

BREVET P. et RAHARINAIVO A.

Labratoire Central des Ponts et Chaussées, France

Etude de la corrosion bactérienne des métaux dans un remblai

Microbiological corrosion of metals in embankment

The bacterial corrosion mechanisms are reviewed. The types of microorganisms, their effects on metals and their conditions of propagation are described. Some examples of metal deterioration in fields and in laboratory are given. The criteria for preventing corrosion in transported soils are presented.

1 - GENERALITES

L'action corrosive des micro-organismes vis à vis des métaux est un problème bien connu des distributeurs et des utilisateurs d'eau, des avionneurs et des producteurs ou utilisateurs de produits pétroliers. La présence de bactéries est pratiquement inévitable dans les sols et matériaux de remblai et leur action se manifestera sur les métaux en présence d'eau douce ou salée et de sels minéraux divers. Certaines bactéries ont besoin d'un apport d'oxygène ; d'autres sont anaérobies. Certaines bactéries se développent en présence de composés organiques (plus ou moins élaborés) mais la plupart prolifèrent en présence de sels minéraux et de gaz carbonique.

La corrosion bactérienne n'est pas une action directe de ces organismes sur les métaux et nous en rappellerons au chapitre suivant les processus. Nous indiquerons ensuite le rôle des trois principaux groupes de bactéries qui engendrent la corrosion puis quelques éléments de prévention.

2 - LES MECANISMES DE LA CORROSION BIOLOGIQUE

L'action corrosive des micro-organismes sur les métaux et les bétons a été décrite par plusieurs auteurs dont GATELLIER (1) IVERSON (2) CHANTEREAU (3)

- Sur les métaux - cinq processus, qui peuvent être combinés simultanés ou successifs, sont possibles :

2.1 - CORROSION CHIMIQUE PAR LES PRODUITS DU METABOLISME DES MICRO-ORGANISMES

Les bactéries autotrophes retirent leur énergie des sels minéraux présents dans les sols ou les eaux et métabolisent des sels agressifs, des acides minéraux (acide sulfurique, phosphorique, nitrique) ou des anhydrides (anhydride sulfureux, ammoniac). Ces composés chimiques augmentent la corrosivité du milieu environnant le métal en le modifiant (acidification, enrichissement en ions agressifs). D'autres organismes vivants, tels que les champignons ou les algues, et les bactéries chimiotrophes secrèteront également des acides (acides organiques) ou des enzymes qui s'attaqueront à de nombreuses matières organiques et libéreront ainsi des composés plus simples (méthane, hydrogène sulfuré, gaz carbonique) qui serviront au développement d'autres espèces de micro-organismes.

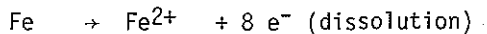
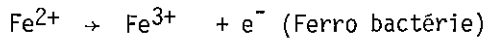
2.2 - CORROSION ELECTROCHIMIQUE PAR FORMATION DE PILES D'AERATION DIFFERENTIELLE OU DE PILES DE CONCENTRATION.

Les colonies de bactéries fixées sur un support métallique engendrent au droit de leur implantation un appauvrissement en oxygène qu'elles consomment ou qui ne peut être renouvelé. On obtient alors une zone "anodique" de dissolution sous cette colonie qu'entoure la zone "cathodique" du métal. Les colonies d'organismes peuvent également engendrer des concentrations en sels (anions ou cations) qui, entre la zone couverte et la zone périphérique du métal, formeront des piles de concentration avec dissolution de ce métal au droit de la zone anodique.

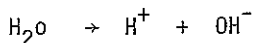
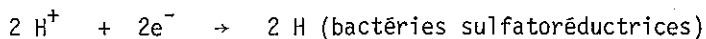
2.3 - PHÉNOMÈNES DE DEPOLARISATION

Dans un électrolyte (l'eau par exemple) un métal est naturellement soumis à une dissolution qui entraîne la formation de cathodes et d'anodes en surface au niveau desquelles s'adsorbent des ions (hydrogène à la cathode - métal à l'anode) qui polarisent les anodes et cathodes et ralentissent fortement le processus de dissolution. Les bactéries en utilisant ces ions comme donneurs (oxydants) ou accepteurs (réducteurs) d'électrons rompent l'équilibre électrochimique établi ce qui entraîne une dissolution nouvelle du métal pour rétablir cet équilibre.

Exemple : à l'anode



à la cathode



2.4 - DESTRUCTION DES FILMS PROTECTEURS

Cette action est indirecte. Les micro-organismes détériorent mécaniquement ou chimiquement les revêtements de protection appliqués sur les métaux (bitumes peintures) ou les films d'oxyde protecteurs (oxydes naturels ou obtenus par traitement de surface) : par exemple les *Pseudomonas aeruginosae* dégradent les hydrocarbures.

