

F.MOULINIER, E. GÉRAUD *	Combien coûte la corrosion ?
* Institut de Développement de l'Inox Av. M. Berthelot F-44822 St-Herblain cedex	Table des matières: RESUME MOTS CLES INTRODUCTION COÛT DE LA CORROSION DANS LE MONDE ; ANALYSE PROPOSITION DE SOLUTIONS INCIDENCE DE LA CORROSION DANS LE COÛT GLOBAL CONCLUSION

1 RESUME

Le coût total, direct et indirect, de la corrosion est estimé entre 2,5 % et 4,5% du PIB mondial. Selon certaines sources, la corrosion consommerait chaque année près de 300 millions de tonnes d'acier et son coût serait de l'ordre de 2000 milliards de US \$ par an, soit un peu moins de la moitié des dépenses annuelles de santé.

Peut-être que parce qu'elle est considérée comme un phénomène normal, altération d'un objet par un oxydant, la corrosion est peut-être trop souvent assimilée à tort à une usure ou un vieillissement des matériaux « dans la nature des choses » et généralement subie avec résignation hormis quelques secteurs où elle est combattue avec vigueur et efficacité. Le secteur des industries de l'eau semblerait d'après les rapports l'un des plus gravement affectés par la corrosion. Poursuivant le parallèle avec les dépenses de santé, il est possible d'observer qu'à l'inverse, ces dernières deviennent de moins en moins subies et concourent de plus en plus à l'augmentation de l'espérance de vie tandis qu'une part croissante s'investit dans la prévention et la recherche.

Au-delà de l'estimation seule du coût de la corrosion, les experts se sont également penchés sur les moyens d'en réduire l'incidence économique. Cela passe par une décomposition et une analyse des coûts afin de déterminer le type d'actions les plus efficaces à engager.

Certains rapports suggèrent que ces coûts pourraient être diminués très significativement si les règles de l'art lors de la conception et la mise en œuvre des équipements étaient mieux respectées. Cette suggestion s'avère exacte dans le cas des équipements en inox par exemple à partir d'une analyse des causes de corrosion : les cas de corrosion rencontrés résultent de malfaçons et peuvent être évités par le simple respect de quelques règles et principes élémentaires ; la durée de vie des équipements s'en trouve ainsi très largement augmentée. Cet exemple sur les aciers inoxydables est sans doute transposable aux autres matériaux métalliques.

Parmi les autres pistes de réduction des coûts de corrosion figure le choix des méthodes constructives : il est montré qu'un léger surcoût à l'investissement peut engendrer des économies significatives sur les frais de maintenance et d'entretien, et contribuer à augmenter la durée de vie des équipements.

Mais outre le coût économique directement chiffrable de la corrosion celle-ci exerce un impact très défavorable sur l'environnement : pollutions, accidents et dispersion de produits de corrosion dans l'environnement, sans compter les coûts et l'impact d'une reconstruction prématurée des équipements.

Or il s'avère que le coût environnemental proposé dans les calculs de coût global –ISO 15686- est à l'heure actuelle très difficile à évaluer. Parallèlement, les observations montrent que dans la plupart des cas, les meilleures solutions en coût global, donc prenant en compte par exemple des dispositions contre la corrosion sont souvent bonnes pour l'environnement. Dans ces conditions le choix du « mieux disant » dans un appel d'offres, présentant un meilleur coût global, pourrait être parmi la moins mauvaise des solutions par rapport à l'environnement.

Si la corrosion « coûte » 3% du PIB, à l'inverse elle peut être génératrice de ce PIB et contribuer ainsi à la croissance ; mais ne nous y trompons pas : la croissance dont nous avons besoin doit être saine et durable, par opposition à une croissance du jetable, celle précisément que produit la corrosion.

2 MOTS-CLÉS

Corrosion, coût de la corrosion, prévention de la corrosion.

3 INTRODUCTION

La 19ème campagne de peinture de la Tour Eiffel va commencer : 25 peintres équipés de harnais vont escalader la « Grande Dame » pendant 18 mois pour gratter, meuler, décaper, réparer les dégâts de la corrosion et appliquer 60 tonnes de peinture sur 250 000 m² de surface à entretenir, pour un budget total estimé à 4 millions d'euros. Et dans 7 ans il faudra recommencer !

Après 3 années de travaux, le chantier de remplacement des câbles de précontrainte du viaduc de Saint Cloud, tous corrodés et menaçant la sécurité globale de l'ouvrage, vient de s'achever.

Aux Etats-Unis, l'on estime à 300 000 le nombre d'ouvrages d'art mis hors service victimes de la corrosion.

En Europe, quelque 1250 ponts et ouvrages d'art ont été démolis et reconstruits entre 1975 et 2005 ; conçus pour une durée de vie initiale de 100 ans, il ressort que leur durée de vie moyenne est de 73 ans, avec pour principale cause de dégradation la corrosion.

Dans le domaine de la construction les études réalisées par les économistes de la construction révèlent que les coûts d'exploitation, de maintenance et de réparations dans un hôpital conçu pour 30 ans représentent 88% du coût total du bâtiment.

La liste est longue et pratiquement inépuisable d'exemples de corrosion, réparations et dépenses associées, à laquelle il conviendrait d'ajouter les accidents de personnes, ou les multiples préjudices qu'elle engendre, qu'ils soient par exemple de nature environnementale ou esthétique.

Tous les secteurs économiques ne sont pas affectés de manière égale par la corrosion, mais certains rapports pointent celui des industries de l'eau comme étant le plus touché par ce phénomène.

Parce que la corrosion est très souvent, trop souvent, perçue comme un phénomène naturel, dans l'ordre des choses, les coûts colossaux qui lui sont associés ne préoccupent pas particulièrement les foules, d'autant que la démolition, l'entretien la réparation occupent leur monde. Certes, mais l'utilisateur ou le contribuable y retrouvent t'ils bien leur compte, lorsqu'en final il faut payer l'addition?

Cependant certains secteurs de l'économie réagissent : les automobiles sont maintenant vendues avec une garantie anticorrosion de 10 ans ; on ne remplace plus les lignes d'échappement depuis qu'elles sont en inox ; qui est gagnant ? Le consommateur en dépit du léger surcoût initial, mais le constructeur aussi qui vend peut-être moins de véhicules mais se trouve engagé dans le combat de demain pour le durable et la qualité contre le jetable.

Ce seul exemple, et il y en a d'autres, montre bien que la corrosion n'est pas une fatalité, qu'elle peut être évitée, le plus souvent à moindre frais, pour le plus grand bien de l'utilisateur, de la collectivité et des générations futures.

