

DÉTECTION ET CARACTÉRISATION SPATIALE DE LA CORROSION LOCALISÉE DES ACIERS AU CARBONE EN MILIEU ANAÉROBIE SULFUROGÈNE

D. Festy¹, B. Forest¹, M. Keddam², R. Marchal³, N. Monfort Moros^{2,3}, B. Tribollet²

1. IFREMER, Centre de Brest, Service Matériaux et Structures, Plouzané

2. UPR 15 du CNRS Laboratoire de "Physique des Liquides et Electrochimie", Paris

3. Institut Français du Pétrole, Division Chimie et Physico-Chimie Appliquée,
Département Microbiologie, Rueil-Malmaison

DETECTION AND SPATIAL CHARACTERIZATION OF CARBON STEEL PITTING CORROSION IN ANAEROBIC SULPHOGENIC MEDIUM

ABSTRACT: The biofilm developing on carbon steel surfaces in anaerobic condition may induce localised corrosion. To be able to better understand this type of biocorrosion, this paper presents a new electrochemical technique, which has been developed in collaboration between IFREMER and the Laboratory for liquid physic and electrochemistry. Focussed on local aspect of this phenomenon, the described technique enables surface current density mapping to be performed and anodic or cathodic zones to be identified. A double microelectrode probe is placed closed to the steel sample surface and potential difference between them is measured. This value is directly connected to ohmic drop within electrolyte and consequently, to local current. By scanning the substrate surface, local current repartition is visualised and one can detect and characterise localised corrosion attacks. After presenting the technique and the calibration procedure, a biocorrosion phenomenon induced by scrapping a biofilm at a carbon steel sample surface is analysed by successively drawing localised current maps, included biocide efficiency assessment.

RÉSUMÉ: La présence à la surface des aciers au carbone d'un biofilm développé en milieu anaérobie peut, dans certains cas, induire une attaque de corrosion localisée. Dans le cadre d'une meilleure compréhension de cette biocorrosion, une nouvelle technique électrochimique, développée en collaboration entre l'IFREMER et le Laboratoire de Physique des Liquides et d'Electrochimie, est présentée. Destinée à l'étude de l'aspect local de ce type de phénomène, la technique décrite permet d'établir une cartographie de densité de courant sur une surface métallique et d'identifier les zones jouant un rôle anodique et celles jouant un rôle cathodique. Pour cela, une sonde de mesure constituée de deux micro-électrodes est positionnée au voisinage de la surface du substrat et la différence de potentiel entre ces deux électrodes est mesurée, permettant d'accéder à la valeur de la chute ohmique dans la solution et, par conséquent, à celle du courant local. Le balayage de la surface étudiée permet de visualiser la répartition des courants locaux et ainsi détecter et caractériser les attaques de corrosion localisée: étendue de la zone anodique et densité de courant. Suite à la présentation de la technique et de la procédure de mise au point, un phénomène de biocorrosion amorcée mécaniquement sur un coupon métallique est analysé par tracé de cartographies successives, y compris l'évaluation de l'efficacité d'un biocide.

La présence à la surface des aciers au carbone d'un biofilm développé en milieu anaérobie, peut dans certains cas induire une attaque de corrosion localisée [1-7]. Parmi les nombreuses voies d'investigation de ce type de corrosion, il peut être utile de chercher à caractériser les événements électrochimiques locaux. Cette approche a largement été étudiée pour la corrosion de surface brute [8-11] et nettement

moins en présence d'un film [12, 13]. La technique de balayage d'électrode à référence (SRET pour *Scanning Reference Electrode Technique*) a été utilisée pour localiser l'apparition de sites de corrosion localisée dans le cas de corrosion intergranulaire par piqûre et de rupture par corrosion sous contrainte [14-17]. La technique de balayage par électrode vibrante (SVET pour *Scanning Vibrating Electrode Technique*) est plus [18-20] que la technique SRET dans la détection de courant direct et a été appliquée avec succès dans la détection de défauts dans les revêtements organiques et inorganiques. La Spectroscopie par Impédance Electrochimique a été utilisée pour étudier la dégradation de métaux revêtus exposés à de nombreux environnements [21]. Cependant, l'interprétation des données est généralement difficile par la complexité des systèmes étudiés et par le fait que les données d'impédance sont relatives à un phénomène généralisé alors que la dégradation se développe souvent sous une forme localisée. La contribution des réactions de corrosion au spectre d'impédance global est difficilement discernable. Plusieurs tentatives pour développer une technique de balayage d'impédance sont rapportées dans la littérature. Une technique utilisait une géométrie de cellule à couche mince. La taille de la sonde était suffisamment large et limitait la résolution spatiale et tout transport de masse prenant place [22].

Une nouvelle méthode de mesure de spectre d'impédance locale a été rapportée par Lillard *et al.* [23] et récemment étudiée par Bayet *et al.* [24, 25]. Dans cette méthode, la spectroscopie d'impédance électrochimique locale (LEIS pour *Local Electrochemical Impedance Spectroscopy*) est déduite des courants alternatifs locaux. La densité de courant alternatif est déterminée à partir des gradients de potentiel au-dessus d'une surface en utilisant un capteur réalisé à cet effet.

Cependant, une meilleure compréhension de l'origine des défauts et des caractéristiques de croissance d'une biocorrosion demande davantage d'information, à un niveau microscopique : aussi bien la répartition des zones électrochimiques que la microstructure du biofilm doivent faire l'objet d'une plus ample recherche. C'est pour cela qu'un capteur électrochimique d'investigation locale en mesure de détecter, localiser et caractériser les défauts engendrés par un processus de biocorrosion permettrait une analyse plus détaillée des facteurs contrôlant l'amorçage et le maintien de la biocorrosion. La technique de cartographie par micro-électrodes développée dans le cadre d'une collaboration entre l'UPR15 du CNRS et le Service Matériaux et Structures de l'IFREMER participe ainsi à la compréhension de la biocorrosion des aciers au carbone en présence de bactéries sulfato-réductrices, en considérant comme paramètre majeur le courant local au niveau des zones de piqûre de corrosion.

Principe

La technique de cartographie développée est basée sur la mesure de la différence de potentiel (ddp) entre deux micro-électrodes bloquantes à proximité d'une surface électriquement active. Cette ddp correspond à la chute ohmique au sein de la solution proche de la surface métallique (fig. 1). Le dispositif expérimental développé est constitué d'une sonde de mesure à deux micro-électrodes introduite dans une cellule d'électrochimie montée sur une table X-Y-Z.

