

## LA BIOCORROSION

### Processus caractéristiques et moyens d'études

**J. Guezennec**

IFREMER, Centre de Brest

*In contrast to the situation of a few years ago, the phenomenon of microbiologically induced corrosion is now generally accepted as being one of a number of mechanisms whereby corrosion occurs. A considerable amount of multi-disciplinary effort has been expended to determine the extent of the problem and to understand the phenomenon. Microbial corrosion refers to the degradation of metallic or non metallic structures resulting from the presence and the activity of a variety of organisms on the surfaces. Although, in many cases, microbial corrosion is closely associated with biofouling phenomena, the area in which it causes most damages concern the deterioration of metallic structures in soils and sediments with the well-known sulphate-reducing bacteria.*

Douze billions de dollars/an, tel est le coût estimé aux États-Unis de ce que l'on appelle la biocorrosion ou corrosion induite par les micro-organismes. Bien que ce chiffre, comme par ailleurs toutes estimations réalisées sur ce sujet, soit discutable, l'important reste le fait que le milieu naturel est un milieu biologiquement actif et que cette activité des micro et macro-organismes a des conséquences significatives sur le comportement des matériaux placés dans des environnements naturels. Ce phénomène est connu depuis longtemps et, sans faire référence à des observations fort lointaines, les premières études ont réellement débuté il y a de cela près d'un siècle. Si cet aspect de la détérioration des matériaux a soulevé un certain septicisme durant un grand nombre d'années, il est à noter, depuis maintenant près de 20 ans, une sensibilisation à cet égard, notamment de la part des industriels et, par voie de conséquence, l'initiation d'études et recherches en la matière visant à comprendre les mécanismes, et mettre en place les moyens de lutte appropriés.

#### **La « Biocorrosion »**

La biocorrosion, ou corrosion induite (influencée) par les micro et macroorganismes, peut être définie comme la dégradation des matériaux liée à la présence physique et à l'activité métabolique de ces organismes sur les surfaces, selon des mécanismes mettant en jeu, soit des réactions électrochimiques à l'interface métal-solution, soit chimiques (production de métabolites agressifs, etc.).

Aucune condition spécifique n'est requise et de telles corrosions se retrouvent dans de nombreux milieux solides et liquides, dans des conditions physico-chimiques variables, tant au niveau du pH (0 à 10), salinité, température, sursaturation en oxygène ou absence de cet élément, etc. La plupart des matériaux sont sensibles à la corrosion biologique, les alliages ferreux (acier doux et aciers inoxydables même fortement alliés) [1, 2], les alliages cuivreux [3, 4], et d'aluminium [5], les matériaux non métalliques comme la pierre et les bétons [6, 7] ainsi que les matériaux plastiques et composites [8].

La notion de biocorrosion est souvent associée à celle de biofilms ou voiles biologiques en conditions aérées et à celle de sédiments sols et boues, en ce qui concerne les corrosions dites anaérobies. Cette séparation apparaît relativement incomplète si l'on tient compte du fait qu'à l'intérieur d'un biofilm, peuvent se créer des conditions d'anaérobiose sous formes de microniches favorisant la croissance de bactéries anaérobies [9], et que, dans les sédiments ou tout autre environnement à priori anaérobie, peuvent exister des microzones aérobie où se développe alors une microflore bactérienne aérobie.

Établir une liste des organismes impliqués dans des cas de corrosion serait sans intérêt et il convient plutôt de considérer les différents métabolismes mis en jeu [10] ainsi que leurs conséquences sur le comportement des matériaux. Ces principaux métabolismes rencontrés en biocorrosion seront abordés ultérieurement.

**Le voile biologique**

La formation d'un biofilm sur les surfaces exposées en milieu naturel se fait selon plusieurs étapes. La première de ces étapes correspond à l'adsorption de macromolécules présentes dans le milieu ou secrétées par les micro-organismes vivant dans ce milieu [11]. Ces macromolécules organiques s'absorbent dès l'immersion du matériau dans le milieu et vont alors constituer le film primaire. Ce film, en modifiant certaines propriétés de surface du matériau, va faciliter l'attachement ultérieur des bactéries [12, 13].

Cet attachement intervient lui-même en deux étapes successives, correspondant, dans un premier temps, à une fixation réversible des bactéries sur le support, et, dans un second temps à l'adhésion irréversible de ces micro-organismes aidée pour cela par la sécrétion de polymères extracellulaires [14 à 17] (Photo 1). Par la suite, si les conditions leur sont favorables, ces bactéries vont se développer sous forme de microcolonies et ces colonies vont pouvoir s'étendre sur toute la surface, créant alors ce que l'on peut appeler le voile bactérien [18, 19]. Cette colonisation bactérienne est suivie par le développement de cellules eucaryotiques, différentes selon les milieux concernés.

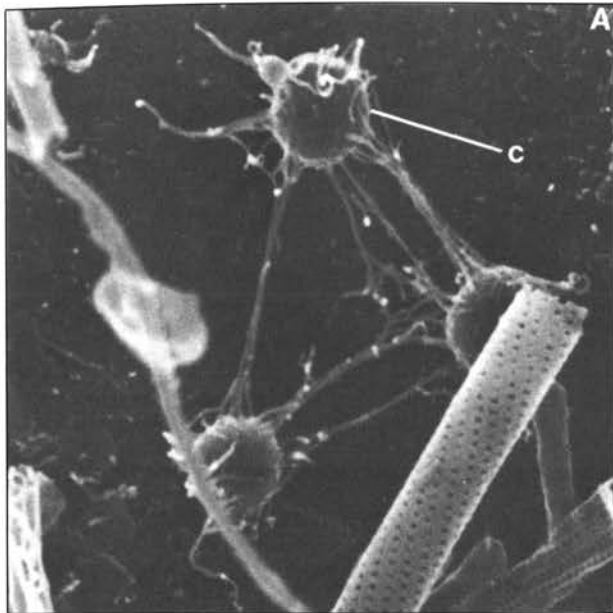


Photo 1 - Fixation irréversible de bactéries sur une surface.  
Photo 1 - Bacterial attachment on metallic surfaces.