Si l'on regarde la corrosion comme une maladie des matériaux métalliques, interrogeons les « corrosion doctors » et demandons leur : les équipements construits avec des matériaux métalliques ont-ils toutes leurs chances dès le départ, c'est-à-dire au moment de leur conception et de leur fabrication ? Comme pour les maladies humaines, le dépistage est-il bien organisé et structuré ? Toutes les mesures préventives, qui à l'instar de la santé publique permettraient de réduire significativement les dépenses sont-elles mises en œuvre ? En fin de compte l'attention portée à la corrosion n'est-elle pas de nature palliative : on arrive en fin de vie et on essaie de faire durer ? Essayons de répondre à ces questions.

4 LA CORROSION

La corrosion désigne généralement l'altération d'un objet par réaction avec un oxydant. C'est un phénomène électro-chimique, à ne pas confondre avec l'usure ou l'érosion.

Les exemples les plus connus de corrosion sont les altérations chimiques de métaux dans l'eau telle la rouille du fer et de l'acier ou la formation de vert de gris à la surface du cuivre et ses alliages. Plus généralement la corrosion ne touche pas seulement les métaux mais l'ensemble des matériaux.

La corrosion des métaux est un phénomène naturel. En effet, à l'exception des métaux nobles que l'on trouve à l'état naturel sur terre, les métaux sont présents sous forme d'oxydes, dans les minerais. Le travail de la métallurgie consiste à réduire ces oxydes pour fabriquer le métal. La corrosion n'est que le retour à l'état naturel, mais en état dispersé, diffus et non récupérable.

La corrosion est la principale cause de dégradation des objets métalliques et certainement la plus coûteuse.

Parce qu'il est naturel de repeindre une grille ou un balcon corrodés, ou d'astiquer les cuivres ou l'argenterie, la corrosion est donc admise comme un phénomène normal, comme une fatalité ; il est dans la nature des choses de réparer.

4.1 Coût de la corrosion

Bien qu'il soit très difficile de connaître précisément le coût de la corrosion dans différents pays, de nombreuses études ont été publiées proposant soit une approche globale, soit une analyse par secteurs d'activité qui permettent de mesurer l'ampleur et l'importance du phénomène.

Approche globale

Aux U.S.A. selon Batele Columbus Laboratories, et le NBS (National Bureau of Standards), le coût de la corrosion a été estimé en 1995 à 4,2% du PIB. Ces mêmes organismes ont réactualisé leurs estimations en 1998 et ont confirmé ce chiffre de 4,2%.

Une autre étude réalisée aux USA par l'Association Corrosion Doctors a étudié le coût de la corrosion dans 26 secteurs industriels ; il ressort que la corrosion sur ces secteurs d'activité coûte entre 1% et 5% du chiffre d'activité, avec une moyenne évaluée à 3,1% du PIB .

Selon une source, française cette fois, ParisTech « Graduate School », le coût de la corrosion et ses conséquences approcherait les 4% du PIB.

La corrosion naturelle des métaux constitue le fonds de commerce des fabricants et fournisseurs de peinture, ce qui les a conduits à en faire une estimation ; d'après cette corporation les coûts de la corrosion dépasseraient 4,5% du PIB, donc supérieurs aux estimations précédentes mais cohérents en ordres de grandeur avec les autres chiffres avancés.

Les scientifiques allemands de l'ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) ont estimé pour leur part que le coût de la corrosion représente plus de 3% du PIB mondial.

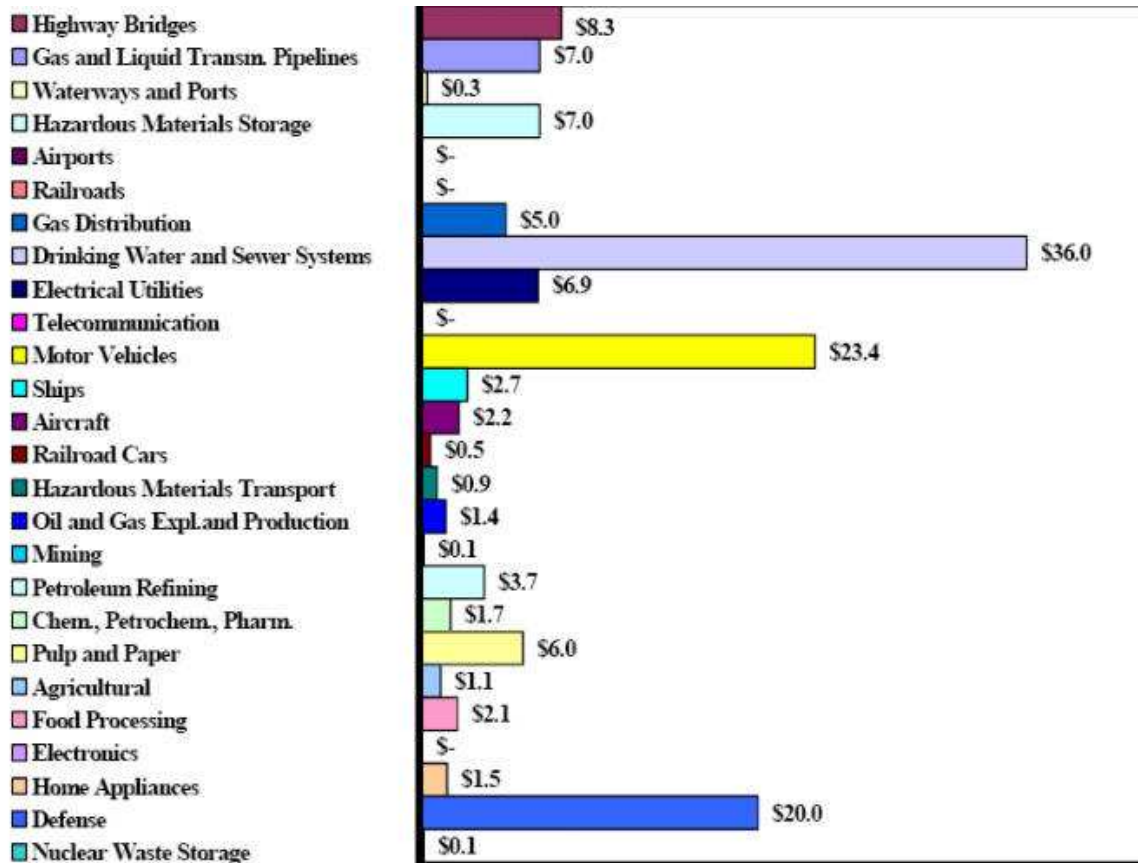
Sans faire mention de nombreuses autres publications existantes, il se confirme à la lecture de ces rapports que les coûts de la corrosion dans le monde se situent raisonnablement dans une fourchette de 3 à 4% du PIB mondial.

