

**DES DANGERS DE L'EMPLOI INCONSIDÉRÉ
DES ACIERS INOXYDABLES
EN EAU DE MER**

par

S. RUEL

INGÉNIEUR DE L'ARMEMENT

et

G. TOSKER

INGÉNIEUR DES ÉTUDES ET TECHNIQUES D'ARMEMENT

Extrait de
Sciences et Techniques de l'Armement
Mémorial de l'Artillerie française
1^{er} fascicule 1973

PARIS
IMPRIMERIE NATIONALE
1973

DES DANGERS DE L'EMPLOI INCONSIDÉRÉ DES ACIERS INOXYDABLES EN EAU DE MER ⁽¹⁾

*(About some hazards of unconsiderate use of stainless steels
in sea water)*

*(Über die Gefahren der unüberlegten Verwendung von nichtrostenden
Stählen in Seewasser)*

par

S. RUEL ⁽²⁾ et G. TOSCAR ⁽³⁾

RÉSUMÉ. — *L'emploi des aciers inoxydables dans l'eau de mer ne va pas sans risque, notamment lorsque l'apparition de la corrosion dite « caverneuse » est possible.*

Après un rappel succinct du comportement général des aciers inoxydables en eau de mer aérée à l'égard de la corrosion, quelques exemples de corrosion caverneuse sont illustrés et commentés. Son mécanisme est expliqué, quelques palliatifs connus en sont indiqués, ainsi que quelques voies de recherches dans lesquelles il paraît possible de leur trouver des remèdes efficaces.

On cherche enfin à dégager une philosophie de l'emploi en milieu marin des aciers inoxydables dans leur état actuel.

ABSTRACT. — *Some hazards may derive from the use of stainless steels in sea water, especially when crevice corrosion may occur.*

After a short reminder about the general behaviour of stainless steels in sea water in the field of aerated sea water corrosion, a few examples of crevice corrosion are given and commented upon. Its mechanism is explained, and a few of the known palliatives are given, as well as a few suggestions as to the directions in which fruitful study might be undertaken.

Finally, we aim to bring together the ideas we consider to be the most interesting and useful on how to make the best use of the grades of stainless steels available to-day.

⁽¹⁾ Mémoire présenté à la session 1972 de l'A.T.M.A.

⁽²⁾ Ingénieur de l'Armement.

⁽³⁾ Ingénieur des études et techniques d'Armement.

ZUSAMMENFASSUNG. — *Der Einsatz von nichtrostendem Stahl im Meereswasser birgt Gefahren in sich, besonders wenn die sogenannte « Spalt » Korrosion auftritt*

Nach einem kurzen Rückblick auf das allgemeine Korrosionsverhalten von nichtrostendem Stahl bei Luftzutritt in Meereswasser werden einige Beispiele für die « Spalt » Korrosion abgebildet und erläutert. Ihr Mechanismus ist erklärt, bekannte Mittel zur Bekämpfung sind angegeben sowie neue Wege, die für eine Abhilfe möglich erscheinen.

Schliesslich wird versucht, eine Theorie für die Verwendung von nichtrostendem Stahl in seinem gegenwärtigen Zustand unter Meereseinfluss zu entwickeln.

1. INTRODUCTION

1.1. Les qualités remarquables de résistance à l'oxydation conférées aux aciers par l'addition de chrome en teneur supérieure à 13 %, qu'améliorent encore d'autres additions, telles celles de nickel ou de molybdène, ont fait connaître à ces alliages un très large développement dans tous les secteurs. En particulier, en eau de mer, on peut citer, parmi de nombreux cas d'emplois satisfaisants, les hélices, les impulseurs de pompe, les sphères de plongée, les mâts hissables de sous-marins, les installations de turbinage du Barrage de la Rance, etc.

1.2. Néanmoins, dans certains cas précis d'emploi en milieu marin, divers mécomptes viennent démentir le qualificatif d'inoxidables reçu par ces aciers, en raison de l'intervention d'une forme maligne de dégradation électrochimique, la corrosion cavernueuse, qui est susceptible d'entraîner des mises hors service prématurées.

1.3. L'objet essentiel de la présente communication est :

— d'une part, de montrer l'intérêt de l'exploitation d'expertises de matériels endommagés pour faire progresser la technique;

— d'autre part, d'attirer l'attention sur la sensibilité exacerbée des aciers inoxydables à la corrosion cavernueuse. Familier depuis longtemps aux gens de laboratoire, ce phénomène paraît avoir jusqu'ici été méconnu par la plupart des utilisateurs; sa gravité croissante résulte de la généralisation inconsidérée de l'emploi des aciers inoxydables, essentiellement en eau de mer.

1.4. Après un rappel succinct du comportement général des aciers inoxydables à l'égard de la corrosion, quelques exemples de corrosion cavernueuse sont illustrés et commentés. Son mécanisme est expliqué, quelques palliatifs connus sont indiqués, ainsi que quelques voies de recherches dans lesquelles il paraît possible de lui trouver des remèdes efficaces. On cherche enfin à dégager une philosophie de l'emploi en milieu marin des aciers inoxydables dans leur état actuel.

2. DIVERSES FORMES DE CORROSION DES ACIERS INOXYDABLES

2.1. Le comportement des aciers inoxydables en eau de mer aérée repose sur le phénomène de passivité qui résulte de la formation d'une pellicule continue d'oxydes hydratés sous l'influence du milieu ambiant.

2.2. Ces alliages présentent une bonne tenue à la corrosion généralisée, notamment en eau polluée, à l'érosion-corrosion, à la fatigue corrosion, à la cavitation. En présence d'alliages dont le potentiel de dissolution est différent, ils peuvent se révéler très tolérants dès lors qu'en dépit d'une différence de potentiel notable, la densité de courant reste faible; c'est le cas avec les cupro-aluminiums. Ils ne donnent pas lieu à l'apparition de corrosions sélectives telles que la dézincification des laitons.