La sonde de mesure est constituée de deux fils d'argent isolés par un vernis polyuréthane disposés dans un tube plastique

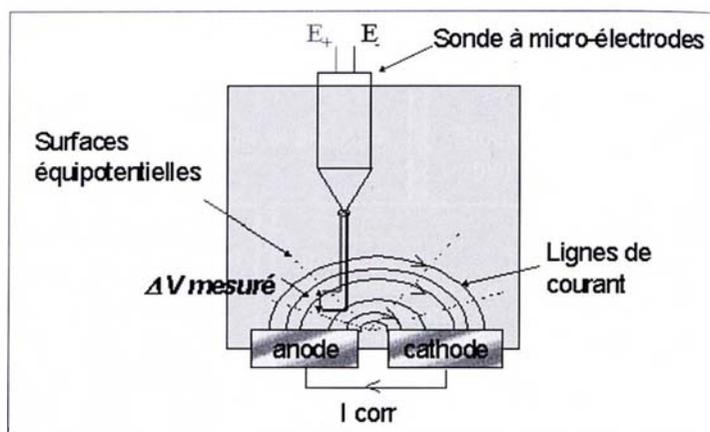


Fig. 1 - Schéma de principe de la mesure de la chute ohmique.

Fig. 1 - Ohmic drop measurement principle.

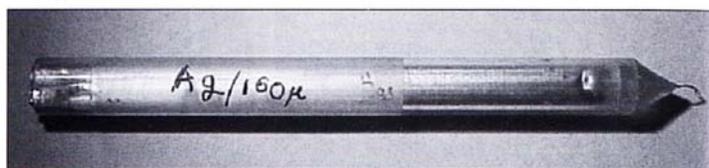


Fig. 2 - Sonde à double micro-électrodes.

Fig. 2 - Double microelectrodes probe.

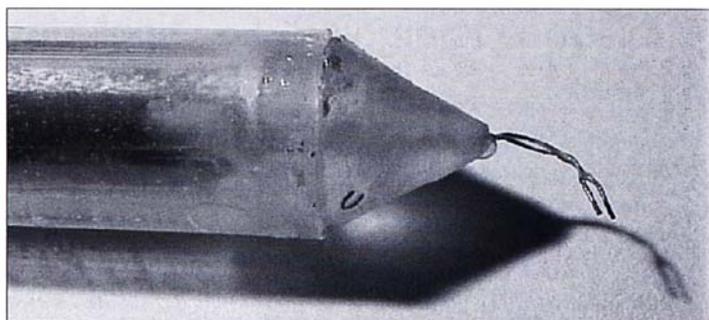


Fig. 3 - Détail de la sonde.

Fig. 3 - Probe detail.

terminé par un cône percé en son centre (figures 2 et 3). Le extrémités des fils d'argent, les micro-électrodes, sont positionnées parallèlement à l'axe de la sonde et séparées d'une distance d'environ 0,4 mm.

Les micro-électrodes sont finalement conditionnées dans une solution à 3 % de NaCl afin d'obtenir un film d'AgCl par polarisation anodique selon la réaction $\text{Ag} + \text{Cl}^- \rightarrow \text{AgCl} + \text{e}^-$.

Le montage expérimental comprend (fig. 4) :

- une cellule électrochimique à double paroi,
- une table X-Y-Z (MM4005, Newport) constituée de trois moteurs pas à pas orientés selon les trois axes orthogonaux,
- un système d'acquisition d'images par caméra vidéo (KPC 550, Hitachi).

La cellule de biocorrosion (fig. 5) est réalisée en Plexiglas®. L'électrode de travail (coupon cartographié) est positionnée horizontalement au fond de la cellule. Une double paroi permet une régulation thermique de l'enceinte. Une entrée et une sortie sont aménagées pour la circulation d'un liquide dans la cellule ainsi qu'une entrée et une sortie situées sur le couvercle de la cellule pour la circulation d'un gaz dans le ciel de la cellule d'électrochimie. Un joint tubulaire souple est fixé entre le couvercle et la cellule d'électrochimie pour conserver le caractère

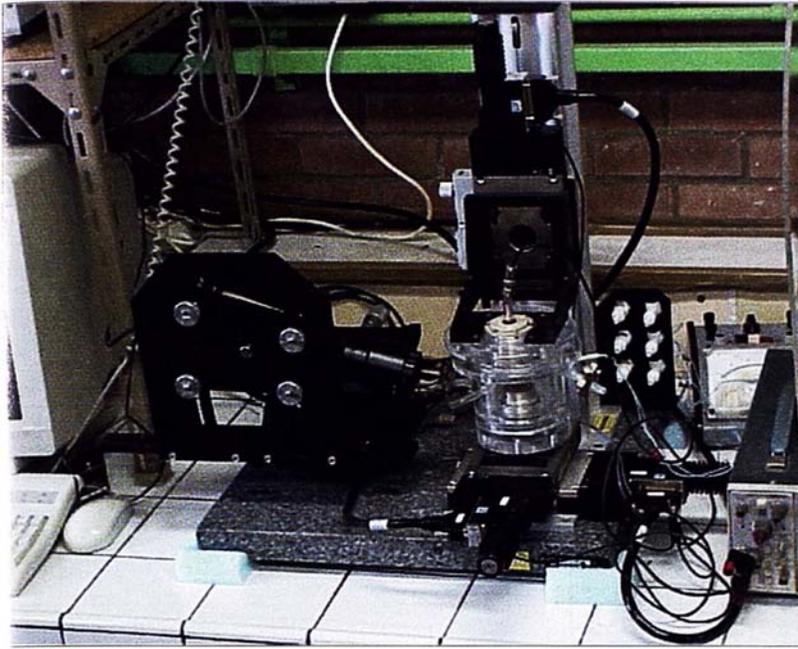


Fig. 4 - Montage expérimental pour la réalisation de cartographies de densité de courant.
 Fig. 4 - Current density mapping experimental device.

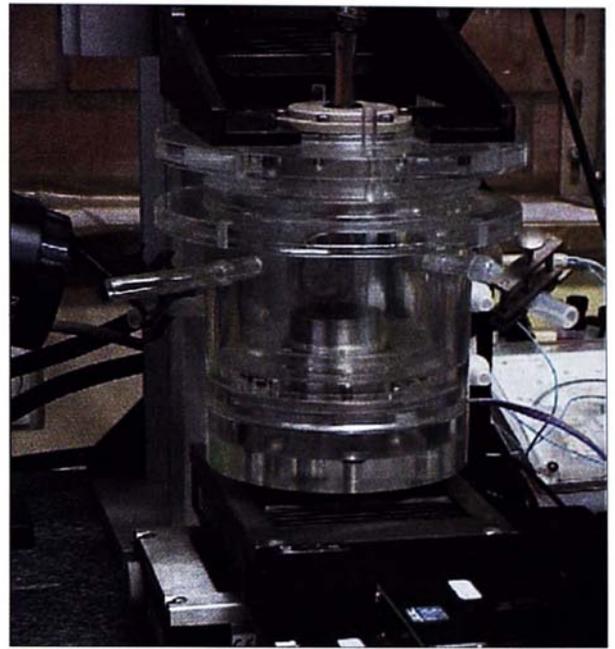


Fig. 5 - Cellule de biocorrosion montée sur table X-Y-Z.
 Fig. 5 - Biocorrosion cell set on X-Y-Z table.

naérobie à l'ensemble tout en autorisant le déplacement de l'un par rapport à l'autre.