En raisonnant sur la base du PIB mondial de 2007 qui était de 68 000 G\$, il apparaîtrait donc que la corrosion coûterait chaque année dans le monde très grossièrement entre 2000 et 2700 milliards de US \$... de quoi sauver quelques banques de la faillite!

Autre chiffre très éloquent : selon certaines sources, la corrosion consommerait chaque seconde près de 10 tonnes d'acier dans le monde soit plus de 300 millions de tonnes par an ; d'autres sources font état d'une consommation annuelle d'acier de l'ordre de 150 millions de tonnes par la seule corrosion, pour une production mondiale 2008 d'environ 1 250 millions de tonnes.

Quels sont les secteurs d'activités les plus touchés par la corrosion ?

Corrosion Doctors a étudié l'impact de la corrosion dans 26 différents secteurs de l'industrie aux Etats-Unis en 1998; le coût total de la corrosion étant estimé à l'époque à 276 G\$ soit 3,1% du PIB, les coûts se répartissent selon le tableau 1 ci-dessous :



D'où nous pouvons extraire le « top five » des secteurs les plus touchés :

- Les industries de l'eau –production d'eau potable et assainissement- qui représentent à elles seules 13,3% des coûts totaux de la corrosion
- Les véhicules à moteur, 8,4%
- Les industries de la défense 7,2%
- Les ponts autoroutiers 3%
- Pipelines et gazoducs à égalité avec le stockage des matières dangereuses à 2,5%

Dans les seules industries de l'eau, traitement de l'eau potable, adduction et assainissement, la corrosion coûte chaque année 36 milliards de \$ base 1998, de quoi s'offrir quelques belles installations !

Ces proportions sont confirmées par un expert américain de la corrosion qui dans un rapport élaboré conjointement avec NACE (National Association of Corrosion Engineers) souligne à quel point les coûts de la corrosion sont élevés dans les industries de l'eau : « on vit avec et l'on ne réalise pas ce que coûte la corrosion à l'ensemble de la société ; j'ai moi-même été surpris de voir que la corrosion en traitement de l'eau potable, comme en assainissement était la plus élevée de tous les secteurs que j'ai étudiés » .

Ces chiffres et ces propos totalement alarmistes conduisent naturellement à la question : que fait-on ? Même si la tendance est, comme nous l'avons déjà souligné, d'accepter la corrosion comme un phénomène naturel, donc inévitable, les experts corrosionnistes ont cependant pour mission de combattre ce fléau pour en limiter les conséquences. Dans un premier temps, il convient d'analyser le contenu de ces coûts pour ensuite définir des actions correctives et dispositions à prendre pour, si possible, en limiter les conséquences.

4.2 Décomposition et calcul des coûts de la corrosion

A la lecture des différents rapports étudiés, il apparaît que les coûts de la corrosion ne sont pas uniquement les coûts des dommages de la corrosion mais représentent l'ensemble des coûts engendrés par la corrosion, depuis la prévention jusqu'aux dommages. Il existe plusieurs approches pour analyser la corrosion, nous en citerons quelques-unes parmi les plus couramment proposées.

Exemples de modèles proposés

Un premier exemple de méthode de décomposition des coûts de la corrosion est proposé par NACE (National Association of Corrosion Engineers) qui distingue les coûts directs et les coûts indirects de la corrosion.

Les coûts directs sont les coûts de conception, de fabrication et de construction :

- Choix des matériaux (exemple inox en remplacement des aciers au carbone)
- Précautions supplémentaires telles qu'augmentation des surépaisseurs
- Traitements préventifs ou retardateurs tels que les revêtements, les inhibiteurs de corrosion ou la protection cathodique
- La mise en œuvre de ces mesures de prévention

A ces coûts directs viennent s'ajouter, les coûts de gestion et suivi de la corrosion tels que par exemple:

- Les inspections
- La maintenance
- Les réparations
- Le remplacement des parties corrodées
- La réhabilitation

Il est très important d'avoir une bonne connaissance de ces coûts directs pour évaluer leur impact sur la durée de vie de l'équipement et son coût global.

Dans la catégorie des coûts indirects NACE inclut des éléments « plus difficiles à appréhender car plus impondérables » : ce peut être par exemple la gêne et le retard occasionnés à la circulation lors de la réhabilitation d'un ouvrage d'art ; ce peut être une pollution ponctuelle et occasionnelle consécutive à la défaillance d'un élément clé d'une installation de traitement d'eau ; ou encore une pollution de rivière par suite de la rupture d'une canalisation corrodée; ces coûts ne sont pas toujours supportés directement par l'exploitant mais ont un impact sur l'économie globale.

Un ouvrage français intitulé « prévention et lutte contre la corrosion », propose une approche différente de l'analyse des coûts de la corrosion en considérant une chaîne d'opérations successives et qui comprend, en allant de l'amont vers l'aval :

- les études : acquisition et gestion des connaissances sur la corrosion (formation, R&D)
- la construction, c'est-à-dire toute dépense allant au-delà de ce qui serait strictement nécessaire dans un environnement inerte ; ce peut être par exemple les surépaisseurs de corrosion, le surcoût des matériaux résistant à la corrosion, le coût des protections ou les coûts des systèmes de monitoring
- l'exploitation : toute dépense induite par la corrosion ou requise pour la prévention : traitements chimiques, maintenance, entretien préventif ou curatif
- les avaries majeures incluant les travaux de réparation / remplacement et les pertes d'exploitation consécutives à l'avarie elle-même.

Dans une autre étude menée conjointement par le NACE et la Federal Highways Administration aux USA, Gerry Koch expert en corrosion, souligne l'insuffisance des moyens alloués à la prévention par rapport à la réparation et considère que le coût de la corrosion pourrait être fortement réduit en recourant plus fréquemment aux mesures préventives.

D'autres études proposent des approches différentes, mais une constante ressort de l'ensemble de ces rapports : la prévention de la corrosion est un investissement. Et en tant qu'investissement, sa rentabilité financière –ROCE, Return On Capital Employed- doit être évaluée. Cependant certains

ouvrages et notamment un rapport piloté par Battelle Memorial Institute pour le compte du National Bureau of Standards (NBS) signalent que 40% de ces coûts pourraient être économisés en mettant en œuvre les technologies existantes et en respectant les règles de l'art, c'est-à-dire sans dépenses ou presque ; n'est ce pas la première piste à suivre pour réduire les coûts de la corrosion ?

