



HAL
open science

Tribocorrosion d'un acier inoxydable en milieu marin artificiel

Guy Lederer, Ingrid Proriol Serre, N. Celati, Rachel Marie Pradeilles-Duval

► **To cite this version:**

Guy Lederer, Ingrid Proriol Serre, N. Celati, Rachel Marie Pradeilles-Duval. Tribocorrosion d'un acier inoxydable en milieu marin artificiel. *Matériaux et Techniques*, 1999, 87, pp.5-10. 10.1051/mat-tech/199987120005s . hal-00111634

HAL Id: hal-00111634

<https://hal.science/hal-00111634v1>

Submitted on 19 Apr 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Tribocorrosion d'un acier inoxydable en milieu marin artificiel

G. Lederer³, I. Serre^{1,2}, N. Cella¹, R.-M. Pradeilles Duval

¹ DGA/DCE/Centre technique d'Armeil

² Laboratoire de Mécanique des Solides, CNRS UMR 7649, École Polytechnique, Palaiseau

³ Travail effectué à DGA/DCE/Centre technique d'Armeil,

actuellement : PSA/Direction des moyens techniques, La Garenne Colombes

CORROSION WEAR OF STAINLESS STEEL IN ARTIFICIAL SEA ENVIRONMENT

ABSTRACT: The friction and wear of stainless steels in sea-water environment is of prime interest for naval applications. The behaviour of the tribosystem alumina pin / 316L stainless steel disc in a 30g/l NaCl solution buffered at pH 8 exhibited the coupling between mechanical and electrochemical parameters. One objective of this study is to determine methods for the comprehension and interpretation of tribocorrosion tests.

The friction coefficient is quite sensitive to the applied potential and it is particularly true around the free potential under friction. In our experimental conditions, sliding friction shifts the value of the free potential towards more cathodic value. This behaviour shows the sensibility of potential to frictional perturbation of the surface. In passive domain of materials, an increase of intensity is observed under friction. This evolution is due to depassivation / repassivation phenomena. The overall wear volume shows a dependence to the applied normal load and to the imposed electrochemical potential. Except for the beginning of the test, the evolution of wear is linear in time during a 5 hours test.

The total wear, addition of mechanical and electrochemical wear, is investigated and an explanation of its global behaviour is proposed on the basis of an electrochemical and mechanical framework. This eroded volume can be principally attributed to corrosive mechanisms. A mechanical modelling related to evaluation of elasto-plastic pressure distribution is proposed and gives the stabilised wear regime. The experimental wear regime is in agreement with this model.

The simplicity of this tribocorrosion system allows an automatic analysis and interpretation of tests results. Interactions between electrochemical and mechanical behaviour are studied. We can explain the mechanical wear by study of contact problem and electrochemical wear by analysis with Faraday law. Despite the great complexity of industrial problems (wear and corrosion of two antagonists,...), this method could be adapted to interpret various tribotest systems.

La compréhension des phénomènes d'usure appliquée à certains systèmes soumis à des sollicitations de frottement-corrosion revêt un intérêt pratique considérable pour de nombreuses applications industrielles. Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes intéressés au comportement en tribocorrosion d'un acier inoxydable industriel en milieu marin artificiel soumis à différentes charges normales de frottement. L'objectif des essais est d'une part de mieux comprendre les mécanismes de dégradation par frottement-corrosion de la surface du matériau, et d'autre part d'élaborer une méthodologie de travail qui pourrait être utilisée dans le cadre des études de tribocorrosion. L'influence des caractéristiques mécaniques des matériaux étant généralement non prise en compte ou sous-estimée, on s'est efforcé de corrélater les mesures électrochimiques et d'usure avec les paramètres du contact et les propriétés mécaniques de l'acier inoxydable 316L dans une solution de NaCl à 3%.

Conditions expérimentales

Les essais sont réalisés à l'aide d'un tribocorrosimètre de type pion - disque développé par le Centre technique d'Arcueil. L'échantillon de travail est un acier inoxydable de type Al 316L. Sa composition chimique, donnée dans le tableau I, est conforme à la norme (X2CrNiMo17-12-2). L'Al 316L a subi avant essai un traitement thermique d'hypertrempe à 1150 °C. Il présente un module élastique de 207 GPa pour un coefficient de Poisson de 0,3 et une limite élastique en traction à 0,02 % de 295 MPa.