De nombreux paramètres peuvent influencer sur l'adhésion des bactéries, sur la formation du voile biologique et son développement dont la physico-chimie du milieu (T, S %, O<sub>2</sub>, teneur en matière organique et inorganique, etc.), la nature du substrat mais aussi les conditions hydrodynamiques dont la vitesse de circulation du fluide [47, 50].

**Les conséquences du voile biologique**

La complexité du phénomène de colonisation des surfaces, de la structure du biofilm, la diversité des micro-organismes qui le compose et donc des métabolismes et métabolites pouvant intervenir d'une façon ou d'une autre dans les réactions chimiques et électrochimiques se produisant à l'interface métal-solution, la diversité des matériaux utilisés ainsi que celui des environnements rencontrés, rendent l'étude des mécanismes de biocorrosion bien difficile.

Cependant, un certain nombre de travaux, tant in-situ qu'en laboratoire, ont d'ores et déjà été menés et ont conduit à des informations importantes sur le rôle joué par le « vivant » sur le comportement des matériaux en milieu naturel.

Il est possible de différencier l'influence du biofilm en tant que « revêtement » sur le comportement du matériau de l'action plus spécifique des bactéries constituant ce voile biologique.

Tableau 1 - Évolution des concentrations de quelques éléments tracés dans un biofilm formé sur du titane : V = 1,5 m/s.

	Eau de mer (ng/kg)	Biofilm (ng/cm <sup>2</sup> )	
		5 j	30 j
Cu <sup>++</sup>	1-3	25-30	70-80
Fe <sup>++</sup>	10-12	100-150	500-700
Mn <sup>++</sup>	5-7	30-40	100-110
Ca <sup>++</sup>	400	12	18
Mg <sup>++</sup>	1 200	36	38

La répartition hétérogène des micro-organismes sur les surfaces et la respiration d'un certain nombre d'entre-eux entraîne la formation de cellules de concentration d'oxygène et conséquemment, la création de cellules d'aération différentielle. Par ailleurs, la fixation irréversible des bactéries sur les surfaces se fait par une sécrétion de polymères, généralement des polysaccharides à caractère acide. Ces polymères sont alors capables de piéger les ions métalliques présents, et ce à des concentrations importantes comparativement à leur teneur initiale dans le milieu. Outre l'importance de ces ions dans les mécanismes de réduction de l'oxygène, il peut également se créer, selon la nature des ions piégés et celle des alliages considérés, des cellules de concentrations d'ions et la formation de couples galvaniques [20]. Des facteurs de concentration de 10 à 1 000 en certains ions (tabl. 1), ont ainsi été mis en évidence dans des biofilms formés sur des surfaces de titane placées en eau de mer circulante (Guezennec, 1984, communication personnelle).

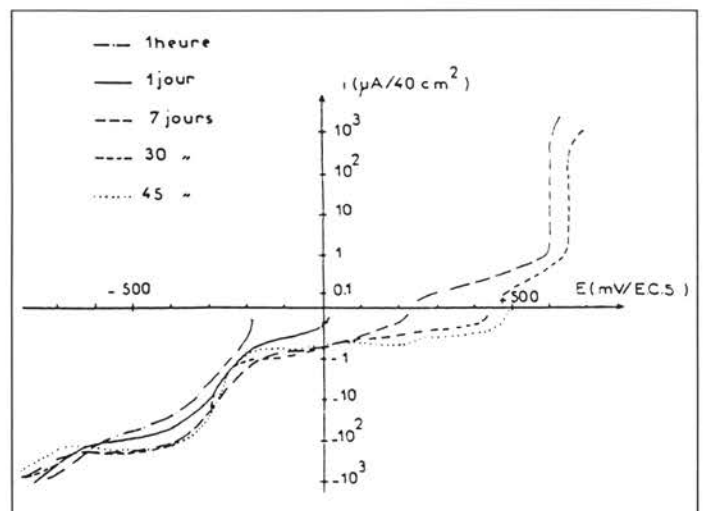


Fig. 1 - Évolution de souches de polarisations réalisées sur un acier inoxydable 316 L en milieu marin.  
Fig. 1 - Polarization curves versus exposure times on a 316 L stainless steel in natural sea water.

La production d'acides organiques par les micro-organismes est également responsable de l'initiation de corrosions localisées. De nombreuses espèces bactériennes, mais aussi les algues et champignons, secrètent comme produits de leur métabolisme des acides et alcools gras à bas carbone dont les principaux restent les acides acétique, butyrique, valérique, etc. [21]. Ces acides abaissent très localement le pH à l'interface métal-solution et peuvent ainsi contribuer à une action directe sur les matériaux ou encore, à la dissolution ou à la modification d'un film passif préalablement établi. L'agressivité de ces acides et autres métabolites, vis-à-vis des métaux est cependant fonction de leur nature, mais aussi de paramètres extérieurs comme l'agitation du milieu et les températures d'utilisation de ces alliages. D'une façon générale, cette agressivité diminue en fonction de la longueur de la chaîne carbonée. Il est aussi noté que ces acides peuvent constituer une étape dans la chaîne de développement et de croissance de bactéries anaérobies telles les bactéries sulfato-réductrices en constituant d'excellents substrats carbonés pour ces dernières.

