

وزارة التعليم العالي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE - المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : *Metallurgie*

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

*La dégradabilité de
quelques
alliages monétaires*

Proposé par :

B.C.A

Etudié par :

M^r N. HABASH

Dirigé par :

M^r F. HELLAL

PROMOTION :

Juin 1990

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



وَأَنْزَلْنَا الْحَدِيدَ فِيهِ بَأْسٌ

شَدِيدٌ وَمَنَافِعُ لِلنَّاسِ

صَدَقَ اللَّهُ الْعَظِيمُ

PLAN

INTRODUCTION	1
PARTIE THEORIQUE	2
I/ GENERALITE	2
1/ <i>Les pièces monétaires</i>	2
2/ <i>Fabrication des monnaies</i>	2
3/ <i>Outillage de frappe</i>	4
II/ THEORIE DE LA CORROSION	5
1/ <i>Définition de la corrosion</i>	5
2/ <i>Les facteurs de corrosion</i>	5
3/ <i>Classification des milieux corrosifs naturels</i>	7
4/ <i>Mécanismes de corrosion</i>	8
5/ <i>Morphologie de la corrosion</i>	14
III/ THEORIE DE L'USURE	17
1/ <i>Introduction</i>	17
2/ <i>Les facteurs de l'usure</i>	17
3/ <i>Les effets observables</i>	18
4/ <i>Différents type d'usure</i>	19
5/ <i>L'usure par abrasion</i>	22
PARTIE EXPERIMENTALE	26
IV/ MATERIAUX UTILISES	26
1/ <i>Types d'alliages</i>	26
2/ <i>Compositions chimiques</i>	27
3/ <i>Caractéristiques</i>	27
4/ <i>Etude métallographique</i>	27

VI/ TECHNIQUES EXPERIMENTALES	29
1/ Techniques de l'usure	29
2/ Technique de pliage simple	31
3/ Technique de l'essai au brouillard salin	32
4/ Essais de corrosion dans des solutions stagnantes	33
VII/ RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS	35
1/ Essais d'usure	36
2/ Essais de pliage	37
3/ Essais au brouillard salin	38
4/ Essais d'immersion	40
VIII/ CONCLUSION	50
ANNEXES	52
BIBLIOGRAPHIE	56

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail

- A mes très chers parents
- A mon frère et mes soeurs
- A mon ami A. EL KHATIB
- A tous mes amis.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier vivement mon promoteur Mr. F. HELLAL, pour l'aide précieuse qu'il m'a apportée tout au long de la réalisation de ce projet de fin d'études.

Je remercie également tous les professeurs du Département Métallurgie qui ont contribué à ma formation.

Je remercie le personnel du Département Génie Chimique et du Département Génie Mécanique.

Je remercie le Personnel du Laboratoire de la C.V.I. ainsi que le Personnel de la B.C.A. et en particulier Mr MOURAD du Département Mines.

Je remercie enfin, tous ceux qui m'ont aidé dans la réalisation de ce mémoire.

INTRODUCTION

Les pièces monétaires sont utilisées abondamment dans notre vie quotidienne, de ce fait, elles sont soumises à divers facteurs extérieurs qui sont souvent agressifs, notamment l'humidité, les sels, la poussière etc...

Les matériaux constituant ces pièces doivent faire l'objet de recherche portant sur le comportement de ces matériaux dans ces milieux corrosifs dans le but de connaître les propriétés physico-chimiques et mécaniques.

Dans le cadre de notre travail, nous nous proposons de faire une étude comparative de trois types d'alliages monétaires utilisés dans différents milieux. Certaines caractéristiques telles que la résistance à l'usure et à la corrosion, la durabilité et la morphologie externe ont été ainsi étudiées.

PARTIE THEORIQUE

I/ GENERALITES

1/ Les pièces monétaires

Les qualités que l'on exige des pièces de monnaie doivent déjà être présentes dans les pièces brutes prêtes pour la frappe. Les tolérances très étroites que l'on impose à la composition chimique des métaux précieux doivent également être appliquées aux pièces brutes pour garantir une protection contre les contrefaçons. Il est également exigé un écart minimum par rapport au poids légal de la pièce, car seul un volume uniforme des pièces brutes permet un fonctionnement satisfaisant des presse automatiques qui frappent les monnaies. La production industrielle des métaux non précieux doit avoir lieu exclusivement selon des procédés appropriés. Les écarts de poids des pièces découpées dépendent essentiellement de la dispersion de l'épaisseur du feuillard utilisé.

2/ Fabrication des monnaies (1,2)

La fabrication des monnaies comprend les opérations suivantes :

* Fonderie :

Dans des fours de types très divers, les matières premières sont amenées à la fusion puis coulées en lames ou lingots dans les lingotières.

* Laminage :

Par passages successifs entre les cylindres des laminoirs, les lames sont amenées à l'épaisseur requise pour que l'opération de découpage donne les flans de poids corrects. Les opérations de laminage sont effectuées suivant

les cas, à chaud puis à froid, ou entièrement à froid. Elles sont interrompues pour recuire le métal afin de détruire l'érouissage.

Pour le laminage final des feuilles dans lesquelles seront découpées les pièces, cela signifie qu'il faut non seulement maintenir une dispersion faible mais aussi exercer constamment une action corrective pour atteindre la valeur nominale.

* Découpage :

Les bandes ou lames sont découpées à l'aide de presses équipées d'outillages classiques composés de poinçons et de matrices ou lunettes. Pour faciliter l'écoulement de la matière sous la pression bilatérale exercée par les deux poinçons.

* Cordonnages :

On procède sur les pièces brutes à la sortie de la presse à une opération de repoussage du bord qui provoque la formation d'un cordonnage, le diamètre et le profil du cordonnage sont adaptés exactement aux outils de frappe qui interviendront ultérieurement. Cette opération qui s'effectue par roulage des flans entre deux outils rectilignes et parallèles, dont l'un a un mouvement rectiligne et alternatif, ou entre un tambour tournant et un coussinet fixe, a pour but de refouler le métal sur le pourtour pour favoriser à la frappe la formation du listel

* Recuit de brillantage:

On fait subir aux pièces un traitement de recuit destiné à leur conférer une dureté uniformément faible sans formation de grains durs, et à leur donner un aspect superficiel satisfaisant. Même après un très bon recuit les flans ne conviennent toujours pas pour la frappe en masse. Ils doivent encore être soumis à un traitement de surface que l'on peut diviser en quatre étapes : nettoyage par lavage (éventuellement décapage), polissage humide avec application de produits lubrifiant et de conservation, séchage et

polissage à sec.

* Frappe :

Après un dernier tri pour éliminer ceux qui sont défectueux, les flans passent à la frappe effectuée sur des presses monétaires, d'où les pièces sortent finies, tranche comprise.

3) Outillage de frappe (1)

L'outillage se compose de deux coins et d'une virole. Les coins en acier trempé présentent en creux ou avers, les reliefs que doivent présenter la face et le revers de la pièce. La virole est un instrument de forme annulaire en acier trempé alésé au diamètre de la pièce à obtenir et dont l'alésage est lisse ou cannelé suivant que la tranche de la pièce doit être lisse ou cannelée.

Les coins sont décolletés de façon à s'engager dans la virole de telle sorte que le flan placé dans la virole entre les deux coins, subit un véritable moulage à l'état solide qui le façonne entièrement, tranche comprise.

Mais les pièces, finies, prêtes pour l'utilisation subissent des transformations au cours du temps ; ces transformations sont dues à deux phénomènes essentiels : la corrosion et l'usure.

II/ THEORIE DE LA CORROSION

1) Définition de la corrosion

La corrosion est l'attaque destructrice d'un métal sous l'action du milieu environnant ; elle provoque la détérioration continue et diminue les caractéristiques physique et mécanique des matériaux. Si on entend par oxydation tous les phénomènes chimiques qui consistent à enlever à la substance oxydée un ou plusieurs électrons (e^-), on peut considérer les processus de corrosion comme des réactions de corrosion des métaux.

2) Les facteurs de corrosion (3,5,6)

L'hétérogénéité à la surface du métal est à l'origine de petits convertisseurs d'énergie ou piles, son origine est due au :

a) Milieu

.....

-La concentration en oxygène qui provoque la corrosion par aération différentielle et fournit les électrons nécessaires aux réactions cathodiques.

- La température et la pression qui ont une nette influence sur la concentration en oxygène.

- Les impurités : leur nature et leur concentration.

- L'agitation.

- Le pH, la présence de complexe.

b) Métal ou alliage

.....

* Composition et état structural, que le matériau présente une ou plusieurs phases et que les tensions électrochimique de celles-ci présentent entre elles des écarts importants, les phénomènes de corrosion sont susceptibles de prendre naissance.

* Entre métal ou alliage et impurtés, ou entre des phases de compositions différentes, des zones anodiques et cathodique apparaissent et rendent le matériau sensible à l'attaque ou à l'agressivité du milieu. Dans le cas d'une impurte ou d'une hétérogénéité dans la composition d'un matériau, deux possibilité sont à envisager :

- L'impurte est moins noble alors ilya corrosion à son niveau.

- L'impurte est plus noble alors il y a corrosion du matériau autour d'elle.

c) Opérations métallurgiques

.....

* système d'élaboration :qui influe sur la répartition des éléments.

* Traitements thermiques : s'ils ne sont pas homogènes, on obtient alors une hétérogénéité de la structure.

* Opérations mécaniques : les déformations du réseau entraînent un écrouissage ; et les zones ainsi écrouies sont anodiques par rapport au autres zones, et donc sensible à la corrosion.

d) Etat de surface

.....

Suivant sa rugosité et ses caractéristiques physico-chimiques, une surface est plus ou moins réactive .La rugosité est importante car les pointes sont très actives, de plus une corrosion par aération différentielle peut apparaitre au niveau d'une simple rayure.

Les caractéristiques physico-chimiques conditionnent les possibilités d'adsorption d'une surface vis à vis de certaines substances du milieu :la présence de produits de

corrosion, des poussières, des graisses, etc.. influe sur le degré de corrosion.

3) Classification des milieux corrosifs naturels (10)

a) Milieux atmosphériques naturels

.....

Les atmosphères se distinguent par la nature de leurs apports locaux qui formeront l'électrolyte constituant le film condensé .

* Atmosphères rurales

Ces atmosphères sont les plus pures, les apports au film condensé sont minimales et la corrosion est donc faible . Même l'action du chlore reste négligeable.

* Atmosphères marines

Les atmosphères marines sont spécifiquement celles où les pièces reçoivent des embruns ou des aérosols qui en sont issus. Le film condensé est très concentré en chlore ce qui provoque des corrosions particulièrement intenses, souvent avec foisonnement des produits de corrosion .

* Atmosphères urbaines -industrielles

Les atmosphères sont caractérisées par la pollution bien connue ; l'agent polluant le plus actif en corrosion est l'anhydride sulfureux SO_2 produit par les foyers industriels et, surtout, par les foyers domestiques. Les effets qui provoquent SO_2 sont :

- Acidification du film d'eau condensé (le pH peut descendre jusqu'à 3.5).

-Pouvoir d'oxydation accru : SO_2 agit comme une substance réductible dont la réduction cathodique se superpose à celle de l'oxygène et peut amener aussi une

accélération très notable de la vitesse de corrosion .

b) Milieux liquides

.....

* La sueur

La sueur est une solution qui renferme des sels et différents autres produits organiques, elle contient en moyenne, pour 1000g d'eau 10 g de matière solide dont 6g de sels minéraux (chlorures alcalins et traces de phosphate, etc) et 4g de matière organique (urée, acides gras, mercure, quinine, etc) .

Elle a une réaction alcaline, elle peut devenir acide par suite de la présence accrue des acides gras et son pH est de l'ordre 6 .

La production de la sueur est constante environ 40 g/l pour les humains . Sa sécrétion peut conduire à une vaporisation directe dans l'atmosphère ou à la formation d'un film liquide.

* Eau salée

L'eau salée utilisée est l'eau de mer dont les principaux constituants en proportion à peu près constante sont :

-Le chlorure de sodium	27.3 g/l
-Le chlorure de magnésium	3.4 g/l
-Le sulfate de magnésium	2 g/l
-Le sulfate de calcium	1.3 g/l
-Le chlorure de potassium	0.6 g/l
-Le carbonate de calcium	0.1 g/l

Le milieu marin est essentiellement alcalin , le pH de l'eau de mer varie entre 7.5 et 8.4 ; et la salinité est en moyenne de 3.5% .

5) Mécanismes de corrosion (3,5,6,7)

Selon les phénomènes à l'interface des métaux, les mécanismes peuvent être classés suivant que la corrosion est

chimique ou électrochimique.

A la première catégorie appartiennent tous les cas d'interaction chimique directe du métal et du milieu environnant, et la corrosion est soit une corrosion par les gaz, soit une corrosion par les liquides non électrolytique, caractérisé par l'adsorption des matériaux des éléments halogènes.

Pour la deuxième catégorie l'existence d'un courant électrique c'est à dire d'un déplacement d'électron d'une partie du métal à une autre qui accompagne la corrosion du métal. Ce courant qui circule dans le métal peut ne pas provenir de l'extérieur, il prend naissance au cours de la corrosion ; cette corrosion peut être une corrosion par des liquides électrolytiques (ou électrolyte), une corrosion atmosphérique humide ou une corrosion par le sol .

Par suit nous donnons seulement les mécanismes de la corrosion électrochimique:

a) Introduction
.....

Le phénomène résulte du fait que le matériau est immergé dans une solution électrolytique ou exposé à une atmosphère humide. Il est bien connu qu'un grand nombre de sels fondus (NaCl , NaNO_3 , etc ..) ainsi que les solutions d'électrolytes présentent également de bonne conductibilité électrique. Ce qui les distingue des matériaux est le fait que la conduction d'électricité présente des caractères nettement différents dans les deux cas. La conductibilité des matériaux est déterminée par l'existence d'électrons se déplaçant librement sous l'action de différences de potentiels appliquées au matériau et c'est ce déplacement d'électrons qui constitue le courant électrique. Les matériaux peuvent donc être définis comme des substances

présentant une grande conductibilité électronique. Dans les solutions électrolytiques le transport des charges est dû au mouvement des ions ; on les définira donc comme étant une grande conductibilité ionique.

b) Mécanismes de la corrosion uniforme (7)

.....

* Dissolution du métal

Dans la corrosion uniforme, on remarque qu'au début et à l'instant de l'immersion il y a dissolution du métal à une vitesse uniforme sur sa surface, mais en même temps il n'y a aucun gradient de concentration dans le milieu corrosif, la concentration du métal dissous augmente dans la couche corrodée et il y a établissement progressif d'un gradient et d'un flux de métal dans la couche limite, ce flux atteint la zone convective du liquide par diffusion puis la dispersion se fait par convection (fig. 1).

* Enrichissement superficiel de la phase liquide en métal soluble

Tant que la limite de solubilité du métal n'est pas atteinte, il existe un enrichissement de la solution en métal dissous, on obtient alors un état stationnaire qui correspond à un équilibre dynamique entre le flux de corrosion et celui de diffusion.

A l'échelle des durées d'exposition à la corrosion, on peut dire qu'un établissement d'un régime de corrosion et de diffusion stationnaire est pratiquement instantané sur un métal nu.

* Précipitation du produit de corrosion

La précipitation du produit de corrosion intervient au départ parce que le flux de diffusion du métal en phase liquide n'arrive pas à évacuer le flux du métal injecté par la corrosion même avec le gradient de concentration maximum. A l'état stationnaire, après une phase transitoire de

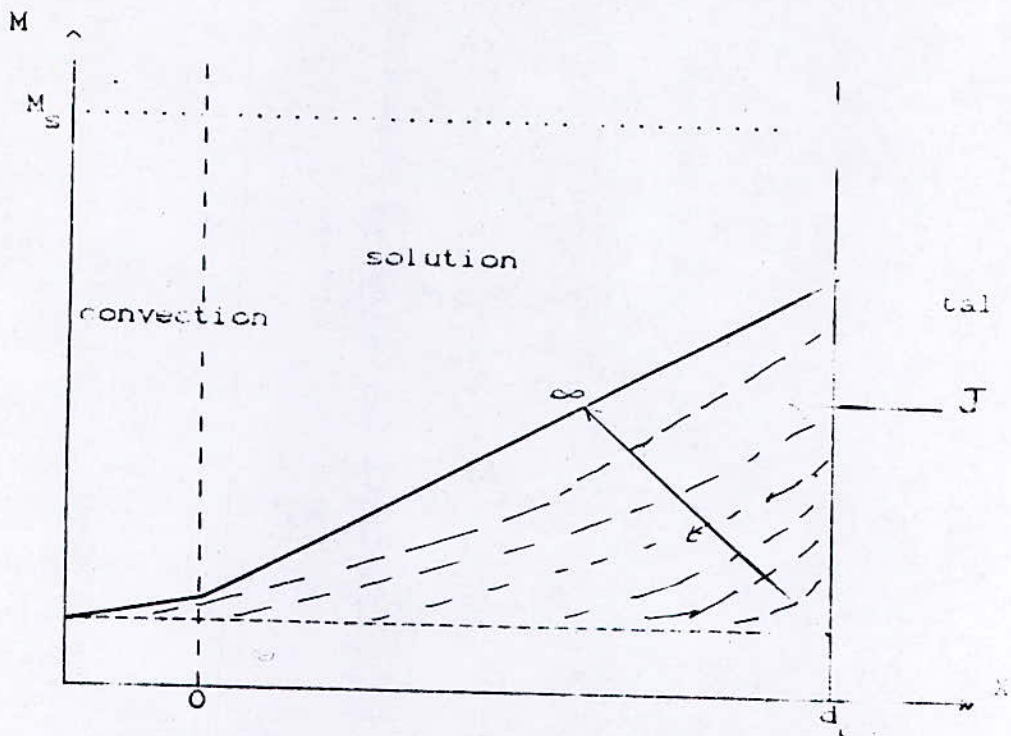


Fig.1 : Etablissement d'un gradient de concentration en ion métallique perpendiculairement à la face d'un métal nu qui se corrode

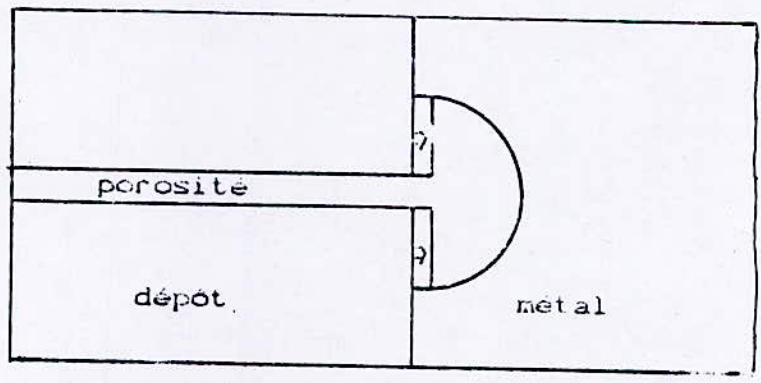


Fig.2 : Pénétration sur la surface envers du dépôt

précipitation ayant abouti à la formation d'un dépôt stable, on n'a plus de précipitation dans le système. Les flux des espèces réagissantes sont égaux mais les coefficients de diffusion sont différents, donc il doit exister des gradients de concentration sans flux. On suppose donc l'existence de forces motrices pour la diffusion classées suivant trois cas :

- Corrosion sous dépôt soluble "précipitation - redissolution"

En présence d'une saturation élevée des ions X^{-n} du milieu extérieur, la cinétique de corrosion va dépendre du degré de saturation du composé $M_n X_m$. Lorsque cette dernière saturation est faible, l'effet d'ensemencement privilégiant alors la formation du nouveau solide sur la face envers du dépôt (fig. 2). A l'opposé, sur la face extérieure du dépôt, la dissolution s'effectue en régime stationnaire à la même vitesse que la précipitation sur le métal. On peut en déduire que les cinétiques des deux réactions de précipitation et de dissolution sont des cinétiques rapides. Dans ce cas les porosités restent ouvertes. Corrosion et précipitation se poursuivent donc en permanence et avec des vitesses voisines. Et donc la quasi-totalité du métal corrodé transite ainsi par le dépôt.