Le frotteur est un pion en alumine (module d'élasticité de 400 GPa) à bout hémisphérique de rayon 30 mm, en rotation sur un rayon de 8 mm. Le choix d'un tel matériau pour le frotteur résulte de son caractère inerte en solution oxydante. De plus, dans les conditions de chargement et de vitesse choisies pour les essais (charge de 40 ou 60 N, vitesse de 40 tr/min), le pion en alumine ne s'use pas, ce qui permet une interprétation plus aisée des phénomènes d'usure.

Le tribocorrosimètre est constitué d'une machine de traction/compression qui permet d'appliquer l'effort normal entre les deux antagonistes. Le pion est entraîné en rotation, tandis qu'un capteur entrave la rotation du disque d'acier. Le coefficient de frottement est le rapport entre l'effort tangentiel mesuré et la force normale réellement appliquée que l'on mesure en continu lors des essais. Notons que la composante radiale de l'effort tangentiel, supposée négligeable, n'est pas mesurée par notre système. Les forces normales appliquées au système sont de 40 N et 60 N. La vitesse relative entre les deux antagonistes est de 0,033 mm/s.

Le montage électrochimique classique à trois électrodes permet d'accéder aux grandeurs caractéristiques que sont le potentiel de notre matériau et le courant global des réactions anodiques et cathodiques, avec ou sans sollicitations de frottement. L'électrode de référence utilisée est une électrode Ag/AgCl (+197 mV/ENH); tous les potentiels présentés par la suite sont référencés par rapport à celle-ci.

Le milieu corrosif utilisé est la solution A3 selon la norme NF A-91 411 (NaCl à 30 g/l tamponnée à pH 8). Après essai, l'usure totale du disque en acier 316L est évaluée par profilométrie.

Résultats expérimentaux

Les résultats de tribocorrosion font apparaître un couplage entre grandeurs mécaniques et électrochimiques. L'usure totale des matériaux, correspondant à la somme de l'usure mécanique et celle d'origine électrochimique, dépend du chargement mécanique et des conditions électrochimiques ainsi que de leurs couplages.

Sensibilités des grandeurs tribologiques aux conditions électrochimiques

L'évolution des grandeurs mécaniques est observée à travers celle du coefficient de frottement.

Lors des essais de tribocorrosion de l'acier inoxydable 316L sous contrôle potentiostatique, le coefficient de frottement se stabilise après une période transitoire d'une cinquantaine de cycles. En fonction du potentiel appliqué, on observe une évolution du coefficient de frottement (fig. 1). Cette évolution peut suggérer une évolution des phénomènes d'usure.

Tableau I - Composition chimique de l'acier inoxydable de type Al 316L (en % massique).

Table I - Chemical composition of stainless steel, 316L type (weight %).

C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	Cu	Ti	P	S
0,039	16,96	12,1	1,86	1,28	0,41	0,22	0,04	0,023	0,019

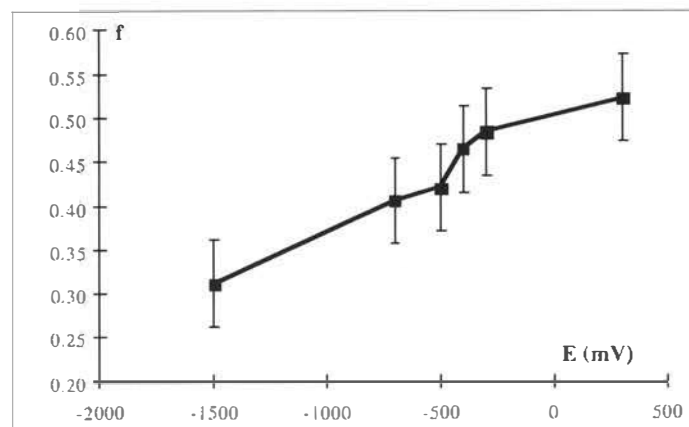


Fig. 1 - Évolution du coefficient de frottement en fonction du potentiel appliqué ($F_n = 40$ N).

Fig. 1 - Friction coefficient's evolution versus applied potential ($F_n = 40$ N).

