



ENJEUX SCIENCES

BIODÉGRADATION DES MATÉRIAUX

QUELS RISQUES POUR LA SANTÉ ET L'ENVIRONNEMENT ?

JEAN GUÉZENNEC, coord.

éditions
Quæ

BIODÉGRADATION DES MATÉRIAUX

QUELS RISQUES POUR LA SANTÉ
ET L'ENVIRONNEMENT ?

BIODÉGRADATION DES MATÉRIAUX

QUELS RISQUES POUR LA SANTÉ
ET L'ENVIRONNEMENT ?

JEAN GUÉZENNEC, coord.

Dans la même collection

Les virus, ennemis ou alliés ?

Stéphane Biacchesi, Christophe Chevalier, Marie Galloux,
Christelle Langevin, Ronan Le Goffic, Michel Brémont
2017, 110 p.

Les végétaux, un nouveau pétrole ?

Jean-François Morot-Gaudry
2016, 160 p.

L'homme et les forêts tropicales, une relation durable ?

Benjamin Singer
2015, 198 p.

Plantes génétiquement modifiées, menace ou espoir ?

Jean-Claude Pernellet
2015, 96 p.

Éditions Quæ

RD 10

78026 Versailles Cedex, France

www.quae.com

© Éditions Quæ, 2017

ISBN 978-2-7592-2452-4

ISSN 2267-3032

Le Code de la propriété intellectuelle interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique, et est sanctionné pénalement. Toute reproduction, même partielle, du présent ouvrage est interdite sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20 rue des Grands-Augustins, Paris 6^e.

Sommaire

Quel est le coût de la corrosion ?	9
Qu'est-ce que la corrosion ?	9
Un coût difficile à chiffrer.....	11
Conclusion	20
Que sont les biofilms et la biocorrosion ?	23
Les séquences de la formation du biofilm en milieu aqueux.....	25
Un biofilm, pour quelles conséquences ?	27
Et le milieu marin ?.....	36
Corrosion bactérienne vs autres formes de corrosion	40
Conclusion	40
Quel est le processus de biodétérioration des matériaux de construction ?	43
Qu'est-ce que la biodétérioration ?	43
Quels en sont les mécanismes ?	45
Un cas d'école : la dégradation d'infrastructures de traitement des eaux usées	51
Cas des bétons armés.....	53
La biodétérioration des monuments historiques	54
Quelles solutions ?	57
Qu'en est-il des matériaux plastiques ?	61
Le processus de biodétérioration et de biodégradation des polymères.....	63
Qu'en est-il des polymères issus de ressources renouvelables ?	70
Quelles solutions ?	72
Quel type de corrosion l'industrie agroalimentaire génère-t-elle ? ..	75
Corrosion des aciers inoxydables	77
Détérioration chimique, physique, biologique et corrosion.....	78
Les solutions à mettre en place contre la corrosion	81
Les traitements pour éliminer la corrosion	84
Conclusion	85
Comment se protéger de la biodétérioration et des biofilms ?	87
La colonisation microbienne et le biofilm : deux éléments déterminants dans la dégradation des matériaux	87
Comment analyser un biofilm ?	88
Comment lutter contre le processus de colonisation et la formation d'un biofilm en milieu naturel ?	91
Cas spécifique du milieu marin	97
Protection cathodique et microorganismes	102
Conclusion	103
Bibliographie	105
Glossaire	115
Liste des co-auteurs	119

*L'habitude nous joue des tours :
Nous qui pensions que notre amour
Avait une santé de fer.
Dès que séchera la rosée,
Regarde la rouille posée
Sur la médaille et son revers.
Elle teinte bien les feuilles d'automne.
Elle vient à bout des fusils cachés.
Elle rongerait les grilles oubliées
Dans les prisons s'il n'y avait personne.
Moi je la vois comme une plaie utile,
Marquant le temps d'ocre jaune et de roux.
La rouille aurait un charme fou
Si elle ne s'attaquait qu'aux grilles.
Avec le temps tout se dénoue.
Que s'est-il passé entre nous,
De petit jour en petit jour ?
À la première larme séchée,
La rouille s'était déposée
Sur nous et sur nos mots d'amour.
Si les fusils s'inventent des guerres
Et si les feuilles attendent le printemps,
Ne luttons pas comme eux contre le temps.
Contre la rouille il n'y a rien à faire.
Moi je la vois comme une déchirure,
Une blessure qui ne guérira pas.
Notre histoire va s'arrêter là.
Ce fut une belle aventure.
(...)*

Maxime Le Forestier, *La Rouille*

Les termes signalés par un astérisque (*)
sont explicités dans le glossaire en fin d'ouvrage.