En se plaçant au niveau électrochimique, la présence d'un biofilm sur les surfaces métalliques placées dans l'environnement naturel a pour conséquence une modification des potentiels d'abandon des alliages et, plus particulièrement pour les alliages passivables, une évolution vers des potentiels plus nobles pouvant atteindre, selon les cas, le potentiel de piquuration de ces alliages (fig. 1).

Cette action du biofilm apparaît liée selon les auteurs, soit à une action enzymatique catalytique des micro-organismes sur la cinétique de réduction de l'oxygène [22], soit à une action catalytique des ions métalliques piégés dans le biofilm sur cette même réaction de réduction [23], soit encore à des modifications de paramètres physico-chimiques à l'intérieur même du biofilm [24]. Il est fort à penser qu'aucune de ces hypothèses suffit à elle seule à expliciter cette évolution des potentiels et qu'en fait, une conjonction de ces différents mécanismes et autres possibles, correspondent à la réalité. De nombreuses études restent encore à réaliser en ce domaine, et tout d'abord, celles conduisant à une meilleure connaissance de la nature et de la structure du voile biologique.

### Les bactéries sulfato-réductrices

Nous l'avons souligné ci-dessus, énumérer les micro-organismes responsables ou susceptibles d'intervenir dans des corrosions serait inutile tant ils sont nombreux et tant les paramètres influant sur cette corrosion sont complexes. Si l'examen de la littérature en ce domaine indique une diversité d'origines pour ces phénomènes [25 à 27], la plus largement décrite reste sans aucun doute la corrosion dite anaérobie et celle liée aux bactéries sulfato-réductrices. Ces bactéries sont responsables de plus de 77 % des phénomènes de corrosion « biologique » rencontrés dans le domaine pétrolier et de 50 % des corrosions rencontrées au niveau des canalisations enfouies.

Les bactéries sulfato-réductrices constituent un groupe hétérogène de micro-organismes tant du point de vue nutritionnel que morphologique, dont la respiration correspond au transfert d'électrons provenant de l'oxydation de substrats organiques ou inorganiques vers un accepteur d'électrons qui est généralement l'ion sulfate, avec production subséquente d'ions sulfures. Le lecteur est convié à se référer à l'abondante littérature en ce domaine. Par ailleurs, ces micro-organismes sont susceptibles, pour certains d'entre eux, d'utiliser l'hydrogène comme donneur d'électrons et ainsi intervenir, bien que cette action soit actuellement fortement controversée, au niveau des réactions cathodiques se produisant à l'interface métal-solution.

Ces micro-organismes anaérobies sont présents dans des environnements variés tels les sédiments, sols et boues mais également à l'intérieur de biofilms où ils se développent, profitant des conditions anaérobies créées au sein du biofilm, et de la présence de substrats carbonés liés au métabolisme d'autres micro-organismes [28].

Les processus par lesquels ils sont susceptibles d'intervenir dans la corrosion des alliages sont essentiellement liés, directement ou indirectement, à la production d'ions sulfures ou bien encore à l'utilisation de l'hydrogène comme donneur d'électrons :

- Action de dépolarisation de la réaction cathodique de réduction des protons et utilisation de l'hydrogène cathodique [29].
- Production de sulfures de fer entraînant, dans un premier temps des dépôts hétérogènes sur les surfaces et la création de piles galvaniques, puis une modification de la nature chimique et stœchiométrique de ces dépôts, soit par une continuité de l'action bactérienne, soit encore par modification chimique de la nature de ces sulfures métalliques [30 à 32].
- Action dépolarisante anodique et cathodique de l'hydrogène sulfuré  $H_2S$  [5, 33].
- Production de métabolites agressifs et notamment de phosphures de fer [34].
- Action « poison » de l'ion sulfure empêchant la recombinaison de l'hydrogène atomique en hydrogène moléculaire et favorisant ainsi la diffusion de cet élément dans le métal et la fragilisation par l'hydrogène [35 à 37].

Toutes ces hypothèses semblent a priori possibles, mais il est fort à penser, là aussi, que plusieurs d'entre-elles participent conjointement ou simultanément aux processus d'initiation des corrosions par ces micro-organismes.

### Autres métabolismes

Autres bactéries du cycle du soufre, les bactéries thio-oxydantes, dont le métabolisme peut conduire à la formation d'acide sulfurique par oxydation du soufre ou des sulfures. Cette formation localisée d'acide conduit à des pH proches de 1 si aucune neutralisation par le milieu environnant ne se produit.

Le cycle du fer est également présent avec comme principal exemple celui des bactéries ferro-oxydantes. Ces dernières, capables également de fixer et d'oxyder le manganèse, se présentent généralement sous forme d'amas filamenteux dans lesquels les conditions anaérobies permettent le développement de bactéries sulfato-réductrices. Par ailleurs, ces amas contiennent de grandes concentrations d'oxyhydroxydes ferriques et manganiques et d'ions chlorures dont l'hydrolyse conduit à la formation localisée de chlorures métalliques et d'acide chlorhydrique. A l'opposé, d'autres micro-organismes réduisent les ions ferriques en ions ferreux enlevant ainsi tout effet protecteur possible de certains oxydes présents sur les surfaces.

Au cours du cycle de l'azote, certaines espèces bactériennes réduisent les nitrates en nitrites, ammoniac ou azote, tandis que d'autres oxydent l'ammoniac en nitrite ou même en nitrate. L'utilisation de certains inhibiteurs de corrosion tels les nitrites ou nitrates se trouvent alors influencée par la présence de ces micro-organismes, et par ailleurs, la production d'ammoniac à partir de sels inorganiques ou acides aminés est de nature à remettre en cause l'emploi de certains alliages tels les alliages de cuivre.