Comportement électrochimique sous frottement

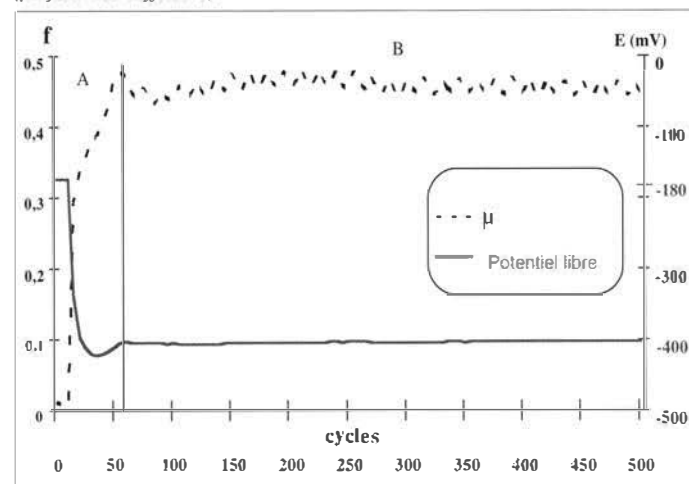
L'évolution du potentiel libre sous frottement en circuit ouvert laisse apparaître deux périodes distinctes pour lesquelles on peut supposer des modes de dégradation différents (fig. 2).

Dès l'application du frottement, le potentiel libre se trouve déplacé vers des valeurs plus cathodiques (environ -400 mV contre -180 mV sans frottement). Ce type de comportement met en évidence la sensibilité du potentiel de corrosion et donc des phénomènes électrochimiques de surface à des perturbations par frottement. La figure 2 montre l'existence de deux domaines distincts: une période transitoire d'environ 50 cycles suivie d'une période stationnaire pour laquelle on observe une stabilisation du potentiel libre. On remarque une évolution similaire en ce qui concerne le coefficient de frottement.

Des essais potentiodynamiques effectués sans et avec frottement confirment le déplacement du potentiel de corrosion vers

Fig. 2 - Évolution du potentiel libre et du coefficient de frottement pour $F_n = 40$ N (μ : coefficient de frottement).

Fig. 2 - Evolution of free potential and of friction coefficient for $F_n = 40$ N (μ : friction coefficient).



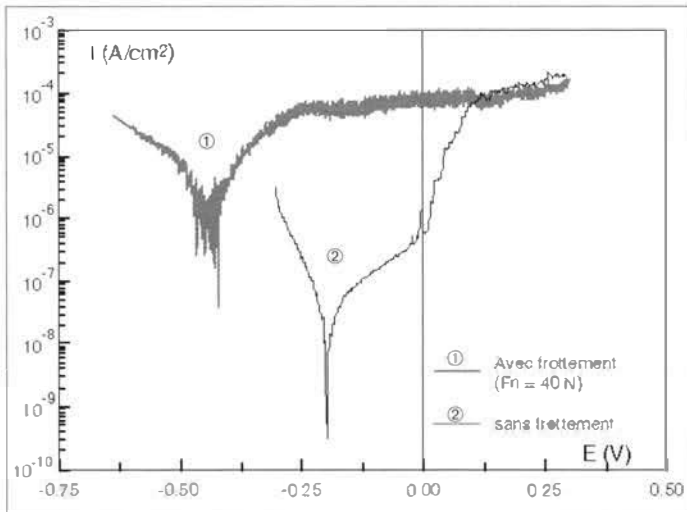


Fig. 3 - Comportement potentiodynamique avec ou sans sollicitations de frottement.

Fig. 3 - Potentiodynamic behaviour with or without friction.

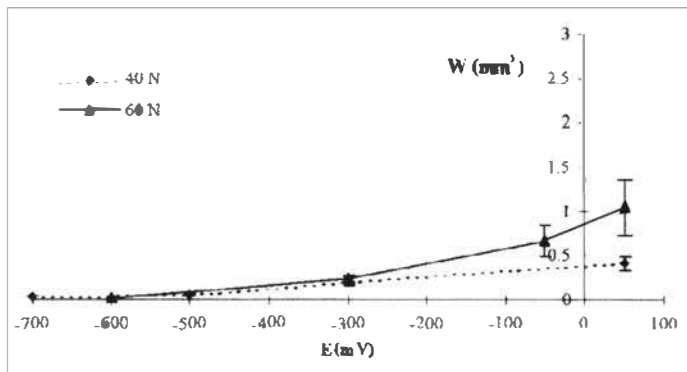


Fig. 4 - Évolution de l'usure avec le potentiel.

Fig. 4 - Total wear volume evolution versus applied potential.

des valeurs plus cathodiques (fig. 3). De plus, on observe une augmentation du courant dans le domaine de passivité du matériau. Ainsi, les sollicitations de frottement modifient de manière significative le comportement potentiodynamique de notre matériau. À chaque passage du pion et du fait des conditions de sollicitation, il y a, en effet, rupture du film passif et donc activation de réactions anodiques qui deviennent prépondérantes, d'où l'augmentation importante du courant et le déplacement du potentiel de corrosion vers des valeurs plus cathodiques.