Les mouvements suivant les axes X et Y de la table permettent de déplacer la cellule, et donc le coupon, dans le plan horizontal. La troisième motorisation permet d'abaisser ou relever la sonde de mesure, afin d'approcher les micro-électrodes de la surface du coupon de façon reproductible et d'éviter l'arrachement du biofilm par la sonde lors des déplacements. En effet, le positionnement initial (distance à la surface du coupon) de la sonde est réalisé avec l'aide de la caméra vidéo. Cette position est enregistrée pour réaliser les cartographies car, en présence d'un biofilm, la surface du coupon n'est plus visible. De plus, le déplacement de la sonde de mesure à hauteur constante provoque l'arrachage du biofilm et peut induire l'amorçage de la corrosion localisée [26]. La sonde est donc relevée avant d'être déplacée et repositionnée pour la mesure suivante.

Le montage expérimental est complété par une chaîne de mesures composée principalement par un amplificateur différentiel (AM 502, Tektronix), d'un filtre (VBF8, Kemo) et d'une carte d'acquisition spécialisée équipant un ordinateur. Un logiciel adapté permet le pilotage de l'ensemble expérimental (déplacements de la sonde et mesures).

La densité de courant ponctuelle, j (en A/cm^2), est calculée à partir de la valeur de la chute ohmique (équation 1).

$$j = \frac{\Delta\Phi}{\rho \cdot d} \quad (1)$$

Avec : $\Delta\Phi$ la différence de potentiel entre les deux micro-électrodes (V), ρ la résistivité de l'électrolyte en ($\Omega \cdot cm$) et d la distance entre les deux micro-électrodes (cm).

Calibration

La calibration de l'ensemble expérimental décrit est réalisée en disposant dans la cellule électrochimique une électrode disque/anneau (fig. 6).

- la solution expérimentale est une solution aqueuse de chlorure de sodium NaCl 3% dont la résistivité est de $24 \Omega \cdot cm$,
- l'électrode de travail est le disque central, d'une surface de $3,14 \text{ mm}^2$ (diamètre = 2 mm),
- la contre-électrode est l'anneau externe, d'une surface de 326 mm^2 ,
- la surface de balayage de la sonde de mesure à micro-électrode est de $10 \times 10 \text{ mm}$,
- $\Delta X = 0,5 \text{ mm}$,
- $\Delta Y = 0,5 \text{ mm}$.

Pour chaque valeur de courant anodique appliqué au disque, une cartographie des courants locaux est réalisée et par intégration directe du profil obtenu (éq. 2) le courant global I (en μA) détecté est calculé.

$$I = \int_{X_{\min}}^{X_{\max}} \int_{Y_{\min}}^{Y_{\max}} j(X, Y) dXdY \quad (2)$$

où $j(X, Y)$ est la densité de courant au point (X, Y) exprimé en $\mu A/mm^2$, dX et dY en mm.

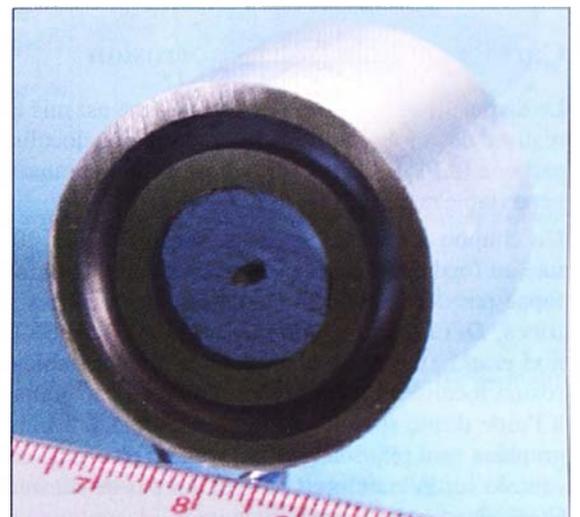


Fig. 6 - Electrode disque/anneau utilisée pour la calibration de la chaîne de mesure.

Fig. 6 - Disk/ ring electrode used for calibration procedure.

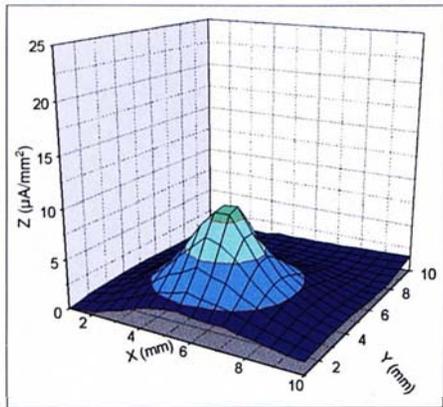


Fig. 7 - Cartographie pour une polarisation de 2 µA.
Fig. 7 - Mapping for 2 µA polarisation.

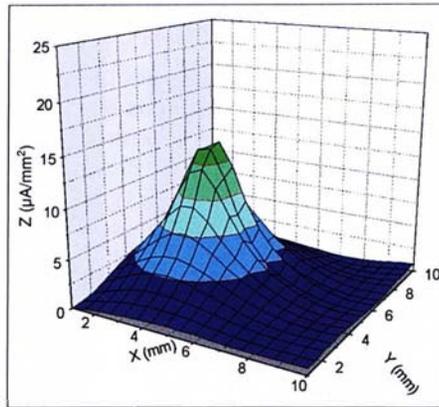


Fig. 8 - Cartographie pour une polarisation de 4 µA.
Fig. 8 - Mapping for 4 µA polarisation.

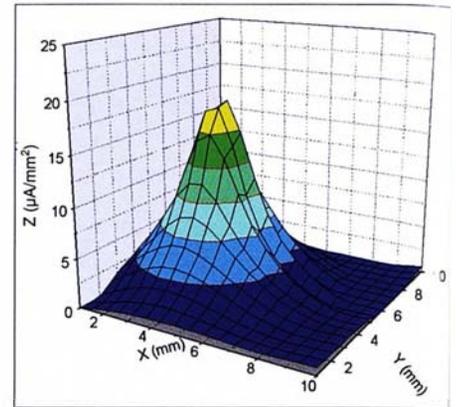


Fig. 9 - Cartographie pour une polarisation de 6 µA.
Fig. 9 - Mapping for 6 µA polarisation.