2.3. Par contre, les ruptures locales de passivité, auxquelles ils sont fréquemment sujets en solution acide ou en présence d'ions halogènes, les rendent sensibles à la corrosion dite en cellule occluse. De cette corrosion, qui sera définie plus loin, relèvent la corrosion intergranulaire et la corrosion sous tension. La figure 1 présente la corrosion intergranulaire généralisée sur une fraction notable de la section résistante d'une pale d'hélice en acier inoxydable Z 14 CN 18-10 ensuite rompue par fatigue. La figure 2 donne un exemple de corrosion sous tension observé en eau de mer lors d'essais effectués à Indret : nous ne nous étendons pas sur ces deux modes de corrosion; ils ont déjà fait l'objet de travaux et publications nombreux et les remèdes correspondants sont plus ou moins classiques.

Il est de même bien connu que les aciers inoxydables présentent lorsque les circonstances s'y prêtent, une vive sensibilité à la corrosion par piqûres. Nous aurons l'occasion d'y faire allusion chemin faisant dans ce qui suit. Mais l'essentiel de notre propos concerne, comme nous l'avons déjà dit, la corrosion caverneuse.



FIG. 1. — Pale d'hélice en acier inoxydable Z 14 CN 18-10. Corrosion intergranulaire généralisée. Document S.T.C.A.N.



FIG. 2. — Acier Z 5 CN 17-4. Fissure de corrosion sous tension en eau de mer

3. EXEMPLES DE CORROSION CAVERNEUSE

3.1. Un échantillonnage assez représentatif des nombreuses avaries par corrosion caverneuse qui ont été données pour étude au Laboratoire d'Indret est fourni par les quatre matériels suivants :

- un réfrigérant d'huile à eau de mer;
- un réfrigérant d'eau de mer au fréon;
- des chemises d'arbre de pompe à eau de mer;
- un écrou.

3.2. RÉFRIGÉRANT D'HUILE À EAU DE MER.

Cet appareil avait été réalisé entièrement en acier inoxydable : la plaque à tubes, les tubes et les coquilles en acier Z 3 CN 18-10; les tubulures et les brides de sortie en acier Z 6 CN 18-8; les tubes étaient dudgeonnés dans la plaque.

La figure 3 présente l'aspect des nombreuses piqûres observées à l'intérieur des tubes. On remarquera l'extension longitudinale des piqûres et l'aspect feuilleté pris par la surface externe, apparemment lié à la présence d'alignements d'inclusions. On a ici à la fois un exemple de piqûres et une première illustration du rôle des inclusions dans la propagation de la corrosion en cellule occluse et en particulier de la corrosion caverneuse.

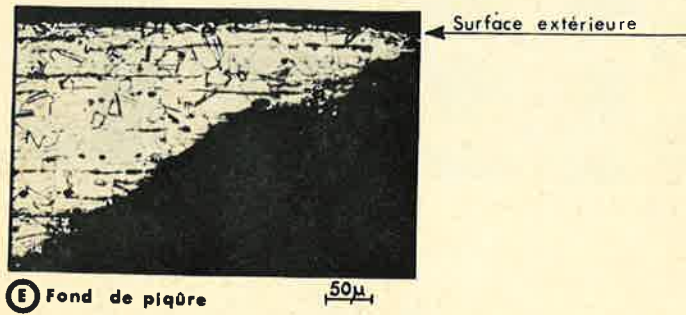
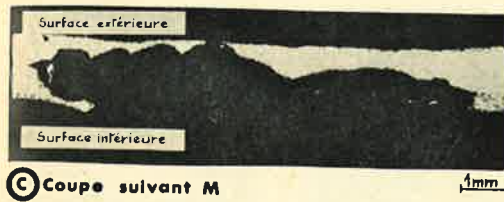
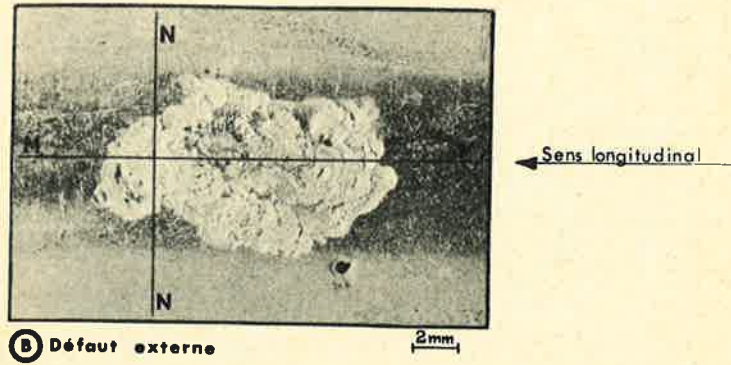
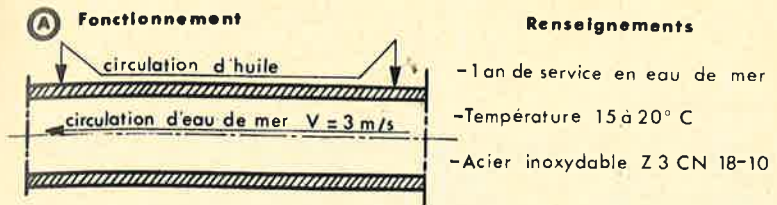


