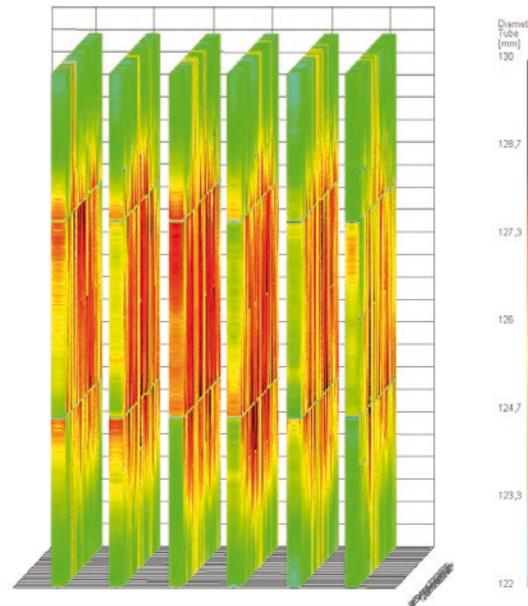


Figure 1 : Résultats d'une inspection typique

trer numériquement le diamètre du tube sur toute la longueur à l'intérieur du reformer.

Cette technique permet de repérer les tendances dans le profil de combustion du four et d'isoler les zones à problèmes liés au chargement du catalyseur ou à l'état du catalyseur. Les problèmes de débit de gaz de combustion peuvent également être isolés à l'aide de ces données. Les résultats du diamètre externe et les relevés des courants de Foucault sont utilisés et affichés simultanément, ce qui facilite cette interprétation.

Il s'agit du seul système par courants de Foucault éprouvé en fonctionnement aujourd'hui qui pénètre l'épaisseur complète de la paroi du tube jusqu'à 24 mm (0,95 pouce). Au fur et à mesure que le robot remonte les tubes, les sondes par courants de Foucault de conception appropriée délivrent les signaux pour l'évaluation. Non seulement le système enregistre les variations de perméabilité magnétique, mais plus important encore, le système traite et surveille en continu les signaux de contrôle par courants de Foucault lui permettant de détecter les fissures et les défauts dans la paroi du tube ainsi que ceux à la surface des diamètres externe et interne. Étant donné que le système fonctionne sans contact (induction électromagnétique), LEO-Scan n'utilise aucun couplant (par ex. de l'eau) ce qui permet un examen complet, absolument répétable.

La répétabilité est un élément clé de ce type de contrôle. L'appareil LEO-SCAN permet de superposer et de comparer directement les résultats de chaque inspection d'une année sur l'autre. Toute déviation des signaux peut être corrélée à des dommages dans la paroi du tube. Cela contraste nettement avec les contrôles par ultrasons : la variation liée à la résistance du couplage élimine la répétabilité et la difficulté de pénétration de ces matériaux – par exemple, les effets de la rugosité de la coulée et de la grosseur des grains (haute dissipation/amortissement) – fait des ultrasons une solution non appropriée pour le contrôle des tubes coulés par centrifugation.

En utilisant jusqu'à quatre lasers (en fonction des espacements tube à tube), le LEO-Scan mesure le diamètre extérieur en même temps qu'il effectue le contrôle par courants de Foucault. Les lasers permettent une précision et une répétabilité maximales. La procédure secondaire qui consiste à mesurer le diamètre du tube afin de révéler le fluage normal, peut également aider à pointer vers les conditions probables qui ont causé les dommages.

### **Il existe trois scénarios suivants lesquels des dommages peuvent se produire dans les tubes de reformage**

- Il est possible que des fissures se forment sans croissance du diamètre à la suite de perturbations opérationnelles, de problèmes de catalyseur ou d'impact de flamme (surchauffe à court terme), de problèmes de distribution du flux de gaz de combustion et de chocs thermiques.
- La croissance du diamètre peut se former sans fissuration (surchauffe à long terme).
- Une combinaison des deux.

Le LEO-Scan a la capacité de détecter des défauts complexes grâce à sa combinaison du contrôle par courants de Foucault et des mesures laser, ce qui en fait l'un des systèmes les plus complets et efficaces du marché.