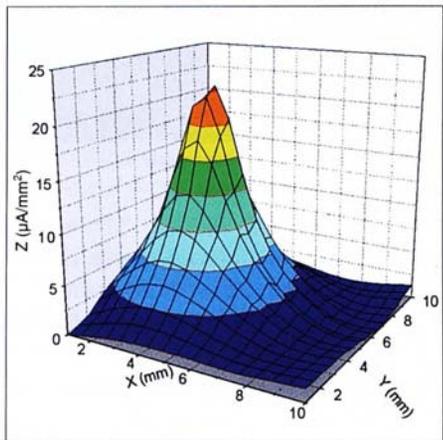


Fig. 10 - Cartographie pour une polarisation de 8 µA.
Fig. 10 - Mapping for 8 µA polarisation.

Fig. 11 - Courant global mesuré fonction du courant appliqué.
Fig. 11 - Overall measured current versus applied current.

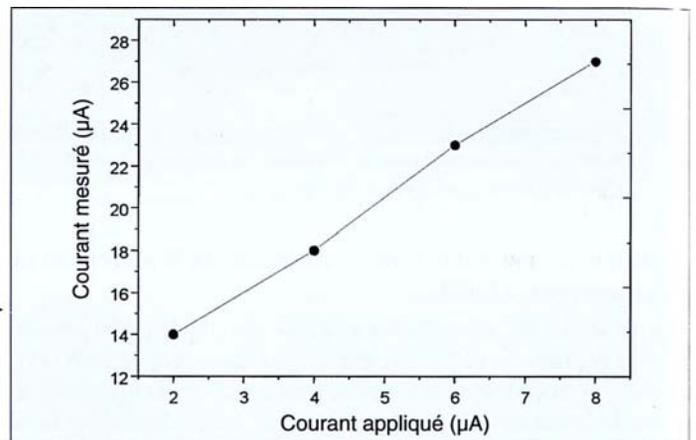


Tableau I - Composition de l'acier API5L Grade 50D.

Table I - API5L steel composition.

C	Cu	Mn	Al	Si	Ni	P	Va	S	Sn	Cr	Ti	Mo	B	Fe
0,063	0,264	1,480	0,052	0,481	0,362	0,0039	Traces	0,0006	0,0192	0,037	Traces	0,091	0,0004	Reste

Les figures 7 à 10 présentent les cartographies réalisées aux différentes valeurs de courant de polarisation anodique du disque. La corrélation entre l'intensité de courant de polarisation et le courant global déduit de l'intégration des cartographies (fig. 11) est utilisée par la suite comme courbe de calibrage pour quantifier un courant de biocorrosion amorcée artificiellement à la surface d'un coupon.

Cartographies d'une biocorrosion

Le dispositif expérimental ainsi étalonné est mis en œuvre pour réaliser des cartographies de biocorrosion localisée d'acier au carbone (API5L Grade 50D) dans un milieu anaérobie sulfurogène (tableau I).

Un coupon d'acier au carbone de dimensions 20 × 30 cm est fixé au fond de la cellule électrochimique. Un biofilm est développé par décantation d'une culture de bactéries sulfato-réductrices, *Desulfovibrio gabonensis* DSM 10636 (Tardy-Jacquenod *et al.*, 1996), circulant dans la cellule (tableau II). La corrosion localisée du coupon est amorcée par grattage du biofilm à l'aide d'une spatule (zone grattée de 1 à 3 mm²). Les cartographies sont réalisées par balayage d'une zone de 10 × 10 mm centrée sur la zone grattée, avec un pas de mesure de 0,25 mm (X et Y).

Tableau II - Composition en g/L de la solution nutritive des BSR.

Table II - Composition of SRB nutritive solution.

Sulfate de sodium Na ₂ SO ₄	2	Extrait de levure	0,25
Hydrogencarbonate de potassium KHCO ₃	0,2	Chlorure de calcium dihydraté CaCl ₂ , 2 H ₂ O	0,1
Sulfate de magnésium heptahydraté MgSO ₄ , 7 H ₂ O	4	Di-hydrogénophosphate de potassium K ₂ HPO ₄	0,5
Chlorure de sodium NaCl	30	Lactate de sodium	2,4
Chlorure d'ammonium NH ₄ Cl	1	Sulfate de fer heptahydraté FeSO ₄ , 7 H ₂ O	0,15.10 ⁻¹
pH	7,4	Température	37,4 °C

La cartographie présentée figure 12 est représentative de la distribution des densités de courant à la surface du coupon métallique en début d'exposition : le profil obtenu est uniforme et de faible amplitude. Après 5 jours de formation de biofilm, la cartographie obtenue est semblable (fig. 13) : la formation du biofilm n'induit pas d'événement de nature électrochimique.

Juste après le grattage d'une partie du biofilm, la cartographie réalisée (fig. 14) permet de détecter une zone à fort caractère anodique, exactement à l'endroit de la zone grattée. La densité de courant maximale est de 20 µA/mm² et le courant global obtenu par intégration des valeurs locales est de 22 µA. La courbe de calibrage (fig. 11) permet de traiter cette dernière

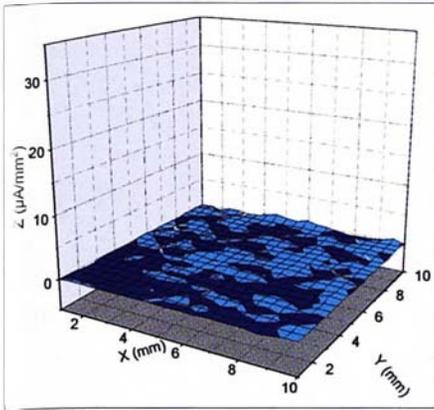


Fig. 12 - Cartographie des densités de courant sur un coupon métallique en milieu bactérien à temps initial.

Fig. 12 - Current density mapping of a metallic coupon exposed to bacterial media: immersion time.

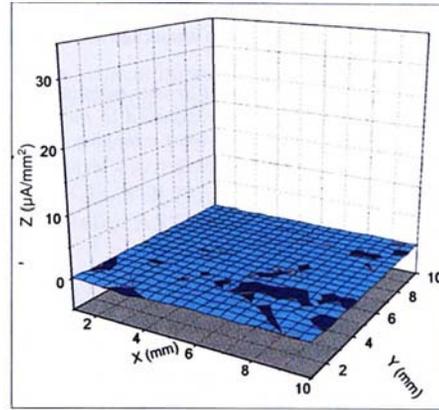


Fig. 13 - Cartographie des densités de courant sur un coupon métallique en milieu bactérien après formation de biofilm.

Fig. 13 - Current density mapping of a metallic coupon exposed to bacterial media: after biofilm development.