FIG. 3. — Tube de réfrigérant d'huile

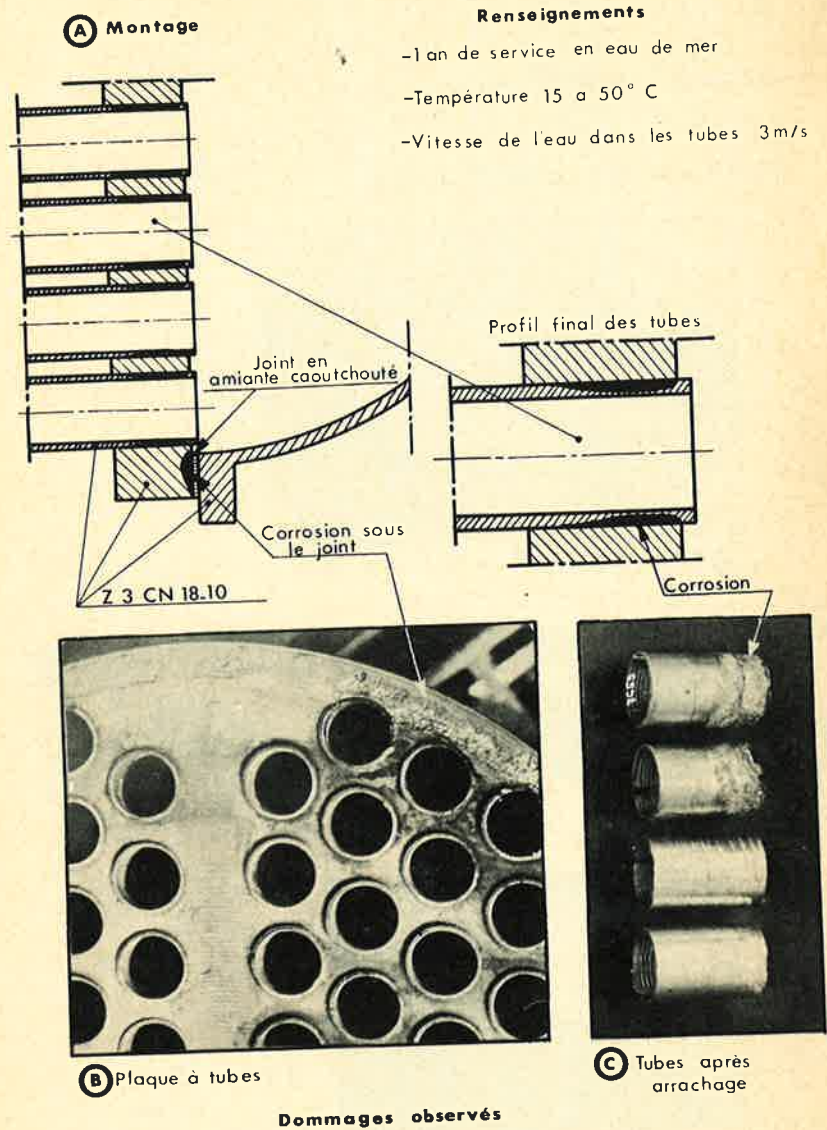


FIG. 4. — Plaque à tubes de réfrigérant d'huile

La figure 4 met en évidence d'une part la corrosion de la surface extérieure des tubes au droit des dudgeonnages, d'autre part la corrosion des zones où la bride porte sur la plaque, avec interposition d'un joint en amiante caoutchouté; ce dernier phénomène ⁽¹⁾ se retrouvant figure 5 dans les portages bride contre bride.

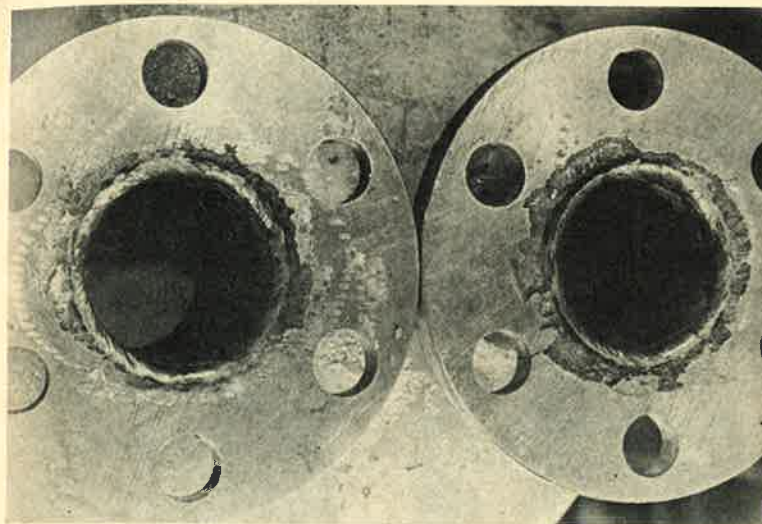


FIG. 5. — Tubulures d'entrée et de sortie d'eau de mer d'un réfrigérant corrodées sous les joints d'amiante caoutchouté

3.3. RÉFRIGÉRANT D'EAU DE MER.

Destiné au maintien de la température d'un vivier à homards de la région de Royan, cet appareil, constitué d'éléments en aciers Z 5 CNDT 18-10 et Z 3 CN 18-10, a subi, en un mois de service, les dégradations illustrées par la figure 6.

Les effets de la corrosion ont été observés aux divers points de contact entre éléments, et notamment sur la boulonnerie.

3.4. CHEMISES D'ARBRE DE POMPE À EAU DE MER.

Ces chemises dont les figures 7 et 8 présentent l'aspect et les détériorations qu'elles ont subi, étaient en aciers martensitiques, Z 8 CN 16 pour l'un, Z 15 CN 16 pour l'autre. Les dégradations sont très importantes. On remarque la corrosion intergranulaire de la chemise en acier à 0,15 % de carbone, qui s'est superposée à la corrosion cavernreuse.

⁽¹⁾ Il n'est d'ailleurs point particulier à l'emploi de joints en amiante caoutchouté mais se rencontre aussi avec le verre, ou d'autres matériaux inertes.