2.5 - DESTRUCTION DES INHIBITEURS DE CORROSION

Par des processus analogues à ceux conduisant à la destruction des films protecteurs, les bactéries sont susceptibles de détruire les inhibiteurs.

3 - RAPPEL DES PRINCIPAUX AGENTS DE LA CORROSION BIOLOGIQUE

3.1 - LES FERROBACTERIES

Elles tirent leur énergie de l'oxydation des ions ferreux en ions ferriques. En leur présence se forme un amas volumineux de rouille renfermant la colonie, sous lequel une dissolution ininterrompue du fer se produit.

On les trouve dans les eaux ferrugineuses ou contenant des sels de manganèse et, dans les eaux stagnantes. La plupart sont aérobies et croissent en milieu neutre en présence d'algues. Cependant un certain nombre d'espèces peuvent se développer en l'absence presque totale d'oxygène ou en milieu acide : ferro-

bacillus ferrooxydans se développe au pH de 3,5, est aérobie et autotrophe, on le trouve dans les déchets miniers.

Les nuisances des ferrobactéries sont essentiellement des perforations et des obstructions de canalisations.

3.2 - LES BACTERIES SULFATOREDUCTRICES

L'espèce type de ces bactéries est le *Desulfovibrio desulfuricans* (4) (5). Elles se développent en l'absence d'air (anaérobiose) mais ne sont pas détruites par l'oxygène. Elles se trouvent dans les eaux douces, les eaux de mer les sols ou les sédiments. Elles tirent leur énergie de différents composés organiques plus ou moins simples provenant de la dégradation de matières organiques complexes.

Elles réduisent les sulfates en hydrogène sulfuré qui agira sur les divers métaux présents. Leurs nuisances sont importantes quelle que soit la nature du métal (aciers, zinc, plomb, aluminium, alliages divers) à la surface duquel les colonies se développent et dissolvent le matériau qu'elles recouvrent.

La formation de sulfures adhérents peut bloquer leur progression. Les figures 1 et 2 montrent l'action de *Desulfovibrio* sur des alliages d'aluminium (6).

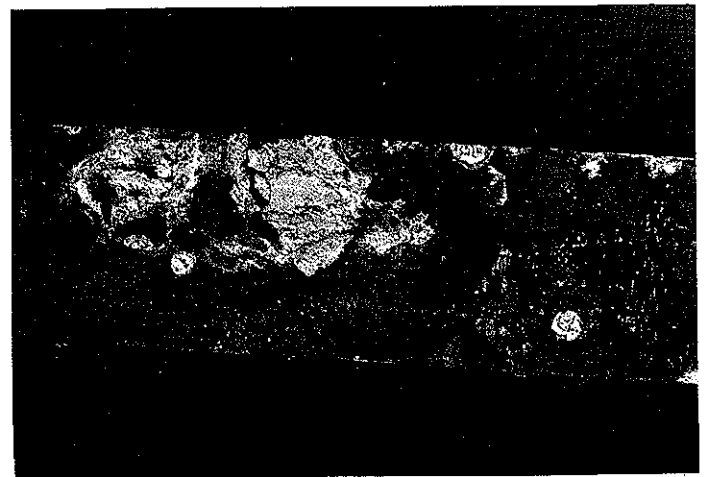


FIGURE N° 1 - Alliage d'aluminium corrodé jusqu'à dissolution totale sous des colonies de *Desulfovibrio desulfuricans* (zones blanches). Dépôts adhérents de sulfure de fer (zones noires) formés par l'action de ces mêmes bactéries.

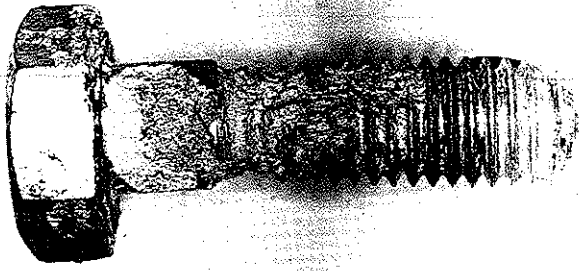


FIGURE N° 2 - Alliage d'aluminium dissous sous une colonie de bactéries sulfatoréductrices

3.3 - LES SULFOBACTERIES

Elles agissent en métabolisant le soufre ou en oxydant le soufre sous forme d'acide H_2SO_4). On distingue quatre familles :