QUEL EST LE COÛT DE LA CORROSION ?

JEAN GUÉZENNEC

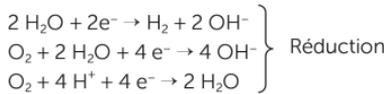
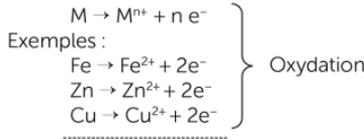
QU'EST-CE QUE LA CORROSION ?

Le mot « corrosion » vient du latin *corrodere*, qui signifie « ronger », « attaquer ». La corrosion peut être définie comme l'interaction physico-chimique entre un matériau et son milieu environnant conduisant à une altération de ce matériau. Dans le cas des métaux et alliages, il est possible de la définir comme un retour à leur état le plus stable, voire à leur état originel de minerais, sous forme d'oxydes, d'hydroxydes, de sulfures, de carbonates ou autres sels. Mais le terme a une signification plus large et ne s'applique pas qu'aux seuls alliages métalliques. On parle également de corrosion du verre, du béton, des céramiques, des polymères*, de toute surface pouvant subir une altération sous l'effet de paramètres physico-chimiques et biologiques. Dans ce dernier cas, on pourra parler de biodétérioration, de bioaltération ou de biodégradation* de ces matériaux plutôt que de corrosion.

La corrosion est un phénomène connu de tous les ingénieurs et concepteurs d'ouvrage, mais qui est souvent moins pris en considération que les propriétés physico-chimiques et mécaniques des matériaux. La corrosion, au sens large du terme, se retrouve dans tous les domaines, des matériaux de construction aux implants orthopédiques, en passant par tous les objets de notre quotidien.

Il existe une règle clairement admise dans le domaine de la corrosion : si l'on ne peut stopper les phénomènes de corrosion, ils peuvent néanmoins être ralentis. Partant de ce constat, il est nécessaire de comprendre les mécanismes de corrosion afin de mieux les anticiper et ainsi y travailler en amont.

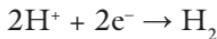
La corrosion métallique est un phénomène électrochimique résultant de la combinaison d'une réaction d'oxydation du métal et de la réduction d'un oxydant (ex. : O_2). En conditions aérobie*, cette corrosion (oxydation) peut être résumée selon les réactions électrochimiques suivantes :



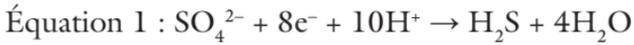
Pour le fer, la résultante de ces deux équilibres est la formation d'oxydes, d'hydroxydes, d'oxyhydroxydes et de sulfates complexes de fer, formant alors ce que l'on appelle communément la « rouille ».

Exemple : $(Fe(OH)_2, Fe(OH)_3, Fe_3O_4, FeO(OH) (\alpha, \beta, \gamma \text{ et } \delta) \text{ et } Fe_2O_3, xH_2O$.

En conditions anaérobies*, la réaction de réduction est portée par celle des protons issus de la dissociation de l'eau :



De fait, cette réaction est plus lente, surtout à des $pH > 6$, et on peut donc considérer, tout au moins en théorie, que dans de telles conditions d'absence d'oxygène, il ne peut y avoir de corrosion du fer, ou tout au moins qu'il s'agira d'un phénomène très lent. Mais dans ces conditions anaérobies, d'autres réactions de réduction peuvent se substituer à celles de l'eau ou de l'oxygène, comme la réduction des nitrates en nitrites ou azote, mais surtout la réduction des ions sulfates en sulfures (équation 1). Cette dernière réaction est le fait de bactéries du cycle du soufre, et plus particulièrement de bactéries sulfato-réductrices*.



Cette corrosion métallique peut revêtir différentes formes : corrosion généralisée, corrosion localisée, corrosion sélective (alliages métalliques), corrosion par aération différentielle, corrosion galvanique, corrosion caverneuse, corrosion intergranulaire, corrosion par piqûrations, corrosion-érosion, corrosion sous contrainte, fragilisation par l'hydrogène et enfin corrosion biologique, ou corrosion induite par les microorganismes (CIM).

UN COÛT DIFFICILE À CHIFFRER

Si l'on considère la multitude de formes que peut prendre la corrosion, le fait qu'elle concerne tous les matériaux et enfin les notions de coûts directs et indirects, il reste très difficile de mesurer précisément le coût de la corrosion. Mais les enjeux sont essentiellement de trois ordres : humains, environnementaux et économiques.