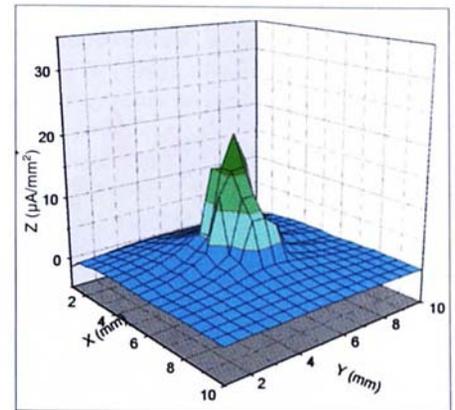


Fig. 14 - Cartographies des densités de courant immédiatement après grattage.

Fig. 14 - Current density mapping of a metallic coupon exposed to bacterial media after scrapping.

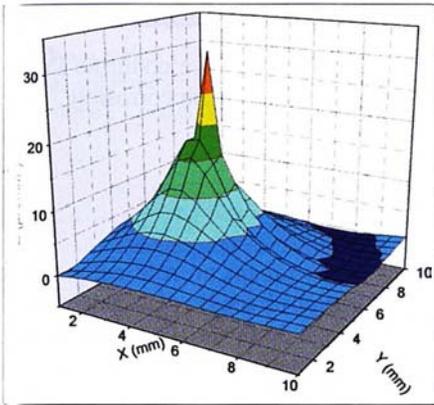


Fig. 15 - Cartographies des densités de courant 24 heures après grattage.

Fig. 15 - Current density mapping of a metallic coupon exposed to bacterial media 24 hours after scrapping.

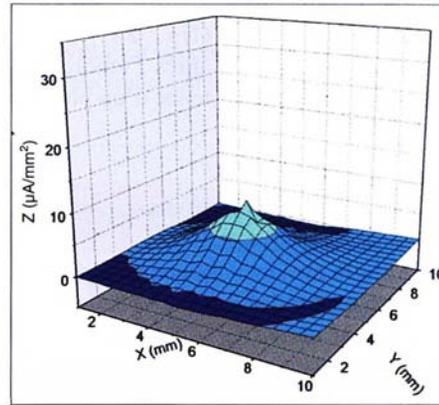


Fig. 16 - Cartographies des densités de courant 72 heures après amorçage mécanique.

Fig. 16 - Current density mapping of a metallic coupon exposed to bacterial media 72 hours after scrapping.

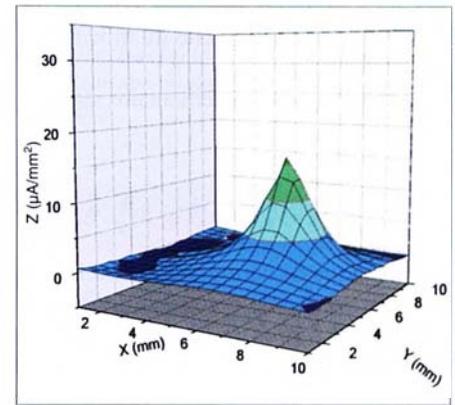


Fig. 17 - Cartographies des densités de courant 96 heures après amorçage mécanique.

Fig. 17 - Current density mapping of a metallic coupon exposed to bacterial media 96 hours after scrapping.

la valeur en courant circulant sur la surface anodique, soit une valeur de $5,8 \mu A$. En considérant une surface anodique de 3 mm^2 , la densité de courant de biocorrosion est de $1,9 \mu A/\text{mm}^2$, équivalent à une vitesse de corrosion de $2,1 \text{ mm}/\text{an}$.

La forte valeur du courant anodique après grattage est en accord avec les valeurs obtenues avec une sonde de mesure de la vitesse de corrosion localisée des aciers au carbone en milieu anaérobie [26].

Vingt quatre heures après l'amorçage de la biocorrosion (fig. 15) la zone à caractère anodique est toujours bien identifiable et s'agrandit, révélant une tendance à la propagation de la zone corrodée. La valeur maximale du pic de densité de courant anodique est de $31 \mu A/\text{mm}^2$ et le courant global est de $27 \mu A$. En considérant toujours une surface corrodée de 3 mm^2 , la vitesse de corrosion peut être évaluée à $2,9 \text{ mm}/\text{an}$.

Les cartographies réalisées à 72, 96 et 144 h d'exposition (figures 16, 17 et 18) font apparaître des variations temporelles

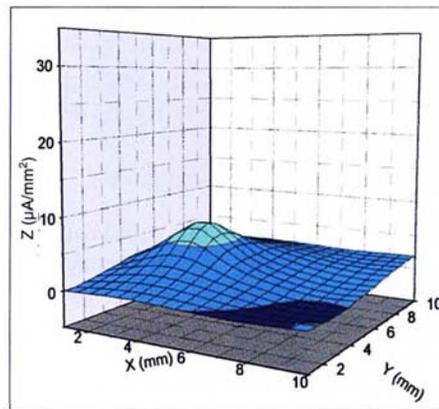


Fig. 18 - Cartographies des densités de courant 144 heures après amorçage mécanique.

Fig. 18 - Current density mapping of a metallic coupon exposed to bacterial media 144 hours after scrapping.

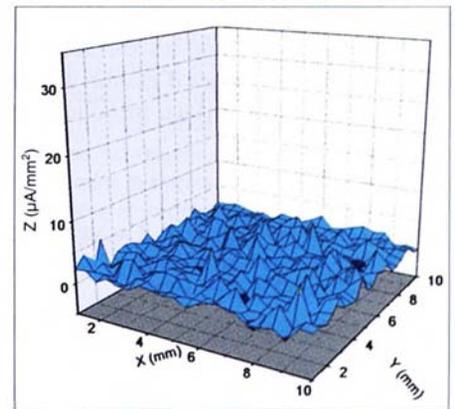
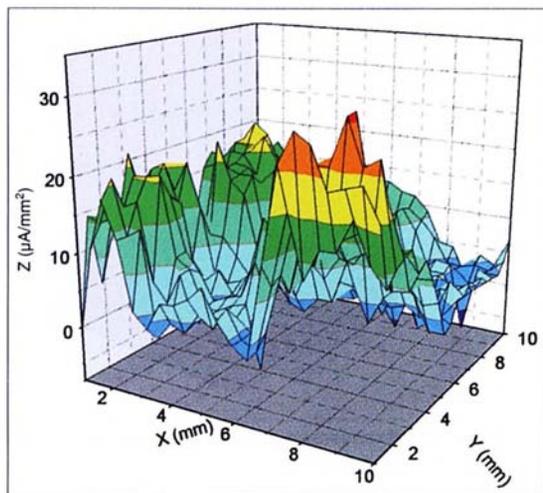


Fig. 19 - Cartographies des densités de courant 24 h après ajout d'eau de Javel.