Si cela est justifié, sur la base des résultats de l'inspection ou du vieillissement des matériaux, une évaluation de la durée de vie restante des tubes (approche non destructive fondée sur les contraintes) peut être recommandée. Elle fournira des calculs de durée de vie restante basés sur l'expérience et l'expertise de professionnel dans la prise de décisions d'aptitude au service (Fitness for Service - FFS), une stratégie de remplacement et une aide aux achats pour la gestion globale des tubes. Le résultat final de cette analyse fournit à nos clients une évaluation suivant le Code d'Aptitude au Service API-579 Niveau II.



LEO-Scan

La figure 2 montre la superposition de plusieurs années d'inspections effectuées par l'extérieur du tube. Idéalement, ces tableaux commencent par une inspection de base, sur laquelle vient se superposer les inspections successives. Les changements des signaux liés au diamètre extérieur et aux courants de Foucault sont immédiatement visibles et faciles à évaluer. Ce graphique montre clairement les changements (augmentation) du diamètre extérieur, sur la gauche du graphique ce qui représente le bas du tube.

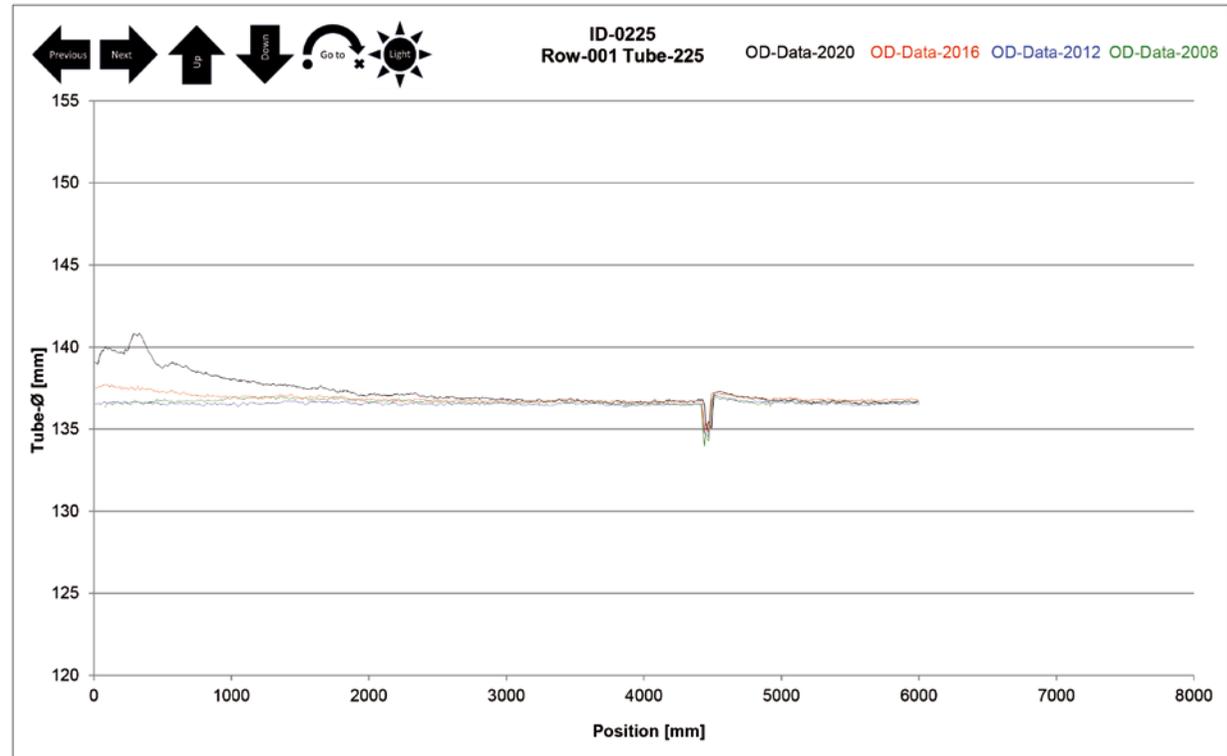
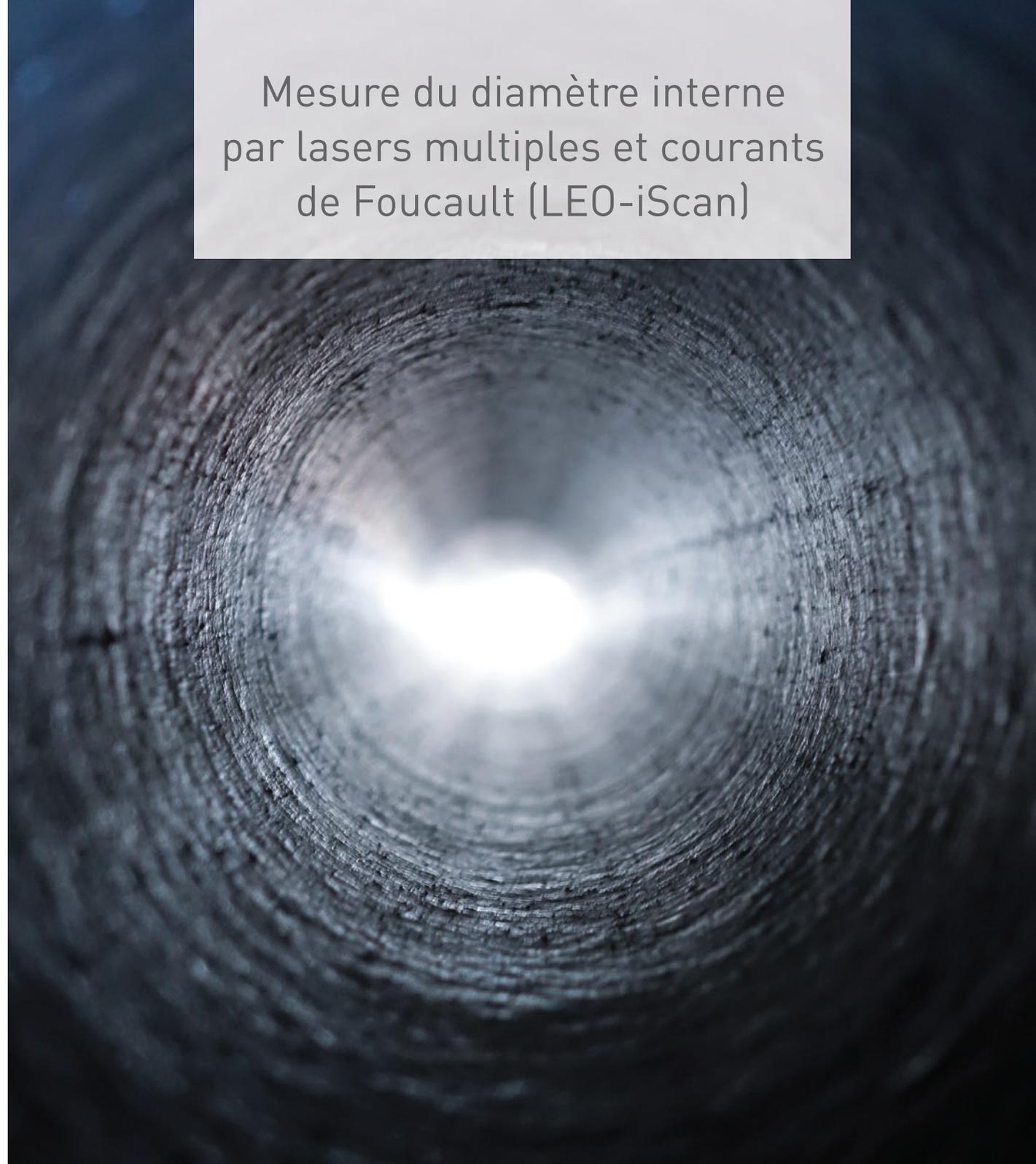


Figure 2 : Quatre inspections du diamètre extérieur d'un tube de reformage sont superposées pour montrer les changements au fil du temps (données de référence en 2008 et inspections en 2012, 2016 et 2020)

Un nouvel appareil sophistiqué développé par la BU Inspection est désormais disponible : LEO-iScan. Ayant fait ses preuves sur le terrain, il comprend une unité laser puissante qui mesure très précisément le diamètre intérieur combinée à un système par courants de Foucault. L'inspection commence au sommet de la bride du tube et se poursuit jusqu'à la grille de support du catalyseur. Cela n'est possible que lorsque les tubes sont en cours de remplacement du catalyseur. Comme les surfaces intérieures des tubes de reformage sont usinées, ces lectures montrent facilement la croissance du fluage même en l'absence de données (de référence) antérieures. Le système utilise huit lasers configurés sur quatre axes pour obtenir une image complète du diamètre interne du tube.