- Corrosion sous dépôt insoluble cathionique

En régime intermittent comme en régime continu, la quantité cumulée du métal corrodé reste égale à la quantité d'ions H^+ atteignent le métal. La saturation, dans ce cas, du composé $M_n X_m$ est forte, la formation du solide sera directement sur le métal (fig. 3a). Lorsque la solution n'ayant plus accès au métal, il y a immédiatement blocage de la réaction de corrosion jusqu'à ce que l'élimination du métal par transport en phase liquide abaisse à nouveau sa teneur locale et entraîne la dissolution de la pellicule formée. Le transport en solution s'effectue en effet en

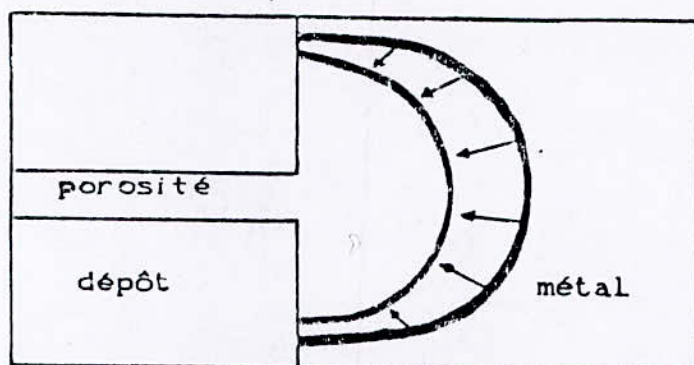


Fig. 3a: Blocage de la corrosion par précipitation de produits solides sur le métal

concentration en M

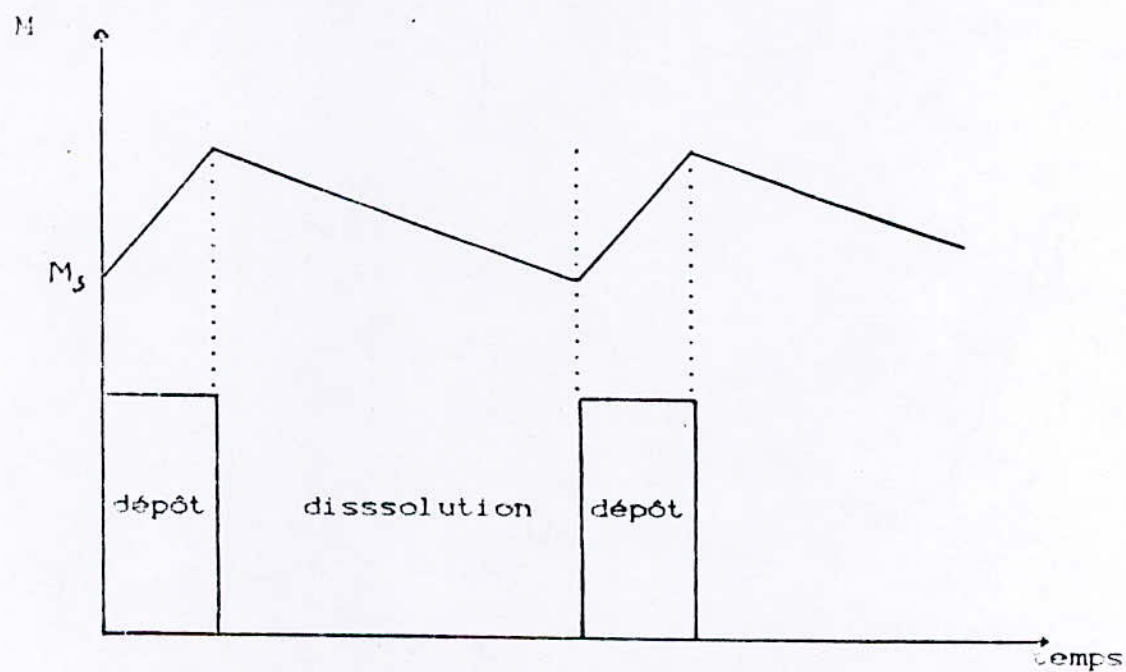


Fig. 3b: régime de corrosion intermittente

permanence, alors que la dissolution du métal n'intervient que durant la fraction du temps où le liquide a accès au métal, c'est-à-dire pendant que la teneur en métal remonte du seuil de sous saturation pour la dissolution au seuil de sursaturation pour la précipitation (fig. 3b). Il y a donc simplement une fluctuation temporelle des concentrations locales en M^{+m} et X^{-n} , et les mêmes ions X^{-n} font perpétuellement la navette entre le liquide et la pellicule solide sur le métal.

- Corrosion sous dépôt insoluble anionique

Dans ce cas la teneur extérieure en ions X^{-n} est faible, le transport de ces ions entre le milieu extérieur et le métal est très lent. Il y a alors épuisement de X^{-n} au contact du métal, et augmentation très élevée de la limite de solubilité en ions M^{+m} . L'évacuation du métal peut se faire par transport en phase liquide. On a donc un mécanisme avec formation directe du dépôt, avec ici contrôle anionique du régime stationnaire.

L'influence des facteurs tels que l'agitation, la corrosivité potentielle et la polarisation de diffusion sur la facilité de la formation d'un dépôt et sur la vitesse de corrosion sous dépôt pour les trois mécanismes, est donnée dans le tableau suivant :

Paramètre variable	La facilité de formation d'un dépôt	vitesse de corrosion sous dépôt		
		insoluble cathionique	insoluble anionique	soluble
Agitation ↗	↘	=		↗
corrosivité potentielle ↗	↗	↘	↗	=
polarisation de diffusion sur métal nu ↗	=	↗	↘	=

c) Mécanismes de la corrosion par piqûres (8)
.....

* Mécanisme d'adsorption

L'absorption des espèces agressives s'effectuerait en des sites énergétiquement préférentiels de la surface du film passif, entraînant la formation d'un oxyhalogène de vitesse de dissolution supérieure à celle de l'oxyde passivant. L'amincissement local du film passif augmente la vitesse de dissolution des éléments métalliques, du fait du champ électrique plus intense qui règne en ces points. Il en résulte la création d'une piqûre dans son étape initiale de croissance. L'apparition de cette piqûre a lieu après un certain temps d'incubation au bout duquel le film a disparu totalement du site (Fig. 4). Pour qu'il y ait croissance stable des piqûres, il faut que le potentiel de nucléation atteigne sa valeur critique. Ce potentiel peut être interprété comme étant le potentiel qui conduit à un taux de recroisement critique θ_{cr} . A ce potentiel, la croissance des piqûres n'étant pas amorcée.

* Mécanisme de pénétration

Un film passif peut être considéré comme un oxyde contenant une forte concentration de lacunes d'oxygène (grande porosité). La croissance des films serait due à la diffusion des lacunes d'oxygène de l'interface métal-film (m/f) à l'interface film-solution (f/s) et les lacunes métalliques migrent en sens inverse et disparaissent dans le réseau métallique. Cependant, si leur vitesse de création est supérieure à celle de leur disparition, il y a création de trou à l'interface m / f. Or la pénétration des ions chlorures dans le film, qui diminuent la concentration en lacunes d'oxygène, entrainerait une augmentation de la vitesse de création des lacunes métalliques. C'est le processus d'incubation des piqûres qui prend fin lorsque ces trous atteignent une certaine taille critique entraînant la rupture du film passif.

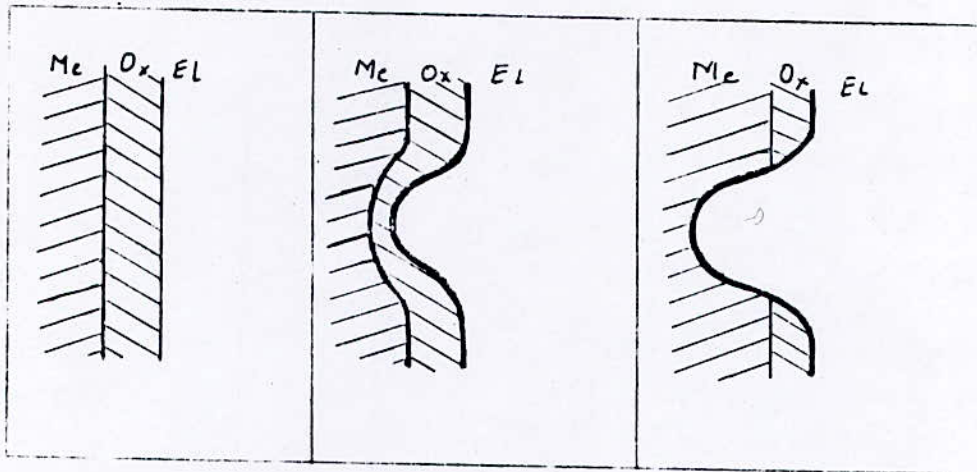


Fig. 4 : Mécanisme de piqûre par absorption

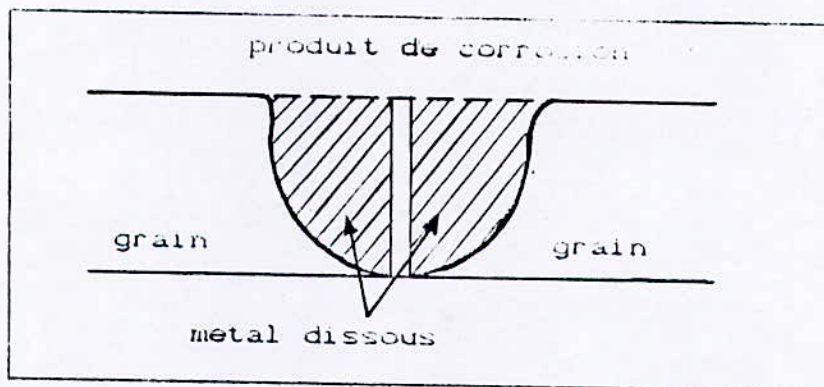


Fig5 : Mécanisme de corrosion intergranulaire

d) Mécanisme de la corrosion intergranulaire (8)

.....

La corrosion intergranulaire est toujours due à l'hétérogénéité de l'émergence du joint de grain sur la surface. L'arrangement de ses atomes est différent de celui de la matrice. Il résulte que le volume moléculaire est très grand et la liaison entre les atomes du métal est faible donc l'énergie d'activation est faible par contre la réactivité est très élevée.

Dans une solution des variations de densité de charge sur la surface induisent des contraintes électriques ; d'où des effets de tension superficielle.

La différence de structure et des propriétés qui existe entre les grains et leurs joints provoque la formation de zone anodique et cathodique provoquant ainsi la sensibilité du métal (fig. 5).

5) Morphologie de la corrosion (3,5,6)

Du point de vue pratique il est important de caractériser la corrosion non seulement quantitativement mais indiquer également la nature de l'attaque, c'est pourquoi les différents types de destruction provoqués par la corrosion peuvent être classés comme corrosions uniformes et corrosions localisées (voir fig.).

a) Corrosion uniforme :

Affecte l'ensemble de la surface du métal en contact d'un électrolyte.

b) Corrosion par exfoliation :

Dans ce cas le métal se détache par plaque.

c) Corrosion par piqûres :

Ce sont des attaques ponctuelles qui sont généralement liées à la création d'anodes peu étendues à côté d'une large cathode.

d) Corrosion intergranulaire :

Il s'agit d'une décohésion des grains de la structure métallique.

e) Corrosion sélective :

L'un des constituants de l'alliage est préférentiellement attaqué, ce qui conduit à une perte totale de la résistance mécanique sans perte apparente de matière.

f) Corrosion par fatigue :

Cette corrosion est provoquée par l'effet combiné de tensions mécaniques alternées et du milieu d'attaque. Elles sont dites aussi "corrosions fissurantes".

g) Corrosion sous tensions :

Provoquée par l'effet combiné de tensions mécaniques statiques à l'intérieur du métal et d'une attaque de milieu peu prononcé en général.

h) Corrosion galvanique :

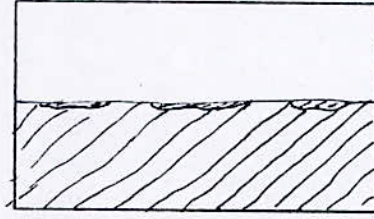
Ce produit lorsqu'il y a couplage électrique du métal attaqué avec un métal plus noble.

i) Corrosion - érosion :

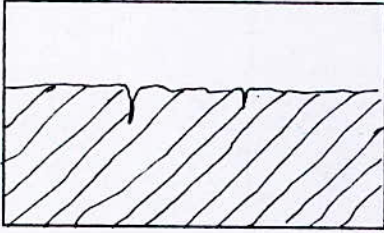
Effet combiné de l'érosion et de l'attaque chimique



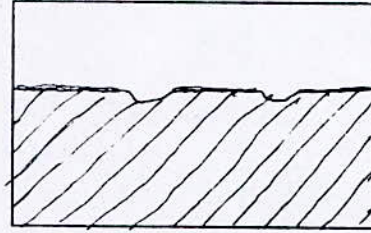
corrosion uniforme



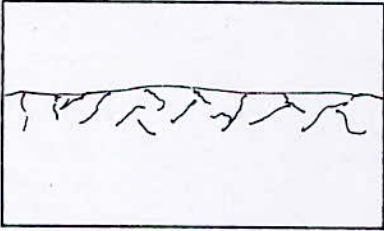
corrosion par plaque



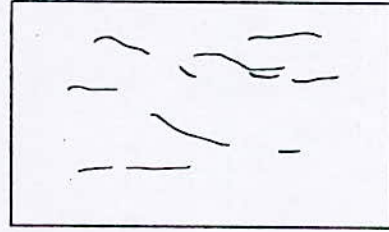
corrosion par piqûre



corrosion par crevace



corrosion inter-
granulaire



corrosion-érosion

III/ THEORIE DE L'USURE

1) Introduction (17)

L'usure, en général, est la détérioration d'une pièce par suite de l'usage, elle est une perte progressive de matière de la surface active d'un corps par suite d'un mouvement de frottement relatif d'un autre corps sur cette surface.

Elle peut être évalué de plusieurs manières :

- Quantité de matière perdue par unité de distance parcourue.
- Quantité de matière perdue par unité de temps.
- Quantité de matière perdue par tour.

L'étude sur l'usure fait intervenir un grand nombre de paramètres, de modes d'observations et de processus physiques qui sont classés dans trois domaines.

2) Les facteurs de l'usure (14,15,16,17)

les paramètres dont le choix définit les conditions initiales de l'expérimentation et de l'utilisation sont : mode de contact, état de surface microgéométrique, le milieu et la nature des matériaux.

a) La forme géométrique des pièces

.....

permet de distinguer les les différents contacts, contacts ponctuels, contacts linéaires et contacts superficiels, cela du point de vue théorique mais en réalité, du faite de la nature physique des différents procédés de fabrication, les pièces réelles présentent, par apport à leur forme idéale des défauts géométriques que l'on ne peut éliminer (fig. 6a).

b) Ambiance et milieu

.....

Par ce terme nous entendons la nature du milieu ainsi

Que les conditions de pression et de température qui engendrent les pics dans la région de contact.

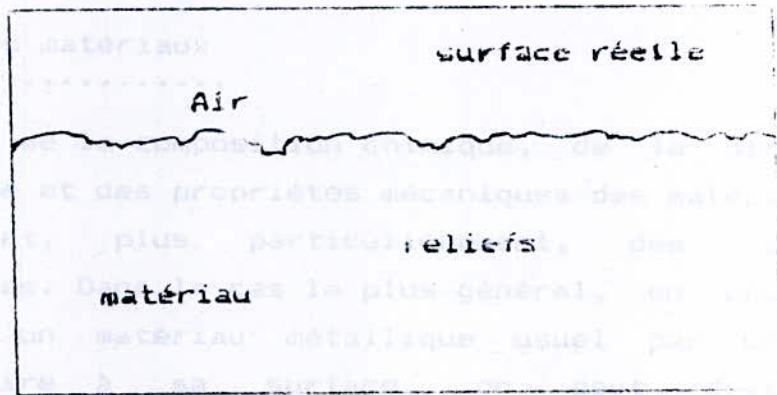


Fig. 6a: Surface microscopique du matériau

Couches:

I: Film contaminant

II: Gaz absorbé,
épaisseur de la couche
3 nm - 0,3 nm

III: Film d'oxyde (10nm)

IV: Métal écroui (1000nm)

V: Métal en cours d'écrouis-
sage.

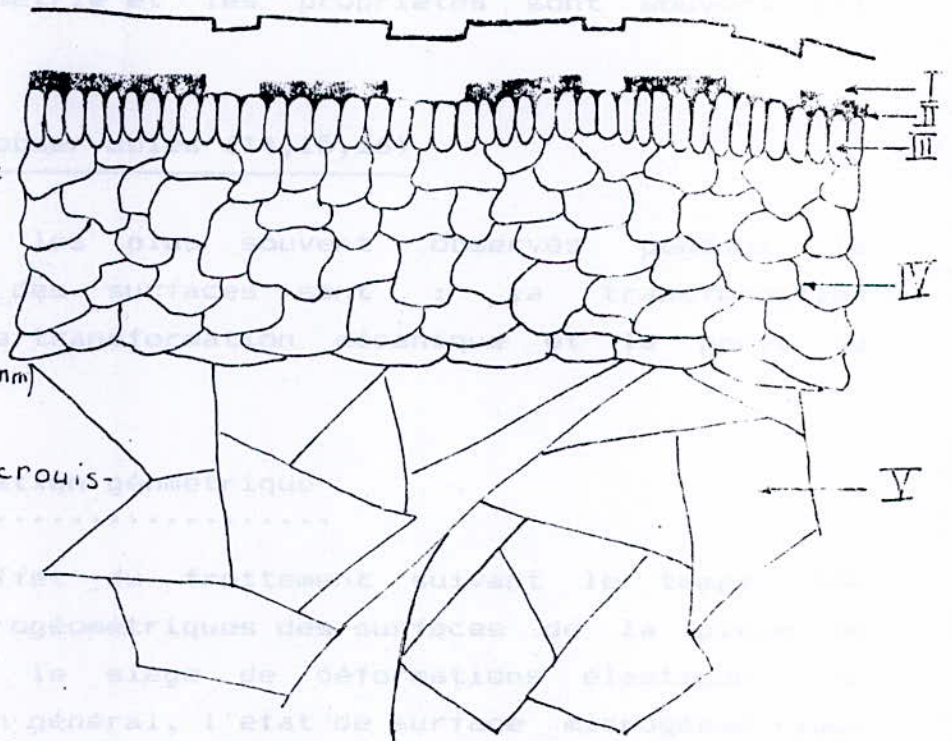


Fig 6b: Coupe schématique d'un matériau métallique usuel

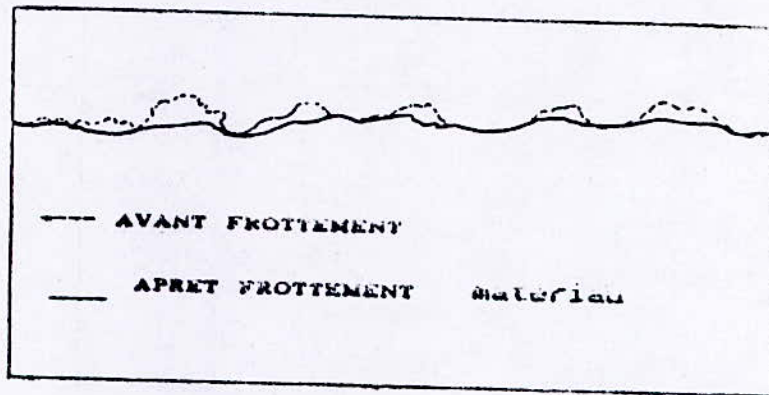


Fig.7 : Changement de l'état de surface du matériau de l'état initial à l'état final

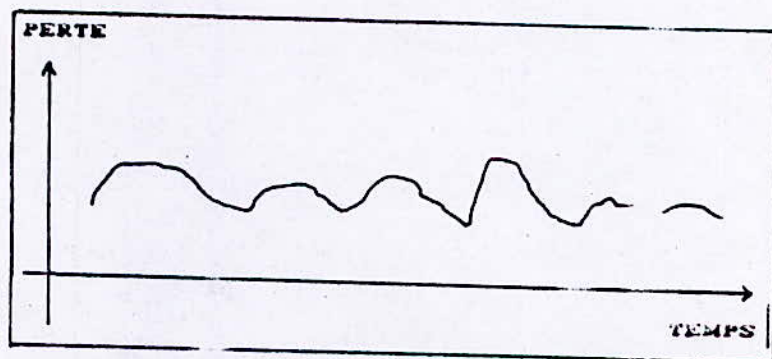


Fig.8 : Perte de masse suivant le temps

température peuvent être à l'origine d'apparition de nouvelles phases qui sont en général des oxydes. On obtient comme résultat un changement de composition chimique des couches superficielles, des destructions des grains et des écrouissages.

c) Variation de masse
.....