Il est toutefois important de souligner que des essais de frottement ont été réalisés en ne laissant en contact à la solution A3 que la surface sollicitée, ceci pour des potentiels se situant dans la zone de passivité du matériau. Les valeurs de courants ainsi mesurés exprimés en intensité totale sont les mêmes que celles observées pour les essais sous frottement sans limitation de la surface en contact avec la solution A3. Ceci nous permet de dire en première approche que les courants mesurés sous frottement correspondent principalement aux phénomènes ayant lieu dans la piste d'usure (processus anodiques principalement).

Usure

L'usure affecte seulement le disque en 316L. Elle est la somme de l'usure d'origine mécanique et de celle d'origine électrochimique, c'est à dire liée aux processus de dissolution (repasivation de l'acier). L'usure est calculée à partir du profil de la piste de frottement obtenu après essai. La figure 4 montre la

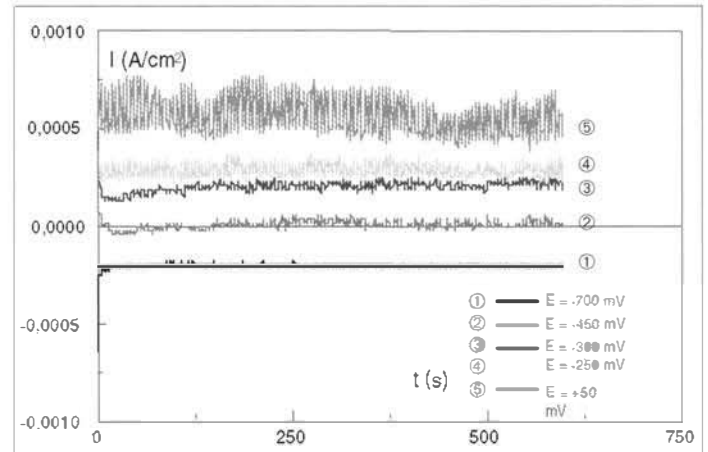


Fig. 5 - Évolution de la densité totale des courants pour chaque palier de potentiel ($F_n = 40$ N).

Fig. 5 - Total currents density evolution versus applied potential ($F_n = 40$ N).

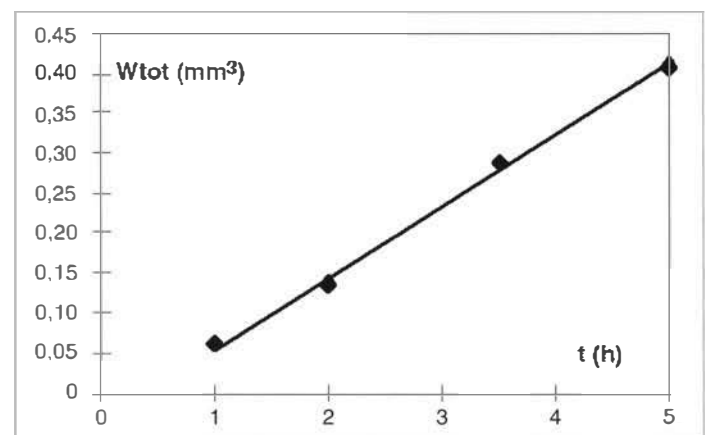


Fig. 6 - Évolution du volume d'usure en fonction du temps ($F_n = 40$ N).

Fig. 6 - Evolution of wear volume versus time ($F_n = 40$ N).

sensibilité du volume usé au potentiel appliqué. De même on observe une augmentation de l'usure avec la charge appliquée. Ainsi, l'usure dépend des conditions électrochimiques et du chargement mécanique.

Nous avons cherché à déterminer si l'usure observée après essai présentait un caractère plutôt mécanique (c'est-à-dire usure de type abrasive) ou plutôt électrochimique (usure par corrosion). Pour cela, des essais sous frottement ont été réalisés pour différentes valeurs de potentiel (fig. 5). À partir de la densité de courant mesurée et de la loi de Faraday, une évaluation de l'usure électrochimique peut être effectuée. Elle est présentée ultérieurement.

Il est important de connaître l'évolution du taux d'usure au cours du temps. Pour cela, il a été effectué des essais de différentes durées, qui ont permis d'obtenir l'évolution de l'usure au cours du temps.