Les enjeux

Humains

La corrosion peut s'avérer un sérieux problème de sécurité sanitaire à plusieurs niveaux. Une contamination des aliments par les microorganismes de surface dans le cas de conserveries et une libération d'ions toxiques liée à une corrosion d'ordre microbiologique peuvent avoir des conséquences désastreuses sur la santé humaine. Il faut y ajouter la corrosion d'implants ou les problèmes associés à l'utilisation d'instruments chirurgicaux. D'autres catastrophes avec des pertes humaines ont été reliées à la corrosion ou à un mauvais entretien des structures, parmi lesquelles : près de 250 morts et des milliers de blessés lors de l'explosion d'une conduite de gaz à Guadalajara, au Mexique, en 1992, où une des hypothèses de travail pointait le rôle des microorganismes, et en particulier des bactéries sulfato-réductrices ; l'effondrement d'un pont en 2007 à Minneapolis,

aux États-Unis, avec 13 morts et plusieurs dizaines de blessés ; l'effondrement du toit du Palais des Congrès à Berlin en 1980. La plus dramatique reste cependant la catastrophe de Bhopal, en Inde, en 1984, qui fit près de 8 000 morts. Une thèse évoquée est celle d'une corrosion des conduites en acier générant des fuites d'eau dans des réservoirs contenant de l'isocyanate de méthyle, avec les produits de corrosion comme catalyseurs d'une réaction alors explosive et la libération de gaz toxiques. Plus proche de nous, citons en 2009 le naufrage du ferry tongien *Princess Ashika* causant la mort de 74 personnes, naufrage dû à des portes non étanches du fait de la corrosion, ou encore une explosion de gaz naturel à Saint-Jean-d'Angély, en France, en 2011, liée à un processus de corrosion. Et combien d'autres exemples de pertes humaines ayant comme origine la corrosion de structures et d'ouvrages métalliques ou en béton ou, plus exactement, et comme cela est souvent le cas, un mauvais entretien de ces ouvrages ou, *a minima*, une mauvaise appréciation de leur durée de vie !

N'oublions pas d'autres cas, certes moins relatés dans la littérature, concernant les animaux, élevages de bétail et bâtiments associés. Les eaux usées provenant de ces structures sont souvent riches en chlorures et en ammoniac et abritent une population bactérienne diversifiée, conditions favorables à l'initiation de corrosion, comme la dégradation de structures en béton dans une ferme au Canada qui avait causé la mort de plusieurs centaines de porcs.

Environnementaux

La corrosion est la cause de catastrophes environnementales, les plus connues étant l'effondrement et la destruction de structures métalliques (plateformes *offshore*, pipelines, etc.) avec des fuites de produits nocifs et un risque de contamination des sols, rivières, fleuves et nappes phréatiques. Il en va de même pour les structures en béton (ponts, ouvrages anciens), sans oublier naturellement la circulation de « poubelles flottantes » sur nos océans et les naufrages avec les conséquences environnemen-

tales qui en découlent (*Erika, Tanio, Exxon Valdez*, et combien d'autres non répertoriés). Un choix inapproprié des matériaux, une absence de considération de toutes les conditions environnementales, des négligences dans le suivi des structures, mais aussi la non-prise en compte de la composante biologique sont souvent la cause de ces catastrophes environnementales. Un seul exemple parmi tant d'autres : 1 million de litres de pétrole brut furent déversés sur plusieurs hectares de la toundra enneigée de l'Alaska en mars 2006, conséquence de la corrosion interne des pipelines en acier ayant dépassé une durée de fonctionnement programmée.

Économiques

Tous les secteurs de l'industrie, sans exception, sont concernés par la corrosion. Entre 2000 et 2001, la Federal Highway Administration (FHWA) et la NACE (National Association of Corrosion Engineers) ont réalisé une des rares études complètes à ce jour sur le coût de la corrosion aux États-Unis. Cette étude a conduit à une estimation des coûts directs de la corrosion de plus de 276 milliards de dollars par an, soit près de 3 % du produit national brut (PIB). Cette somme représentait alors une contribution de près de 970 dollars par an pour chaque Américain ! D'autres études plus récentes réalisées en Chine, au Japon, au Royaume-Uni, en France et en Australie ont conduit à la même conclusion, c'est-à-dire un coût correspondant à 3 % à 4 % du PIB, soit la somme gigantesque de près de 1,8 milliard de dollars par an au niveau mondial ! Et il ne s'agit ici que de coûts directs, c'est-à-dire liés aux actions de réparation, de maintenance et de remplacement des matériaux et structures endommagés. Les coûts indirects sont plus difficiles à évaluer et concernent les pertes de production, les impacts environnementaux, les cessations d'activités, les problèmes de circulation des biens et des personnes, ou liés à la rupture de canalisations (eau, fluides essentiels), sans oublier naturellement les conséquences humaines (arrêts de travail, blessures). Mais ils n'en seraient pas moins élevés, conduisant alors à un doublement du coût global de la corrosion. Cette étude date de plus de quinze ans (2001),