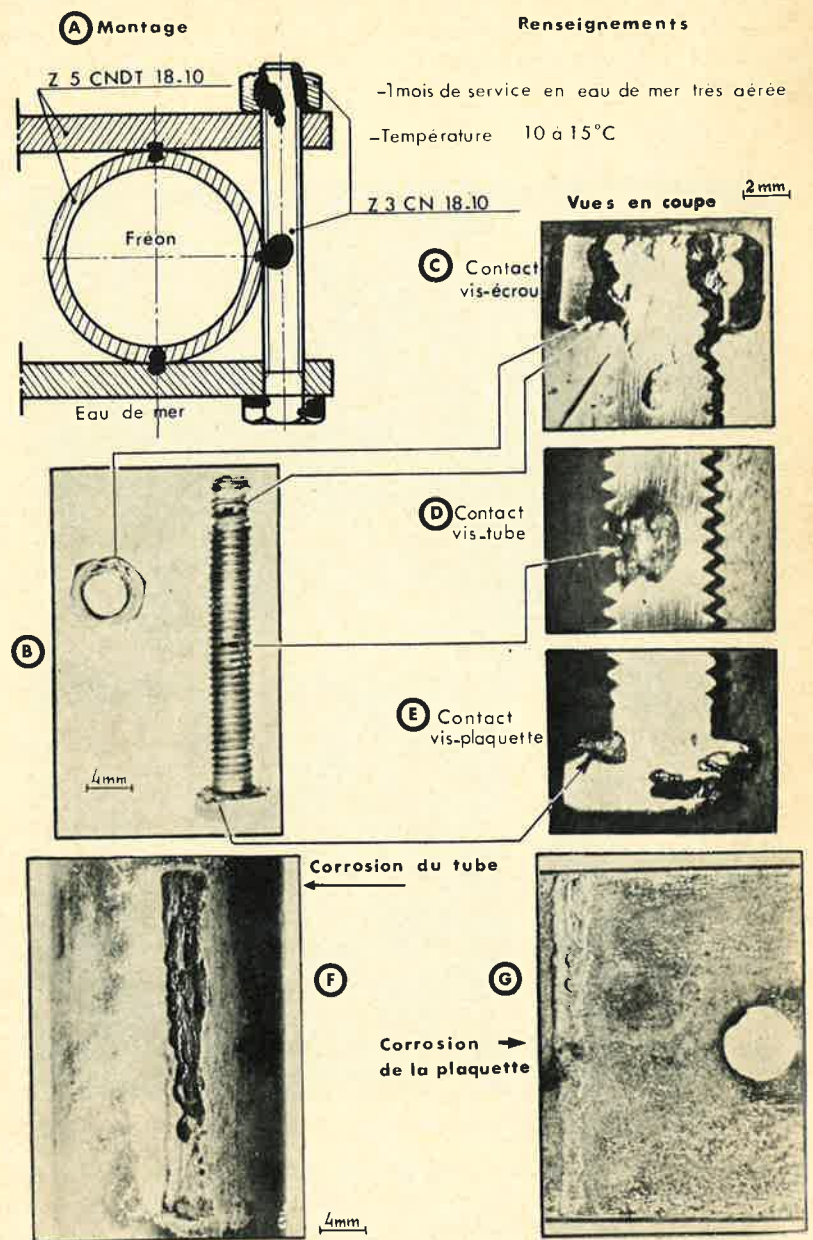
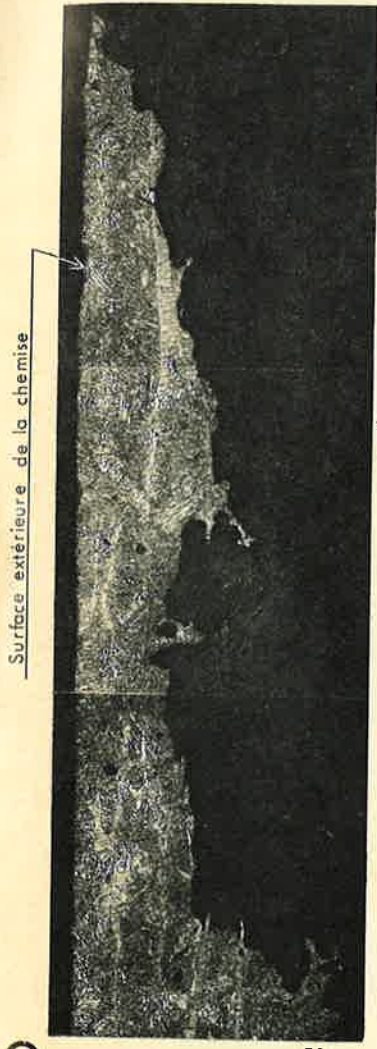
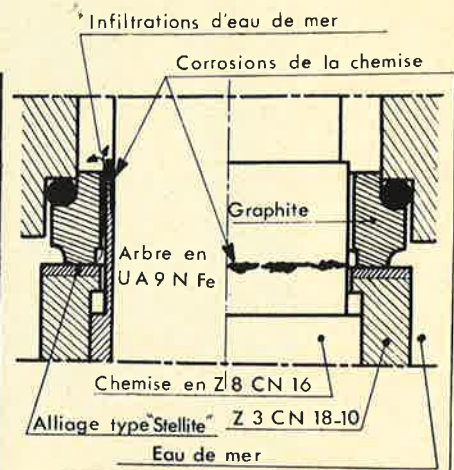


FIG. 6. — Éléments de réfrigérant d'eau de mer

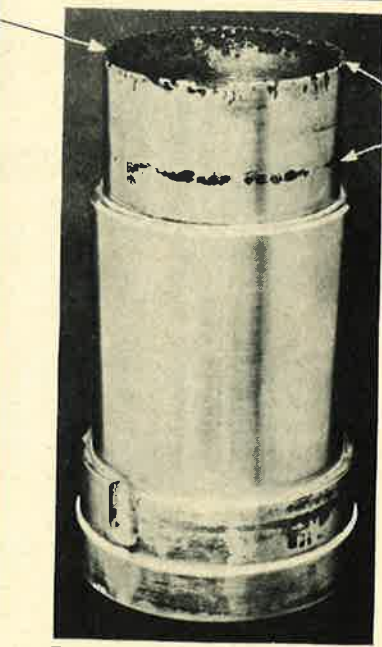
Renseignements

- 2 mois de service en eau de mer
- Température: 25° C

(A) Montage



(C) Corrosion de l'extrémité 50μ



(B) Dommages observés

FIG. 7. — Chemise de garniture d'étanchéité

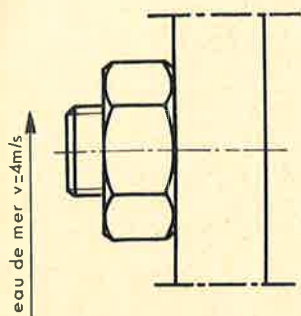


FIG. 8. — Élément semblable à celui de la figure 7, en acier Z 15 CN 16
Même zone que figure 7 C
On observe la superposition de la corrosion intergranulaire et de la corrosion caverneuse

3.5. Écrou.