La variation de masse dans ce cas c'est la perte en poids des pièces provoquée par le frottement et la corrosion superficiels ; cette perte est relative selon le temps (fig. 8).

4) Les différents types d'usure

L'étude de l'usure conduit à classer les détériorations selon l'aspect sous lequel elles se présentent. Pour chacune, on étudie les causes, l'évolution et les conséquences. Les types fondamentaux de l'usure sont classés comme suit :

a) Usure adhésive
.....

La première manifestation de l'usure adhésive est le transfert de la matière des pièces frottantes sur la surface du corps antagoniste. Les surfaces des corps réels comportent des aspérités dont les dimensions sont très grandes si on les compare à la maille atomique. Ces aspérités existent quelque soit le soin apporté à la préparation des surfaces. Le contact des deux corps s'établit par l'intermédiaire de ces aspérités et l'aire réelle de contact n'est donc qu'une faible partie de l'aire apparente (fig. 9).

Le rapprochement des atomes de chacun des corps métalliques peut donner des jonctions métalliques.

L'observation et l'évolution de la perte de masse au

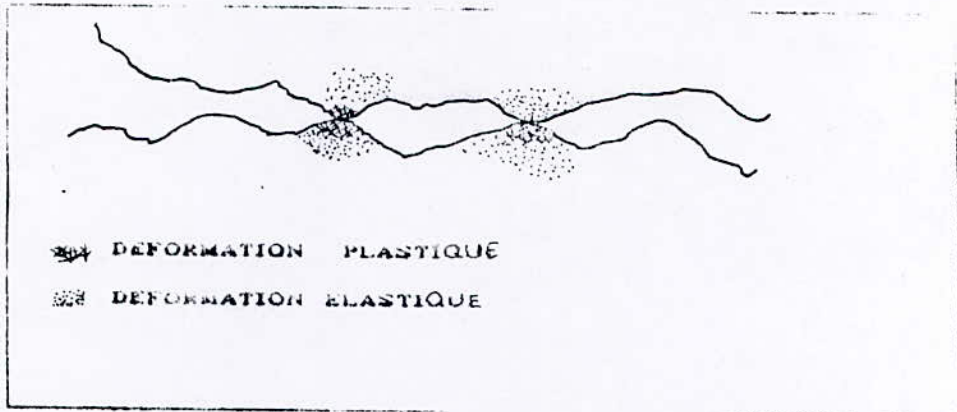
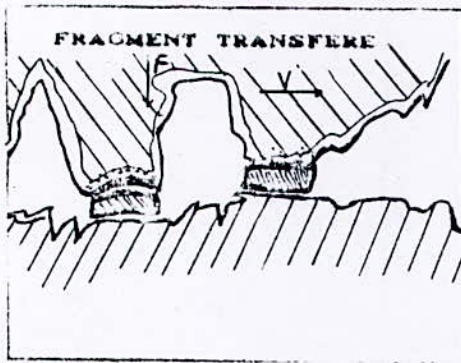
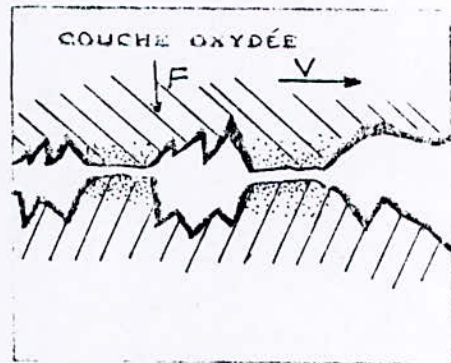


Fig.9 : Contact de deux corps métalliques



USURE SEVERE



USURE MODEREE

Fig.10 : Usure adhésive

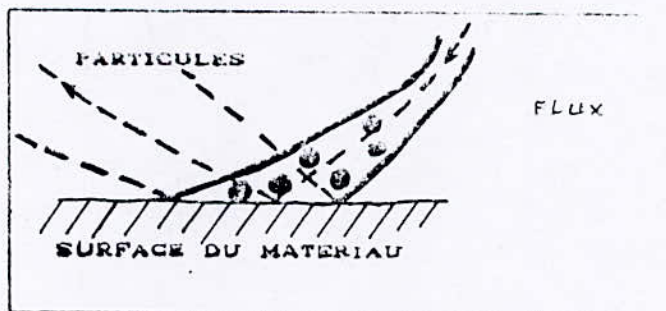


Fig.11 : Usure par érosion

cours du temps ne peuvent être complètement interprétés à l'aide de ces lois.

D'autres phénomènes peuvent intervenir (oxydation, absorption, lubrification) ainsi que les différents facteurs de l'usure (fig. 10).

b) Usure abrasive

.....

L'usure abrasive est définie comme étant l'usure par déplacement de matière produite par des particules dures ou des protubérances dures.

Les particules dures peuvent se trouver entre les deux surfaces en mouvement relatif ou être encastrées dans l'une des surfaces.

L'usure abrasive se manifeste par des polissages, des griffures, des arrachements de copeaux. Les conditions principales d'obtention de l'abrasion sont les suivantes :

- les particules abrasives doivent être plus dures que la surface abrasée,
- la particule doit avoir des coins ou des angles aigus.

En présence de la vapeur (milieu humide) les débris d'usure seront classés ce qui favorise la conservation de l'efficacité des particules abrasives. Pour les métaux abrasés, la résistance à l'usure est une fonction linéaire croissante de la dureté en fixant les autres paramètres (milieu, température, temps).

c) Usure érosive

.....

L'usure érosive c'est la perte de matière d'une surface solide, dure au contact avec un fluide en mouvement relatif contenant des particules solides (fig. 11).

L'usure érosive se manifeste sur des matériaux fragiles par des éclats et des fissures et sur matériaux ductils par des piqûres, des rayures et des copeaux. De plus la dureté des matériaux influe énormément sur la perte de masse par érosion ; lorsque la dureté augmente, la perte de masse diminue.

d) Usure par fatigue

.....

En appliquant une charge assez importante sur une pièce, elle peut détériorer les surfaces. On peut observer des déformations plastiques sur les matériaux ductils et des cassures sur les matériaux fragiles. Dans certains cas on peut supposer que l'usure pendant le glissement comme la conséquence d'un phénomène de fatigue. Sans oublier l'usure par fatigue dans le cas du roulement dont l'effet des contraintes se fait sentir par une provocation de microfissures et un changement de structure métallurgique. On obtient un détachement des particules par fatigue mécanique superficielle produite par accumulation des contraintes (fig. 12).

e) Usure corrosive

.....

L'usure corrosive est due à une réaction des surfaces de frottement avec un milieu corrosif qui crée un produit de réaction évacué ultérieurement par le frottement. Dans certains cas le produit de réaction peut avoir une meilleure résistance mécanique que le substrat et favoriser la tenue à l'usure. La couche obtenue peut passiver le matériau et stopper au moins provisoirement son attaque.

L'usure corrosive peut être définie aussi comme étant un processus d'usure dominé par une réaction chimique ou électrochimique avec le milieu environnant.

Cette forme d'usure peut devenir très prononcée surtout

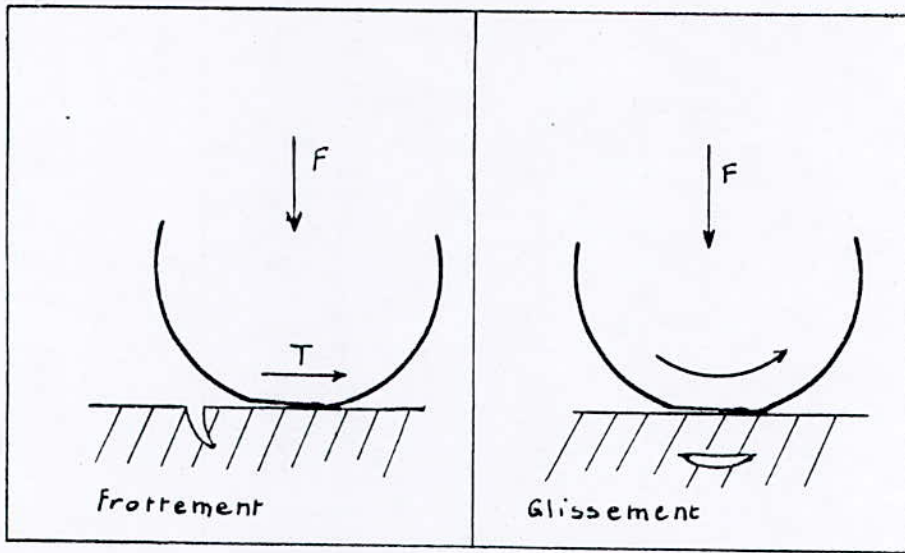


Fig. 12 : Amorçage de la fissure

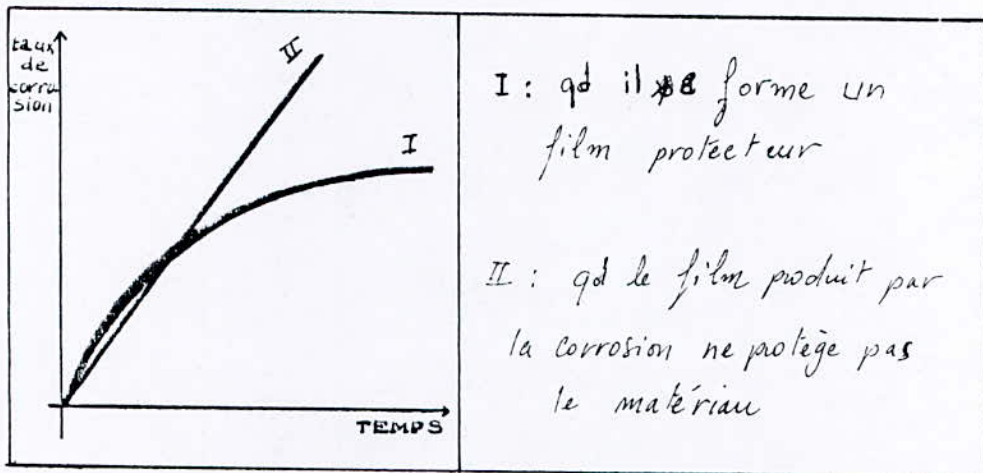
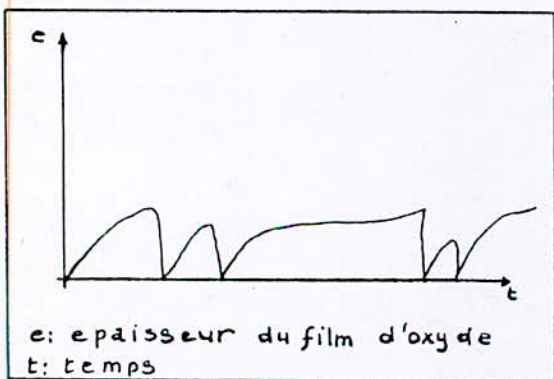
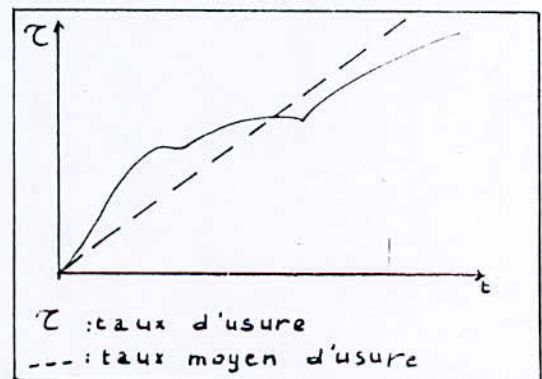


Fig. 13 : Quantité de matière produite par corrosion.



(a)



(b)

Fig. 14 : Epaisseur du film du matériau fragile corrodé et taux d'usure

aux températures élevées ou dans des atmosphères humides.

Dans certain cas il y a d'abord une réaction chimique suivie d'un enlèvement des produits de corrosion par action mécanique.

Le processus comprend deux stades distincts :

* il se produit une corrosion des surfaces métalliques selon les processus classique de corrosion (fig. 13).

* le film de matériau corrodé est enlevé lors du mouvement relatif des pièces en contact, le matériau sous-jacent est mis à nu et le processus recommence.

Selon la nature du film superficiel on peut schématiquement prévoir deux types de destruction :

* Si le film superficiel est fragile, c'est le cas de nombreux oxydes, il est enlevé par plaques dès que son épaisseur dépasse une certaine valeur critique (fig. 14a). Le taux d'usure est important (fig. 14b).

* Si le film superficiel est ductile, c'est le cas de certains sulfures, le cisaillement se produira dans l'épaisseur du film (fig. 15a) et le taux d'usure sera faible (fig. 15b).

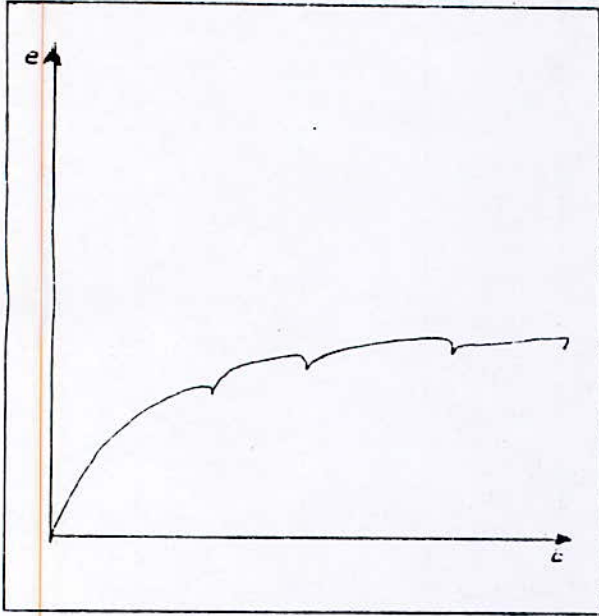
5) L'usure par abrasion (14,15,16)

a) Introduction

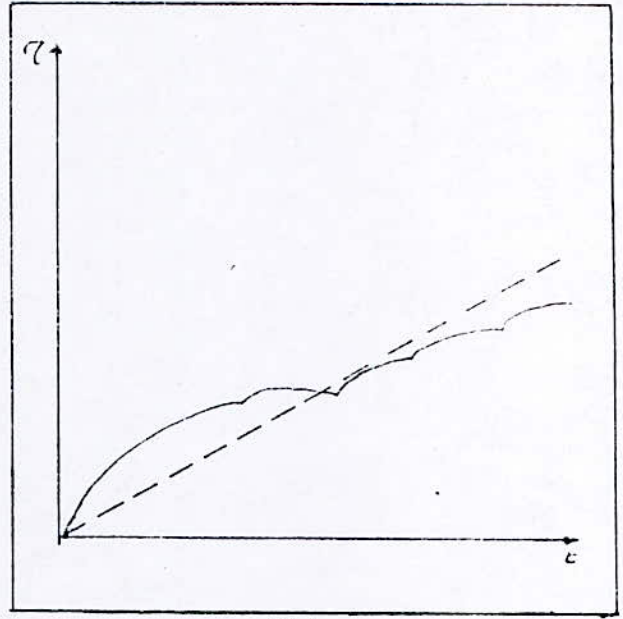
.....

L'étude de l'usure se portera sur l'usure par abrasion. La résistance à l'abrasion n'est pas une propriété intrinsèque du matériau comme par exemple son module d'élasticité ou sa conductibilité thermique, car elle dépend des sollicitation et des caractéristiques du milieu.

L'abrasion de la surface tendre par les aspérités de la



(a)



(b)

Fig.15 : Epaisseur du film de matériau ductile corrodé et taux d'usure

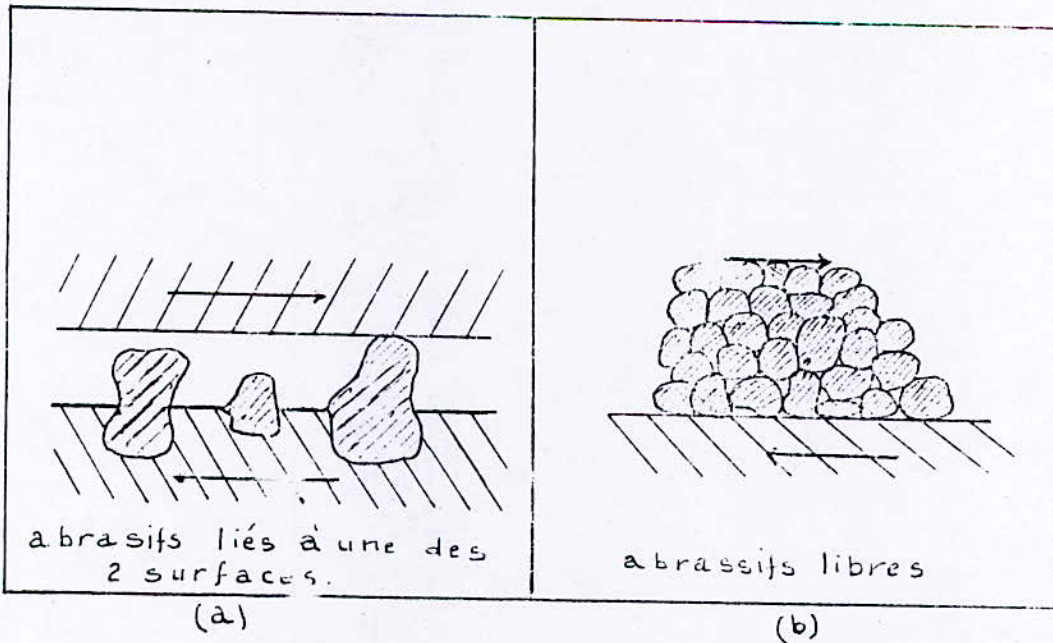


Fig.16 : Abrasion à 2 corps

surface la plus dure appelée abrasion à deux corps (fig. 16 a,b)

L'abrasion provoquée par des particules dures roulant entre les deux surfaces ou enchassées dans la plus tendre, on parle alors d'abrasion à trois corps (fig. 17 a,b).