Nombreux sont les exemples de bactéries impliquées dans les corrosions localisées, ces exemples de métabolismes n'en représentant que les principaux. Il convient d'ajouter que les bactéries ne sont pas les seuls micro-organismes responsables de corrosions, mais que les algues [38] et champignons [39] sont également concernés, soit du fait de leur simple présence sur les surfaces en modifiant certains paramètres chimiques à l'interface matériau-milieu, mais encore par production de métabolites agressifs vis-à-vis des alliages. Enfin, il faut insister que la corrosion biologique n'est jamais le fait d'une seule espèce, mais qu'il existe des effets de synergie entre les différentes communautés bactériennes [40] et entre ces communautés et d'autres organismes supérieurs tels les algues, champignons, mollusques, etc.

### Moyens d'études

La biocorrosion implique, comme son nom l'indique, la dégradation des matériaux sous l'influence du milieu vivant. Il en ressort de cela une évidence, celle que la biocorrosion est un domaine *pluridisciplinaire* associant les connaissances en microbiologie et biologie, chimie, électrochimie mais également métallurgie. Il en ressort donc aussi qu'elle ne constitue pas le domaine réservé de telle ou telle spécialité mais au contraire, que son étude ne peut être totalement

réalisée que par la mise en commun partielle ou totale de l'ensemble de ces domaines.

La connaissance et l'identification des micro-organismes et de leur métabolisme, font appel à la microbiologie. Les moyens d'identification sont nombreux, allant des méthodes classiques telles l'utilisation de milieux de cultures solides et liquides, les techniques microscopiques par transmission ou réflexion [17], aux méthodes plus récentes techniques d'épifluorescence après coloration à l'acridine orange, [41, 42] ou encore l'INT [43], l'utilisation d'enzymes spécifiques [44] ou d'anticorps répondant à des antigènes caractéristiques de certaines bactéries [45, 46] ou encore l'utilisation de sondes nucléiques permettant une identification rapide et fiable des micro-organismes.

D'autres techniques peuvent se substituer ou compléter ces analyses microbiologiques [47], telles les méthodes biochimiques basées sur la mise en évidence de marqueurs biologiques présents dans les parois ou membranes cytoplasmiques bactériennes. Il est ainsi possible d'étudier la structure des communautés bactériennes, soit en déterminant la présence de composés spécifiques au monde bactérien, soit en recherchant encore une plus grande spécificité de

ces composés et leur seule appartenance à un groupe ou genre bactérien [48 à 51].

La détermination de l'origine d'une corrosion passe par la connaissance du matériau, de sa surface mais aussi du milieu dans lequel il se trouve placé. Les analyses chimiques, tant du milieu que des surfaces, sont donc également nécessaires dans ces études. Les méthodes analytiques utilisées sont celles que l'on rencontre couramment en chimie analytique et les études de surfaces peuvent être réalisées quant à elles, soit par colorimétrie, analyses spectrophotométriques ou encore analyses de rayons X, ESCA, EDAX, Effet Mossbauer (fig. 2), [52], etc.

Les méthodes électrochimiques sont, bien sûr, indispensables à ce genre de recherches, avec l'utilisation des méthodes classiques de potentiométrie, les tracés de courbes de polarisation, les déterminations de résistance de polarisation, les diagrammes d'impédance, le bruit électrochimique, etc. [53].

Le choix d'une technique dépend de paramètres propres aux conditions de prélèvement, aux équipements de laboratoire et aussi aux nécessités de coût et temps. Cependant seule, la mise en commun de l'ensemble de ces résultats permet de comprendre les mécanismes mis en jeu et ainsi de sélectionner dans certaines circonstances, les moyens de prévention et de lutte contre les micro-organismes.

### Représentativité des essais de laboratoire

Le milieu naturel est un milieu complexe. De nombreux paramètres tant physico-chimiques, hydrodynamiques et biologiques influent sur la corrosion et la durée de vie des matériaux dans l'environnement naturel. Il apparaît alors difficile d'imaginer recréer en laboratoire toutes ces conditions, et de ce fait, les études sur cet aspect de la corrosion peuvent, dans certaines circonstances, apparaître sujettes à contreverse.

Ainsi, les études menées en laboratoire sur des milieux synthétiques ou naturels reconstitués et enrichis en substrats carbonés, si proches soient-ils du milieu naturel, ou encore sur mono ou co-cultures bactériennes, ne peuvent en aucun cas reproduire les conditions exactes du milieu, ne tenant pas compte, par exemple, des effets complexes de synergie existant dans un microcosme déterminé ou plus généralement dans le milieu.