La figure 9 présente un écrou en acier Z 3 CN 18-10 à l'issue d'un an de séjour en eau de mer dans un circuit. On constate quels peuvent être l'étendue des dégâts et le danger présenté par de telles pièces dont la résistance mécanique peut s'annuler pratiquement sans que leur aspect ne le laisse en rien soupçonner. Cet exemple montre en outre de façon encore plus nette que le premier (3.2) le rôle néfaste des inclusions.

(A) Montage

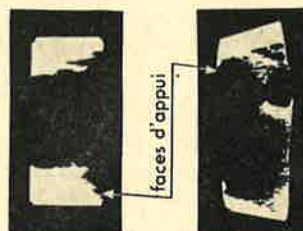


Renseignements

- 1 an de séjour en eau de mer
- température : 20°C
- tous éléments en Z3CN 18-10

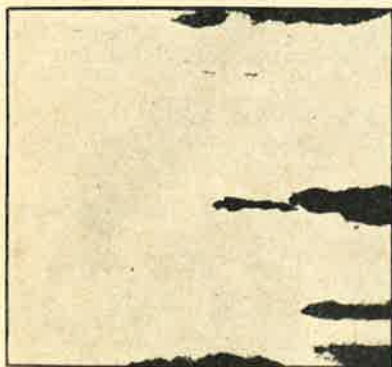


(B) Face d'appui

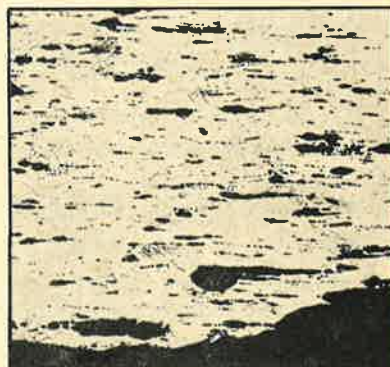


(C) Vues en coupe

2,5mm



(D) Sans attaque 50μ



(E) Après attaque 50μ

Corrosion et alignements

FIG. 9. — Écrou

TOSKER



acier Z 15 CN 16

la corrosion caverneuse

3.6. Citons encore, sans les illustrer :

- des entretoises d'arbre de pompe (acier Z 30 NC 35-12);
- des éprouvettes d'essai d'érosion-corrosion ⁽¹⁾ en la plupart des nuances courantes d'aciers inoxydables ainsi qu'en Incoloy 800 ou en Inconel 600 qui présentent une excellente tenue à l'érosion-corrosion mais sont rongées sous les élastiques de fixation au porte-éprouvettes;
- des manilles de voiliers;
- des filtres montés en amont de garnitures de pompes à eau de mer et qui, constitués pour l'essentiel d'un bobinage hélicoïdal à spires jointives de fil d'acier inoxydable, se détruisent très rapidement;
- des arbres de pompes à eau de mer, sur lesquels des effets sensibles de la corrosion cavernueuse ont été étudiés;
- etc.

3.7. Un dernier exemple pour montrer la généralité du problème : les implants métalliques employés en chirurgie sont l'objet du même phénomène dans le sang (dont la composition se rapproche de celle de l'eau de mer). Ce problème, très particulier, a été évoqué récemment à la Conférence de Noordwijk.

4. CONSÉQUENCES PRATIQUES DE LA CORROSION CAVERNEUSE

L'échantillonnage, représentatif des cas concrets, qui vient d'être donné permet de faire un certain nombre de remarques.

4.1. En premier lieu les aciers inoxydables impliqués sont fort divers mais dans l'ensemble de nuances courantes caractérisées par une teneur en molybdène inférieure à 3 %. On y trouve :

- des aciers martensitiques ou ferritiques au chrome;
- des aciers austénitiques chrome-nickel du type 18-10, à carbone variable de 0,03 % à 0,07 % environ, stabilisés ou non, au molybdène (2,5 %) ou non;
- des aciers réfractaires à forte teneur en carbone (0,40 %);
- des aciers à forte teneur en nickel et bas carbone (type Incoloy 800 et dérivés);
- des aciers à teneur variables en inclusions (aciers de décolletage ou non), etc.

4.2. Selon le cas, les éléments corrodés sont au contact d'un acier identique, d'un acier inoxydable de nuance différente, de joints en amiante ou en autres matières inertes (verre), ou bien en regard d'acier inoxydable, de cupro-aluminium, de graphite.

⁽¹⁾ Essai « jet impingement test » de la B.N.F.M.R.A.

4.3. De son côté, l'eau qui entoure les zones corrodées peut être en circulation permanente à faible vitesse (2,5 m/s) ou en circulation intermittente. Cette eau est toujours aérée, parfois très aérée; c'est très souvent l'eau d'un circuit d'eau de mer.

En revanche, la géométrie des matériels comporte aux endroits corrodés des recoins, interstices, et plus généralement toutes sortes de zones susceptibles de favoriser la rétention locale de l'eau et d'empêcher son renouvellement, ainsi que l'alimentation en oxygène de l'eau retenue.

4.4. Les faibles valeurs de la vitesse de circulation, moins de 2 à 3 m/s, favorisent dans les zones libres la formation de piqûres. Mais, sauf lorsque ces piqûres affectent des tubes, la corrosion caverneuse met l'appareillage hors service plus rapidement encore, et naturellement d'autant plus que l'épaisseur de la section résistante est faible.