Ces diverses configurations influent sur l'usure dans la mesure où l'abrasif peut glisser ou rouler sur la surface antagoniste.

b) Mécanisme de l'abrasion

.....

La dégradation des matériaux par abrasion consiste, en effet, principalement en deux effets généralement combinés de déformation et de coupe. Au delà de la capacité de déformation, une perte de matière est produite par fracture et écaillage. Lorsqu'un grain abrasif est en contact avec une surface ductile on observe :

. d'une part la formation plastique d'une empreinte ou d'un sillon qui n'entraîne pas nécessairement un enlèvement de matière ;

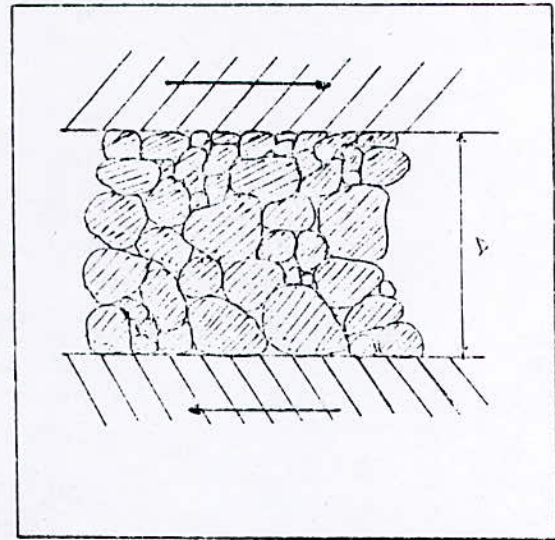
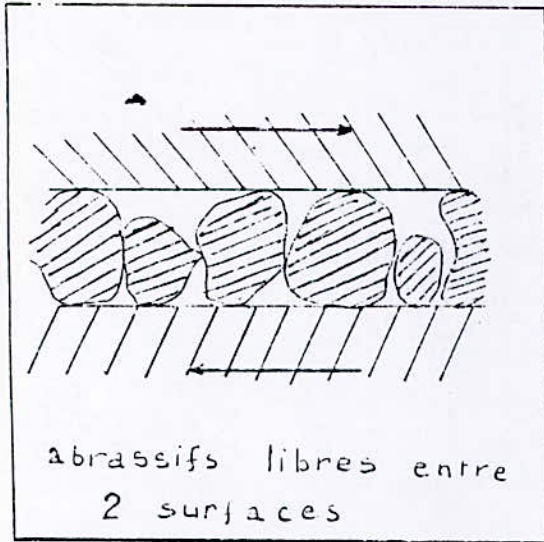
. d'autre part l'enlèvement par coupe de particules de matière sous forme de micro-copeaux primaires.

Pour les matériaux ductiles, on observe une proportion faible de matière enlevée par effet de coupe, soit une dégradation prédominante par déformation et pour les matériaux durs, une proportion importante de matière enlevée par effet de coupe, soit une dégradation prédominante par effet de coupe (fig. 18).

c) Conséquences de l'abrasion

.....

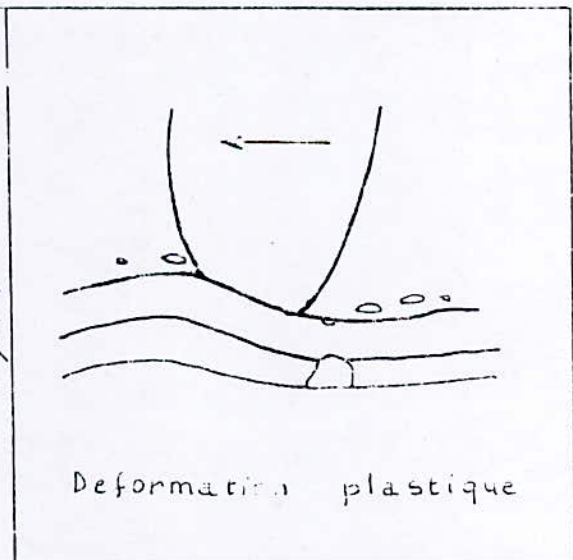
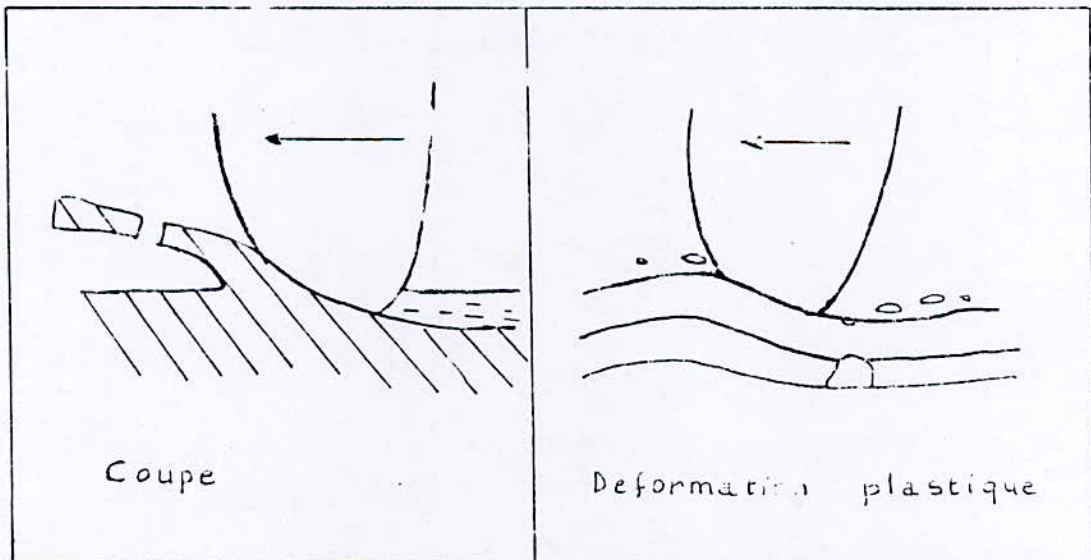
Les surfaces soumises à l'abrasion présentent des sillons dans le sens du glissement et de profondeur



(a)

(b)

Fig.17 : Abrasion à 3 corps



(a)

(b)

Fig.18 : Usure abrasif

variable.

Si les particules sont de faibles dimensions, elles ont un travail semblable à celui d'un alliage de râpe, et la surface endommagée conserve un certain fini, on ne distingue pas la marque de chaque particule prise séparément.

d) Facteurs influants sur l'usure

.....

L'essai d'usure est influencé par plusieurs facteurs, parmi eux on cite :

* Paramètres dynamiques de la sollicitation d'abrasion

La sollicitation dynamique est caractérisée par la charge, la pression ou les contraintes exercées, ainsi que par les vitesses relatives des surfaces et des particules abrasives. La charge appliquée peut agir sur le mode de sollicitation en fragmentant ou en usant les grains abrasifs.

* Paramètres du milieu

Le milieu est déterminé par l'atmosphère (sèche, humide, corrosive) et la température qui peuvent moduler ou amplifier ses effets.

* Dureté de l'abrasif

Elle détermine l'aptitude physique du grain abrasif à rayer un matériau plus tendre que lui. Les usures bien que faibles, se produisent encore, alors que la dureté de l'abrasif est inférieure à la dureté de la surface exposée et inversement (fig. 19).

* Granulométrie et forme de l'abrasif

La dimension des grains influe particulièrement sur l'usure, sans oublier sa forme qui influe sur son agressivité en combinaison avec sa dureté. Egalement sa résistance à la rupture qui pourra favoriser l'arrondissement du grain ou au contraire la création de

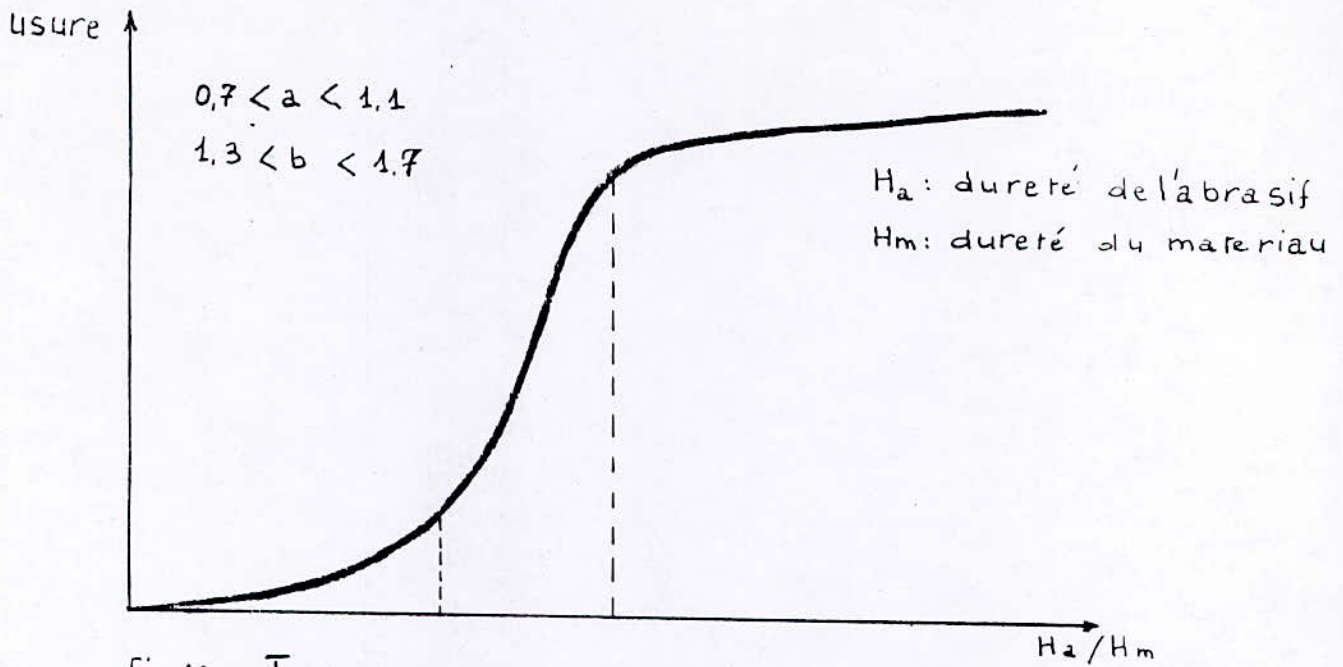


Fig.19 : Influence de la dureté de l'abrasif

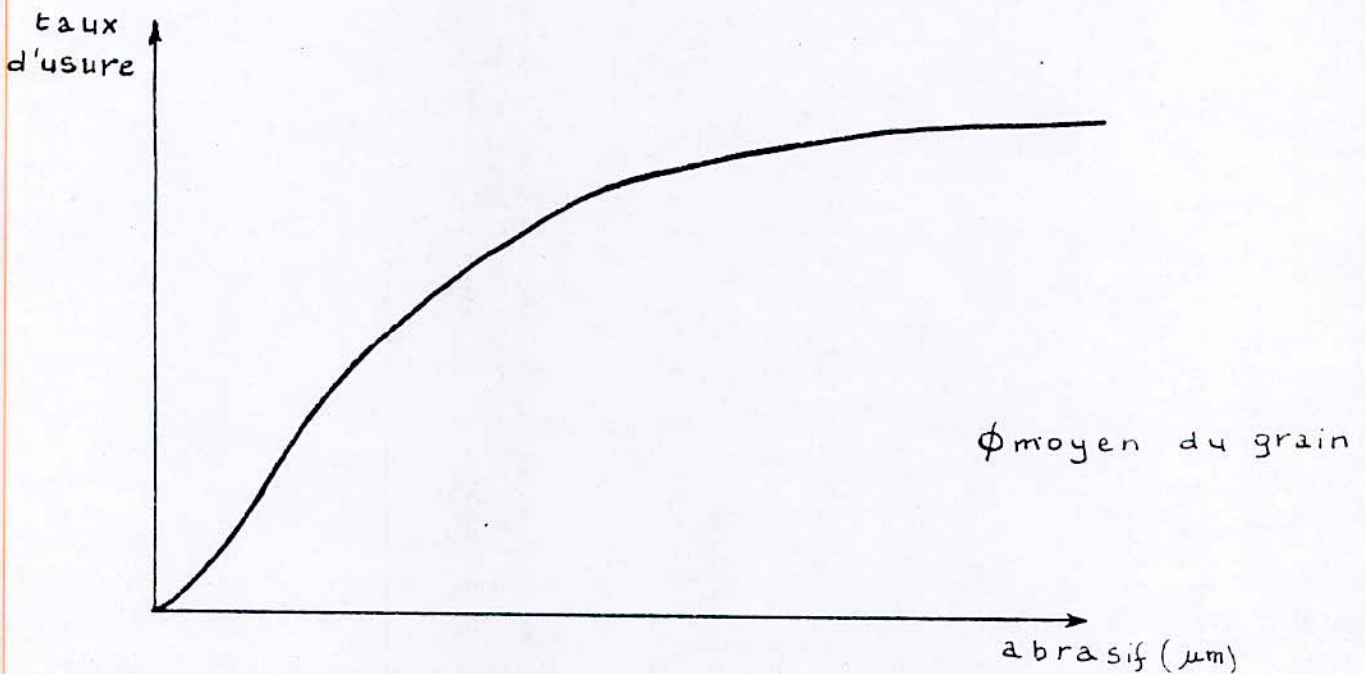


Fig.20: Influence de la dimension du grain abrasif sur le taux de corrosion

nouvelles arêtes (fig. 20).

* Temps de fonctionnement

Le temps de fonctionnement est un paramètre important dans l'usure des pièces surtout dans le cas de l'usure abrasive où les particules abrasifs dures en nombre constant arrachent des quantités constantes de matériau au cours du temps.

* Paramètres du matériau

Les paramètres à prendre en compte sont la dureté et la microstructure des matériaux. Pour des métaux purs, l'usure par abrasion est inversement proportionnelle à leur dureté. Dans le cas d'alliages, la relation entre les volumes usés par abrasion et la dureté des matériaux est plus complexe. D'autre part, l'écroutissage sur des structures monophasées en provoquant des transformations structurales consolide le matériau en augmentant sa dureté et favorise sa résistance à l'abrasion.

PARTIE EXPERIMENTALE

IV/ MATERIAUX ETUDIES

L'étude porte sur trois types d'alliages

1) Types d'alliages

- Nickel pur

Le nickel est le métal de monnayage le plus noble parmi les métaux ordinaires. Sa couleur blanche à reflets bleutés, son brillant caractéristique après frappe et sa résistance à l'usure restent inégales.

- Cupro-nickel 75-25

Il est constitué principalement de 75% de cuivre et 25% de nickel. Ces deux constituants sont totalement solubles l'un dans l'autre à l'état solide ; le nickel forme une solution solide de substitution, donc la présence d'une seule phase (structure monophasée). Ces résistances à la corrosion et à l'usure restent bonnes mais inférieures à celle du nickel pur.

- Acier inoxydable ferritique

Cet acier est constitué de deux éléments principaux : le fer et le chrome ; comme le chrome est un élément alpha-gène (carbure-gène) et soluble dans le fer, l'acier obtenu est un acier ferritique monophasé et homogène (le chrome forme une solution solide de substitution dans le fer). Les résistances à l'usure et à la corrosion sont très élevées.

2) Compositions chimiques (18)

La composition chimique comporte les éléments principaux, les éléments d'addition et les impuretés. Ces éléments sont

donnés avec leur pourcentage pour chaque matériau.

Matériau	composition chimique en %											
	Zn max	Pb max	Fe	C max	Cr max	Ni	Mn max	Cu max	Si max	Co max	S max	P max
Acier inox Z8Cr17	—	—	>77	0.08	17.2 18	0.5	0.6	—	0.06	—	0.02	0.035
Nickel pur B162.62	—	—	—	0.02	—	>99.4	0.2	0.1	0.05	0.2	0.005	0.05
Cu-Ni25	0.2	0.02	<0.25	0.05	—	24 à 26	0.15	>74	0.1	—	—	—

3) Caractéristiques (2)

On peut résumer leurs caractéristiques dans le tableau suivant :

Matériau	Désignation DIN	Elements principaux %	Masse volumi- que kg/dm ²	dureté réseau	caractéristi- que
Nickel pur	N ₁ 99.2	Ni >99.2%	8.89	95 130	C.F.C blanc magnétisable
cupro- nickel	Cu-Ni25	Cu 75% Ni 25%	8.94	80 105	C.F.C blanc matériau stand
acier inox	X8Cr17	Fe 83% Cr 17%	7.7	150 178	C.F.C blanc magnétisable

4) Etude métallographique

a) Préparation

Les échantillons ont subi un polissage au papier abrasif 180, 220, 320, 600 et 1000 et une finition à la pâte diamantée.

Les réactifs utilisés sont :

- Pour l'acier inoxydable l'eau régale de composition

- o 100 ml de HNO_3
- o 200 ml de HCl
- o 300 ml de glycérine.

Pour obtenir l'eau régale on mélange l'acide chlorhydrique (HCl) avec la glycérine, puis on rajoute l'acide nitrique (HNO_3), le tout est maintenu à basse température dans l'eau glacée pendant un certain temps. Le temps d'attaque de ce réactif est de l'ordre de 20 à 50 secondes, à la température ambiante.