L'utilisation de l'eau de mer synthétique comme milieu d'étude pour le comportement des matériaux en milieu marin ou depuis longtemps été démontré comme non représentative d'un point de vue corrosion. Des différences de potentiels d'abandon supérieures à 200 mV sont parfois observées entre essais réalisés en milieu synthétique et essais

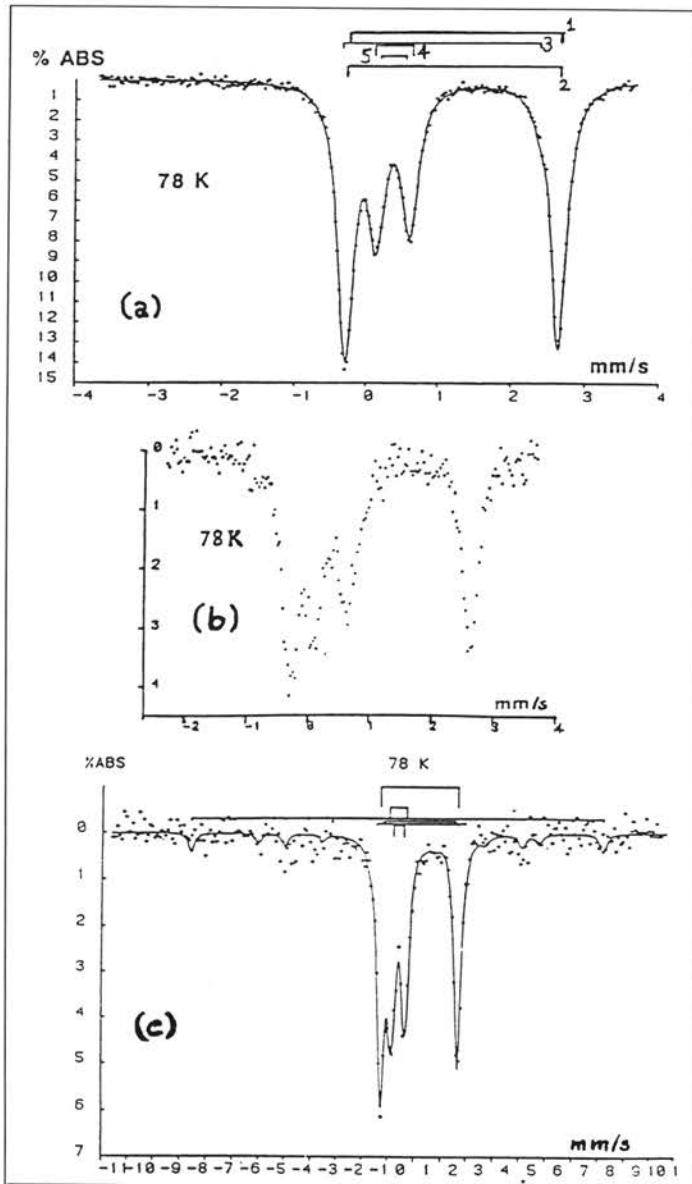


Fig. 2 - Spectre Mössbauer de produits de corrosion.  
 Fig. 2 - Mossbauer spectra run at 78 K.  
 (a) Green rust 2 standard (Table 1).  
 (b) Product of bacterial corrosion.  
 (c) Large velocity range spectrum of product obtained by bacterial corrosion with computer fitting (Table 2).

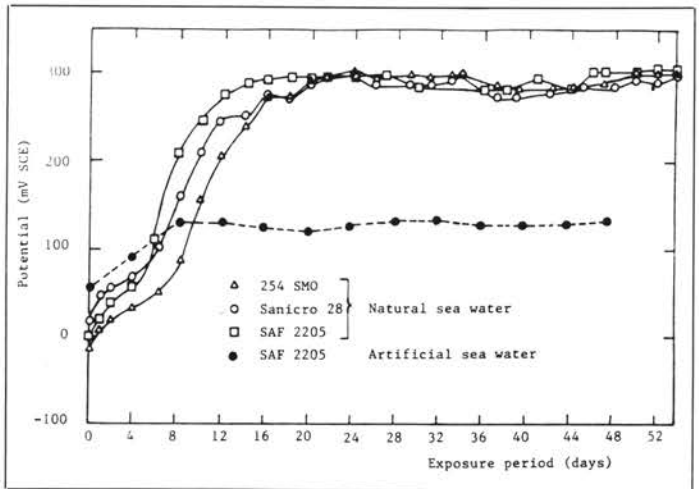


Fig. 3 - Évolution de potentiels d'abandon en eau de mer naturelle et artificielle.  
 Fig. 3 - The potential development on 254 SMO, Sanicro 28 and SAF 2205 in nearly stagnant sea water and for SAF 2205 in artificial sea water. Temperature  $8 \pm 2^\circ\text{C}$ .

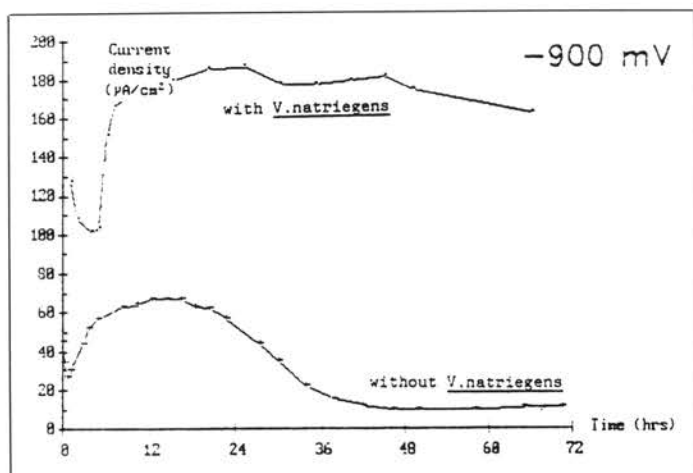


Fig. 4 - Évolution de la demande en courant cathodique d'un acier inoxydable à  $-900$  mV/ECS en présence et absence de *V. natriegens*.

Fig. 4 - Cathodic current density demand of steel (17 C) coupons polarized to  $-900$  mV/SCE in environment with and without *V. natriegens*.

en conditions naturelles, différences attribuables à la présence d'un biofilm sur les surfaces (fig. 3) [23, 59].