4.5. En résumé, dans les divers cas cités, la corrosion caverneuse s'est manifestée :

— chaque fois que la géométrie des ensembles créait des zones d'étendue restreinte plus ou moins fermées, recoins, interstices, portages, dudgeonnages, etc.;

— quel que soit le type d'acier dans la gamme courante;

— quelles que soient les conditions de couplage galvaniques avec des métaux de noblesse équivalente ou supérieure, ou de voisinage avec des matériaux inertes.

L'emploi des aciers inoxydables dans l'eau de mer doit donc en général être évité chaque fois que la géométrie de l'ensemble favorise la création de cavernes et que l'épaisseur de la section résistante est faible. C'est le cas, en particulier, de nombreux éléments constitutifs des circuits d'eau de mer.

5. MÉCANISME DE LA CORROSION CAVERNEUSE

Les spécialistes ont depuis longtemps reconnu que le mécanisme de la corrosion caverneuse ne pouvait pour l'essentiel être ramené à aucun des processus ou facteurs suivants :

— érosion-corrosion, érosion par cavitation;

— courants vagabonds;

— influence de corps non métalliques (de leur décomposition en particulier);

— couplages galvaniques entre aciers inoxydables de nuances différentes ou avec des alliages cuivreux (Cu-Al) ou le graphite.

Sans contester pourtant que les deux derniers ne puissent à l'occasion jouer un certain rôle mineur, il ne reste donc que les mécanismes de la corrosion en cellule occluse, ce qui est *a priori* plausible, étant donné que dans tous les cas de corrosion caverneuse on est en présence d'eau aérée, c'est-à-dire à forte teneur en oxygène dissous. En effet, sous le nom de corrosion en cellule occluse, BROWN a proposé de désigner la corrosion qui se produit dans

des conditions de diffusion restreinte, de sorte que la composition de la solution corrodante existant dans des cavités plus ou moins obturées puisse être très différente de celle de l'ensemble de la solution. Ces conditions se rencontrent notamment dans la corrosion par piqûres et la corrosion cavernueuse qui nous ont particulièrement intéressés ici, ainsi d'ailleurs que dans la corrosion sous tension et la corrosion intergranulaire auxquelles les aciers inoxydables présentent une certaine sensibilité dans les solutions chlorurées.

Diverses publications ont traité de ces mécanismes. Rappelons seulement que chaque fois que l'agent corrosif est une eau de pH voisin de 7 (c'est le cas de l'eau de mer), l'hydrolyse des produits primaires de corrosion entraîne une acidification locale croissante, par la formation d'un acide qui dans le cas de l'eau de mer est l'acide chlorhydrique, particulièrement virulent. Dans ces conditions, on observe la corrosion cavernueuse chaque fois que la corrosion généralisée se produit dans une cellule où l'oxygène ne se renouvelle pas. Le pH peut descendre à des valeurs de l'ordre de 3 à 4 et l'attaque progresser à une vitesse allant jusqu'à 1 mm. par semaine.

La corrosion par piqûres se poursuit de façon semblable sous la couche de produits de corrosion chaque fois qu'une rupture du film protecteur permet l'amorçage du processus.

6. PALLIATIFS ET REMÈDES DE LA CORROSION CAVERNEUSE

6.1. Il existe contre la corrosion cavernueuse un certain nombre de mesures de natures diverses, d'efficacité variable selon les circonstances; dans le cas qui nous intéresse, celui des matériels navals, et en particulier des circuits d'eau de mer, beaucoup sont inefficaces, ou ne peuvent être envisagées.

Pour combattre la corrosion cavernueuse on peut chercher à jouer séparément ou conjointement :

- sur la géométrie des matériels;
- sur le milieu ambiant;
- sur les matériaux.

6.2. L'action sur la géométrie s'exerce au niveau de la conception des matériels; on cherche à éliminer du dessin interstices, recoins, contacts, zones d'écoulement perturbé favorable à la formation de dépôts. C'est donc pour le concepteur affaire d'état d'esprit. A la vérité, on peut considérer que l'action sur la géométrie ressortit en grande partie à la catégorie des vœux pieux, mais irréalisables, car comment éliminer systématiquement tout portage, toute bride, toute boulonnerie, etc...?

6.3. L'action sur le milieu ambiant vise dans l'ensemble à en modifier les caractéristiques électrochimiques.

6.3.1. En premier lieu on peut minimiser l'influence de l'oxygène, soit en maintenant nul le gradient de concentration, soit en l'éliminant par voie physique (dégazage) ou chimique (addition d'inhibiteurs, tels que le sulfite de soude).

Le maintien d'une concentration constante pourrait en principe être assuré par une aération forcée maintenant le niveau de l'oxygène à la valeur de saturation. Toutefois, dans la pratique, l'espoir de retarder le processus de corrosion en favorisant l'accès de l'oxygène aux zones de recoins par la saturation du milieu est quasi nul, ainsi que le démontrent certains des exemples précédents, en particulier celui du vivier à homards, et celui des éprouvettes d'essai d'érosion-corrosion.

L'élimination de l'oxygène se montre en revanche efficace : c'est ainsi que l'acier inoxydable peut être employé — avec un succès à vrai dire non absolu — dans les usines de dessalement et dans diverses opérations de traitement de milieux aqueux chlorurés fonctionnant sans air. Il convient de noter qu'une entrée d'air fortuite, toujours à craindre, pourrait avoir à terme des conséquences graves. De toute façon dans notre cas, cette solution n'est pas viable, notamment en raison des sujétions qu'elle présenterait.

Un troisième procédé intéressant en dehors de notre domaine paraît être le tamponnage de la solution qui permettrait le maintien de la valeur du pH à son niveau initial. L'expérience des implants chirurgicaux montre cependant qu'il n'est pas suffisant.

6.3.2. Procédé purement électrochimique, la protection cathodique semble à première apparence séduisante. En effet, au moins en laboratoire, elle a fait la preuve de son efficacité, et rien ne s'oppose pratiquement à son application dans notre cas.

Néanmoins, elle se révèle peu satisfaisante en fait, en raison de la complexité des matériels à protéger, et des difficultés de mise au point et de surveillance.