Une autre approche des coûts de la corrosion

L'approche qui consiste à considérer que les coûts de corrosion lors de la construction représentent toute dépense au-delà de ce qui serait strictement nécessaire dans un environnement inerte est très séduisante, mais ne tient compte que de la seule influence du milieu comme facteur de corrosion. Poursuivant la parallèle des dépenses de santé avec le coût de la corrosion, cela reviendrait à dire que pour optimiser la longévité humaine, il suffirait de « blinder » un individu contre toutes les maladies qu'il pourrait attraper en passant d'une chambre stérile à un environnement humain normal ; à la limite, les nouveaux docteurs Faust ainsi mithridatisés deviendraient immortels, faute de causes de mortalité. Il en va de même pour la corrosion : si le milieu extérieur favorise ou crée les conditions de la corrosion, les causes réelles de la corrosion des matériels sont à rechercher dans les défauts de mise en œuvre, de fabrication ou d'entretien.

Et ici s'arrête la comparaison parce si nous ne sommes pas responsables de nos gênes ni de notre « fabrication » en tant qu'humains, en revanche lorsque nous concevons, construisons et utilisons un appareil, nous en avons la maîtrise totale et en toute connaissance des conditions d'utilisation.

Et l'expérience montre que les bonnes pratiques, c'est-à-dire choix des matériaux appropriés, conception adaptée, mise en œuvre dans les règles de l'art et nettoyage courant permettent d'augmenter considérablement la durée de service des équipements et de diminuer les coûts de la corrosion, et sans dépenses supplémentaires, simplement parce que, en général, ça ne coûte pas plus cher de faire les choses comme il faut.

Pour montrer que la prévention de la corrosion ne représente pas un coût important, nous raisonnerons à partir d'un exemple que nous connaissons bien, celui des aciers inoxydables, cet exemple étant transposable à la presque totalité des autres matériaux métalliques courants

5 EFFETS DES BONNES PRATIQUES DANS L'UTILISATION DES ACIERS INOXYDABLES

Depuis de nombreuses années nous sommes quotidiennement questionnés à l'Institut de Développement de l'Inox sur des problèmes de corrosion ; la totalité des cas rencontrés ont pour origine des négligences humaines, souvent grossières, qui peuvent s'expliquer par la croyance selon laquelle l'inox est un matériau inaltérable.

Ces négligences peuvent être classées en 4 types :

- Choix de nuance inopportun
- Erreur de conception (appareils présentant des zones de rétention par exemple)
- Défaut de mise en œuvre
- Défaut d'entretien

Pour s'en convaincre, empruntons le cheminement inverse d'analyse des situations de corrosion et remontons à la cause de cette situation pour montrer que ces causes peuvent toutes être évitées.

Concernant les inox, les corrosions diagnostiquées peuvent être répertoriées en 5 catégories :

- corrosion uniforme
- corrosion par piqûres
- corrosion cavernueuse
- corrosion sous contrainte
- corrosion intergranulaire

Et les anomalies les plus couramment rencontrées sont :

- la formation de couples galvaniques
- la contamination
- la détérioration des cordons de soudure
- les corrosions dues au biofilm

A partir de l'analyse de ces situations, nous pourrions constater que si les recommandations sont bien suivies et les règles de l'art respectées, la durée de vie des équipements peut être

considérablement allongée sans coûts supplémentaires, et qu'il est possible sans frais, de diminuer les coûts de la corrosion.

5.1 Corrosion uniforme

Comme son nom l'indique, elle se manifeste par une diminution régulière et uniforme de l'épaisseur de métal sur toute la surface. Dans le cas des aciers inoxydables, elle ne peut résulter que d'un choix inapproprié de nuance en fonction du milieu ; donc seuls une bonne description du milieu et le choix de la nuance en permettent la prévention

Tableau 1 : prévention de la corrosion uniforme

	Nuance	Conception	Mise en œuvre	Entretien
Corrosion uniforme	X			

5.2 Corrosion par piqûres

La corrosion par piqûres se caractérise par l'apparition de fines perforations après une phase d'amorçage qui peut être plus ou moins longue ; elle apparaît sur des zones très restreintes de la surface de l'inox dans lesquelles la couche passive ne joue plus son rôle protecteur : il y a rupture du film passif. La corrosion par piqûres se produit principalement dans les milieux neutres chlorurés contenant un oxydant. Le phénomène de piqûration dépend essentiellement de la teneur en ions chlorures, du pouvoir oxydant du milieu environnant, de la composition chimique de l'inox et de son état de surface.

La corrosion par piqûres est un phénomène électro-chimique qui peut s'observer sur une courbe de polarisation qui indique pour un métal en solution les variations de la densité de courant en fonction du potentiel appliqué (figure 1). On observe sur cette courbe obtenue en milieu chloruré neutre une faible intensité jusqu'à une valeur de potentiel que nous appellerons E_p ou potentiel de piqûre à partir de laquelle elle commence de nouveau à croître brutalement révélant alors un courant de corrosion et donc une perte de passivité.

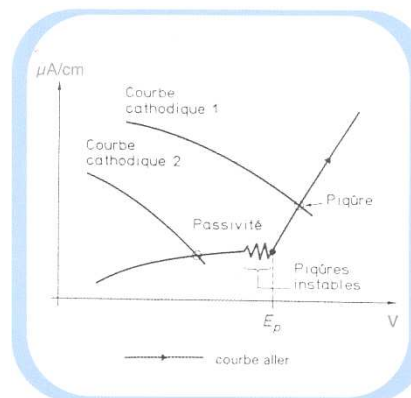


Figure 1. Courbe de polarisation, potentiel de piqûres

Pour un acier donné et pour un milieu corrosif défini, les piqûres n'apparaissent que lorsque le potentiel métal/solution dépasse la valeur critique du potentiel de piqûres.

Le potentiel de piqûres est donc un critère pour juger de la résistance à corrosion par piqûres d'un inox. Le domaine d'utilisation du matériau sera d'autant plus large que le potentiel de piqûre sera élevé. La valeur du potentiel de piqûre E_p :

- Diminue avec l'élévation de la température
- Diminue avec l'augmentation de la concentration en chlorures
- Diminue si la propreté inclusionnaire est douteuse
- Varie en fonction de la composition chimique des nuances d'inox (augmente si le % de chrome, de molybdène et / ou d'azote augmente).

Très concrètement et d'une façon pratique, il est possible de quantifier leur influence grâce à un indice appelé PRE (Pitting Resistance equivalent) calculé à partir de la teneur en chacun de ces éléments, qui se corrèle assez bien avec le potentiel de piqûres et permet d'avoir une idée de la résistance à la corrosion de la nuance :

$$\text{PRE} = \% \text{ Cr} + 3,3 (\% \text{ Mo}) + x (\% \text{ N})$$

Avec :

- $x=0$ pour les nuances ferritiques et martensitiques
- $x= 16$ pour les duplex
- $x= 30$ pour les austénitiques

En fonction de la nature du milieu, on choisira la nuance d'inox selon son PRE ; par exemple en milieu eau potable, le PRE d'une nuance doit être >17

Tableau 2. PRE des différentes nuances d'inox

Nuance d'inox			PRE
famille	Designation symbolique	Dés. numérique	
ferritique	X 6 Cr 17	1.4016	17
	X 3 Cr Ti 17	1.4510	
	X 2 Cr Mo Ti 18 – 2	1.4521	25
austenitique	X 5 Cr Ni 18 – 10	1.4301	19
	X 5 Cr Ni Mo 17 – 12 - 2	1.4401	25

Le tableau 2 ci-dessus donne les PRE de différentes nuances d'inox.