L'un des avantages de l'utilisation des courants de Foucault pour l'inspection interne est la proximité des sondes avec les défauts potentiels liés au fluage, qui commence généralement à environ 1/3 de la surface du diamètre interne. Le système a été mis au point pour les fours qui peuvent nécessiter une surveillance des défauts causés par le fluage sous le sol, ou pour les tubes qui se touchent en raison d'une inclinaison importante, ce qui les rend inaccessibles de l'extérieur. Il peut également être utilisé comme contrôle secondaire pour vérifier l'état de fluage d'un tube. Les résultats montrent le diamètre du tube en 3D sur 360°. Cette information peut être présentée pour des tubes simples, des rangées simples ou le réformer en entier.

## Mesure du diamètre interne par lasers multiples et courants de Foucault (LEO-iScan)



# Surveillance de l'état des tubes de raccords « pigtails » de sortie



Les pigtails de sortie sont des composants critiques qui nécessitent une inspection rigoureuse en raison de leur emplacement et de leur fonction prévue. Pour l'identification et la détermination du fluage, nous avons développé un dispositif unique pour mesurer les pigtails diamétralement à la sortie du tube du collecteur.

Les mesures sont effectuées sur deux axes, cette configuration permet d'évaluer l'augmentation du diamètre des pigtails des sections droites et des coudes, en tenant compte des différences inhérentes (et normales) de diamètre dues au processus de pliage. Comparé aux tests manuels, ce nouveau système est très rapide, fiable et reproductible. Il fournit également un profil de diamètre précis sur toute la longueur du pigtail, ce qui donne lieu à une évaluation du fluage sous forme numérique qui peut être utilisée pour de futures évaluations. Il est également possible de mesurer la perméabilité du pigtail de sortie à l'aide d'un MAGNETOSCOP de chez FOERSTER. Ceci est particulièrement important lorsqu'il s'agit de raccorder les pigtails en cas de défaillance du tube : il est important de déterminer ici que le matériau soit dans un état approprié, c'est à dire avec une ductilité suffisante, pour permettre le raccordement. Cette procédure permet d'isoler les tubes qui fuient sans nécessiter l'arrêt de la production. Récemment, de nombreuses usines ont eu besoin d'un arrêt, ou du moins d'une réduction du débit de vapeur, juste pour permettre le raccordement.

# Inspection des extrémités supérieures



La norme historiquement acceptée pour l'examen des tubes de reformage en service dans les reformeurs de méthane à vapeur (PRM) a été d'inspecter la longueur chauffée du tube dans le four. Cependant, les tendances récentes ont changé cette perspective, en raison de la découverte de défauts internes et de dommages dans ces parties du tube jusqu'ici non inspectées aux extrémités supérieures dans certaines conceptions d'usine. On a trouvé des défauts dans deux configurations complètement différentes : une conception à bas débit et

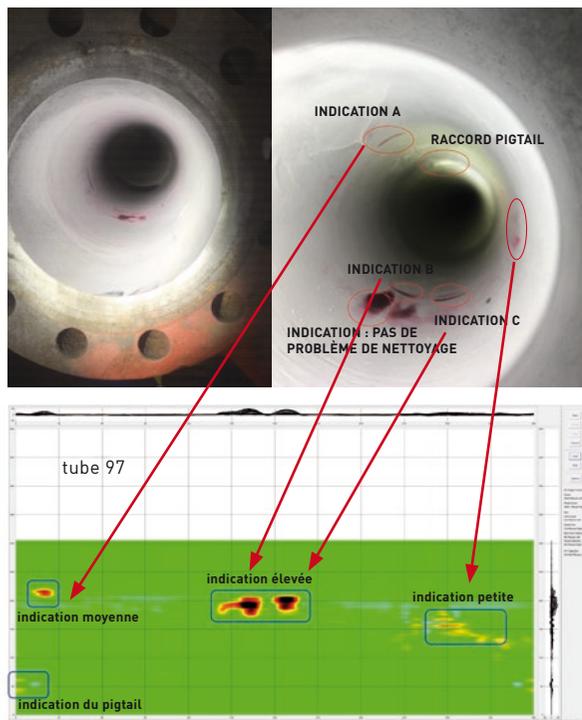


Figure 3 : Examen représentatif de l'extrémité supérieure montrant les défauts



Figure 4 : Extrémité supérieure classique

une conception à haut débit. Dans les deux cas, un mécanisme de dommage appelé « fatigue thermique » était à blâmer.