Fig. 19 - Current density mapping of a metallic coupon exposed to bacterial media after biocide treatment.

de la vitesse de corrosion localisée, en accord avec les résultats obtenus par ailleurs [26].

Cent quarante quatre heures après le grattage, une solution d'eau de Javel à 20 ppm est injectée dans la cellule d'électrochimie tout en maintenant l'alimentation en solution bactérienne

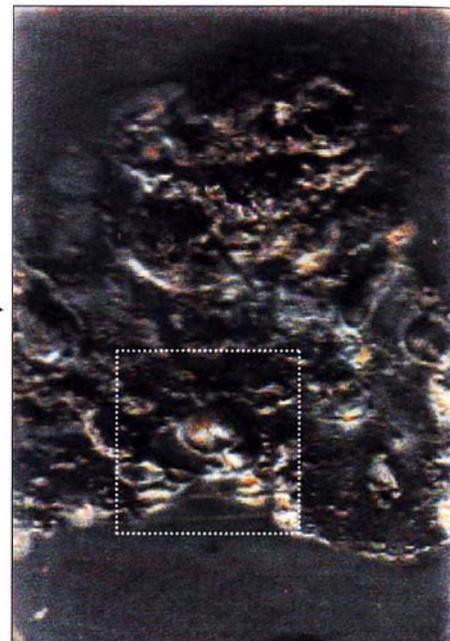


◀ Fig. 20 - Densités de courant 144 heures après amorçage mécanique de biocorrosion.

Fig. 20 - Current density mapping of a metallic coupon exposed to bacterial media 144 hours after scrapping.

► Fig. 21 - Piqûres de biocorrosion à la surface du coupon métallique. Le carré en pointillé de 10 × 10 mm correspond à la zone cartographiée de la figure 17.

Fig. 21 - Pitting corrosion of metallic coupon. 10 × 10 mm dot square correspond to mapped zone (fig. 17).



afin de soumettre le biofilm à un traitement choc. La cartographie (fig. 19) effectuée 24 h après ce traitement est identique aux cartographies réalisées pendant la formation de biofilm, montrant ainsi l'efficacité du biocide sur l'inhibition de ce type de biocorrosion.

Une expérience complémentaire réalisée afin de comparer profil

de cartographie (fig. 20) et observation visuelle (fig. 21) 144 h

après l'amorçage de la corrosion par grattage confirme l'existence d'un phénomène de propagation de la biocorrosion.

Conclusions

La technique de cartographie développée est basée sur la mesure de la différence de potentiel (ddp) entre deux micro-électrodes bloquantes à proximité d'une surface électriquement active. Cette ddp correspond à la chute ohmique au sein de la solution proche de la surface métallique (fig. 1). Le dispositif expérimental développé est constitué d'une sonde de mesure à deux micro-électrodes introduites dans une cellule d'électrochimie montée sur une table X-Y-Z.

Une meilleure compréhension des phénomènes de corrosion localisée comme ceux dans lesquels sont impliqués les bactéries sulfurogènes nécessite la mise en œuvre de techniques d'investigation à même les surfaces corrodées. La technique électrochimique permet d'établir une cartographie de densité de courant sur une surface métallique et d'identifier les zones

jouant un rôle anodique et celles jouant un rôle cathodique. Pour cela, une sonde de mesure constituée de deux micro-électrodes est positionnée au voisinage de la surface du substrat et la différence de potentiel entre ces deux électrodes est mesurée permettant d'accéder à la valeur de la chute ohmique dans la solution et par conséquent, à celle du courant local. Après mise au point et calibrage de la technique décrite, l'application à un cas réel de corrosion localisée en présence de bactéries sulfato-réductrices a permis de visualiser la répartition des courants locaux et ainsi de délimiter en fonction du temps (tracés de cartographies successives) l'étendue de la zone anodique et évaluer les densités de courant.

Cette technique permet également d'évaluer l'impact et donc l'efficacité de biocides et d'inhibiteurs de corrosion. □

RÉFÉRENCES

- [1] C. TARDY-JACQUENOD, P. CAUMETTE, R. MATHERON, C. LANAU, O. ARNAUD and M. MAGOT, *Canadian Journal of Microbiology*, Vol. 42, pp. 259-266, 1996.
- [2] J.L. CROLET, *Corrosion* 95, Paper N°188 (Houston TX, NACE, 1995).
- [3] "Factors influencing accelerated corrosion of cargo oil tanks", Oil Companies International Marine Forum, Sept. 1997.
- [4] J. GUEZENNEC, M.W. MITTLEMAN, J. BULLEN, D.C. WHITE and J.L. CROLET, *Proceedings of UK Corrosion 92*, London, UK, Institute of Corrosion.
- [5] X. CAMPAIGNOLLE, J.S. LUO, J. BULLEN, D.C. WHITE, J. GUEZENNEC and J.L. CROLET, *Corrosion* 90, paper N°103 (Houston TX NACE, 1993).
- [6] X. CAMPAIGNOLLE, PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, November 1996.
- [7] X. CAMPAIGNOLLE and J.L. CROLET (97), *Corrosion*, Vol. 53, N°6, pp 440-447.
- [8] ANNERGREN I., THIERRY D., and ZOU F. (1997), 'Localized electrochemical impedance spectroscopy for studying pitting corrosion on stainless steels', *J. of Electrochem. Soc.*, 144 (4), 1208.
- [9] ISAACS H.S. (1987), 'The use of scanning vibrating electrode technique for detecting defects in ion vapor-deposited aluminum on steel', *Corrosion*, 43, 594.
- [10] BAYET E., HUET F., KEDDAM M., OGLE K., and TAKENOUTI H. (1997), 'A novel way of measuring local electrochemical impedance using a single vibrating probe', *J. Electrochem. Soc.*, 144 (4), L87.
- [11] ZHAO J.G., FRANKEL G., and MCCREERY R.L. (1998), 'Corrosion protection of untreated AA-2024-T3 in chloride solution by a chromate conversion coating monitored with Raman spectroscopy', *J. Electrochem. Soc.*, 145, 2258.
- [12] WHITHAM T.S. (1995), 'Challenges to the prediction and monitoring of microbially influenced corrosion in the oil industry'. *Microbial Corrosion*, Proceedings of the 3rd International EFC