Récemment, des essais sur le comportement d'alliages «poisons» dans le milieu marin ont mis en évidence les différences existant entre conditions eau de mer ASTM, milieu naturel et eau de mer stérilisée puis inoculée à l'aide de mono et co-cultures bactériennes [60].

Enfin, des études menées sur l'influence du biofilm sur la protection cathodique ont démontré des différences importantes de demandes en courant lors d'expérimentations menées parallèlement sur monoculture placée dans un milieu eau de mer enrichie et en conditions naturelles (fig. 4) [55 à 58].

Ces quelques exemples, ainsi que bien d'autres, illustrent le caractère de non-représentativité des essais de laboratoire aux conditions naturelles et de prudence dont il est alors nécessaire de faire preuve lors de l'interprétation de tels résultats.

## Moyens de lutte contre la biocorrosion

Les moyens de lutte contre la biocorrosion se situent essentiellement à 3 niveaux :

- au niveau du milieu dont il est nécessaire de connaître et contrôler la microflore présente;
- au niveau du matériau lui-même en tenant compte de critères tels le coût, durabilité, etc.;
- au niveau de la surface de ces matériaux car c'est là principalement que peuvent se créer les conditions propices à l'initiation de corrosions induites par le milieu vivant.

### a) Le milieu.

Les moyens de lutte se situent alors soit par un contrôle de paramètres hydrodynamiques et physico-chimiques du milieu (matières organiques et surtout inorganiques, vitesse de circulation du fluide, élévation rapide et soudaine de température), soit par un contrôle microbiologique réalisé notamment grâce à l'utilisation de biocides.

Il serait impossible ici de lister tous les bactéricides et biocides utilisés et utilisables dans ce domaine, mais de façon très générale, ces composés organiques sont généralement des amines primaires, secondaires, tertiaires ou quaternaires, des dérivés soufrés ou phosphorés, des alcools et aldéhydes avec les plus connus que sont le formaldéhyde et le glutaraldéhyde.

L'ensemble de ces composés, si efficaces qu'ils puissent être, présentent cependant plusieurs inconvénients, propres par ailleurs à

tous ou à la majorité des biocides, c'est-à-dire a) celui d'un manque de connaissance total sur les effets à court, long et moyen termes sur le milieu, b) un effet sélectif et la croissance de certaines souches bactériennes et autres, comme par exemple celles générant des formes de résistances sous forme de spores, c) peut-être à long terme, la formation de mutants.

A ces dérivés organiques, il convient aussi d'ajouter d'autres biocides plus connus ceux-là comme l'ozone et le chlore et ses dérivés.

Ce dernier composé présente lui aussi les inconvénients identiques à ceux précédemment cités, avec en sus une possible influence sur le comportement des matériaux. L'utilisation du chlore (et de ces dérivés), n'est pas en effet sans conséquence sur le comportement électrochimique des alliages et son utilisation doit être optimisée en fonction de ces critères microbiologiques et électrochimiques [51, 52].

Une première solution pourrait se situer autour de la méthodologie d'utilisation de ces biocides et notamment du chlore en choisissant un traitement en continu mais à faible dose, ce afin d'éviter le développement et la croissance de bactéries présentant des formes de résistances à ces biocides.

Quant à l'ozone, il apparaît d'une efficacité réelle, efficacité à laquelle s'ajoute un faible impact sur le milieu du fait de la décomposition de cet élément à haute température, mais qui, par ailleurs, peut présenter l'inconvénient d'un coût élevé et d'une manipulation plus délicate.

### b) Les alliages

Par un choix approprié des alliages en fonction naturellement du coût, de la résistance à la corrosion, de la durabilité de ces alliages dans le milieu utilisé.

Une voie nouvelle serait peut-être celle qui consiste, en modifiant la composition chimique des alliages, c'est-à-dire en y incorporant des éléments poisons retrouvés notamment au niveau de couches passives sur les alliages passivables, à limiter, voir inhiber tout développement bactérien sur les surfaces. Des essais ont été entrepris dans ce sens par Unirec, UTC et l'Ifremer avec des résultats prometteurs.

### c) Les surfaces

C'est-à-dire en modifiant certaines propriétés de surface des matériaux, soit par l'utilisation de revêtements organiques ou inorganiques, soit encore, dans le cas d'alliages métalliques, (et ou cela est possible) par la protection anodique ou cathodique.

Ce type de protection couramment employée dans le milieu marin doit cependant être adapté aux conditions naturelles et dans certains cas optimisé en fonction de critères microbiologiques. C'est ainsi qu'une relation a pu être établie entre la protection cathodique et le développement de bactéries sulfato-réductrices dans les sédiments marins, ainsi qu'entre un biofilm et la protection cathodique en milieu naturel aéré [53 à 55].

Quant aux revêtements organiques, ils peuvent présenter les inconvénients de pouvoir constituer une source de carbone organique pour certains organismes, ainsi que celui de la rupture du film organique protecteur, les nouvelles conditions créées sous ce film favorisant alors le développement de bactéries.

La mise au point et l'utilisation de composés ayant une double propriété d'absorption sur les surfaces et d'effet biocide sur le milieu, donc un possible effet filmogène combiné à un effet biocide limitant, empêchant en inhibant tout développement bactérien apparaissent intéressantes. Quelques produits existent déjà sur le marché mondial, produits dont l'application n'est cependant pas universelle et qui doivent donc être appliqués en fonction des critères d'exploitation et d'utilisation.

D'autres possibilités résident peut-être en l'effet de synergie que peut présenter l'utilisation de biocides tels le chlore avec l'addition d'éléments toxiques comme le cuivre ou autres éléments toxiques. Dans ce genre de synergie, est associée l'action oxydante du chlore au niveau des polymères produits par les bactéries ou au niveau d'une action sur la paroi et membrane bactérienne, et l'action toxique de l'élément cuivre sur la croissance des organismes.