- Pour le nickel pur et le cupro-nickel, on utilise une solution acéto-nitrique constituée de 50 % d'acide nitrique concentré et le reste d'acide acétique glacial. La durée d'attaque est de 10 à 15 secondes pour le cupro-nickel et de 60 à 80 secondes pour le nickel pur.

b) Observation métallographique

L'observation des structures des échantillons se fait à l'aide d'un microscope optique.

o pour le cupro-nickel : Les grains ont une grande taille de 70 μm en moyenne et variante de 20 μm à 140 μm . La structure est monophasée, la matrice est homogène et l'orientation des grains est différente (micrographie 1).

o Pour le nickel pur : les grains ont une taille de l'ordre de 10 μm à 70 μm et de moyenne 30 μm ; leurs orientations sont différentes. La structure est monophasée (la couleur est uniforme) (micrographie 2)

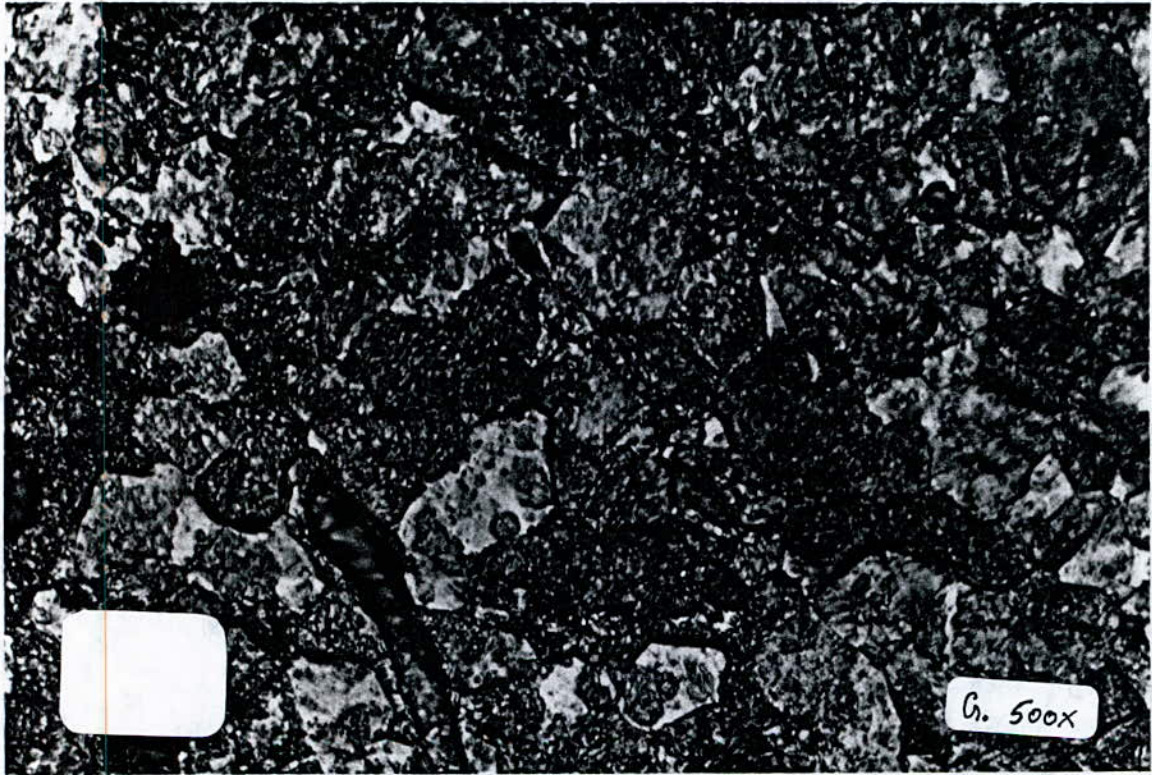
o Pour l'acier inoxydable l'attaque chimique était hétérogène ; le résultat est une attaque sous forme de plaque. Un grossissement fait apparaître la structure fine des grains avec différentes teints causées par les éléments d'additions. Ces grains sont de même forme, leur taille est de 2 μm (micrographie 3).



micrographie 1 : Cupro-nickel (structure métallographique)



micrographie 2 : Nickel pur (structure)



micrographie 3: Acier Inoxydable (structure)

V/ TECHNIQUES EXPERIMENTALES

1) Techniques de l'usure

Afin de caractériser la résistance à l'usure de chacun des matériaux étudiés, nous avons adopté la méthode expérimentale consistant à mesurer la perte de masse engendrée par le mécanisme abrasif. Pour cela nous avons utilisé une machine d'usure par abrasion, conçue au Département.

a/ Caractéristiques de la machine d'usure et principes de fonctionnement.

Ce modèle de machine d'usure est constitué essentiellement d'un dispositif à cylindre caoutchoute dont le principe de fonctionnement est le suivant :

Le cylindre est soumis à une rotation. Au moyen d'une charge P, l'échantillon est mis en contact avec le cylindre et entre eux il y a écoulement des particules abrasives, à partir d'un réservoir, qui provoque l'usure de l'échantillon (Schéma 1).

b/ Conditions opératoires

- Forme et dimension de l'échantillon utilisé est de forme parallélépipède de dimension $10 \times 10 \times 25 \text{ mm}^3$.

- Charge : la charge appliquée pour maintenir l'échantillon en contact avec le cylindre caoutchoute est d'environ 1 kg.

- Température : les essais se font à température ambiante.

- Temps de fonctionnement : la durée adoptée pour chaque essai est de 30 mn.

- Débit de l'abrasif : La machine est réglée pour un débit constant d'environ 19.5 kg/h.

c/ Nature et caractéristiques de l'abrasif utilisé

L'abrasif utilisé est du carbure de silicium pour meules. Sa composition chimique est donnée ci-dessous en pourcentage (17)

SiC	SiO ₂ + Si mét.	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	C libre	Fe dissous
98.2 % à 99.2 %	0.5 % max	0.1 % max	0.15 % max	0.15 % max	0.05 % max

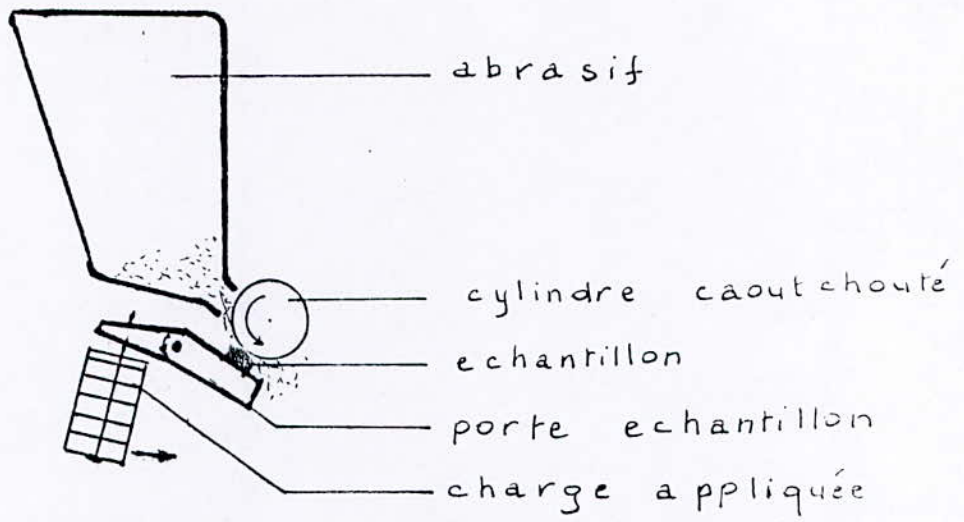
Ses caractéristiques sont données ci-dessous

- . excessivement durs, très tranchants et fiables.
- . structure cristalline : SiC classé hexagonale
- . forme des grains : cubique à arrêtes vives.
- . dureté Hv : en moyenne 2800 N/mm².

c/ Mode opératoire

L'échantillon est fixé à l'aide d'une vis sur le porte échantillon, on met la charge en place, on règle la glissière du réservoir pour laisser tomber la matière abrasive. Puis le moteur est mis en marche et en même temps on déclenche un chronomètre.

La matière abrasive tombe sur l'échantillon et y est maintenue un certain temps par la matière caoutchoutée, de cette manière l'usure a lieu. A la fin de l'essai on retire



Schema 1 : Appareil d'usure

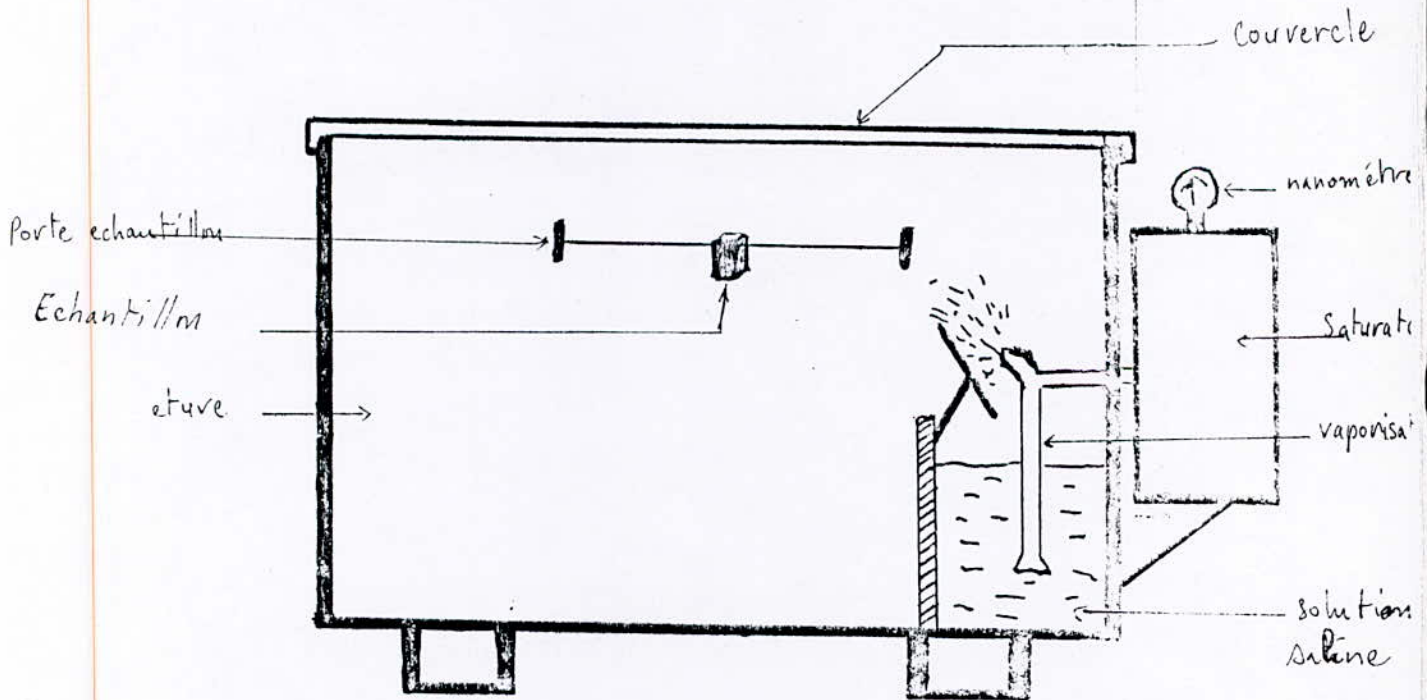


Schéma 2 : Appareillage du brouillard salin.

l'échantillon et on mesure la perte de masse.

2) Technique de pliage simple

L'essai a été effectué à l'École Nationale Polytechnique sur machine à pliage simple.

a) Principe

Le principe consiste à soumettre un échantillon rectiligne de section pleine, à une déformation plastique par pliage sans inversion du sens de flexion au cours de l'essai.

Le pliage est poussée jusqu'à ce que l'une des branches de l'échantillon fasse, sous charge, avec le prolongement de l'autre branche un angle α (schéma 3).

b) Conditions de l'essai

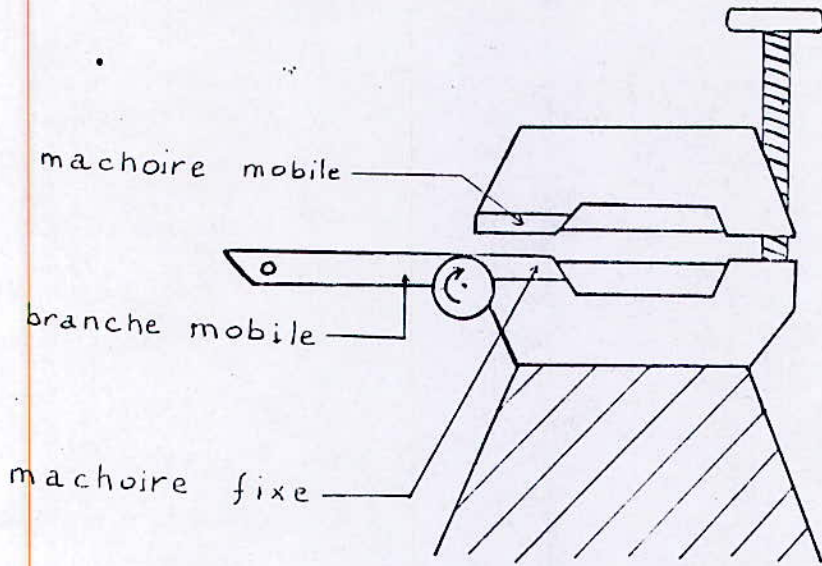
- l'exécution de l'essai se fait à température ambiante.
- le pliage sous un angle prescrit α plus petit que 180° .
- les deux branches de l'échantillon doivent rester perpendiculaires à l'axe de pliage.
- l'application de la charge de pliage doit être uniforme pour permettre une déformation plastique normale.
- lorsque l'angle prescrit est atteint on arrête l'essai.

c) Mode opératoire

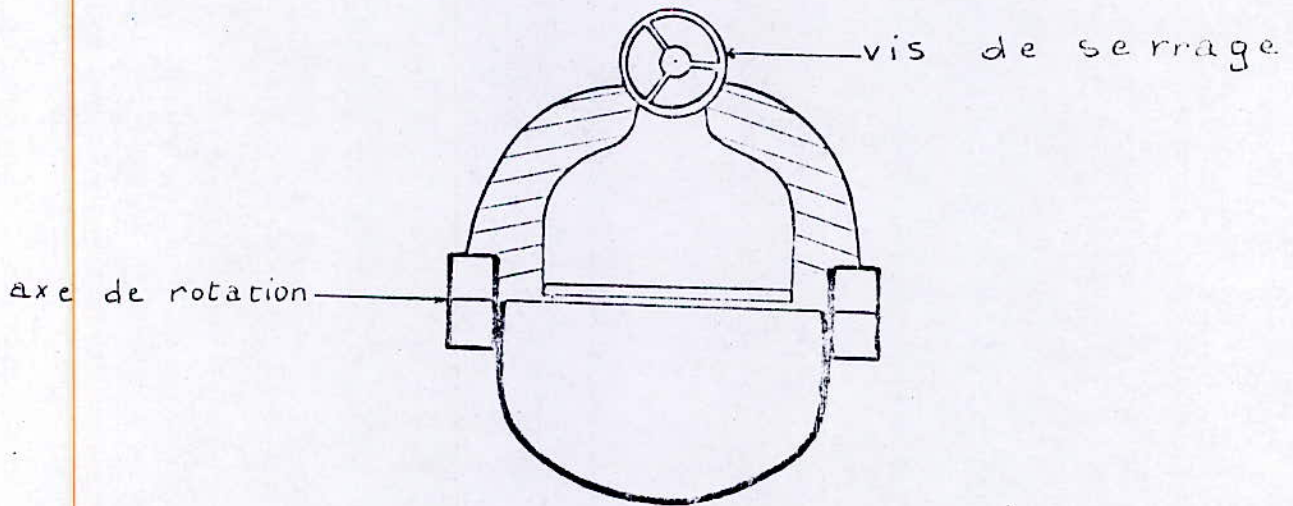
L'échantillon est fixé au mandrin fixe de la

Dispositif de pliage simple

Schema 3



(a) vue de droite



(b) vue de dessus

plieuse. Une partie de l'échantillon reste à l'extérieur du mandrin du côté de la partie mobile de la plieuse (Schema 3) Cette partie mobile tourne autour d'un axe fixe parallèle à celui de pliage et entraîne avec elle, par application de charge, l'autre partie de l'échantillon. Après avoir atteint l'angle α , on élimine la charge appliquée et la partie mobile retourne à sa position initiale, puis on retire l'échantillon.

3) Technique de l'essai au brouillard salin

Cet essai est sensé refléter des conditions de corrosion semblables à celles d'un climat marin.

* Principe

Consiste en attaque corrosive accélérée par un brouillard artificiel salin de composition bien définie, dans les conditions de températures et de pression fixées dans des limites étroites.

* Caractérisation de l'appareil (Schéma 2)

L'étuve à brouillard salin est constituée de :

- o enveloppe extérieure en tôle d'acier calorifugée un couvercle,
- o une chambre d'essai,
- o un système de pulvérisation : pour pulvériser la solution saline dans la chambre d'essai,
- o un saturateur permettant l'humidification de l'air de pulvérisation,
- o un compresseur d'air intercallé à l'entrée de l'étuve,
- o un appareillage de chauffe et de contrôle.

* Mode opératoire

L'échantillon est suspendu dans la chambre d'essai, il est auparavant, nettoyé et séché. Le réservoir de la solution saline est rempli avec de l'eau salée (eau de mer) au 2/3. Le saturateur doit être rempli avec de l'eau distillée. On met l'appareil sous tension et on règle la pression de pulvérisation à 1 bar à partir du détendeur, on règle la température du thermostat à contact, de la chambre et du saturateur à $35^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et à 42°C respectivement. La solution commence à être pulvérisée à l'intérieur de l'étuve. La température augmente jusqu'à environ 36°C et se stabilise ensuite. On obtient un taux d'humidité équivalent à 92 %. La durée de l'essai doit, au minimum être de 16 heures. Après cet essai, on retire les échantillons, par la suite, ils sont lavés puis séchés.

4/ Essais de corrosion dans des solutions stagnantes

On utilise des bacs de forme rectangulaire portant des supports d'échantillon en pastique.

les solution électrolytique sont la sueur et l'eau de mer ou les échantillons sont immergés complètement.

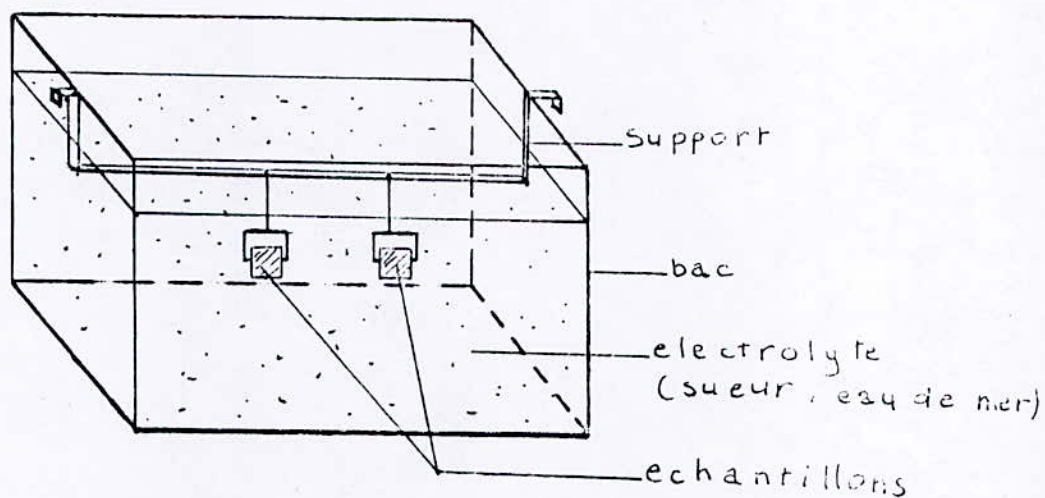
Pour l'essai dans la sueur, chaque échantillon des alliages étudiés (Nickel pur, cupro-nickel et l'acier inoxydable) est accroché à un support ; l'échantillon réagit seulement avec la solution (schéma 4).

pour les essais dans l'eau de mer il y a :

- o l'immersion des échantillons pris séparément (schema 3)
- o Immersion des couples galvaniques : Cu-Cupronickel, Cu-Nipur, Cu-Acier inoxydable, acier inoxydable-Nipur et Acier inoxydable-Cupronickel (contact directe de leurs surface). (schema 5).