Une fois passée la période transitoire, l'évolution du volume d'usure total mesuré est linéaire en fonction du temps comme en témoigne la figure 6. Nous avons de plus observé qu'après essai, très peu de débris d'usure sont visibles macroscopiquement et qu'aucun signe traduisant des dégradations sévères n'a été observé par microscopie optique ou à balayage (arrachement de matière, sillons de labourage, fissures...).

Ceci qualifie donc un régime d'usure "douce" dans cette période stationnaire et pour nos conditions expérimentales.

Interprétation des résultats

Parmi les différents points mis en évidence expérimentalement, nous nous concentrons principalement sur l'interprétation des phénomènes d'usure. Les essais effectués font apparaître, d'une part, un régime global d'usure douce sur l'ensemble de la plage de potentiel étudiée et, d'autre part, une forte sensibilité du volume d'usure au potentiel imposé. Nous interprétons ces deux phénomènes à la lumière d'une analyse mécanique du contact pour le premier point et d'une analyse électrochimique pour le second.

Régime global d'usure

La configuration choisie pour les essais, à savoir pion hémisphérique/disque, permet une estimation des pressions de contact en fonction des caractéristiques mécaniques des matériaux et de la charge appliquée. Cette pression de contact détermine le niveau de contraintes dans l'échantillon et permet notamment de savoir si ce niveau de contraintes est suffisant pour entraîner une plastification de l'échantillon à l'échelle de la mécanique des milieux continus.

Cette information est déterminante pour la prévision du régime global de dégradation. Un régime de fatigue mécanique à faible nombre de cycles est, en effet, associé à des déformations plastiques cycliques, alors qu'un état stabilisé élastique va être lié à de la fatigue à grand nombre de cycles [4, 5]. Dans le cas des problèmes de contact, le premier type de fatigue est généralement associé à la création de débris macroscopiques, alors que le second, générant une usure globale plus faible, peut générer à long terme une fissuration de l'ensemble de la structure.

Pour tenter de prédire le régime d'usure, il faut donc commencer par définir la pression de contact. L'hypothèse de base généralement considérée consiste à négliger tout effet des déformations plastiques sur la répartition de pression; la pression est donc dans ce cas hertzienne [3]. Les pressions hertziennes maximales p_0 au centre du contact s'élèvent à 578 et 661 MPa pour respectivement 40 et 60 N. Les niveaux de contraintes dans le disque peuvent être calculés analytiquement, et une approche simplifiée permet de déterminer la nature du contact en fonction du rapport de la pression hertzienne maximale à la limite élastique en cisaillement (p_0/k) et du coefficient de frottement μ [3,4].

La figure 7 présente ainsi les différents domaines de fonctionnement d'un contact hertzien. Dans notre cas, avec une limite élastique en cisaillement de l'ordre de 170 MPa et des coefficients de frottement supérieurs à 0,3 (fig. 1), le frottement devrait engendrer des déformations plastiques à chaque cycle et donc des débris (domaine "écoulement surfacique" sur la figure 7). Or, l'absence expérimentale de débris macroscopiques est en contradiction avec cette conclusion. De même, en utilisant un calcul numérique spécifique [5], qui permet d'avoir directement le régime stabilisé, on conclut à un régime accommodé, incohérent avec ce qui est observé expérimentalement.

De plus, une approche simple de ce type suppose un seul régime d'usure et ne permet donc pas de rendre compte de la période transitoire observée (fig. 2).

Afin d'améliorer la cohérence de l'interprétation mécanique, nous proposons la démarche suivante: durant la phase transitoire, les déformations plastiques cycliques vont modifier la surface initialement plane du disque pour se "conformer" avec le pion et