Il est nécessaire de souligner que ces fissures commencent à l'intérieur et se propagent vers l'extérieur, n'offrant aucun avertissement jusqu'à ce qu'une défaillance inattendue interrompe la production. Il est également important de savoir que ces fissures ne montrent généralement aucun fluage mesurable. Par conséquent, une inspection efficace des extrémités supérieures doit détecter les fissures plutôt que les dommages liés au fluage.

Les défaillances de ce type peuvent causer des dommages matériels catastrophiques, des pertes de production et des manquements à la sécurité. C'est dans ces zones peu visitées que sont les extrémités supérieures des tubes de reformage qu'un incendie peut se déclarer. Les têtes de tubes adjacents, les pigtails d'entrée et la structure en acier peuvent surchauffer, déclenchant ainsi une cascade d'autres défaillances. La BU Inspection a mis au point une technique fiable et un dispositif spécialisé pour contrôler ces zones supérieures des tubes afin d'éviter de tels désastres. Une sonde de contrôle par courants de Foucault, construite à cet effet, examine les extrémités supérieures à la recherche de fissures et autres signes de fatigue thermique. L'identification rapide de ces défauts contribue au fonctionnement sûr et fiable du reformeur et peut prévenir des incendies qui peuvent entraîner des pertes importantes.

La figure 3 montre un examen typique de l'extrémité supérieure du tube de reformage, montrant des fissures dans la paroi du tube qui rayonnent vers l'extérieur à partir de la surface intérieure. Le client a vérifié les fissures au moyen d'un contrôle par ressuage (PT). La détection rapide de tels défauts peut augmenter la fiabilité et protéger la valeur du bien tout en garantissant la sécurité.

Qu'est-ce que l'évaluation  
de la durée de vie restante  
de vos tubes ?



Le logiciel propriétaire TubeLife développé dans un but collaboratif a été créé expressément pour combler les écarts dans les évaluations de la durée de vie restante des tubes de reformage : auparavant, il n'y avait pas de normes ni de pratiques accessibles au public qui traitaient officiellement de la complexité du comportement de la vie des tubes de reformages. TubeLife y parvient en intégrant les données de déformation et de taille des fissures dans son modèle propriétaire.

Dans le passé, les estimations pour une quantité importante de tubes étaient basées sur les principes et les éléments des normes post-construction telles que l'API 571, l'API 579, R5 et/ou BS7910. Cependant, l'application de ces normes est loin d'être idéale, car

elles ne reflètent pas directement la complexité des mécanismes de dommages qui affectent la longévité des tubes de reformage. Un modèle Dyson modifié incorporé dans TubeLife évalue la contrainte accumulée sur une période donnée comme moyen de projeter la dégradation des matériaux et de calculer la durée de vie restante. De plus, l'analyse pondère toutes les mesures par courants de Foucault qui indiquent des dommages sur les parois car les fissures déclenchent généralement le mode de défaillance du tube. Le logiciel s'appuie également sur les données diamétrales effectuées par le laser (mesures de déformation), ainsi que sur les informations relatives au process et à l'historique des arrêts.

Le modèle fait appel à plusieurs mécanismes de dégradation connus dans les tubes de reformage. Il s'agit notamment du vieillissement/adoucissement thermique, de l'adoucissement par déformation, du grossissement de la structure des grains (en particulier des carbures secondaires) et de l'augmentation de la densité de dislocation, de la formation/cavitation et croissance de vides de fluage. L'intégration de plusieurs types de dégradation permet d'obtenir des estimations réalistes de la durée de vie restante en fonction de l'accumulation de contraintes sur la durée de vie du tube, couplée à une évaluation précise de la formation de fissures grâce aux signaux par courants de Foucault. Cette technique d'évaluation a été exécutée avec succès pour de nombreuses entreprises dans le monde entier.