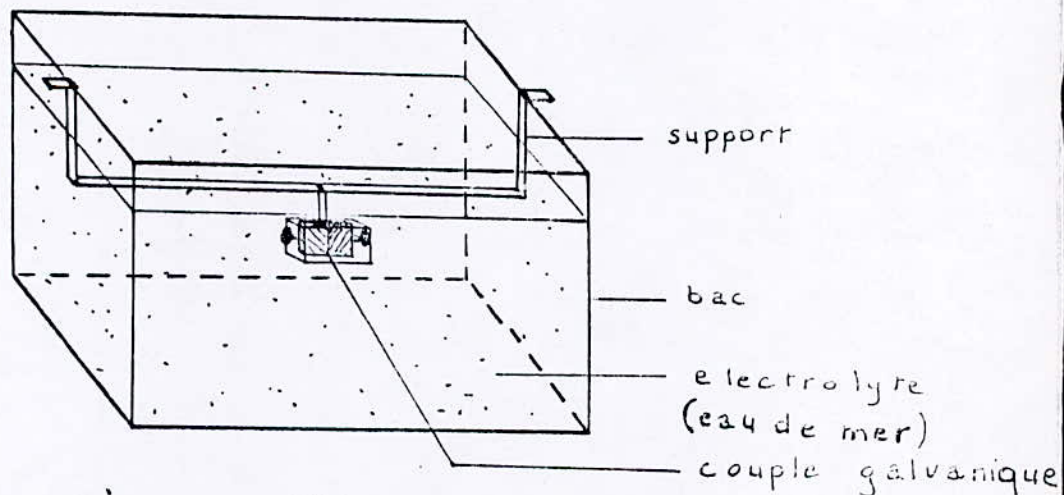
Les matériaux classés d'après leurs potentiels

Schema 4



Système d'immersion
d'échantillons simples

Schema 5:



Système d'immersion
de couples

décroissants par rapport à l'eau de mer sont :

- Acier inoxydable
- Nickel pur
- Cupronickel
- Cuivre

VI / RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS

Les différents essais effectués pour les différents matériaux sont mentionnés dans le tableau suivant :

matériau ----- type d'essai	Nickel pur	cupro- nickel	acier inox	acier- CuNi	acier- nickel	Cu- acier	Cu- nickel	Cu- CuNi
Brouillard salin	x	x	x	o	o	o	o	o
Corrosion à l'eau de mer	x	x	x	x	x	x	x	x
Corrosion à la sueur	x	x	x	o	o	o	o	o
Usure	x	x	x	o	o	o	o	o
Dureté	x	x	x	x	x	o	o	o
pliage	x	x	x	o	o	o	o	o

o : pas d'essai

x : essai réalisé

1/ Essai d'usure

L'essai est fait pour chaque matériau pris séparément. La durée de l'essai est de 30 mn à température ambiante. Un seul paramètre est étudié : la masse des différents matériaux. Sa variation est donnée dans le tableau ci-dessous :

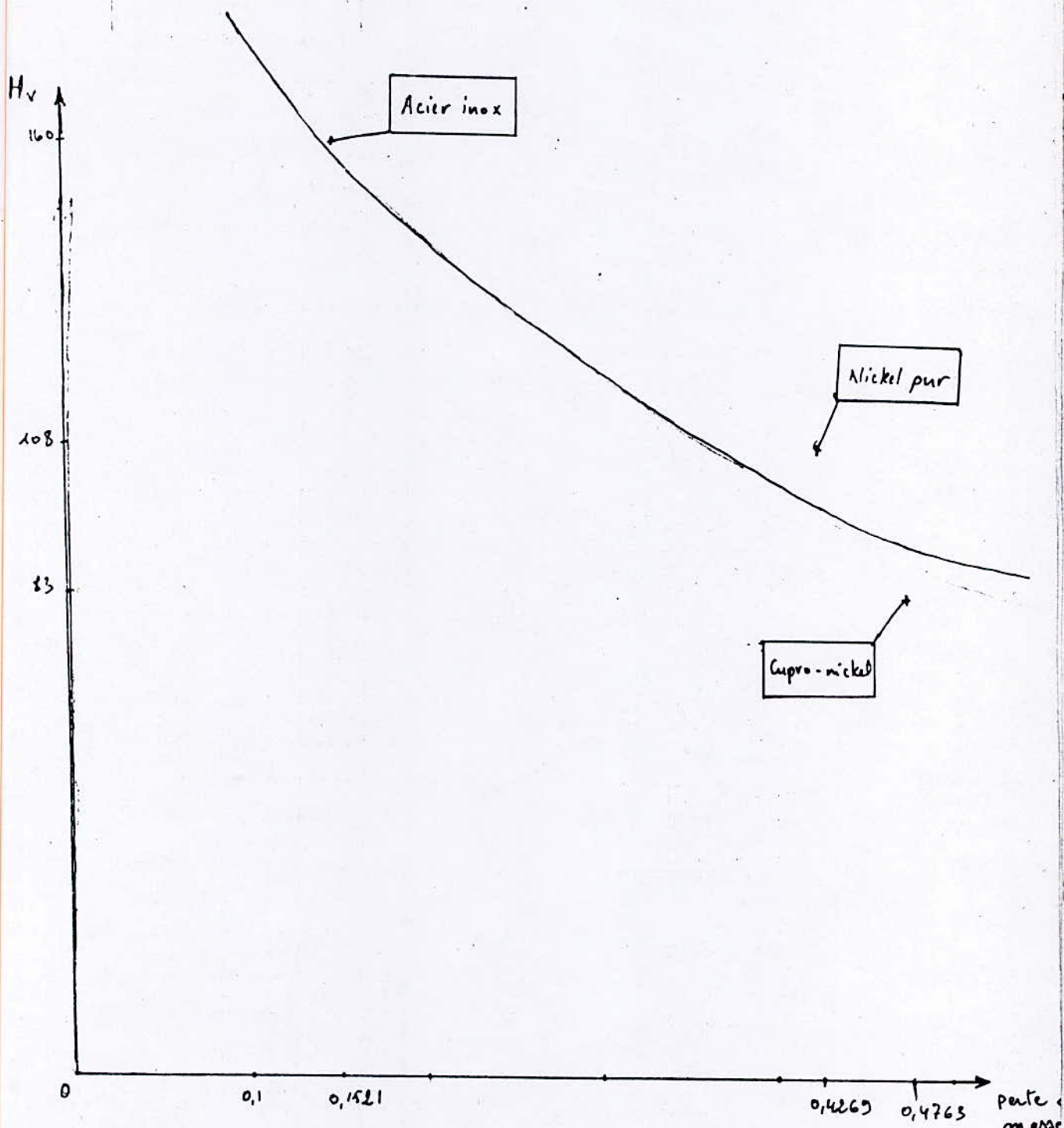
Matériau	Dureté (Hv)	mesure de masse avant essai (g)	mesure de masse après essai (g)	perte de masse (g)
Acier inox	163	19.6326	19.3805	0.1521
Cupro-Nickel	84	22.4021	21.9258	0.4763
Nickel pur	108	22.5573	22.1277	0.4296

Observation :

Les résultats obtenus indiquent que la perte de masse est relative selon les matériaux. La plus grande valeur de cette perte correspond au matériau le moins dur et la plus petite valeur correspond au matériau le plus dur. Les sillons observés sur la surface de chaque échantillon montre que pour des grains fins les sillons sont de petite forme (faible profondeur.) par contre pour les gros grains les sillons plus larges et profonds (micrographies 4, 5, 6).

Interprétation :

La perte de masse du matériau est inversement proportionnelle à la dureté (voir courbe). Nous pouvons dire que la résistance à l'usure est proportionnelle à la dureté. A l'échelle microscopique, les trois matériaux étudiés ont le même réseau cristallin (c.f.c.) et présentent une structure monophasée et une matière homogène. Sauf que la taille des grains influent énormément (voir micrographies 1, 2, 3).



Courbe de la perte de masse en fonction de la dureté du matériau.



micrographie 4 : Cupro-nickel (Essai d'usure)



micrographie 5 : Nickel pur (Essai d'usure)



micrographie 6 : Acier inox (Essai d'usure)

Les grains de petite dimension possèdent un nombre élevé de défauts (joints de grains) qui jouent le rôle d'obstacles au déplacement des atomes. Pendant l'essai d'usure les joints de grains s'opposent au grains abrasifs et tentent à diminuer l'arrachement des atomes (barrière d'énergie nécessaire au déplacement ou arrachement des atomes du joint de grain est plus élevée que celle des atomes à l'intérieur des grains) ce qui provoque l'augmentation de la résistance du matériau à l'usure.

La dimension des grains n'est pas la seule à influencer sur la perte de masse, il y a aussi l'état de surface des pièces et le taux d'érouissage qui sont très importants.

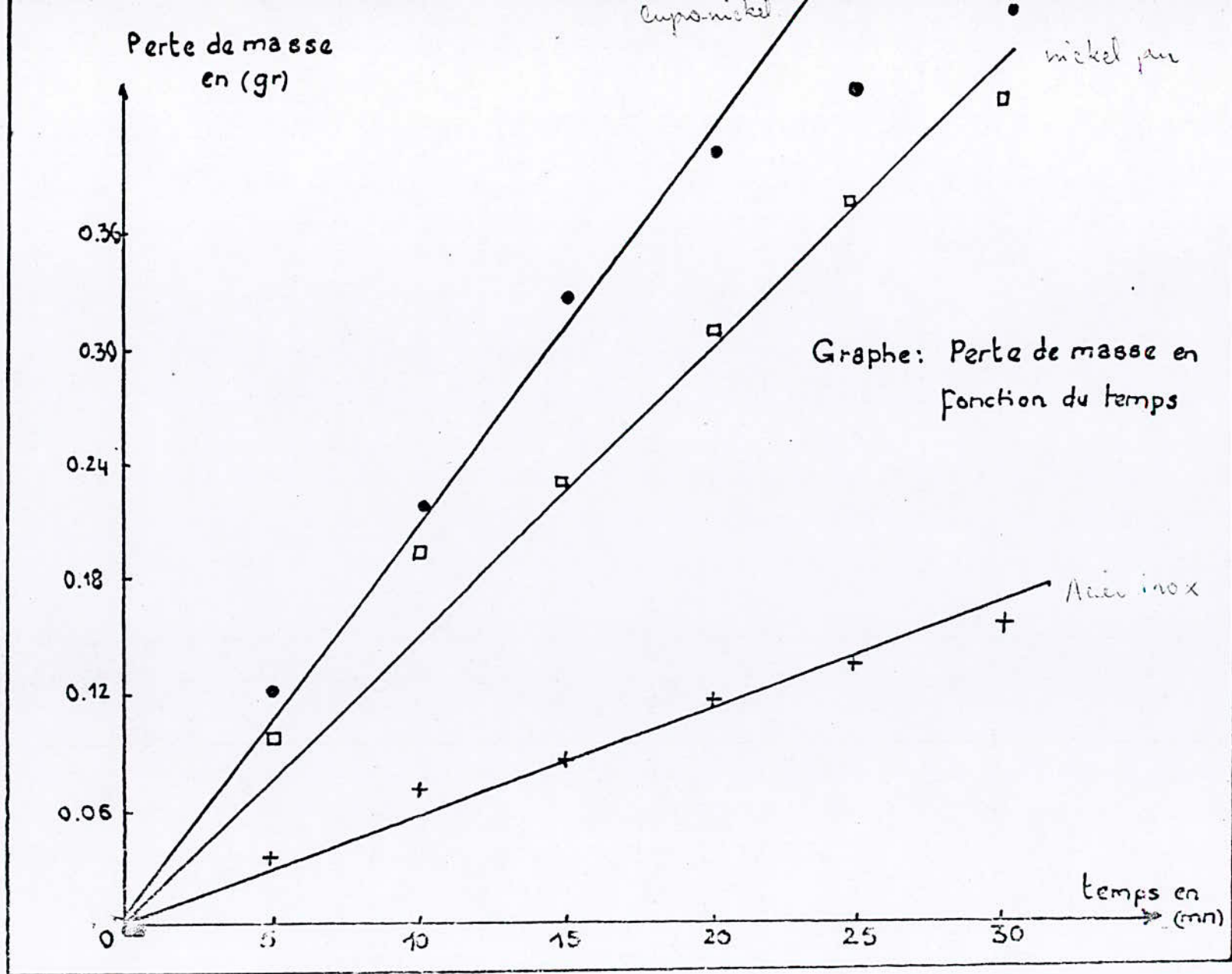
Pour la variation, le taux de perte de masse en fonction du temps est donné dans le tableau suivant :

perate temps de masse de	5 mn	10 mn	15 mn	20 mn	25 mn	30 mn
Acier inox	0.0326	0.0684	0.0817	0.1143	0.1318	0.1521
Nickel pur	0.0961	0.1618	0.2294	0.0365	0.3712	0.4269
Cupronickel	0.1217	0.2158	0.3261	0.3979	0.4318	0.4763

Le tracé des points de la variation de perte en masse en fonction du temps donne des droites. La variation du taux de perte en masse est proportionnelle aux taux d'essai.

2) Essai de pliage

Le pliage se fait à froid (à température ambiante). Les échantillons, d'épaisseur supérieur à 1.6 mm, subissent une déformation mécanique uniforme vitesse de rotation de la partie mobile de la plieuse est constante.



L'essai montre que ces matériaux ont une tendance à la déformation plastique sans atteindre la phase de rupture macroscopique. en effet, au niveau de la surface, l'observation microscopique ne met en évidence que quelques microfissures parallèles à la ligne de déformation.

Pour les essais d'immersion les paramètres mesurés sont la masse, le diamètre et l'épaisseur ; et l'étude portera sur la variation de ces différents paramètres.

3) Essai au brouillard salin

Les échantillons sont accrochés à des supports en plastique et sont suspendus dans l'étuve sous atmosphère contrôlée de vapeur d'eau de mer d'une humidité supérieur à 90 % .

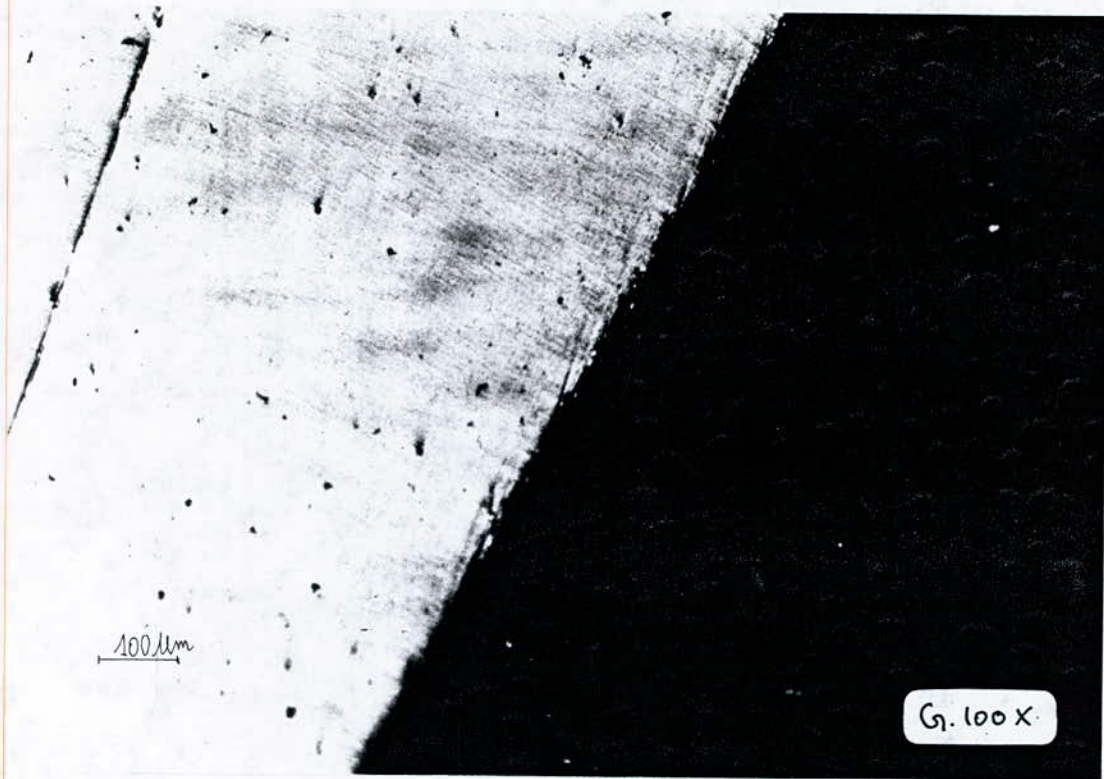
L'essai est réalisé à une température de l'ordre de $35^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ avec une durée de 24 heures avec plusieurs interprétations.

Les paramètres mesurés sont la masse, l'épaisseur et le diamètre (tableau)

Matériau	mesures initiales			mesures finales			variations		
	Masse (g)	Diam. (mm)	Epais. (mm)	Masse (g)	Diam. (mm)	Epais. (mm)	Δm	Δd	Δe
Nickel pur	11.979	30.60	1.82	11.979	30.60	1.82	0	0	0
Cupro Nickel	7.0389	24.60	1.63	7.0400	24.60	1.64	0.0011	0	0.01
Acier Inox.	6.2169	24.60	1.66	6.2169	24.60	1.66	0	0	0

Observation :

L'aspect extérieur du Nickel pur et de l'acier inoxydable n'a pas changé, les variations de masse et de dimension sont nulles (micrographie 7, 8,9) par contre pour



micrographie 7 Cupro-nickel (En coupe)
(Essai au broillard salin)



micrographie 8 : Espro-nickel pur (Aspect surface)



micrographie 9 : Acier inoxydable (Aspect extérieur de la surface).

le cupro nickel il y a eu changement de couleur, une augmentation en masse et une augmentation d'épaisseur (à cause du dépôt du produit de corrosion).

L'épaisseur du dépôt sur la surface de la pièce en copro-nickel est de $5 \mu\text{m}$ (calculer à partir de la variation d'épaisseur) et le film corrodé observé est de $8 \mu\text{m}$ (calculer à partir de la micrographie du métal en coupe). En comparant avec la surface nue de la pièce (CuNi), on trouve qu'il y a une diminution de l'épaisseur de $3 \mu\text{m}$ correspondant à une perte de masse de 268 (mdd)⁽¹⁾.

Interprétation :

Le nickel pur et l'acier inoxydable possèdent une très grande résistance à la corrosion (passifs dans le brouillard salin), par contre le cupro-nickel a une certaine tendance à se corroder.

L'oxygène de l'air diffuse à travers le film de vapeur condensé sur la surface de l'échantillon. Cette diffusion de l'oxygène provoque la dissolution de l'eau pour donner des ions OH^- d'après la réaction de réduction suivante :



Les réactions d'oxydation du métal sont les suivantes :



Dans l'eau de mer le potentiel d'oxydation du cuivre est supérieur à celui du nickel⁽²⁾. La réaction qui aura lieu est donc celle du cuivre (2) (oxydation du métal).

à partir des deux réactions (1) et (2) on obtient la

(1) voir annexe tableau III

(2) voir annexe tableau IV

réaction globale de la corrosion du métal (cupro-nickel)



On peut dire que la corrosion est sous dépôt insoluble anionique (§ II.4.b) car : le nombre d'ions OH^- diffusant à travers le film corrodé est supérieur au nombre d'ions Cu^{2+} dissous, il y a dépôt directe de Cu(OH)_2 à l'interface film/métal. D'autre par, la dissolution du produit de corrosion est très faible à l'interface film/électrolyte⁽²⁾.