Autre point de repère pour faire le bon choix de la nuance appropriée : la valeur critique de concentration en chlorures (Cl⁻) à 25°C est de 500 ppm pour les nuances type 1.4301 et de 1500 ppm pour les nuances type 1.4401 qui présentent une bonne propriété inclusionnaire.

En définitive, la prévention de la corrosion par piqûre peut se faire sans frais ; il suffit de décrire précisément le milieu, et en fonction de la teneur en chlorures et de la température, de choisir la nuance d'inox adaptée et, par la suite de procéder à un entretien régulier pour éviter le dépôt et la concentration des chlorures.

Tableau 3. Prévention de la corrosion par piqûres

	Nuance	Conception	Mise en œuvre	entretien
Corrosion par piqûres	X			X

5.3 Corrosion caverneuse

La corrosion caverneuse est l'une des plus fréquemment rencontrées dans les industries de l'eau ; comme son nom l'indique, elle prend naissance dans des « cavernes » ou crevasses ou tous espaces confinés dus à une conception ou une mise en œuvre inappropriées des appareils.

Les zones confinées sont propices à l'accumulation d'espèces chimiques et à l'acidification progressive du milieu (figure 5) jusqu'à un niveau appelé « pH de dé passivation » pH_d qui provoque la rupture de la couche passive. Le temps d'incubation avant l'amorçage dépend de la sévérité de la caverne. Il faut bien noter que c'est la modification du milieu consécutive à des défauts de conception qui provoque la corrosion caverneuse.

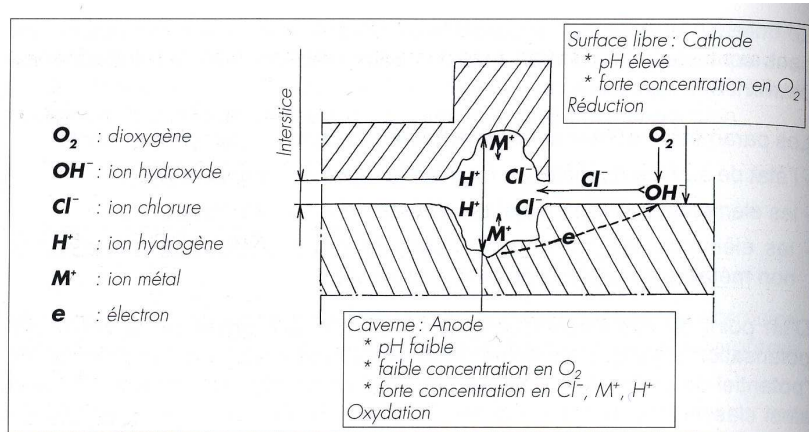


Figure 2. Mécanisme de la corrosion caverneuse

C'est en priorité lors de la conception et de la mise en œuvre des équipements et appareils que la corrosion caverneuse doit être évitée :

- en évitant les interstices et les zones de stagnation ou de concentration de dépôts comme le montre l'exemple de la figure 3

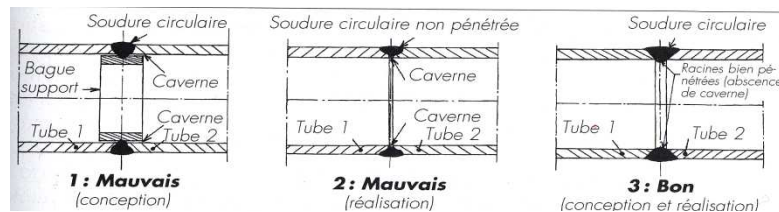


Figure 3. Règles d'assemblage et de rabotage des tubes

- en éliminant les dépôts solides
- en évitant d'utiliser des joints soufrés dont la mauvaise adhésion sur le métal favorise la formation de cavernes

Si toutefois le concepteur craint un risque de formation de cavernes, il doit choisir les nuances d'inox qui présentent un bon potentiel de dépassivation pH_d ; le tableau 4 ci-dessous donne des valeurs de pH de dépassivation pour différentes nuances : plus cette valeur est élevée, meilleure sera la résistance à la corrosion caverneuse .

Tableau 4. Valeurs de pH de dépassivation pH_d pour différentes nuances d'inox

Nuance d'inox		pH _d
Designation symbolique	Designation numérique	
X 3 Cr Ti 17	1.4510	2.5
X 2 Cr Mo Ti 18 – 2	1.4521	1.8
X 5 Cr Ni 18 – 10	1.4301	2.1
X 5 Cr Ni Mo 17 – 12 - 2	1.4401	1.8

Les solutions pour prévenir la corrosion caverneuse consistent à :

- éviter les zones confinées lors de la conception
- choisir la nuance appropriée (valeur de pH_d plus grande)
- lors de la mise en œuvre, au soudage notamment, éviter le rochage

Tableau 5. Prévention de la corrosion caverneuse

	Nuance	Conception	Mise en œuvre	entretien
Corrosion caverneuse	X	X	X	

5.4 Corrosion sous contrainte

Ce type de corrosion se manifeste par la formation de fissures sur des appareils soumis simultanément à un milieu corrosif et à des contraintes; un cas très courant est celui des appareils soudés dans lesquels subsistent des contraintes résiduelles.

Pour prévenir la corrosion sous contrainte :

- choisir les nuances d'inox les moins sensibles ; les ferritiques ou si le milieu est agressif, les austéno-ferritiques.
- Limiter les contraintes résiduelles lors de la mise en œuvre, en pratiquant par exemple un traitement de détentionnement avant la mise en service.

Tableau 6. Prévention de la corrosion sous contrainte

	Nuance	Conception	Mise en œuvre	entretien
Corrosion sous contrainte	X			

5.5 Corrosion intergranulaire ou inter-cristalline

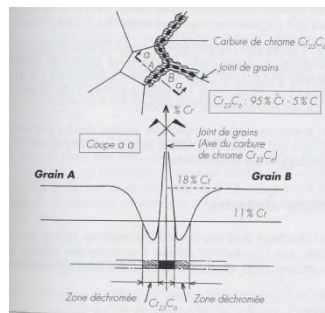


Figure 2. Mécanisme de la corrosion caverneuse

Cette corrosion se manifeste sous la forme d'attaques aux joints de grains. Elle résulte d'un affaiblissement de la teneur en chrome dans les joints de grains par suite de la formation de carbures de chrome.