et de plus récentes estimations (2013) situaient le coût total de la corrosion aux États-Unis (coûts directs et indirects) à plus de 1 000 milliards de dollars, à comparer aux près de 550 milliards cités en 2001 !

À cet enjeu économique, il convient d’y ajouter un autre non négligeable, l’enjeu touristique. La dégradation des œuvres d’art, telles que toiles de maîtres, peintures rupestres ou parchemins anciens, et des monuments historiques, qui pour certains d’entre eux font partie de notre patrimoine mondial (pyramides, monuments, églises, ponts), peut avoir pour conséquence une diminution de leur attrait touristique. Il s’ensuit des pertes économiques conséquentes, pertes auxquelles viennent s’ajouter naturellement les coûts de remise en état et de protection de ces œuvres d’art et monuments.

Si l’on prend toujours comme point de référence cette étude très complète menée par la NACE en 2001, et il est fort à parier que les données de ce jour ne soient pas fondamentalement différentes, tous les secteurs industriels sont donc concernés par la corrosion (figures 1 et 2). Cette étude montre que les secteurs les plus affectés restent les circuits de distribution d’eau et ceux d’évacuation des eaux usées, le secteur des transports (voitures, trains, avions) et le secteur de la défense. Les circuits de distribution des produits pétroliers, les infrastructures (ex. : ponts autoroutiers) ainsi que le stockage de produits dangereux contribuent également de manière significative au coût global de la corrosion.

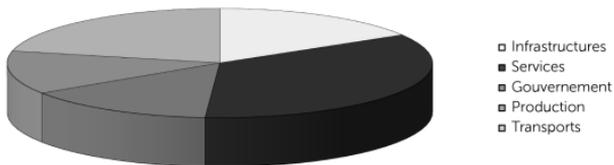


Figure 1. Coût de la corrosion (%) aux États-Unis par grand secteur d’activités (Koch *et al.*, 2002).

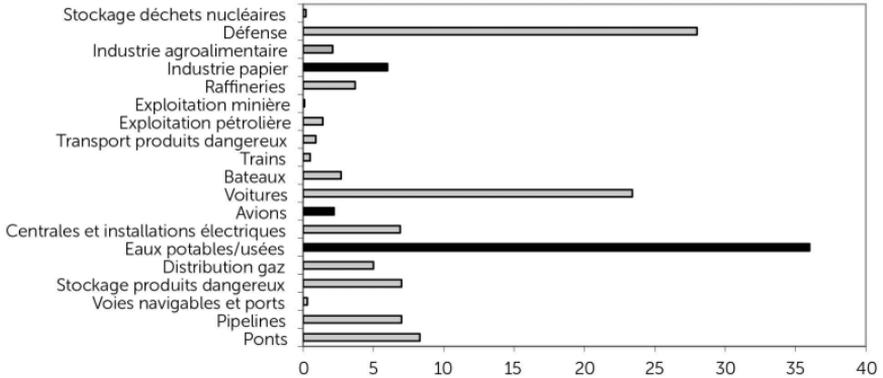


Figure 2. Coût de la corrosion (en milliards de \$) aux États-Unis par secteur économique (Koch *et al.*, 2002).

Les secteurs les plus affectés

Les infrastructures

Les infrastructures (*onshore* et *offshore*) routières, ferroviaires, aéroportuaires et portuaires (routes, tunnels, ponts, gares, aéroports, ports, quais) et le stockage de produits dangereux représentent près de 16 % du coût total de la corrosion. Plus de 600 000 ponts ont été construits aux États-Unis entre 1950 et 1994, soit des durées de vie actuelles, pour certains d'entre eux, de près de 70 ans ! Mais près de 10 % à 15 % de ces ponts présenteraient aujourd'hui, en 2017, des risques du fait de leur dégradation, et plusieurs milliards de dollars devraient être investis dans leur réparation ou leur remplacement. Les voies navigables et les installations portuaires (quais, docks, structures d'amarrage, murs de prévention) sont naturellement concernées par la corrosion, mais peu de données précises existent, pour un coût néanmoins estimé à près de 300 millions de dollars. Les voies ferrées (rails) ne sont pas épargnées par ces problèmes de corrosion, de même que les aéroports, avec les réserves, le stockage et l'acheminement de carburants, ainsi que les infrastructures aéroportuaires.