4) Essai d'immersion dans l'eau de mer d'échantillon simple

Les échantillons sont accrochés à des supports en plastique, l'interaction se fait seulement entre ces échantillons et l'électrolyte. Le test dure 700 heures (29 jours et 4 heures) à température ambiante. L'immersion est complète et sans interruption. Les résultats obtenus sont présentés ci-dessous :

Matériau	Mesures initiales			Mesures finales			Variations		
	Masse (g)	Diam. (mm)	Epaiss. (mm)	Masse (g)	Diam. (mm)	Epaiss. (mm)	Δm (g)	Δd (mm)	Δe (mm)
Nickel pur	11.901	30.59	1.82	11.9138	30.01	1.8115	0.0128	0.02	0.0025
Cupro Nickel	6.9565	24.52	1.64	6.9633	24.53	1.65	0.0068	0.01	0.01
Acier Inox.	6.1385	24.60	1.64	6.1473	24.61	1.64	0.0088	0.01	0

(2) voir annexe "corrosion handbook " (auteur UHLIG)

Observation :

Les trois matériaux ont subi des variations de masse, de diamètre et d'épaisseur.

Le dépôt de corrosion sur le cordon de la pièce en nickel pur est de 10 μm sans oublier le dépôt dans les pores (hétérogénéité de la surface). La mise à nu du métal donne un taux de corrosion inférieure à 1 $\mu\text{m}/\text{Jour}$ (micrographie 10).

Pour l'acier inoxydable le dépôt de corrosion est aussi sur le cordon sauf que son épaisseur est d'environ 20 μm . Le taux de corrosion est de 15 μm pendant 29.1667 jours c'est-à-dire 137.71 $\mu\text{m}/\text{an}$ qui est équivalent à 39.6 (mdd) (micrographie 11).

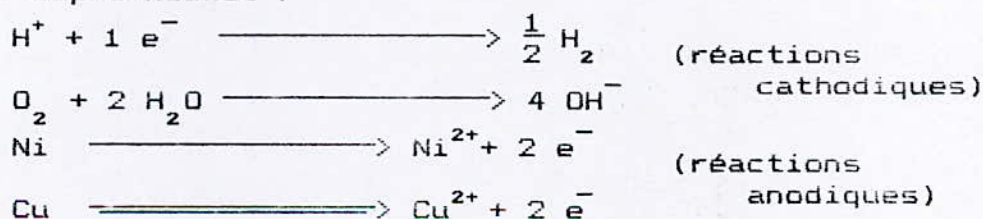
Pour les deux matériaux en nickel pur et en acier inox l'aspect apparent de la surface a légèrement changé (diminution de la brillance) à cause de la formation d'un film, très fin, de corrosion inférieur à 2 μm par an.

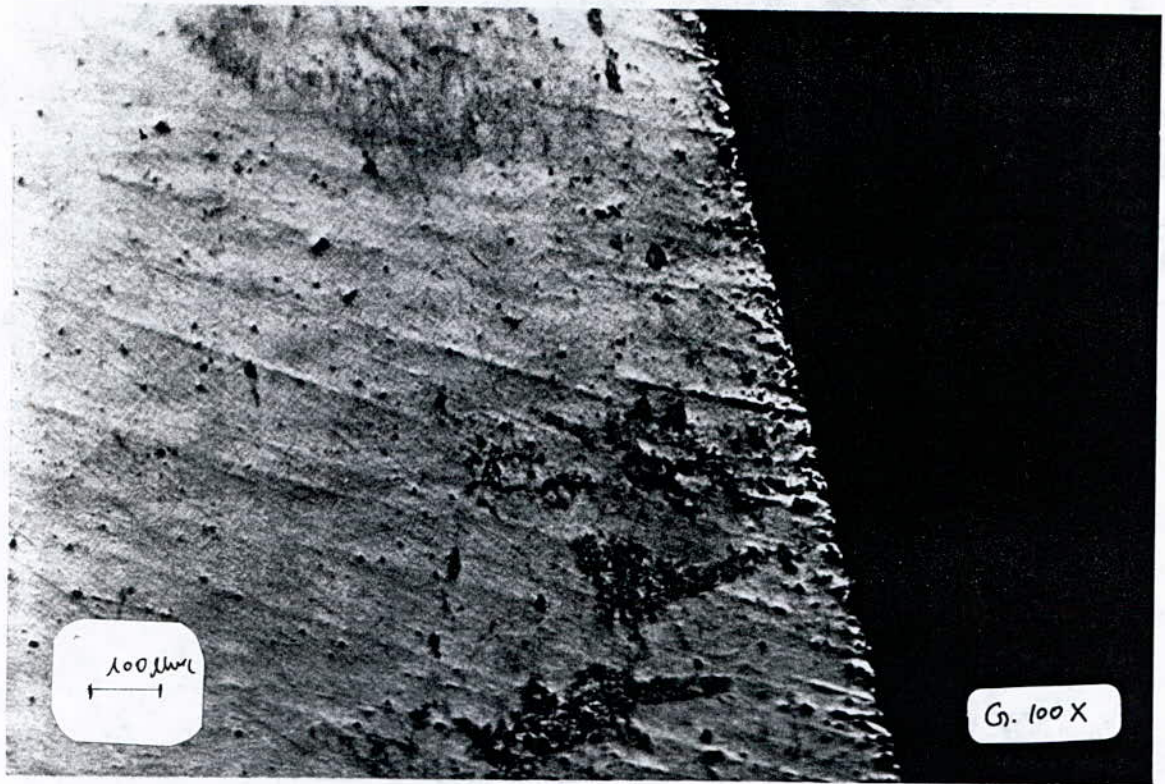
Le cupro-nickel subit une corrosion uniforme de 10 μm d'épaisseur, la pénétration est de 5 μm (62.6 $\mu\text{m} / \text{an}$), ce qui correspond à une perte de masse de 15.33 (mdd) (micrographie 12). L'aspect de la surface change complètement (changement de couleur) (micrographie 13).

Interprétation :

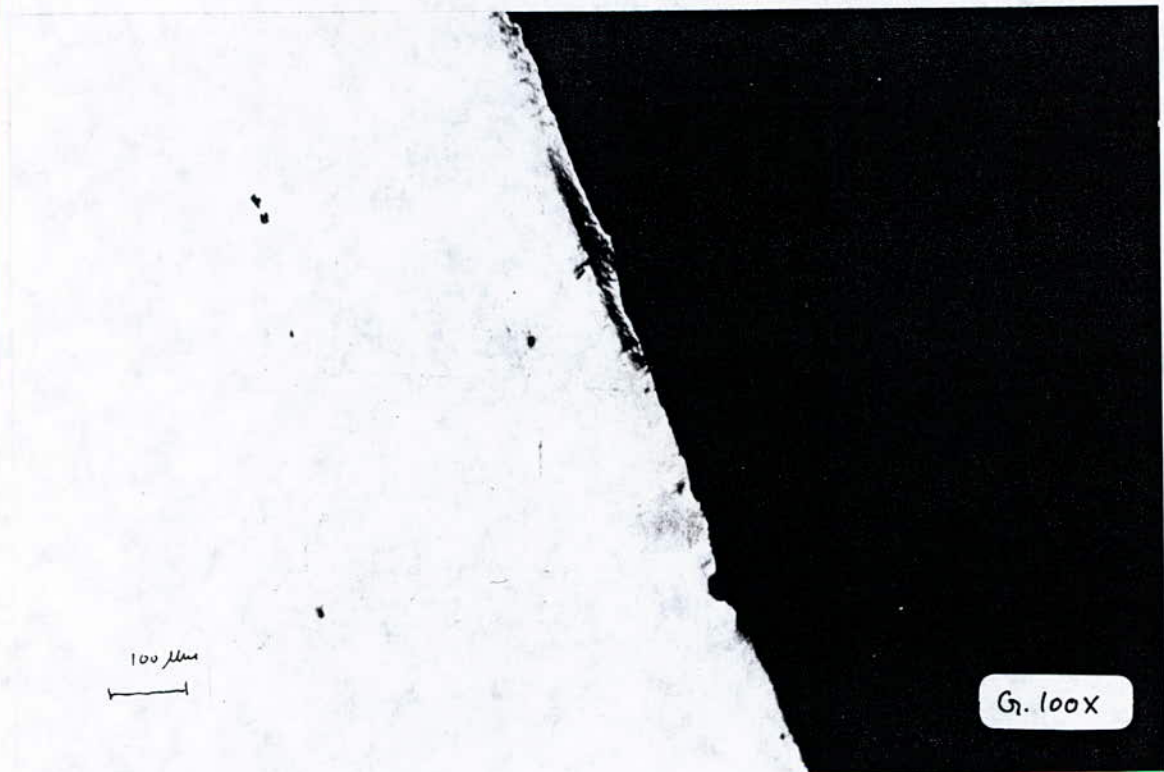
Les réactions qui se déroulent au niveau de chaque matériau sont :

* pour le cupro-nickel :

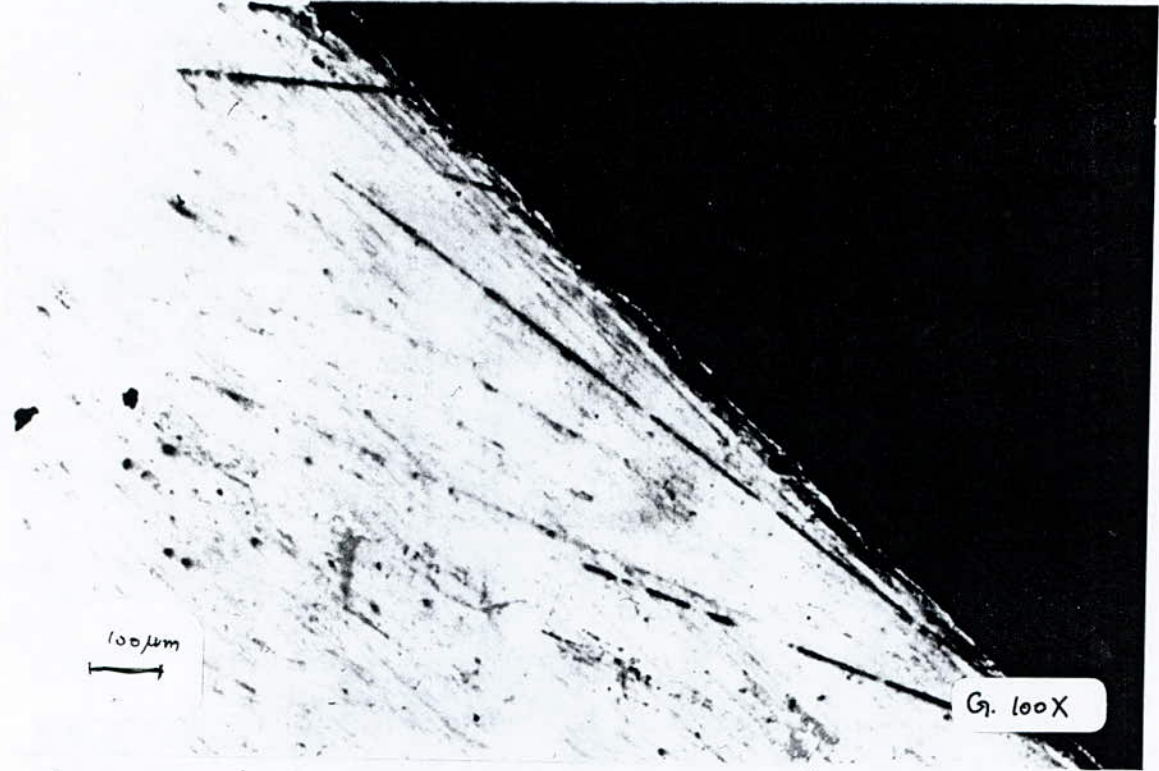




micrographie 12: Cupro-nickel en coupe (Essai dans l'eau de mer)



micrographie 10: Nickel pur (Essai dans l'eau de mer)



micrographie 11: Acier inoxydable (Essai dans l'eau de mer)



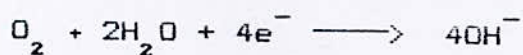
micrographie 13: Cupro-nickel (Aspect de la surface)

La réaction produite

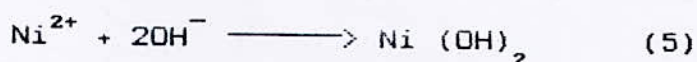


Le potentiel de corrosion du nickel est inférieur à celui du cuivre, la corrosion du cuivre aura lieu et le nickel reste intact. Il y a corrosion sous dépôt insoluble anionique (§ II.4.b) car il y a un flux d'ions H^{+} et Na^{+} qui empêche la redissolution du produit de corrosion et la solubilité du produit obtenu est faible.

* pour le nickel pur :

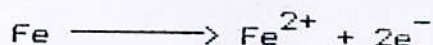


la réaction est :

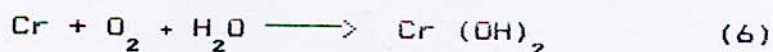


Puisque le nickel est plus résistant que le cupro-nickel dans l'eau de mer (Ni passif), la corrosion sera plus faible pour le premier et le produit de corrosion (du Nickel) aura une couche moins épaisse (très petite par rapport à celle du cupronickel).

Pour l'acier inoxydable les réactions cathodiques sont les mêmes (dissolution de l'eau) et les réactions anodiques sont :



La réaction globale est :



Le pourcentage de l'acier inoxydable en chrome étant élevé (1) il provoque ainsi la diminution du taux de corrosion. Le produit de la réaction de corrosion donne un dépôt insoluble anionique. L'aération de la solution est faite donc la dissolution de l'eau est limitée et la réaction (6) sera partielle.

5/ Essai sur les couples galvaniques Cu-acier inox, Cu-Ni et Cu-cupronickel

L'essai est réalisé avec les couples galvaniques Cu-Nickel pur, Cu-Acier inoxydable et Cu-Cupro-nickel. Ces piles sont immergées complètement dans la solution saline à température ambiante. La durée du test est de 140 h. Les résultats mesurés sont dans le tableau suivant :

Matériau	mesures initiales			mesures finales			variations		
	masse (g)	diam. (mm)	épai. (mm)	masse (g)	diam. (mm)	épai. (mm)	Δm (g)	Δd (mm)	Δe (mm)
Nickel pur	11.9422	30.60	1.82	11.9445	30.60	1.82	0.0023	0	0
Cupro-nickel	7.0959	24.62	1.66	7.0611	24.62	1.66	0.0016	0	0
Acier inox	6.2592	24.56	1.66	6.2598	24.58	1.66	0.0006	0.02	0

Observation :

Les résultats montrent que le cuivre s'est oxydé pour les 3 couples. Il y a eu dissolution du cuivre dans l'électrolyte d'après la réaction :



(1) voir annexe tableau II

et une réduction des autres alliages :



Puisqu'il y a contact direct le dépôt sera directement sur l'autre métal ce qui explique la couleur rougeâtre du dépôt sur la surface des échantillons en Ni, Cupro-nickel et acier inoxydable (micrographie 15,16,17,18)

Les réactions sont



Une grande partie du cuivre oxydé diffuse dans l'électrolyte et la partie la plus proche des échantillons forme un produit de corrosion sur la surface :

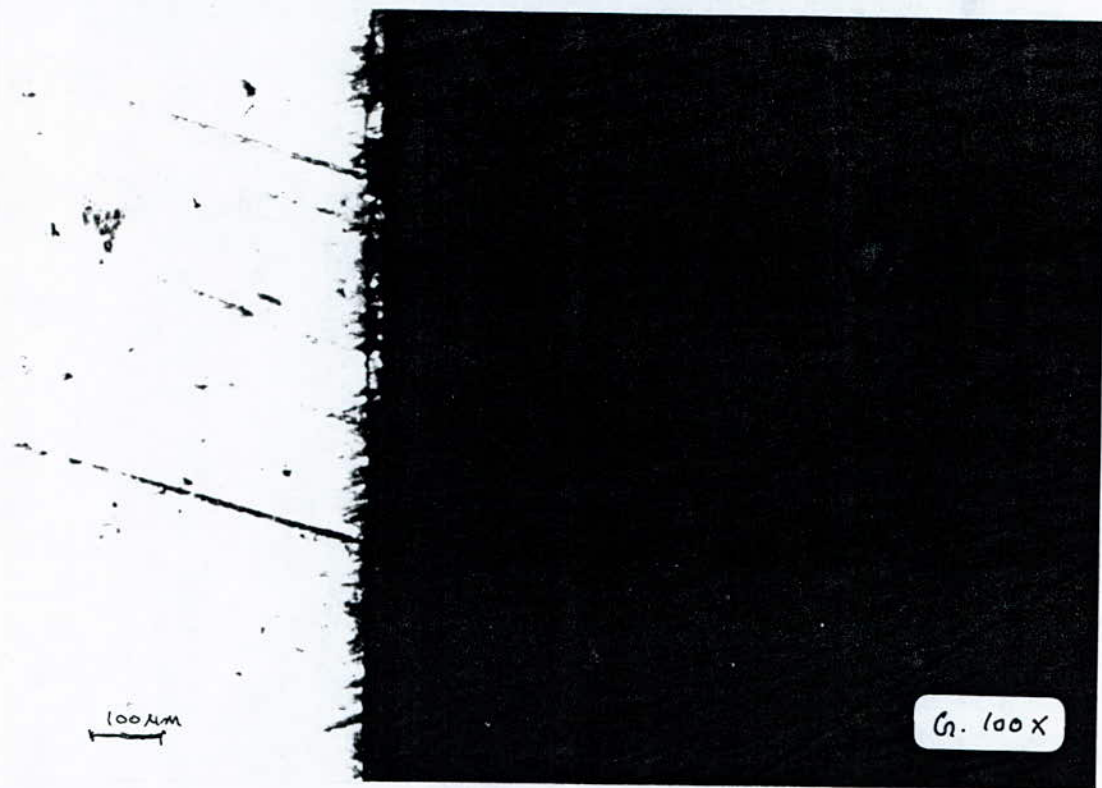


La perte de masse des échantillons est nulle car ils sont protégés par le cuivre (le dépôt de corrosion de la réaction (7) se déposera sur les matériaux utilisés (autre que le cuivre).

6/ Essai sur deux couples galvaniques Acier-Ni pur et Acier-cupronickel

Les deux couples Acier inoxydable - Cupronickel et Acier inoxydable - Nickel pur sont en immersion totale dans l'électrolyte (eau salée) à température ambiante pendant une durée de 461h.