Pour que la corrosion intergranulaire puisse se produire, il faut que 3 conditions soient remplies simultanément :

- Métal sensibilisé entre 500°C et 700°C (cas du soudage)
- Milieu agressif (chlorures par exemple)
- Teneur en carbone > 0,03% favorisant la formation de carbures de chrome à moins que cette nuance ne soit stabilisée (Ti ou Nb)

Pour éviter tout risque de corrosion intergranulaire, il faut et il suffit qu'au moins une de ces trois conditions ne soit pas remplie.

Concrètement, le concepteur s'il doit réaliser un matériel en inox comportant des soudures devra toujours s'assurer que la nuance choisie est à bas carbone (condition 3 non remplie) pour se mettre à l'abri de tous risques de corrosion intergranulaire.

5.6 Corrosion galvanique

Cette forme de corrosion résulte de la formation d'un courant qui, en présence d'un électrolyte, s'établit entre un métal plus noble et un métal présentant un potentiel plus bas.

Le potentiel de l'inox étant élevé, la corrosion galvanique se fera en général au détriment des autres matériaux au contact ou à proximité de l'inox. La corrosion n'affecte donc pas directement l'inox, mais il faut prendre des précautions pour éviter une détérioration des pièces en cuivre en acier galvanisé ou en aluminium par exemple. La vitesse de la corrosion galvanique dépend de la nature des matériaux métalliques concernés et en particulier de leur potentiel comparé à celui de l'inox. Pour cela il existe des tables de potentiels.

Afin de prévenir la corrosion galvanique, il faut éviter le contact entre matériaux métalliques de natures différentes ou à défaut utiliser un isolant entre les deux.

Tableau 7. Prévention de la corrosion galvanique

	Nuance	Conception	Mise en œuvre	entretien
Corrosion galvanique		X	X	

5.7 Contamination

Les outils utilisés pour la conformation, le découpage, le nettoyage, s'ils ne sont pas spécifiquement dédiés à l'inox sont susceptibles de déposer à la surface de l'inox des particules d'un autre matériau métallique pour lequel ils ont été utilisés auparavant. Dans un premier temps, ces particules s'oxydent et il se forme à la surface de l'inox des petits points de rouille, si les particules sont ferreuses: ce n'est pas l'inox qui se corrode, mais les particules déposées. A la longue si l'on ne nettoie pas, ces particules finissent par interagir avec la surface de l'inox, altérer puis transpercer la couche passive et provoquer de la corrosion. Le type de corrosion ainsi engendrée est de la corrosion par piqûres.

En distribution d'eau potable, ce phénomène de contamination peut apparaître accidentellement lors de la mise en œuvre (cintrage, serrage dans un étau...) ou en service à l'occasion par exemple d'opérations de meulage à proximité d'une tuyauterie en inox, qui projette des particules de métal étranger.

Pour décontaminer une installation en fin de chantier il faut effectuer un traitement de surface par application d'une solution à base d'acide nitrique.

Pour éviter la contamination ferreuse, quelques règles très simples :

- lors de la mise en œuvre utiliser des outils et des locaux dédiés à l'inox (ou du moins isolés du reste des activités) afin d'empêcher les dépôts de poussières indésirables.
- En service, proscrire les opérations de découpe ou de meulage à proximité d'une installation en inox et dans tous les cas, procéder à un nettoyage soigné et si nécessaire à une décontamination

Tableau 8. Prévention de la contamination ferreuse

	Nuance	Conception	Mise en œuvre	entretien
Contamination ferreuse			X	X

5.8 Soudage

La soudure est une zone sensible sur laquelle, lorsque les opérations n'ont pas été effectuées correctement, la corrosion peut s'amorcer. Les opérations de soudage requièrent donc un soin et une attention particuliers, avec les recommandations suivantes :

∅ Avant soudage

Choisir une nuance insensible à la corrosion intergranulaire (cf §4.5)

∅ Cordon de soudure :

- La soudure doit être bien pénétrée pour éviter les risques de corrosion caverneuse sur les interstices de la face envers
- Le cordon doit être lisse pour éviter le rochage et les risques de corrosion caverneuse associés
- Utiliser des gaz de protection endroit et envers

∅ Après soudage

Les zones colorées doivent impérativement être éliminées mécaniquement ou par décapage car, composées d'oxydes de chrome, elles affaiblissent la couche passive.

La prévention de la corrosion sur les zones soudées est une question de technique et de savoir faire et ne requiert pas de dépenses particulières.

Tableau 9. Précautions à prendre au soudage pour prévenir la corrosion

	Nuance	Conception	Mise en œuvre	entretien
Corrosion autour de la soudure	X		X	

5.9 Corrosion due au biofilm

Ce type de corrosion peut survenir dans les bras morts et sur les points de plus grande fragilité de la surface de l'inox, donc sur des soudures mal décaperées. Pour prévenir ce type de corrosion il faut donc concevoir des installations où l'eau circule bien, sans bras morts et surtout bien décaper les soudures ou, à défaut, faire une protection envers. Dans tous les cas il faut :

- Eviter les zones et phases de stagnation prolongée
- Décaper les soudures

Tableau 10. Prévention de la corrosion par le biofilm

	Nuance	Conception	Mise en œuvre	entretien
Corrosion par le biofilm		X	X	

5.10 Résumé des règles pour une prévention efficace de la corrosion des aciers inoxydables

L'ensemble des tableaux ci-dessus peuvent se ramener dans un tableau unique simple (tableau 10) :

	Nuance	Conception	Mise en œuvre	Entretien
Corrosion uniforme	X			
Corrosion par piquûre	X			X
Corrosion caverneuse	X	X	X	
Corrosion sous contrainte	X			
Corrosion intergranulaire	X			
Corrosion galvanique		X	X	
Corrosion par contamination			X	
Corrosion des zones soudées	X		X	
Corrosion par le biofilm			X	

Où il apparaît que la prévention de la corrosion, donc la pérennité des équipements pour un milieu donné, dépend uniquement du sérieux, de la compétence et du savoir faire des bureaux d'études, des fabricants, des constructeurs et des opérateurs.

A cette fin I.D.Inox a rédigé avec l'ASTEE un guide de l'utilisation de l'inox dans les réseaux d'eau en 2 parties ; si toutes les règles simples énoncées dans ces deux fascicules sont bien respectées, les problèmes de corrosion devraient être en quasi-totalité éradiqués, et les coûts associés réduits à néant.