## Conclusions

Admettre le phénomène de biocorrosion constitue une étape importante tant ce concept apparaissait secondaire il y a simplement de cela quelques années. Le milieu vivant, des bactéries aux organismes supérieurs, peut influencer considérablement le comportement des matériaux placés dans des milieux naturels. Il convient cependant de ne pas passer d'un extrême à l'autre, et de considérer tout cas apparemment nouveau comme d'origine biologique. Bactéries et micro-organismes peuvent signifier corrosion mais, à l'inverse, corrosion ne signifie pas automatiquement ou uniquement bactéries et autres, même si le milieu est favorable à leur développement. D'autres formes de corrosion existent et il est nécessaire de ne pas l'oublier. Le milieu naturel est extrêmement complexe et de ce fait difficilement reproductible en laboratoire. De ces remarques il convient alors d'en retirer différentes conclusions :

En ce qui concerne la notion de biofilms de nombreuses hypothèses ont déjà été avancées sur le rôle joué par ce « revêtement biologique » sur le comportement des matériaux. Ces hypothèses n'expliquent pas tout et de ce fait, de nombreuses études complémentaires restent à accomplir en la matière et peut-être en premier lieu, sur la nature et structure exacte de ce biofilm.

D'autre part, utiles elles le sont, utiles elles le resteront, mais les expérimentations menées en laboratoire doivent être interprétées et analysées comme telles, c'est-à-dire représentative du seul milieu d'études ou dans le meilleur des cas, d'un phénomène très localisé. L'extrapolation d'études menées sur des milieux artificiels ou sur des mono ou co-cultures bactériennes aux conditions naturelles demande précautions.

Les moyens de lutte, de prévention et protection existent. Le choix d'une méthodologie ou d'une stratégie doit cependant être précédé par une connaissance aussi complète que possible de l'environnement physico-chimique et microbiologique du milieu. Différentes voies existent, que ce soit au niveau du milieu, des matériaux ou des surfaces avec pour chacune d'entre elles, avantages et inconvénients.