- Workshop, Tiller A.K. and C.A.C. Sequeira, Editors, EFC Publications N°15, The Institute of Materials.
- [13] ZOU F. and THIERRY D. (1997), 'Localized electrochemical impedance spectroscopy for studying the degradation of organic coatings', *Electrochem. Acta*, **42**, 3293.
- [14] ISAACS H.S. and VYAS B. (1981), in *Electrochemical Corrosion Testing*, Mansfeld F. and Bertocci U., Editors, p.3-33, STP 727, American Society for Testing and Materials, ASTM, Philadelphia, USA.
- [15] PA ISAACS H.S. (1988), 'Initiation of stress corrosion cracking of sensitized type 304 stainless steel in dilute thiosulfate solution', *J. Electrochem. Soc.*, **135**, 2180.
- [16] BATES S.J., GOSDEN S.R. and SARGEANT D.A. (1989), 'Design and development of scanning reference electrode technique for investigation of pitting corrosion in EV448 gas turbine disc steel', *Mater. Sci. Technol.*, **5**, 356.
- [17] ROSENFELD I.L. and DANILOV I.S. (1967), 'Electrochemical aspects of pitting corrosion', *Corrosion Science*, **7**, 129.
- [18] ISAACS H.S. (1987), 'The use of scanning vibrating electrode technique for detecting defects in ion vapor-deposited aluminum on steel', *Corrosion*, **43**, 594.
- [19] ISAACS H.S. (1988), 'The measurement of the galvanic corrosion of soldered copper using the scanning vibrating electrode technique', *Corros. Sci.*, **28** (6), 547.
- [20] JAFFE L.F., NUTICELLI R. (1974), 'An ultrasensitive vibrating probe for measuring steady electrical currents', *J. Cell. Bio.*, **63**, 614.
- [21] AMIRUDIN A. and THIERRY D. (1995), 'Comparative evaluation of alkyd, bituminous, and epoxy paints on steel in chloride media by impedance spectroscopy', *Brit. Corros. J.*, vol. **26** (3), 195.
- [22] ISSACS H.S. and KENDIG M.W. (1980), 'Determination of surface inhomogeneities using a scanning probe impedance technique', *Corrosion*, **36**, 269.
- [23] LILLARD R.S., MORAN P.J. and ISAACS H.S. (1992), 'A novel method for generating quantitative local electrochemical impedance spectroscopy', *J. Electrochem. Soc.*, **139** (4), 1007.
- [24] BAYET E., HUET F., KEDDAM M., OGLE K. and TAKENOUTI H. (1998), 'Adaptation of the Scanning Vibrating Electrode Technique to ac mode : Local Electrochemical Impedance Measurement', *Electrochemical Methods in Corrosion Research VI*, Bonora P.L. and Deflorian F., Editors, Materials Science Forum, Trans Tech Publications, Trento, vol. **289-292**, 57.
- [25] BAYET E., HUET F., KEDDAM M., OGLE K. and TAKENOUTI H. (1999), 'Local electrochemical impedance measurement : scanning vibrating electrode technique in AC mode', *Electrochim. Acta*, **AA**, 4117.
- [26] MONFORT MOROS N. (2001) *Corrosion localisée des aciers au carbone induite par des bactéries sulfato-réductrices. Développement d'un capteur spécifique*. PhD thesis, Université de Paris VI, November 2001.

Par qui furent découverts les corps simples de la chimie ?

LES ÉLÉMENTS CHIMIQUES ET LES HOMMES

Le récit d'une grande aventure

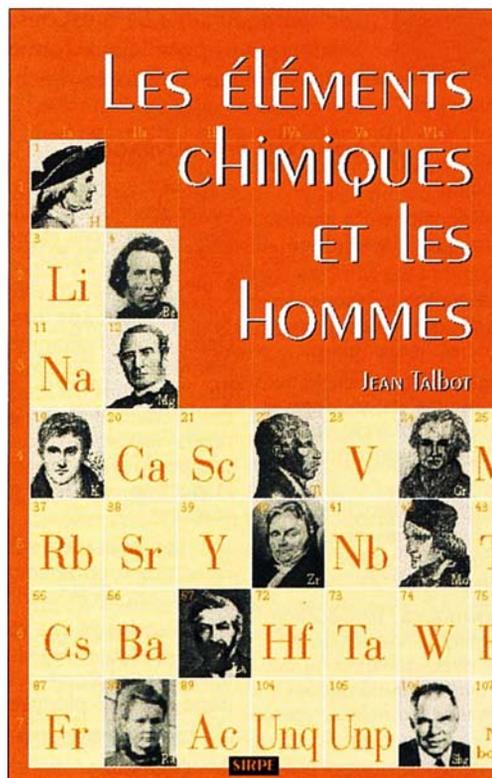
Par ce livre Jean Talbot ravive les péripéties de la découverte des corps simples, de l'antiquité à nos jours. Le lecteur, familier ou non de la chimie, envisage celle-ci sous un nouveau jour et se trouve ainsi associé à l'une des épopées cruciales de l'histoire de l'humanité. Au rythme de l'enchaînement des découvertes, se perçoit la volonté des savants d'éclairer de mieux en mieux les zones d'ombre du savoir.

Les éléments

Cet ouvrage nous livre tout d'abord des clefs de la classification de Mendéléév, qui sert de guide pour présenter tous les éléments chimiques. Pour chaque élément est alors précisé l'origine de son nom, à quelle date, par qui et comment il fut découvert.

Les hommes

Puis, au travers de brèves biographies, Jean Talbot relate certains traits de la vie des hommes ayant contribué à accroître le savoir dans le domaine de la chimie. L'auteur dépeint leur caractère, leur carrière, leurs écrits, leur rayonnement dans d'autres domaines, l'opinion des confrères tant sur eux-mêmes que sur



leurs recherches, et souligne les circonstances des découvertes. Les anecdotes relatées et les portraits de la plupart des protagonistes ouvrent à une meilleure connaissance de ces pionniers et de leurs travaux.

Les techniques, l'enseignement

Enfin, pour situer le cadre de travail des chimistes des siècles passés, sont abordées l'évolution de certaines techniques de laboratoire qui, dès leur mise en œuvre, contribuèrent à de grandes avancées de la recherche, et la genèse et le développement de l'enseignement de la chimie et de la pharmacie en France.