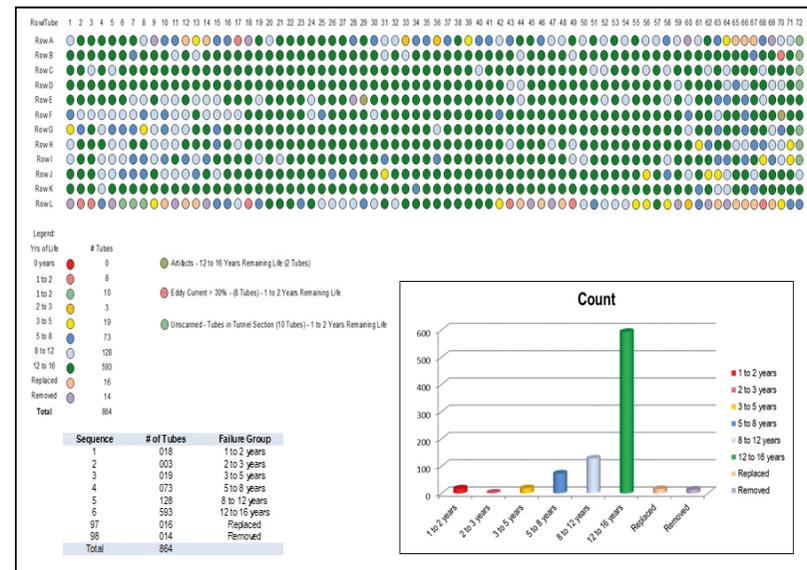


Figure 5 : Résultats classiques de l'évaluation de la durée de vie restante

## Contrôle de fissure par courants de Foucault

### Contrôles non destructifs à l'aide de la méthode des courants de Foucault

De nos jours, l'attention portée à la qualité – sans parler des risques liés à la responsabilité du produit – nécessite de plus en plus des inspections à 100 %. La méthode par courants de Foucault selon la norme DIN EN ISO 15549 est une méthode non destructive et sans contact pour les contrôles de matériaux. Il révèle des défauts tels que des fissures, des porosités, des cavités et des artefacts

matériels, et fonctionne rapidement, de manière fiable et économique – sans nécessiter l'utilisation de liquides de couplage.

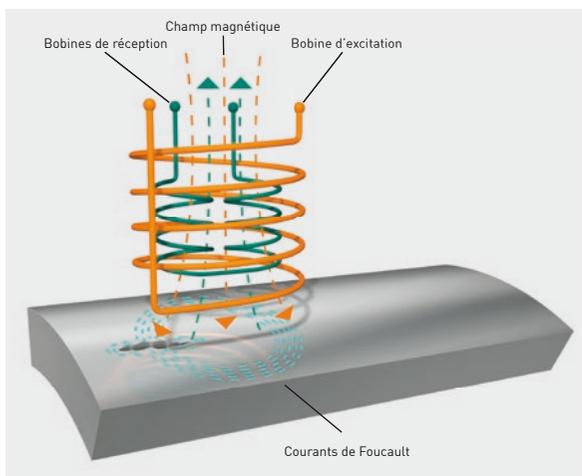


Figure 6 : Le principe de contrôle par courants de Foucault

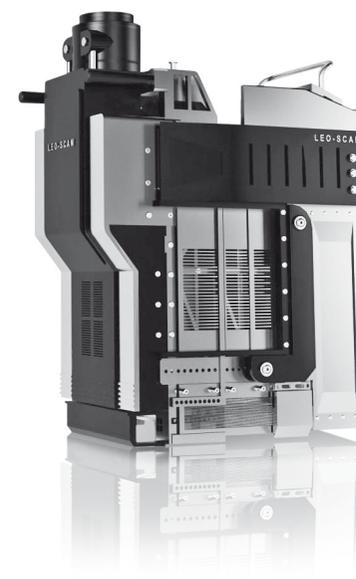
Un champ magnétique est généré par une bobine d'excitation qui induit des courants de Foucault à haute fréquence dans le matériau. Le signal obtenu est généralement issu d'une bobine de mesure différentielle. Ce signal obtenu est évalué par rapport à son amplitude et sa phase par rapport au signal d'excitation, permettant même de détecter les plus petits défauts du matériau.