Enfin, la corrosion induite par les micro-organismes est une science pluridisciplinaire et seule la mise en commun des connaissances et compétences en différents domaines permettra une recherche approfondie des mécanismes et des solutions à mettre en œuvre.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] D. POPE, D. J. DUQUETTE, A. H. JOHANNES & P. C. WAGNER, *Mat. Perf.*, 1984, pp. 14-18.
- [2] P. J. B. SCOTT & M. DAVIES, *Corrosion/89*. Paper 186, New Orleans, 1989.
- [3] SCHRIFFIN & S. R. DE SANCHEZ, *Corrosion*, 1985. Vol. 41, n° 1, pp. 31-38.
- [4] H. A. VIDELA, S. GOMEZ DE SARAVIA & M. F. L. DE MELE, *Corrosion/89* Paper 185, New Orleans, 1989.
- [5] R. C. SALVARREZA & H. A. VIDELA, *Corrosion* 1980. Vol. 36, p. 550.
- [6] K. MILDE, W. SAND, W. WOLFF & E. BOCK, *J. of Gen. Microb.*, 1983. 129, pp. 1327-1333.
- [7] W. SAND, E. BOCK & D. C. WHITE, *Corrosion/84*. Paper 96. New Orleans, 1984.
- [8] P. J. B. SCOTT, *Mat. Perf.*, 1989. Vol n° pp. 52-53.
- [11] R. NEIHOFF & G. LOEB, *Third Int. Congress on Marine Corrosion and Fouling*, 1972. Gaithersburg, MD, pp. 710-718.
- [12] W. A. ZISMAN, *Adv. Chim. Ser.*, 1964, 43, pp. 39-56.
- [13] R. E. BAIER, *Proc. Third Int. Congress on Marine Corrosion and Fouling*, 1973. Gaithersburg, pp. 633-639.
- [14] K. C. MARSHALL, R. STOUT & R. MITCHELL, 1971, *J. Can. Microbiol.*, 1971. Vol. 68, pp. 337-348.
- [15] D. C. ELLWOOD, C. W. KEEVIL, P. D. MARSH, C. M. BROWN & J. N. WARDELL, *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 1982, 297, pp. 517-532.
- [16] W. A. CORPE, *Third Int. Cong. on Marine Corrosion and Fouling*, 1973. Gaithersburg, pp. 598-609.
- [17] J. W. COSTERTON, G. G. GEESEY & K. J. CHENG, *Sci. Am.*, 1978, 238, pp. 86-95.
- [18] A. L. MILLS & R. MAUBREY, *Microb. Ecol.*, 1981, 7, pp. 315-322.
- [19] W. G. CHARACKLIS, *Wat. Research*. 1973a, 7, pp. 1113-1127.
- [20] G. G. GEESEY & J. JANG, In T. J. Beveridge and R. J. Doyle (Eds) *Metal ions and bacteria*. John Wiley and sons, Inc., 1989, pp. 325-357.
- [21] S. M. GERCHAKOV, B. J. LITTLE & P. WAGNER, *Corrosion*, 1986. Vol. 42, n° 11, pp. 689-692.
- [22] V. SCOTTO, R. DI CINTIO & G. MERCENARO, *Corrosion Sci.*, 1985. Vol. 25, n° 3, pp. 185-194.
- [23] F. VAN DEN BRING, E. BARENDRECHT & W. VISSCHER, *Rec. Trav. Chim. Pays Bas*. Vol. 99, 1980, p. 253.
- [24] S. C. DEXTER & G. Y. GAO, Paper n° 377. *Corrosion/87*, San Francisco, 1987.
- [25] S. A. ASHON, D. A. MILLER & R. A. KING, *Brit. Cor. J.* 1973, 8, pp. 185-189.
- [26] R. E. TATNALL, *Mat. Perf.*, 1981. Vol. 20, n° 8, pp. 41-48.
- [27] M. POHL, M. RINKEN, M. AYDIN & W. A. KONIG, *Z. Naturforsch*, 1984, 39C, pp. 240-243.
- [28] W. A. HAMILTON, *Ann. Rev. Microbiol.*, 1985, 39, pp. 195-217.
- [29] C. A. H. VON VOLZOGEN KUHR & L. S. VAN DER VLUGT, *Water*, 1934. The Hague, 18, pp. 147-165.
- [30] G. H. BOOTH & A. K. TILLER, *Corrosion Sci.*, 1968, n° 8, pp. 583-600.
- [31] D. T. RICKARD, *Stockholm Contr to geology*, 1969, 20, p. 67.
- [32] R. A. KING & J. D. A. MILLER, *Anti-Cor. Methods Mater.*, 1977. Vol. 24, n° 8, pp. 9-12.
- [33] J. A. COSTELLO, *S. Afr. J. Sci.*, 1979, 70, pp. 202-204.
- [34] W. P. IVERSON, *Mat. Perf.* 1984. Vol. 23, 3, pp. 28-30.
- [35] R. G. J. EDYVEAN, C. J. THOMAS, R. BROOK & I. M. AUSTEN, *Int. Conf. on Biologically Induced Corrosion* 1985. Gaithersburg.
- [36] J. A. HARDY & J. L. BOWN, *Corrosion*, 1984. Vol. 40, n° 12, pp. 650-654.
- [37] T. E. FORD & R. MITCHELL, *Corrosion/89*. Paper n° 189. New Orleans, 1989.
- [38] R. G. J. EDYVEAN & L. A. TERRY, *Biodeterioration* 5, 1983, pp. 336-347.
- [39] STRANGER-JOHANNESSEN, *Biodeterioration* 6, 1986, pp. 218-223.
- [40] N. J. E. DOWLING, J. GUEZENEC, L. LEMOINE, A. TUNLID & D. C. WHITE, *Corrosion*, 1984. Vol. 44, n° 12, pp. 869-874.
- [41] J. E. HOBBIER, R. J. DALEY & S. JASPER, *Appl. Environ. Microbiol.*, 1977, 33, pp. 1125-1128.
- [42] G. PAIK, In (E. H. Lennette, A. Balows, W. J. Jr. Hansler, J. P. Truant, Eds) *Manual of Clinical Microbiology*. American Society for Microbiology, Washington, D. C. 1980.
- [43] R. ZIMMERMAN, R. ITTURRAGA & J. BECKER-BIRK, *Appl. Environ. Microbiol.*, 1978. Vol. 36, n° 6, pp. 926.
- [44] L. DURIEZ, Thèse Université Compiègne, 1989.
- [45] D. L. TISON, D. H. POPE, W. B. CHERRY & C. B. FLIERMANS, *Appl. Environ. Microbiol.*, 1980. Vol. 39, n° 2, p. 456.
- [46] E. B. BRAUN, M. D. BAKER & D. H. POPE, *Appl. Environ. Microbiol.*, 1981.
- [47] J. GUEZENEC & P. FERA, *Rev. Française de l'IFP*, 1987. Vol. 42, n° 5, pp. 599-617.
- [48] D. C. WHITE, W. M. DAVIS, J. S. NICKELS & R. J. BOBBIE, *Oecologia*, 1979, 40, pp. 51-62.
- [49] R. J. BOBBIE & D. C. WHITE, *Appl. Environ. Microbiol.*, 1980. Vol. 39, n° 6, pp. 1212-1222.
- [50] J. GUEZENEC, J. Thèse Université Paris VI, 1985.
- [51] N. J. E. DOWLING, J. GUEZENEC & D. C. WHITE, In (Biodeterioration 7 Houghton, D. R., R. N. Smith, H. O. W. Egging Eds) Elsevier Applied Science, 1987, pp. 404-410.
- [52] A. W. OLOWE, Ph. BAUER, J. M. R. GENIN & J. GUEZENEC, *Corrosion*, 1989. Vol. 45, n° 3, pp. 229-235.
- [53] S. C. DEXTER, O. W. SIEBERT, D. J. DUQUETTE & H. A. VIDELA, *Corrosion/89*. Paper n° 616. New Orleans, 1989.
- [54] R. GUNDERSEN, B. JOHANSEN & P. O. GARTLAND, *Corrosion/89* Paper 106. New Orleans, 1989.
- [55] L. FIKSDAL & J. GUEZENEC, *Int Congress on Marine Corrosion and Fouling*, Valencia, 1988.
- [56] M. THERENE, Thèse Université Paris VI, 1989.
- [57] J. GUEZENEC, M. THERENE, N. J. E. DOWLING & D. C. WHITE (submitted to *Biofouling*), 1989.
- [58] J. GUEZENEC & E. ANTOINE, *Mat et Tech.* 1990.
- [59] R. JOHNSEN & E. BARDAL, *Corrosion/86*. Houston, pp. 1-6.
- [60] HERNANDEZ, Thèse Université Techn. Compiègne, 1989.

N.B. : Ces références ne constituent que quelques références bibliographiques ayant servi spécifiquement pour la rédaction de cet article. De nombreux autres articles existent en ce domaine et le lecteur est invité à s'y référer.