6.4. Les divers procédés que nous venons de passer en revue (6.2 et 6.3) n'apparaissent ainsi, dans le cas présent, que comme des palliatifs. C'est à l'action sur les matériaux qu'il faut donc demander une solution plus réaliste, soit en fait à la protection par revêtements ou à la modification de la nature des matériaux.

6.4.1. La protection par revêtements est de prime abord séduisante. Dans notre cas, elle peut effectivement constituer une solution à terme.

On peut distinguer :

- les revêtements électriquement neutres ;
- les revêtements métalliques.

6.4.1.1. Les revêtements neutres, plastiques ou peintures, ne paraissent pas constituer la panacée. En effet, leur épaisseur doit être compatible avec les impératifs mécaniques et ils doivent résister aux mauvais traitements qu'ils subissent au montage. En outre, s'ils ne sont appliqués que localement, on court le risque de ne faire que déplacer la corrosion. Par contre, si les sujétions n'interdisent pas un revêtement intégral, ce genre d'application peut être intéressant et à la limite permettrait d'éliminer l'acier inoxydable au profit d'alliages moins chers.

6.4.1.2. Les revêtements métalliques sur acier inoxydable sont prometteurs. On peut envisager un dépôt cathodique moins noble que l'acier de base, qui fournira en fait une protection cathodique, localisée au site même de la corrosion, au contraire de la protection globale évoquée précédemment.

On peut également envisager un dépôt anodique, plus noble, sous réserve qu'il ne soit pas sensible à la corrosion caverneuse, et qu'il ne donne pas lieu à un courant de couplage important si le revêtement n'est pas intégral.

L'expérience en la matière n'est pas très importante. On a cependant déjà pu constater l'effet bénéfique d'un revêtement de cuivre, sur une vis placée dans des conditions difficiles, où toute la partie non revêtue avait été détruite par corrosion caverneuse.

Les revêtements métalliques méritent donc d'être étudiés plus avant. La facilité de leur application, par exemple au tampon par voie électrolytique, est un facteur favorable.

6.4.2. La modification de la nature des matériaux peut prendre trois aspects :

— ou bien on abandonne les aciers inoxydables au profit d'alliages de nature différente;

— ou bien on conserve les aciers inoxydables actuels en s'attachant à choisir le mieux adapté à chaque cas particulier;

— ou bien, à plus long terme, on s'efforce d'améliorer les propriétés des aciers inoxydables.

6.4.2.1. Divers alliages, qui n'appartiennent pas à la catégorie des aciers inoxydables, et réputés peu sensibles à la corrosion caverneuse, fournissent des solutions intéressantes, mais qui présentent parfois l'inconvénient d'un coût plus élevé, et d'une moindre facilité de mise en œuvre.

Citons : les cuproaluminiums à haute résistance, le cupro-nickel 90-10 Fe, l'Incoloy 825, les monels K, les Hastelloys, les alliages de titane, etc.

6.4.2.2. Certaines nuances d'aciers inoxydables, dans l'état actuel du marché, sont meilleures que les autres. Ainsi, compte tenu, en particulier, des études effectuées à Indret, il convient de choisir des aciers austénitiques ou austénoferritiques à faible teneur en carbone et forte teneur en chrome, comportant du molybdène (et du silicium), avec la plus faible densité possible en inclusions, et d'éliminer les aciers martensitiques, les aciers stabilisés au titane, et les aciers ne présentant pas l'ensemble des caractères précédents.

Citons comme aciers admissibles ceux des catégories 25 et 28 *bis* de l'Instruction 47 d'Indret (AISI 316 et 347), ainsi que les aciers à 20 % de chrome, 25 % de nickel et 4 % de molybdène qui ont déjà fait la preuve d'un comportement nettement supérieur à celui de l'acier de la catégorie 25. Il convient de noter que, si le choix de tels aciers est de nature à réduire notablement la probabilité de l'apparition de la corrosion caverneuse, il n'apporte aucune amélioration une fois qu'elle s'est déclenchée car son développement, après initiation, s'effectue aussi vite que dans le cas des autres aciers, et que donc il ne fournit aucune garantie de tenue indéfinie.

6.4.2.3. A moyen et long terme, il convient de chercher à améliorer le comportement des aciers inoxydables.

Les études devront s'attacher à définir des aciers dont la couche passive soit la plus solide possible, et résiste le mieux possible à l'action des acides et en particulier de HCl. Autrement dit, leur potentiel de piqure sera très bas et ils ne se dépasseront que pour un pH faible — inférieur à celui qui règne dans une caverne.

Il convient d'approfondir l'influence du chrome, du molybdène, du cuivre, du silicium, et de définir les valeurs optimales des teneurs en ces éléments d'addition (ainsi d'ailleurs qu'en nickel).

L'influence des inclusions devra être également étudiée pour fixer quel seuil leur densité ne doit pas dépasser.

Quelques aciers déjà ont la réputation d'un comportement excellent, tels les austénitiques à 6 % de molybdène proposés par Defranoux, ou les austénoferritiques, type 25-5-Mo-Cu.

7. PHILOSOPHIE DE L'EMPLOI DES ACIERS INOXYDABLES EN EAU DE MER

Pour nous en tenir au domaine marin, nous savons que les aciers inoxydables actuels ont à la fois de très intéressantes qualités qui en justifient l'emploi dans de nombreux cas, et de graves défauts qui l'interdisent dans d'autres.

En leur faveur, on peut invoquer leur comportement à la corrosion généralisée en eau polluée à l'érosion-corrosion à vitesse d'écoulement élevée, à la fatigue-corrosion, à la cavitation. Ils sont en outre actuellement d'approvisionnement facile et de mise en œuvre aisée.

A leur rencontre, il faut noter la sensibilité à la corrosion par piqûres et à la corrosion cavernueuse, ainsi que, selon les nuances, à la corrosion sous tension et à la corrosion intergranulaire.

Laissant de côté ces deux dernières formes de corrosion, on peut considérer que l'emploi en eau de mer des aciers inoxydables actuellement disponibles est souhaitable, du point de vue corrosion, chaque fois que des risques de corrosion cavernueuse ou par piqûres ne sont pas encourus.