- a) Thiorhodaceae qui se développent à la lumière en anaérobiose et que l'on trouve dans les vases et eaux stagnantes en présence d'hydrogène sulfuré.
- b) Chlorobacteriaceae dont le développement se fait en présence de lumière et d'hydrogène sulfuré, conditions réunies généralement dans les boues et eaux stagnantes.
- c) Beggiatoaceae dont l'habitat est l'eau (douce ou eau de mer) contenant de l'hydrogène sulfuré ou parfois du soufre. Les estuaires sont des lieux de développement de toutes les espèces.
- d) Thiobactériaceae qui sont présentes dans les sols et les eaux contenant des composés sulfurés. Le genre le plus dangereux vis à vis des métaux est celui des Thiobacillus qui se développent en milieu acide ou basique en présence de gaz carbonique ou de bicarbonate et facultativement en anaérobiose en présence de nitrates. Nous citerons par exemple : Thiobacillus ferrooxydans bactérie autotrophe aérobie se développant en présence de sels d'ammonium et de fer (pyrite marcasite) en milieu acide (pH = 3 à 6), cette bactérie est présente dans les déchets miniers et les schistes.

La figure 3 montre l'effet de l'acidification provoquée par cette famille de bactéries sur un acier galvanisé (7).



FIGURE N° 3 - Corrosion d'un acier galvanisé provoquée par l'acidification du sol (pH local 3, pH initial 6 à 7,6) après oxydation de la pyrite en présence de sulfobactéries

4 - CONDITIONS PARTICULIERES AUX SOLS REMANIES

Les matériaux de remblai sont des matériaux d'apport dont on peut choisir les caractéristiques en fonction de la résistance à la corrosion des métaux à leur contact. A la lumière des éléments qui viennent d'être exposés, la prévention de la corrosion bactérienne portera sur :

4.1 - LA TENEUR EN MATIERES ORGANIQUES

Les micro-organismes chimioorganotrophes se développent en présence de matières organiques plus ou moins élaborées, leur absence dans un sol ne permet donc pas l'activité biologique. L'expérience montre qu'un minimum de 20 à 50 ppm de matières organiques (valeur en carbone organique) est nécessaire au développement des bactéries qui puisent leur énergie de ces matières.

Nous avons trouvé pour notre part dans les remblais siège de corrosion bactérienne (6) des teneurs de 200 à 700 ppm de carbone organique.

4.2 - LA TENEUR EN EAU

Pour les remblais non immergés, une faible humidité ne permet pas le développement des colonies de bactéries. Cette humidité est liée à la granulométrie.

Un matériau drainant tel qu'un sable siliceux à faible teneur en fines retient mal l'eau d'infiltration. Par contre un matériau à forte teneur en éléments fins retient une importante quantité d'eau. D'autre part les matériaux les plus fins favorisent la création de zones anaérobies au contact des métaux.

4.3 - LA TENEUR EN SELS MINÉRAUX

Les bactéries autotrophes ont, pour source d'énergie des sels minéraux, pour source de carbone, le gaz carbonique, les carbonates et les bicarbonates, et pour l'azote, les nitrates ou l'azote.

Dans les remblais aérés la présence d'azote et de gaz carbonique est inévitable, on devrait donc limiter les teneurs en sels minéraux lorsque la teneur en eau de rétention est élevée.

Dans les remblais immergés pour lesquels le gaz carbonique et l'azote sont rapidement éliminés il convient d'éviter la présence de nitrates, carbonates et bicarbonates solubles ainsi que celle des composés soufrés incomplètement oxydés.

4.4 - L'ACTIVITÉ BIOLOGIQUE

Si dans un matériau de remblai on dénombre des bactéries en nombre important, ce sol remplit les conditions de prolifération de ces micro-organismes et il convient alors de le traiter avant utilisation par oxydation complète des matières organiques, ou de ne pas l'utiliser.

Les méthodes de comptage et de culture des différentes espèces sont décrites par POCHON et TARDIEUX (8) ou CHANTEREAU (3). Un milieu de culture spécifique de chaque genre est nécessaire. Les recherches des *Desulfovibrio* et des bactéries sulfoxydantes seront effectuées lorsque l'on craint leur développement (sols immergés - présence de composés soufrés). Il est admis, par les biologistes, qu'au dessous de 10 bactéries par gramme de sol, ce sol n'est pas favorable au développement d'une colonie importante. En fait ce critère est critiquable pour les matériaux extraits en profondeur et contenant des composés soufrés incomplètement oxydés qui, remaniés et mis en présence d'air, peuvent être le siège d'une activité biologique importante en aérobie.

5 - ESSAIS DE CORROSION BIOLOGIQUE

5.1 - MATÉRIAUX D'ESSAIS

Les expérimentations de corrosion microbiologiques doivent porter sur des métaux et des sols particuliers. En effet, comme nous l'avons rappelé, les bactéries n'ont pas les mêmes influences selon leur nature et leur quantité. Une expérimentation ne porte donc que sur un sol donné et ses résultats ne sont pas toujours faciles à généraliser.