Une autre brochure a été élaborée dans le même esprit conjointement avec le groupe assainissement de l'AITF et donnant les recommandations à suivre et règles de l'art pour éviter les problèmes de corrosion sur les équipements en acier inoxydable utilisés dans le domaine de l'assainissement.

Coût d'investissement : le temps nécessaire à prendre connaissance des recommandations.

6 INCIDENCE DE LA CORROSION DANS LE COUT GLOBAL

Dans ce qui précède nous avons vu que les coûts de corrosion peuvent dans certains cas être réduits à zéro ou presque rien par le seul respect des règles de l'art, une certaine forme d'hygiène appliquée à la construction.

Il existe d'autres cas où, pour prévenir la corrosion et augmenter la durée de vie de l'installation, il soit nécessaire d'investir dans une solution qui augmente le coût initial ; il convient alors de procéder à un calcul financier pour déterminer, sur la durée d'utilisation du matériel, l'incidence du surcoût initial sur le coût global ou LCC (Life Cycle Cost).

Par LCC, nous entendons, au sens de la norme ISO 15686 la somme :

- Coûts de construction
- + coûts d'exploitation

- + coûts de maintenance
- + coûts de fin de vie (déconstruction)
- + coûts environnementaux

Le niveau des taux d'intérêts est primordial dans ce type de raisonnement, sachant que s'ils sont élevés, l'investissement initial doit être le plus faible possible pour ne pas immobiliser trop de capital, et il est préférable de jouer la carte du consommable.

Pour illustrer cette approche, nous nous appuyerons sur un exemple donné par le groupe de travail durabilité de la fib (Fédération Internationale du Béton). Comme nous l'avons mentionné dans l'introduction, la corrosion et plus particulièrement la corrosion des armatures est responsable de la réduction à 73 ans de la durée de vie des ouvrages d'art conçus pour 100 ans.

Cet exemple est totalement transposable à un bassin de rétention d'eaux usées en béton armé utilisé en assainissement.

Pour prévenir la corrosion des armatures, le rapport envisage plusieurs stratégies :

- Stratégie 1 : ne rien faire et réparer
- Stratégie 2 : utiliser des bétons plus compacts et donc plus chers et augmenter les enrobages
- Stratégie 3 : utiliser des aciers au carbone traditionnels et mettre en place une protection cathodique
- Stratégie 4 : béton ordinaire, enrobages classiques, utilisation partielle d'armatures inox dans les zones exposées

La meilleure stratégie en termes de LCC en fonction des taux d'intérêts figure sur la figure 5 ci-dessous

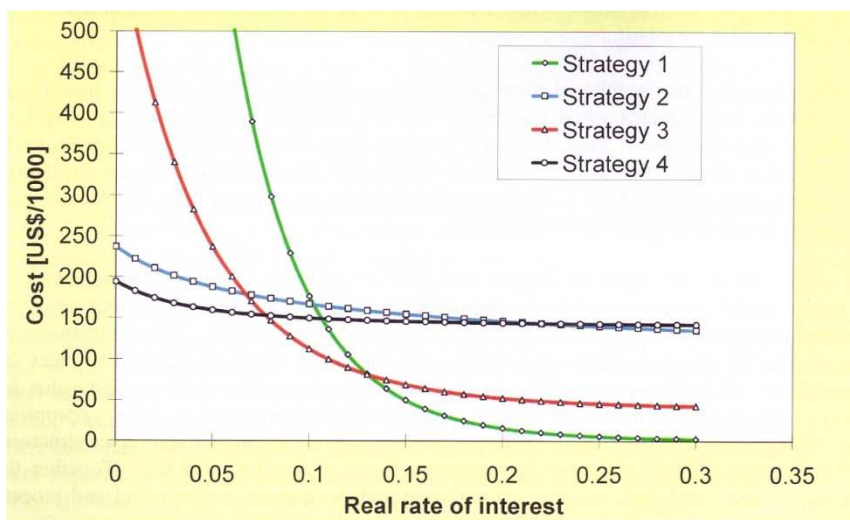


Figure 6: Influence of discount rates upon the choice of repair strategy for a concrete quay exposed to a marine environment

Parameters Associated with Figure 6 Example

Required service life: 50 years
 Climates: 10 deg C and 30 deg C
 Design approach: Four alternative repair strategies - utilising probabilistic service life performance analysis

Strategy 1: Traditional concrete grade and carbon steel, allowing for one repair.
 Strategy 2: High Performance Concrete and large cover to carbon steel.
 Strategy 3: Traditional concrete grade and carbon steel, with the use of cathodic protection later.
 Strategy 4: Traditional concrete grade and carbon steel, selective use of stainless steel rebar.

Si les taux d'intérêt sont supérieurs à 13%, il vaut mieux ne rien faire ; en revanche, si les taux d'intérêt sont inférieurs à 8%, dans cet exemple, la meilleure stratégie est celle des armatures inox (stratégie 4), bien que le prix d'achat brut de l'inox soit 5 à 6 fois supérieur à celui des aciers au carbone.

Dans ce dernier cas le coût de la corrosion se ramène au seul surcoût initial des armatures inox utilisées partiellement dans les zones sensibles.

Cependant dans cet exemple d'évaluation de coût global, il n'est pas tenu compte du coût environnemental.

6.1 Impact environnemental de la corrosion

La corrosion exerce sur l'environnement un impact invisible, destructeur et irréversible et lourd. La corrosion, comme l'érosion, ne se voit pas : elle est lente et continue et ce n'est que lorsque les dégâts sont apparents qu'elle se révèle : une canalisation qui perce, un câble qui se rompt, un réservoir qui fuit, un boulon qui casse ; les inspections ont pour but de diagnostiquer ces phénomènes avant qu'il ne soit trop tard, et de prévenir les pollutions accidentelles ; il n'empêche que les inspections ne mesurent jamais les quantités d'ions métalliques de toutes natures, fer, cuivre, zinc pour ne citer que les plus courants, répandus dans l'environnement et qui se dissolvent dans les nappes phréatiques et les rivières chargeant les eaux d'éléments dont la concentration excessive les rend indésirables.

La corrosion est aussi un phénomène irréversible, c'est le retour à l'état d'origine des métaux issus de la métallurgie (l'entropie augmente); mais les énormes quantités d'oxydes répandus dans la nature ne sont pas récupérables car complètement dispersées ; elles doivent être remplacées par des volumes de matière au moins équivalents, mais qui pour être fabriqués ont consommé des ressources – minerais énergie, transports etc...- et produit des émissions de CO₂. Supposons qu'une tonne d'acier produit émet 2 tonnes de CO₂, si la corrosion consomme par exemple 200 millions de tonnes par an (bas de la fourchette), alors elle serait responsable de l'émission de 400 millions de tonnes de CO₂ !