L'emploi de ces aciers inoxydables est ainsi seulement possible de façon utile :

- d'une part en eau de mer non aérée,
- d'autre part en eau de mer aérée soit si la vitesse d'écoulement est élevée en permanence (sans que les périodes d'arrêt humide dépassent quelques jours) et si à la fois, le dessin des matériels élimine les recoins où l'eau pourrait stagner, soit pour des pièces d'épaisseur suffisante pour que la corrosion cavernueuse y soit sans danger et/ou telles que son développement même fasse disparaître les conditions favorables à sa progression, etc.

Ainsi on peut les envisager pour des hélices, des impulseurs de pompe, dans les usines de dessalement après désaération, etc.

L'emploi des aciers inoxydables doit être en général évité en eau de mer aérée :

- lorsque les pièces sont minces;
- pour la boulonnerie, les brides, les filtres, et de façon plus générale toutes pièces en contact;
- pour les éléments faisant partie d'un circuit où l'eau circule à vitesse limitée, ou avec de longues périodes d'arrêt humide;
- en présence de recoins, d'interstices, de zones mortes, etc.

CONCLUSION

En résumé, en eau de mer lorsqu'il y a risque de corrosion cavernueuse, il convient d'éviter l'emploi des aciers inoxydables. Si ces aciers constituent la seule solution possible compte tenu des autres sujétions, des remplacements fréquents de pièces seront à prévoir. Dans tous les autres cas, des aciers inoxydables bien choisis et correctement mis en œuvre peuvent apporter une excellente solution.

Pour conserver pleinement leur intérêt, les aciers inoxydables ne doivent en définitive être utilisés en milieu marin que de manière mûrement réfléchie.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] B. F. BROWN. — Les matériaux et la corrosion en milieu marin, *Matériaux et Techniques*, janvier 1971, p. 22-27, février 1971, p. 39-42.
- [2] R. MAY et STACPOOLE. — Appareil à projection pour l'évaluation de la corrosion par l'eau de mer en mouvement, *The Journal of the Institute of Metal*, juin 1950.
- [3] Choix des matériaux pour applications marines, brochure E4 de l'International-Nickel.
- [4] G. TOSKER. — Les méthodes et moyens d'étude de la corrosion et des détériorations associées mis en œuvre à l'établissement des constructions et armes navales d'Indret, *Sciences et Techniques de l'Armement*, 1^{er} fasc. 1972, p. 105-178.
- [5] J. M. DEFRANOUX. — Les méthodes électrochimiques d'étude de la corrosion des aciers inoxydables, *Mécanique-Électricité*, n° 191, septembre 1965, p. 73-77.
- [6] J. M. DEFRANOUX. — Étude électrochimique de la corrosion des aciers inoxydables, *Corrosion et anti-corrosion*, 1958, p. 363-372.
- [7] J. M. DEFRANOUX. — La mise en œuvre des aciers inoxydables. Acquisitions récentes de la science de la corrosion, *Aciers spéciaux*, n° 10, p. 21-28.
- [8] J. M. DEFRANOUX. — Sur le comportement des aciers inoxydables en présence d'eau de mer froide et chaude, *Corrosion-Sciences*, 1968, vol. 8, p. 245-258.
- [9] J. M. DEFRANOUX. — Sur la résistance à la corrosion des aciers inoxydables dans l'eau de mer, Congrès international de la corrosion marine et des salissures, Cannes, 8-12 juin 1964.
- [10] A. DESESTRET. — La corrosion par piqûres des aciers inoxydables, *Corrosion, traitements, protection, finition*, vol. 15, août-septembre 1967, p. 281-287.
- [11] H. CORIOU, L. GRALL, A. DESESTRET, H. G. WAGNER. — Initiation des piqûres sur les aciers inoxydables austénitiques au chrome et au nickel du type 18-10 dans les solutions de chlorure de sodium, Colloque annuel du CEFRACOR, 8-10 avril 1970.
- [12] J.-M. DEFRANOUX. — La résistance des aciers inoxydables à la corrosion localisée dans l'eau de mer, Conférence sur la corrosion marine (International-Nickel), Biarritz, 2-4 juin 1969, *Corrosion, traitements, protection, finition*, 1970, p. 359-367.
- [13] M. POURBAIX. — Signification du potentiel de protection lors de la corrosion par piqûres, de la corrosion intergranulaire et de la corrosion fissurante sous tension, *Rapport technique du CEBELCOR*, n° 179.
- [14] A. POURBAIX. — Étude de la corrosion localisée en solution chlorurées, *Rapport technique du CEBELCOR*, n° 198.
- [15] P. STAMFORD. — Application des alliages de nickel en présence d'eau de mer, Colloque international sur l'exploitation des océans, 1971.
- [16] Réunion de l'Européan Sea Horse Institute à Noordwijk du 6 au 8 septembre 1971.
- [17] Journée de corrosion du CEBELCOR à Bruxelles, 10 septembre 1971.

rosion caverneuse,
 aciers constituent
 des remplace-
 les autres cas, des
 peuvent appor-
 ables ne doivent
 ment réfléchie.

et Techniques,
 rosion par l'eau
 tional-Nickel.
 orations asso-
 adret, Sciences
 des aciers
 oxydables,
 entes de la
 eau de
 eau de
 1964.
 ements,
 sur les
 onditions
 eau
 1969.
 es,
 que

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
Résumé (français, anglais, allemand).....	23
1. Introduction	24
2. Diverses formes de corrosion des aciers inoxydables.....	25
3. Exemples de corrosion caverneuse.....	26
4. Conséquences pratiques de la corrosion caverneuse.....	34
5. Mécanisme de la corrosion caverneuse.....	35
6. Palliatifs et remèdes de la corrosion caverneuse.....	36
7. Philosophie de l'emploi des aciers inoxydables en eau de mer.	39
8. Conclusion	40
Bibliographie.....	40