Les services

Les services, c'est-à-dire les circuits de distribution d'eau, de gaz et d'électricité, mais également toutes les infrastructures de traitement des eaux usées et des égouts, comptent pour un large pourcentage dans le coût global de la corrosion (près de 35 %), avec des sommes annuelles de plusieurs dizaines de milliards de dollars. La plus grande part de ces coûts, pour près de 75 %, est liée aux services de distribution d'eau potable ainsi qu'au traitement des eaux usées. Aux États-Unis, près de 15 % de l'eau potable est ainsi perdue et, dans 90 % des cas, cette perte serait due à des problèmes de corrosion de canalisations. En Europe, la corrosion et la rupture de canalisations d'eau potable étaient responsables en 2004 de près de 30 % de la perte d'eau entre les usines de traitement et sa disponibilité pour le consommateur.

Les moyens de transport

Les moyens de transport (trains, avions, bateaux et surtout voitures) comptent pour plus de 21 % du coût de la corrosion, avec comme objectifs pour les industriels de ce secteur le développement de nouveaux matériaux résistant à des environnements agressifs, ainsi que des revêtements et des technologies d'élimination des produits de combustion. À ces études de recherche et développement viennent s'ajouter des coûts de maintenance significatifs, quel que soit le moyen de transport choisi. À titre d'exemple, le coût moyen de maintenance d'un avion de ligne avoisine près de 150 000 euros par an.

Les structures de production ou de transformation

Sont concernés les moyens de production d'énergie et les moyens de stockage de ces énergies (industrie pétrolière, industrie nucléaire, énergies solaire, géothermique, éolienne, hydrolienne, etc.), mais aussi toutes les usines de production (raffineries, aciéries, industries chimiques, pharmaceutiques, agroalimentaire, etc.). Toutes ces structures de production ou de transformation

sont confrontées à des problèmes de corrosion sur le moyen et le long terme, avec des conséquences sur leur sécurité et leur durée de vie. Si l'on considère par exemple l'industrie nucléaire et le stockage de déchets radioactifs, sujets très sensibles aux yeux de l'opinion publique, ces structures, principalement construites en béton armé, doivent avoir une durée de vie de plusieurs centaines d'années ! Aux États-Unis, chaque heure, ce sont environ 500 kg d'acier qui sont détruits pas la corrosion ! C'est aussi quelque 5 tonnes d'acier par seconde qui sont ainsi transformées en oxydes de fer dans le monde ! Pour la seule industrie pétrolière à l'échelle internationale, le coût des impacts directs et indirects ainsi que des opérations de contrôle et de prévention a été estimé à 30 milliards d'euros par an. Une intéressante étude menée en 2013 par la Commission européenne, portant sur les installations et raffineries pétrolières au sein de l'Union européenne et des pays de l'OCDE, a montré que plus de 20 % des 137 incidents majeurs notés depuis 1984 dans ces installations avaient comme origine la corrosion sous ses différentes formes.

Mais, dans ce secteur de l'énergie, il y a les problèmes récurrents et il y a ceux qu'il faut anticiper pour demain. Quelques exemples pour illustrer ce propos : la recherche d'alternatives à la production d'énergie fossile peut générer des problèmes qu'il convient de prendre en considération dès maintenant. Il en est ainsi de la production de gaz carbonique (CO_2) liée à la production d'énergie à partir des ressources fossiles (charbon, pétrole). Ce gaz carbonique est considéré comme responsable du réchauffement climatique de notre planète, avec les conséquences que tout le monde connaît. Une solution à cet excédent de CO_2 reste le stockage à grande profondeur. Mais cette technologie n'est pas aussi simple qu'il y paraît si l'on considère les problèmes de corrosion liés au CO_2 , mais également les nombreuses impuretés que ce gaz peut contenir (CO , SO_2 , H_2S). Il s'agit de technologies s'inscrivant dans le long terme et nécessitant donc une prise en considération de ces problèmes de dégradation des matériaux.