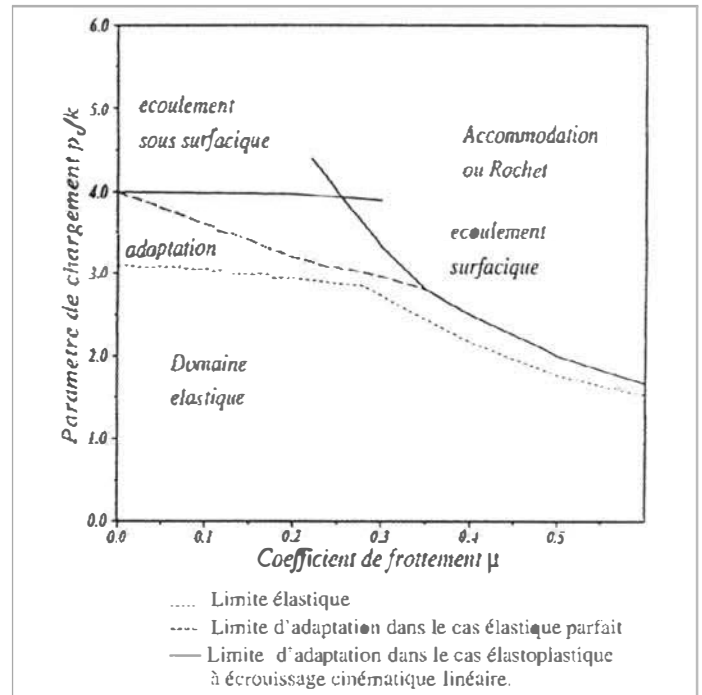


Fig. 7- Cartographie des différents régimes d'un contact hertzien en fonction du paramètre de charge p_0/k et du coefficient de frottement μ [4].

Fig. 7- Cartography of different regimes for an hertzian contact with charge p_0/k and friction coefficient μ [4].

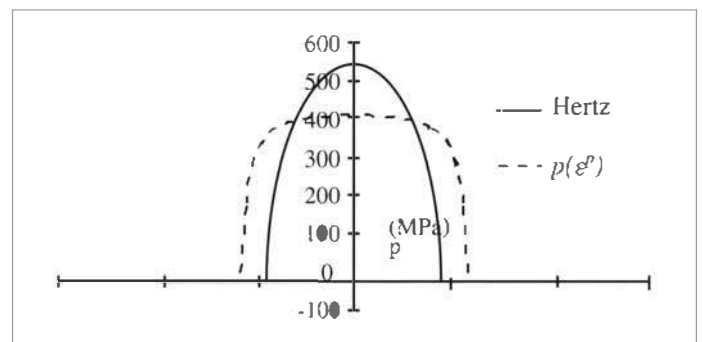


Fig. 8- Répartition de pression hertzienne et élasto-plastique $p(\epsilon^p)$ pour un contact à 40 N.

Fig. 8- Repartition of hertzian and elasto-plastic stresses $p(\epsilon^p)$ for a 40 N contact.

ainsi modifier la répartition de pression. C'est cette répartition modifiée, en fin de phase transitoire, que nous allons prendre en compte pour déterminer le régime stabilisé du disque.

La détermination de la nouvelle répartition ne peut plus se faire de façon simple et nécessite l'emploi d'outils de calcul numérique (éléments finis) [2]. Cette répartition de pression est approchée dans un premier temps en négligeant l'effet du frottement sur la pression normale. On considère donc une répartition de pression d'indentation élasto-plastique axisymétrique. La figure 8 compare la répartition de pression ainsi obtenue $p(\epsilon^p)$ avec la répartition hertzienne de référence. On observe une forte diminution de la pression maximale et une augmentation de la largeur de contact. Cette dernière a pu être corrélée à des mesures expérimentales lors d'essais, interrompue au niveau de la piste d'usure du disque d'acier inoxydable (fig. 9).

Cette nouvelle répartition de pression, représentative de la fin de la période transitoire, est ensuite intégrée à un programme spécifique d'éléments finis [5], permettant de calculer numéri-

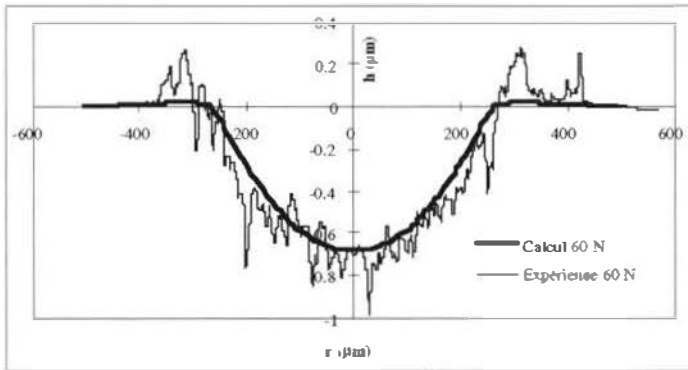


Fig. 9- Comparaison entre profil mesuré en fin de phase transitoire et profil calculé (sous 60 N).