L'auteur

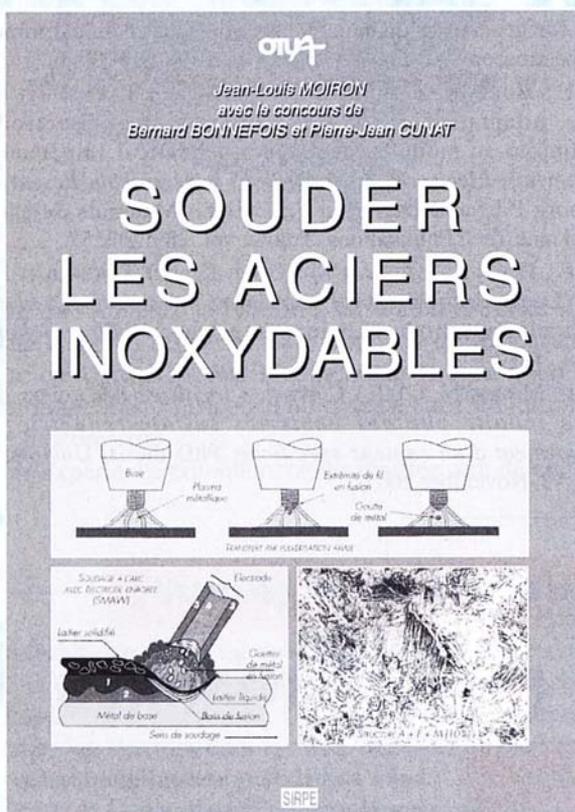
Jean Talbot (†), professeur honoraire à l'Université Pierre et Marie Curie et ancien directeur de l'École Nationale Supérieure de Chimie de Paris, témoigne d'une sensibilité et d'une ouverture d'esprit qui transparaissent dans ce livre original, procurant à tous un vif plaisir de lecture, qui passionnera le professionnel, l'enseignant, l'étudiant

et tous ceux intéressés à connaître des hommes et leurs idées ayant contribué à l'évolution du monde moderne.

1 volume 15,5 x 24 cm relié, sous jaquette ; 240 pages, 95 illustrations. Prix franco: 185 F (TVA 5,5 % et port inclus)

SIRPE éditeur, 76 rue de Rivoli, 75004 Paris - Tél. (1) 42 78 52 20 - Fax (1) 42 74 40 48

SOUDAGE DES ACIERS INOXYDABLES : LES CONNAISSANCES INDISPENSABLES



Les opérations de soudage des aciers inoxydables requièrent des précautions spécifiques appropriées à leur structure métallurgique, selon qu'il s'agit de mettre en œuvre :

- les aciers inoxydables ferritiques ;
- les aciers inoxydables martensitiques ;
- les aciers inoxydables austénitiques ;
- les aciers inoxydables super-austénitiques ;
- ou les aciers inoxydables austéno-ferritiques.

Complément indispensable du manuel "Travailler les aciers inoxydables" publié par SIRPE en 1998, ce livre technique présente d'une manière pragmatique les données de la métallurgie du soudage indispensables pour obtenir des assemblages sains présentant les caractéristiques désirées. Il prend en compte les plus récents progrès de la sidérurgie et des savoir-faire.

Elaboré par Jean-Louis MOIRON, Chef du Service Inox du Centre Matériaux "Techniques de soudage" d'Usinor Recherche et Développement, avec le concours de Bernard BONNEFOIS (Centre de Recherche des matériaux du Creusot d'Usinor Recherche et Développement) et de Pierre-Jean CUNAT (Directeur technique d'Euro-Inox), ce livre constitue la synthèse de l'ancien guide édité par l'ATS et l'OTUA et de celui réalisé par Ugine.

Utile aux entreprises artisanales et aux PMI comme aux grands entrepreneurs, ce livre est aussi un outil précieux pour l'enseignements technique et pour "l'auto-formation" permanente des techniciens. Aussi a-t-il sa place dans toutes les bibliothèques techniques.

AU SOMMAIRE DE L'OUVRAGE

I - **LES ACIERS INOXYDABLES** : Définition - Classification

II - **RAPPELS SUR LA MÉTALLURGIE DU SOUDAGE** : Définitions - Le soudage par fusion - Conséquences des cycles thermiques de soudage - Quelques données quantitatives.

III - **LES PRINCIPAUX PROCÉDÉS DE SOUDAGE PAR FUSION** : Description générale - Description des principaux procédés de soudage par fusion - Préparations de joints utilisées pour les aciers inoxydables.

IV - **LE SOUDAGE DES ACIERS INOXYDABLES FERRITQUES** : Introduction - Conséquences métallurgiques des cycles thermiques de soudage - Choix des conditions de soudage - Soudage des aciers inoxydables ferritiques avec d'autres types d'aciers - Nettoyage, décapage et passivation.

V - **LE SOUDAGE DES ACIERS INOXYDABLES MARTENSITIQUES** : Introduction - Conséquences métallurgiques des cycles thermiques de soudage - Choix des conditions de soudage - Soudage des aciers inoxydables martensitiques avec d'autres types d'aciers.

VI - **LE SOUDAGE DES ACIERS INOXYDABLES AUSTÉNITIQUES** : Introduction - Conséquences métallurgiques des cycles thermiques de soudage - Soudage des aciers inoxydables austénitiques avec quelques % de ferrite - Soudage des aciers inoxydables "purement" austénitiques - Soudage des aciers inoxydables austénitiques avec d'autres types d'aciers - Nettoyage, décapage et passivation.

VIII - **LE SOUDAGE DES ACIERS INOXYDABLES SUPER-AUSTÉNITIQUES** : Intro-

duction - Principaux matériaux - Conséquences métallurgiques des cycles thermiques - Sur-alliage et résistance à la corrosion de la soudeuse - Compacité et propriétés mécaniques des soudures (exemple de l'acier UNS S31266) - Procédés de soudage utilisables - Les gaz de protection - Nettoyage, décapage et passivation.

VII - **LE SOUDAGE DES ACIERS INOXYDABLES AUSTÉNO-FERRITIQUES** : Description et désignation des aciers austéno-ferritiques - Traitement thermique de qualité et traitement thermique post-soudage - Choix des conditions de soudage - Procédés de soudage utilisables - Choix des produits d'apport et composition du métal déposé - Soudage des aciers austéno-ferritiques avec d'autres aciers - Nettoyage et décapage ; passivation des soudures - Détermination de la teneur en ferrite - Inspection, contrôle non destructif et essais de qualification des soudures.

IX - **LES ASSEMBLAGES HÉTÉROGÈNES** : Définition - Introduction - Principes fondamentaux - Exemples de soudages hétérogènes - Conclusion sur le soudage hétérogène.

X - **LE SOUDAGE DES TÔLES PLAQUÉES** : Introduction - Rappel des principes généraux de mise en œuvre - Cas particulier du soudage des tôles avec placage austéno-ferritique - Traitement thermique post-soudage des tôles plaquées.

XI - **LE PARACHEVEMENT DES SOUDURES**

XII - **GLOSSAIRE**

"Soudier les aciers inoxydables"

1 vol. broché 15x21 cm, 144 pages, 69 illustrations, 42 tableaux, ISBN 2-906643-21-1; prix franco: 45,12 € TTC (41,92 € + port 3,20 €).

SIRPE éditeur, 76 rue de Rivoli, 75004 Paris. Tél. 01 42 78 52 20 - Fax 01 42 74 40 48

E-mail sirpe@noos.fr - Internet www.sirpe.com