Les rapports auxquels nous nous sommes appuyés ci-dessus pour chiffrer le coût de la corrosion ne précisent pas clairement comment l'impact environnemental a été évalué en termes de coût.

En effet, le coût environnemental devrait constituer une composante importante du LCC, comme l'atteste le schéma ci-dessous extrait de la norme ISO 15686

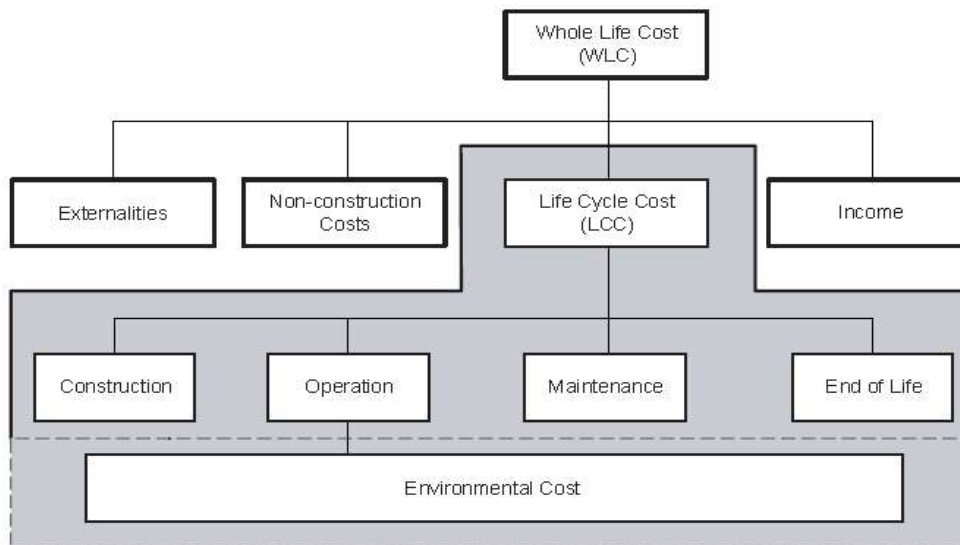


Figure 2 — WLC and LCC elements

Cependant si l'on s'en réfère aux explications contenues dans cette norme, les recommandations ou suggestions, ténues voire inexistantes se réduisent à un paragraphe de quelques lignes : « on pourrait inclure des suppléments correspondant à l'utilisation d'énergies non renouvelables et les coûts de pollution des cours d'eau ».

Existe-t-il des approches permettant d'évaluer le coût environnemental de la corrosion ?

6.2 Approches du coût environnemental de la corrosion

S'il existe des moyens d'évaluation d'impact tels que l'évaluation de l'empreinte environnementale, calculée en surface (hectares par individu) traduisant grâce à un système de

conversion une quantité de ressources nécessaires pour une opération donnée, il ne semble pas qu'il existe des méthodes permettant de chiffrer le coût environnemental de la corrosion.

Les différents rapports auxquels nous nous sommes référés ci-dessus pour chiffrer le coût de la corrosion restent évasifs sur les coûts environnementaux.

La « légèreté », l'indigence, du seul petit paragraphe consacré au calcul du coût de l'impact environnemental dans la norme ISO 15686 révèle bien l'embarras des experts devant ce sujet.

En clair, il semblerait que chacun s'accorde à reconnaître que les dommages à l'environnement devraient s'évaluer en termes de coût, mais personne ne se hasarde vraiment à le faire.

Cela ne doit en aucun cas servir de prétexte à ne pas évaluer le LCC.

A l'inverse, l'on peut se demander s'il n'y a pas de corrélation entre coût global et coût environnemental et si finalement à chaque fois que nous choisissons la meilleure solution en coût global – LCC ou WLC mais sans le coût environnemental -, nous n'avons pas choisi la meilleure solution environnementale, donc avec un coût correspondant plus bas. Pour pousser le raisonnement plus loin, ne peut-on pas dire que par rapport à l'environnement, l'on ne se trompe pas en choisissant la solution du meilleur coût global ?

C'est d'ailleurs le sens des nouvelles recommandations européennes qui incitent les maîtres d'ouvrage à remplacer le moins disant par le mieux disant. C'est bien d'ailleurs cette même démarche qu'a adoptée le MEDAD lorsqu'il lance une « étude de faisabilité d'un logiciel d'aide à la décision intégrant le coût global de constructions » en écrivant en préambule de cette consultation :

« La difficulté pour l'acheteur maître d'ouvrage d'intégrer, en plus de la charge foncière et des travaux, les coûts d'utilisation de l'ouvrage, (consommation et entretien, durée de vie et valeur résiduelle) voire les externalités (coûts environnementaux tels les émissions de GES) constitue un frein au développement durable dans les constructions ».

Dans ces conditions et compte tenu de son coût économique et de son impact environnemental, la prévention de la corrosion devrait être l'une des préoccupations premières des maîtres d'ouvrages et des constructeurs

7 CONCLUSION

Sous l'éclairage de ce qui précède, la corrosion apparaît comme une charge, un coût net, une part du PIB. Mais d'un autre côté la corrosion peut aussi être perçue comme un générateur de croissance : « lorsque je gratte ou décape, je fais du PIB, lorsque je repeins, je fais du PIB, lorsque je répare, je fais du PIB, lorsque je démolis, je reconstruis etc. je fais du PIB ». Aux USA, 300 000 ponts et ouvrages d'art, endommagés par la corrosion ont été mis hors service mais l'équivalent a été reconstruit en ouvrages neufs, cela générant du PIB, une croissance qui elle-même génère des emplois ; certes.

Mais, nous l'avons vu ces choix sont désastreux en termes de coût global et en finale dans le temps, pénalisent lourdement le consommateur d'aujourd'hui et les générations futures qui hériteront d'une planète souillée, polluée qui n'aura pas maîtrisé ses émissions de gaz à effet de serre et dont les ressources auront été pillées et dispersées dans l'environnement sous forme de produits de corrosion.

Dans les débats et discours sur le futur, l'environnement et la sauvegarde de la planète sont au cœur des préoccupations. Petit à petit commence à poindre l'idée d'une croissance verte -ueuse, c'est-à-dire un nouveau calcul de la croissance qui prendrait en compte le développement

durable, par un système de compensations (points positifs et points négatifs). Quels que soient les modèles qui commencent à prendre forme, une chose est sûre, la corrosion de par ses effets globaux désastreux doit être considérée comme un coût net, comme une charge nette et doit être combattue et selon deux directions prioritaires :

- Par un meilleur respect des règles de l'art et des règles de mise en œuvre des matériels et équipements
- En généralisant une approche de coût global dans les décisions d'investissement, et donc en contraignant les concepteurs à mettre en place les moyens de prévention contre la corrosion