Fig. 9- Comparison between experimental profile at end of transit phase and calculated profile (normal load: 60 N).

quement l'état stabilisé de la structure sous frottement continu. L'état final obtenu est élastique après plastification initiale. On observe donc un régime stationnaire adapté. Cet état est cohérent avec le régime d'usure douce observé. Ceci valide *a posteriori* la démarche mécanique employée.

Part de l'usure corrosive

Les courants positifs (donc principalement anodiques) mesurés sous frottement traduisent des phénomènes ayant lieu en majeure partie sur la piste d'usure. Nous avons cherché à relier ces courants à un volume d'usure par corrosion par une approche de type loi de Faraday [7]. Pour chaque palier de potentiel supérieur au potentiel de corrosion du matériau considéré, on peut en effet supposer en première approximation que le courant mesuré correspond à des phénomènes de dissolution anodique dans la piste.

Nous pouvons considérer que l'usure totale du système est la somme d'une composante purement abrasive et d'une autre purement corrosive et écrire la relation suivante :

$$W_{tot} = W_{abr}(Fn, E, t) + W_{cor}(Fn, E, t)$$

W_{tot} correspond au volume total d'usure (mesuré par profilométrie mécanique) et W_{cor} au volume d'usure par corrosion.

Pour des potentiels se situant dans le domaine anodique, W_{cor} peut donc être calculé à partir de la loi de Faraday :

$$W_{cor} = \frac{MI(E, t)}{\rho n F}$$

avec M masse atomique de l'espèce se dissolvant, $I(E, t)$ courant en ampère, ρ masse volumique du matériau, n valence de la réaction de dissolution considérée, F constante de Faraday.

La figure 10 présente les volumes d'usure ainsi obtenus en comparaison avec les volumes totaux mesurés pour deux types de chargements normaux. Dans le domaine de potentiel qui

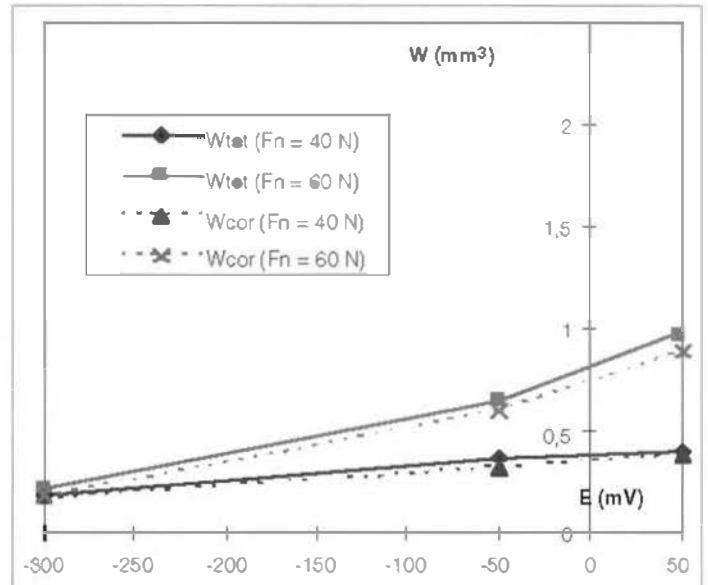


Fig. 10- Comparaison des volumes d'usure totaux et par corrosion pour différents potentiels et charges normales (durée des essais: 5 heures soit 600 m de glissement).

Fig. 10- Comparison between total wear volume and wear volume by corrosion for different potentials and normal charge (5 hours tests).

nous intéresse (-300 à +50 mV correspondant au domaine anodique du matériau, lorsque celui-ci est soumis à des sollicitations de frottement), l'usure par corrosion est prépondérante par rapport à la composante abrasive de l'usure totale, pour les conditions de chargement et vitesse employées lors des essais.

Bilan des résultats

Les résultats présentés dans cette étude ont permis d'aboutir à une meilleure compréhension des phénomènes de dégradation de surface de l'acier inoxydable 316L lorsque celui-ci est soumis à des sollicitations de frottement-corrosion dans une solution de type A3 (milieu marin artificiel).

Sous l'effet du frottement, le régime d'usure se décompose en deux périodes distinctes : une phase transitoire, en régime élasto-plastique, durant laquelle les déformations plastiques cycliques de la surface de l'Al 316L engendrent une nouvelle répartition de pression, suivie d'une phase stationnaire durant laquelle l'évolution des volumes d'usure est linéaire dans le temps sur la durée de nos essais. Le modèle de l'adaptation du contact basé sur un calcul d'indentation élasto-plastique axi-symétrique qui a été vérifié expérimentalement est cohérent avec le régime d'usure douce observé.