De même, l'état des matériaux métalliques a une grande importance sur les conséquences de la corrosion biologique.

D'une façon générale, ces matériaux d'essais doivent être dans un état aussi proche que possible de celui qu'ils ont en service.

5.2 - CONDITIONS D'ESSAIS

La corrosion bactérienne ne peut se produire que si les bactéries peuvent proliférer. Il est donc nécessaire de placer le sol et l'éprouvette métallique dans un milieu nourricier des micro-organismes.

Le choix de ce milieu est délicat et important, car une non prolifération des bactéries sur le métal peut être due non pas à une absence de corrosion, mais à un mauvais choix de conditions de prolifération.

En général, l'ensemble constitué par le métal, le sol et le milieu de culture est placé dans un tube scellé et porté à une température compatible avec la prolifération rapide des micro-organismes et avec la température de service.

5.3 - RESULTATS

Les figures 4 et 5 montrent les résultats que nous avons obtenus (6) sur des sols contenant 60, 130 ou 250 *Desulfovibrio desulfuricans* par gramme. Sur le site la population atteignait 25 000 bactéries par gramme à proximité des métaux corrodés. Les études en laboratoire ont permis de reproduire la prolifération constatée en service.

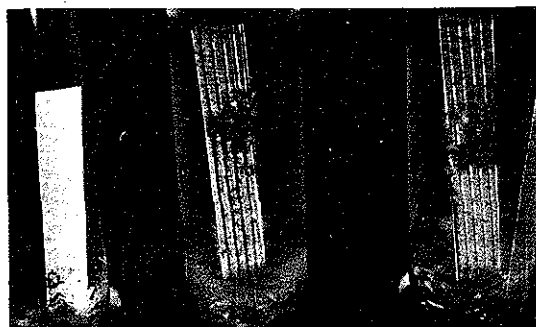


FIGURE N° 4 - Culture *in vitro* de *Desulfovibrio desulfuricans*.
Formation d'une gelée blanchâtre au niveau de la colonie.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) GATTELIER C . COUTRIS R. "La corrosion des conduites d'eau et de gaz - Causes et remèdes" 1968 Eyrolles Ed. p 185 - 201
- (2) IVERSON WP - Mechanisms of microbial corrosion. Adv. Corros. Sci. Technol. 1972 - 2 , p 1 à 42
- (3) CHANTEREAU J - Corrosion bactérienne - Bactéries de la corrosion - Technique et Documentation - 1977
- (4) Von WOLZOGEN KUHR, Van der VLUGT - 1934 - Water 18 (16) 147 - 165
- (5) IVERSON WP - A possible role for sulfate reducers in the corrosion of aluminium alloys. Electro. Chem. Tech. 1967 , 5, 77 - 9
- (6) RAHARINAIVO A. - BREVET P. - Corrosion d'alliages d'aluminium dans un remblai situé en eau de mer. 4ème Congrès international Corrosion marine et salissures - Antibes - Juan les Pins - 1976 p 425.429
- (7) CHEVASSU G. - LEBRIS J. - Bull Liaison des Ponts et Chaussées - 1978 - 95 - p 151 . 152
- (8) POCHON J. - TARDIEUX P. - Techniques d'analyse en microbiologie du sol . 1962 . Ed de la Tourelle - St Mandé.

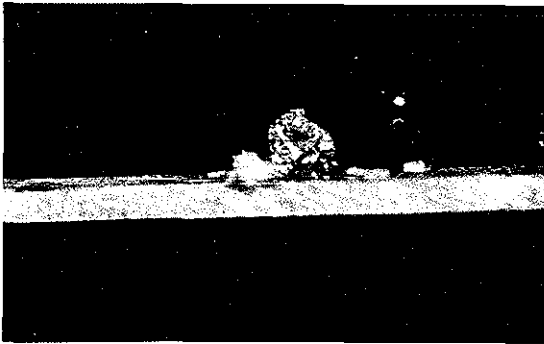


FIGURE N° 5 - Colonie de bactéries sulfatoréductrices et produits de corrosion sur un alliage d'aluminium (phénomène reproduit en laboratoire).

6 - CONCLUSIONS

Les quelques exemples cités de corrosion bactérienne sont peu fréquents lorsqu'il s'agit de remblais. Toutefois il convient de ne pas ignorer les désordres possibles qu'apporte l'activité biologique dans les sols sur les métaux qui y sont incorporés, car ce type de dégradation n'est pas facile à maîtriser. Les remblais utilisés pour le renforcement des sols ne devraient donc pas contenir de parties organiques.