Figure 7 : Agrandissement d'une photomicrographie d'une fissure de fluage

## Contrôle de fissures

Pour la détection des fissures, la sonde par courants de Foucault est déplacée le long d'un échantillon stationnaire. Tant que le matériau n'est pas endommagé, les courants de Foucault circulent uniformément, car la résistance électrique est homogène. Mais là où il y a une fissure, la densité des courants de Foucault apparaît différemment de celle d'une partie intacte. Ce changement est enregistré et affiché comme un signal d'erreur. La pénétration dépend des fréquences utilisées : alors que les fréquences plus élevées se concentrent sur la surface du matériau, les fréquences plus basses pénètrent plus profondément dans le matériau. Le type de sonde, la taille de la sonde et la fréquence de contrôle sont choisis en fonction du type de test souhaité et du matériau à tester.



LEO-Scan

**La tour d'essais FOERSTER – Notre installation pour des essais grandeur nature et mettre à l'épreuve nos équipements de contrôle**

La tour d'essai nouvellement installée, qui contient plusieurs tubes dans leur position verticale d'origine (y compris la bride supérieure), est une représentation parfaite d'une rangée de tubes de catalyseur dans un reformeur de méthane à vapeur. Cette configuration permet d'utiliser nos équipements dans des conditions réelles pour tester de nouveaux développements ou optimiser des prototypes et des modifications. Cette tour est maintenant disponible pour réaliser des essais avec des systèmes de contrôles automatisés, externes (OD) et internes (ID). De plus, cette installation permet de tester le logiciel en termes d'application de programmes de contrôle et de collecte de données en temps réel lors de l'utilisation d'un appareil avancé de contrôle par courants de Foucault.



DANS LE MONDE ENTIER

Une présence mondiale – géré  
depuis Reutlingen, Allemagne



**Opérant dans le monde entier – n'importe quand, n'importe où.**

Dès le départ, le Groupe FOERSTER s'est efforcé de développer son réseau mondial d'experts afin d'opérer efficacement et prudemment sur les marchés mondiaux. Partout dans le monde, les contrôles de tubes de reformage sont nécessaires – notre BU Inspection est là pour vous, prête à répondre à vos besoins et à vos exigences.

**Siège social**

- Institut Dr. Foerster GmbH & Co. KG, Germany

**Filiales**

- FOERSTER Instruments Inc., Americas
- FOERSTER (LOTIS & MANTIS), Americas
- US Thermal Technology Inc. (USTT), Americas
- FOERSTER (Shanghai) NDT Instruments Co., Ltd., China
- FOERSTER Japan Ltd., Japan
- FOERSTER France SAS

**Représentants**

- Hydro Kleen Systems do Brasil Limpeza Industrial Ltda, Brazil, Argentina
- Middle East Star (MES) – Tragency Middle East, Egypt
- Pipeline Supply Company LLC. (India), India
- PT. Profluid, Indonesia
- NDT Corrosion Control Services Co. (NDTCCS), Kingdom of Saudi Arabia, Bahrain
- Calibre Petrochem SDN. BHD., Malaysia
- Leap Engineering Solutions, Pakistan
- Marant Polska SP z o.o., Poland
- Arsenal Group Co. Ltd, Russia
- Safetech Co., Ltd., South Korea
- Pipeline Supply Company LLC. (PSC), Sultanate of Oman



**FOERSTER**

Parent Company of MP and USTT  
Owner of LOTIS and MANTIS Technology

**Institut Dr. Foerster GmbH & Co. KG**

In Laisen 70 | 72766 Reutlingen | Allemagne

+49 7121 140 0 | m +49 160 9461 7857

inspection@foerstergroup.com

[foerstergroup.com](http://foerstergroup.com)

**U.S. Thermal Technology Inc.**

**A FOERSTER Group Company**

140 Industry Drive | Pittsburgh, PA 15275

+1 412 788 8976 | m +1 713 806 6561

inspection@foerstergroup.com

Kara Ellis

**FOERSTER INSTRUMENTS INC.**

**(LOTIS & MANTIS)**

906 Geneva Street, Shorewood, IL 60404

C: 815-979-3238

[kara.ellis@foerstergroup.com](mailto:kara.ellis@foerstergroup.com)