La part corrosive de l'usure s'est révélée prépondérante par rapport à la part purement abrasive.

Conclusion, perspectives

Les résultats de ce travail sont de deux ordres: d'une part des résultats propres au comportement en tribocorrosion de l'Al 316L (développés ci-dessus), d'autre part des résultats méthodologiques à portée plus générale. Ces derniers concernent les phénomènes caractéristiques du couplage usure/corrosion, le dépouillement et l'interprétation des résultats pour ce type de matériaux (passifs et ductiles). Notamment, il est important d'effectuer une analyse du contact pour séparer la

part de l'usure imputable à des phénomènes volumiques (usure par fatigue, fissuration...) de la part surfacique influencée par le frottement.

Les essais pion/disque sont classiquement employés en tribocorrosion. En utilisant un pion en alumine, ils permettent, en effet, une simplification des phénomènes d'un point de vue mécanique et électrochimique. Du fait de la neutralité électrochimique du pion, on ne considère que les réactions électrochi-

miques à la surface du disque. De plus, l'usure abrasive se limite à l'usure subie par le matériau de la piste car les propriétés mécaniques du pion sont très supérieures à celles du disque. Enfin, le contact de type pion/disque est relativement facile à mettre en œuvre et permet alors l'élaboration de méthodologie systématique d'étude. Ainsi, cette configuration, utilisée lors d'essais interlaboratoires [9], a permis de comparer différents montages. Une bonne corrélation des résultats des différents laboratoires en ce qui concerne les grandeurs mécaniques et électrochimiques est observée. En revanche, en ce qui concerne l'usure, la comparaison semble délicate.

Cependant, sur les structures réelles, la configuration de contact, la neutralité électrochimique des matériaux, l'usure relative des deux antagonistes ne sont pas celles d'essais de type pion/disque avec pion en alumine. Pour rendre compte de ces paramètres intervenant fortement sur le comportement en tribocorrosion, il convient d'étudier d'autres types d'essais

(différents matériaux, différentes configurations de contact...), Le type de contact (pion/disque, plan/plan...) intervient, en effet, sur la répartition des pressions de contact (et donc sur l'usure), sur le frottement (particules pouvant rester dans le contact pour des essais plan/plan), sur les mécanismes de dissolution/repassivation dans le cas de métaux passivables. De même, deux matériaux électrochimiquement actifs peuvent entraîner des couplages galvaniques et donc une modification des conditions électrochimiques du contact et, par conséquent, une modification de l'usure.

Ainsi, dans le cadre d'études plus appliquées (contact plan/plan de type anneau/disque), il sera sans doute important de considérer des essais plus complexes : contact plan/plan, matériaux choisis en fonction de l'application, potentiel imposé... L'interprétation des essais et leur mise en œuvre seront, certes, plus délicates, mais les essais reproduisant des phénomènes plus proches de la réalité seront plus riches en information. □

RÉFÉRENCES

- [1] G. LEDERER, P. PONTIAUX, N. CELATI, J. VIAL, C. BOHER, *Matériaux et Techniques*, n° hors série, Juillet, 25-27 (1997).
- [2] G. LEDERER, "Modélisation tribomécanique du frottement en milieu agressif", Thèse, Ecole Polytechnique, Palaiseau (1998).
- [3] K.-L. JOHNSON, *Contact Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge (1985).
- [4] K.-L. JOHNSON, *Wear*, **190**, 162-170 (1995).
- [5] K. VAN DANG, M.-H. MAITOURNAM, *J. Mech. Phys. Solids*, **41**, 1691-1710 (1993).
- [6] K. KIM, K.-C. LUDEMA, *J. of Tribology*, **57**, 617-621 (1995).
- [7] H.-H. UHLIG, *Journal of Applied Mech.*, **21**, 401 (1954).
- [8] S. MISCHLER, S. DEBAUD, E.-A. ROSSET, D. LANDOLT, "Effect of corrosion on the wear behavior in Aqueous solutions", Proc. 22th Leeds-Lyon Symp. on Tribology, Lyon, France (1992).
- [9] S. MISCHLER, Étude interlaboratoire sur la tribocorrosion de l'acier 316 L, *Bulletin du Cercle d'Etudes des Métaux*, n°19, mai 1999 et *Matériaux & Techniques*, n° hors série décembre 1999 (présent numéro), p. 39.