Les résultats obtenus sont donnés pour chaque couple dans le tableau suivant :



micrographie 14 : Cupranickel^P
(Cu)

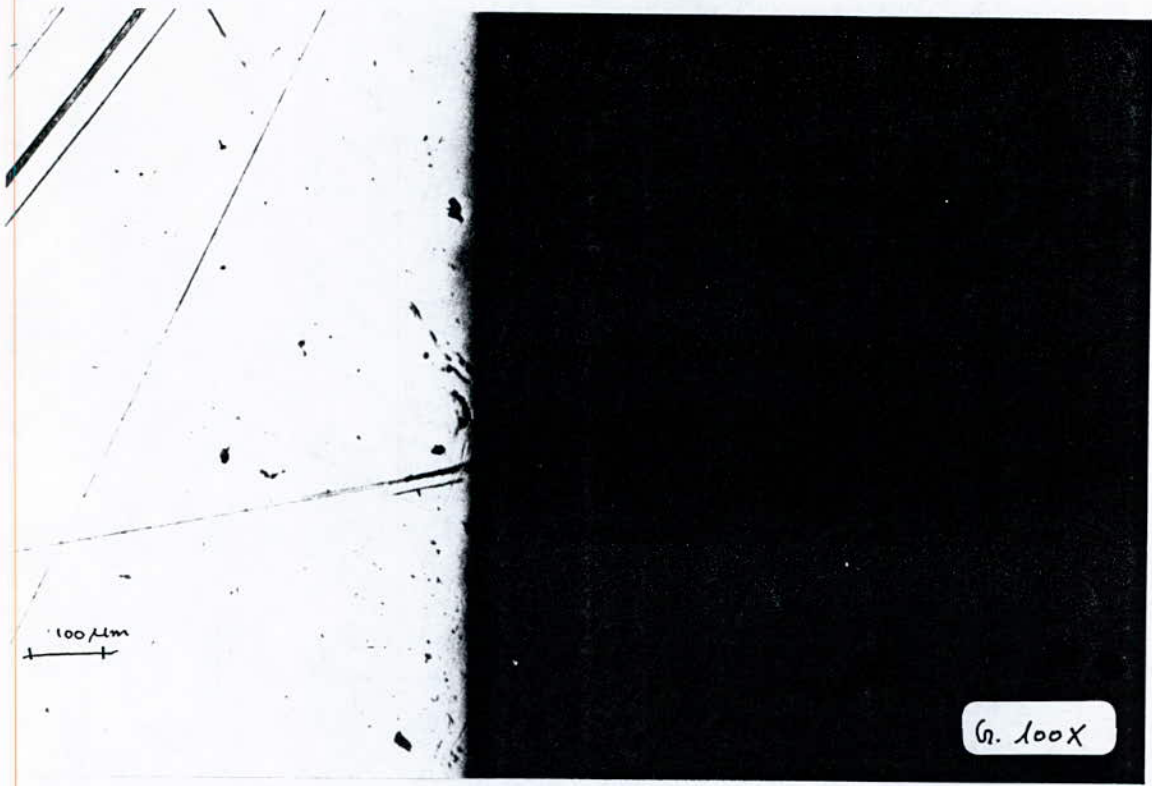
(couple galvanique).
(Essai d'immersion dans l'eau
de mer).



micrographie 15 : Nickel pur (-Cu) (Essai dans l'eau salée)
"eau de mer")



micrographie 16: Nickel pur (- Cu) (Essai dans l'eau de mer)



micrographie 17: Acier inox (-Cu) (Essai dans l'eau de mer)

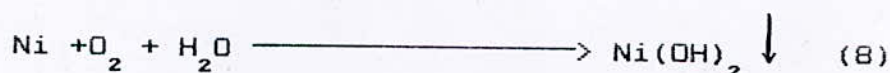


micrographie 18: Acier inox (Aspect de la surface).

couples	mesures initiales			mesures finales			variations		
	masse (g)	diam. (mm)	épai. (mm)	masse (g)	diam. (mm)	épai. (mm)	Δm (g)	Δd (mm)	Δe (mm)
Nickel	11.8148	30.61	1.815	11.6216	30.58	1.815	0.0068	0	0
Acier	5.8907	24.62	1.65	5.9087	24.66	1.65	0.072	0.02	0
Cupro-nickel	6.7732	24.58	1.58	6.614	24.56	1.58	-0.1592	-0.02	-0.02
Acier	5.9845	24.62	1.66	5.987	24.66	1.66	0.0025	0	0

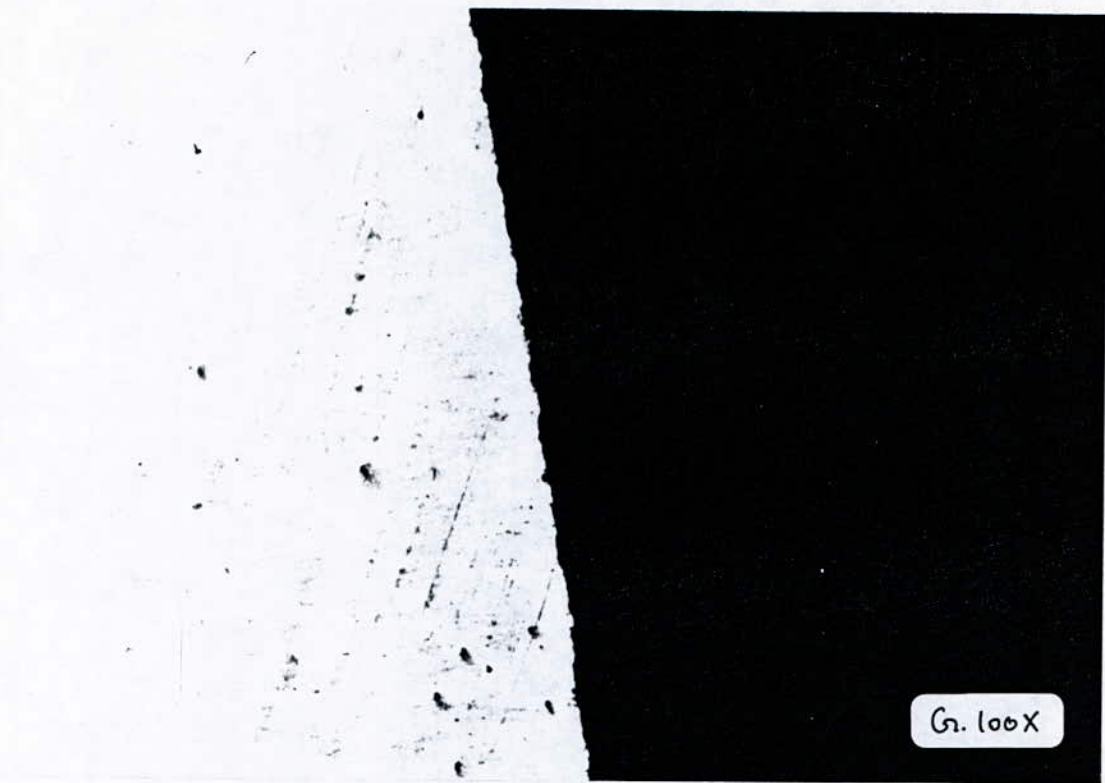
Observation :

Nous remarquons que pour le premier couple, il y a eu augmentation en masse et en diamètre de l'acier inoxydable par contre pour le nickel pur il y a eu seulement une augmentation en masse. D'après l'observation à l'oeil nu il y a changement de couleur de l'acier inox en gris-bleu, cela est dû au dépôt de nickel sur une aire de la surface de l'acier (formation d'un film très fin à la surface (micrographie :19,20). Pour le nickel pur il y a eu une légère oxydation de la surface de contact donc dissolution des ions du Nickel en partie et une redéposition sur le nickel et sur l'acier inoxydable (micrographie 21) d'après la réaction :



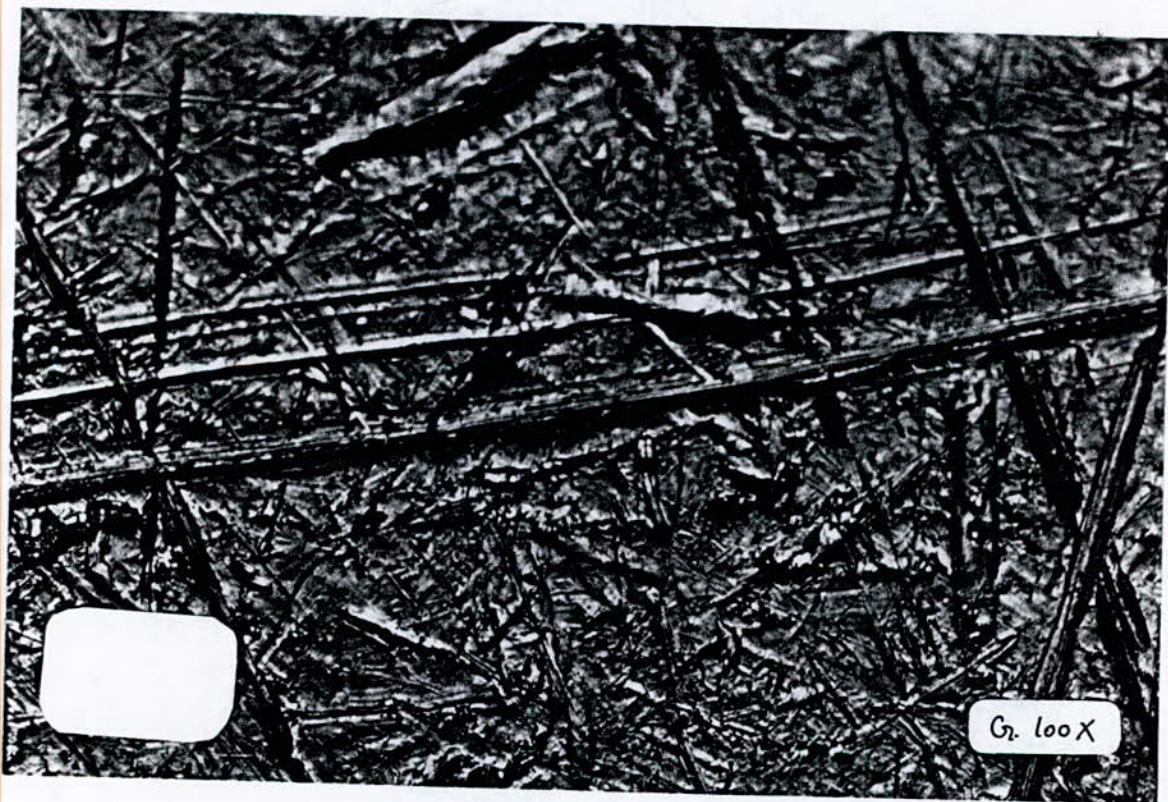
Pour le deuxième couple le cupro-nickel a perdu en masse et en dimension avec changement de l'aspect extérieur par contre pour l'acier il y a eu un dépôt négligeable (film mince) d'une partie du Cuivre en solution (micrographie: 22,23,24,25)

Interprétation :



Gr. 100X

micrographie 19: Acier inox (- Nipour) (Essai dans l'eau de mer)

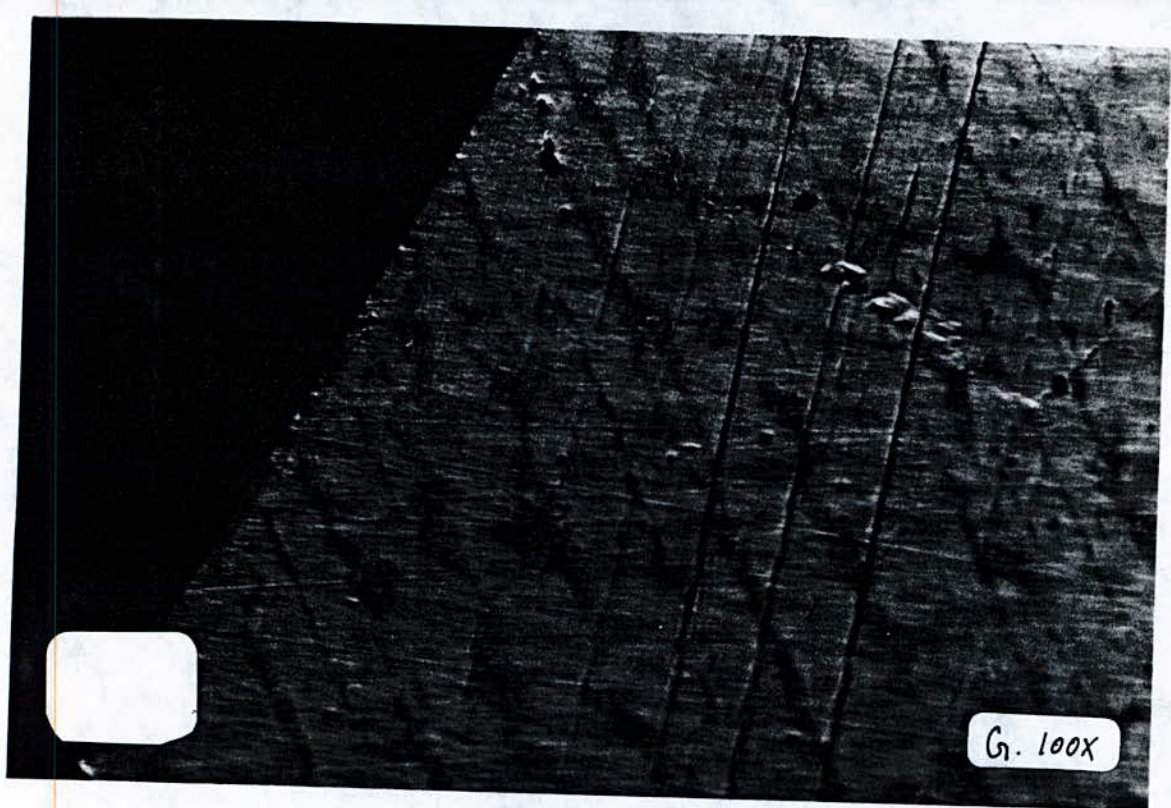


Gr. 100X

micrographie 20: Acier inox (Aspect extérieur) de la surface



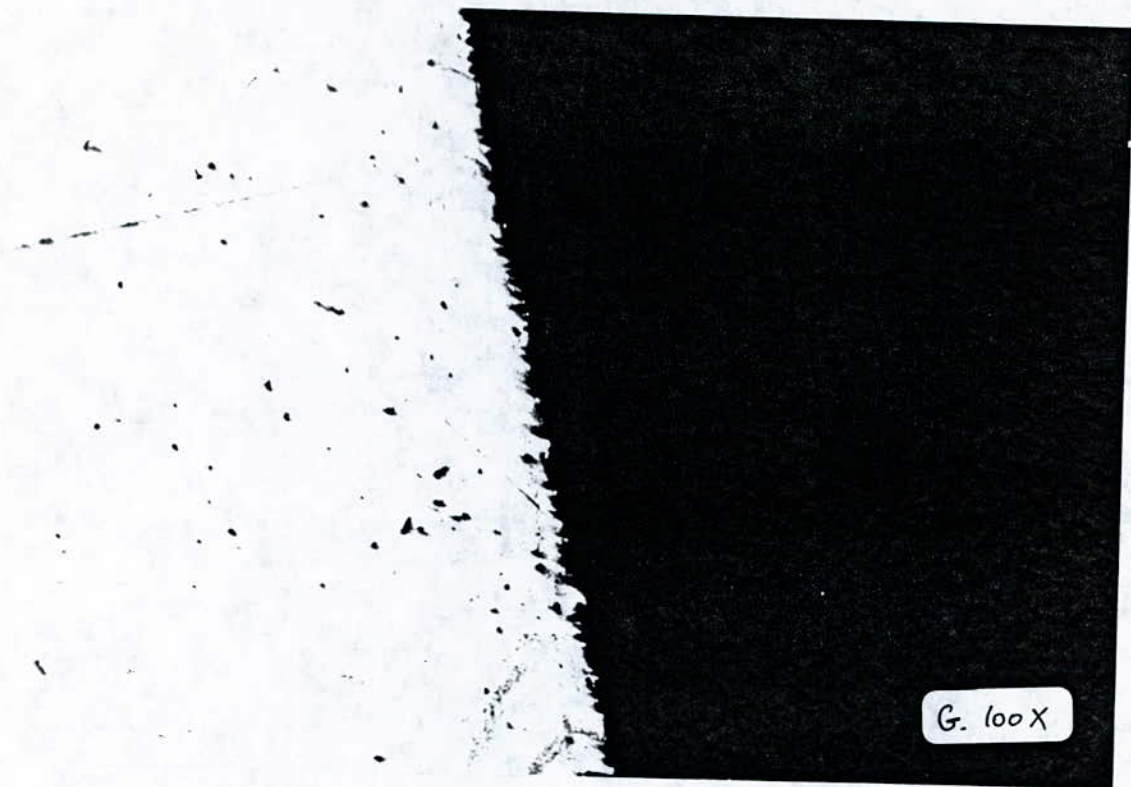
micrographie 21: Nickel pur (-Aminox) (Essai dans l'eau de mer)



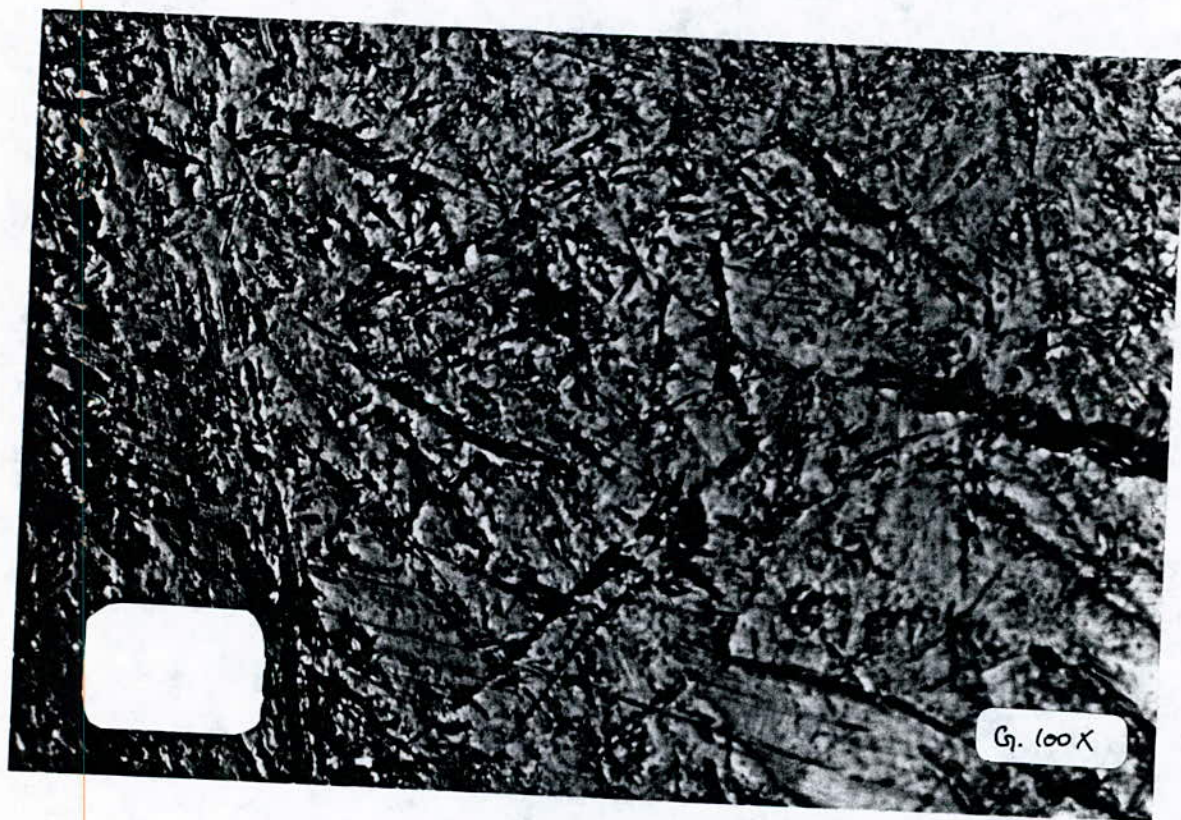
micrographie 22: Cupro-nickel (-Acier inox) (Essai dans l'eau de mer)



micrographie 23: Cupro nickel (Aspect de la surface)



micrographie 24: Acier inox (-Cath) (Essai dans l'eau de mer)



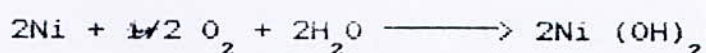
micrographie 25: Acier inox (Aspect de la surface)

Les potentiels d'oxydation de l'acier inoxydable étudié et du nickel pur sont presque égaux avec celui du nickel pur qui est légèrement supérieur ($V \simeq 0,03$ v) ce qui explique la faible dissolution des ions Ni^{2+} .

D'après les réactions on a :



Le produit de corrosion se formera par l'intermédiaire de la réaction suivante :

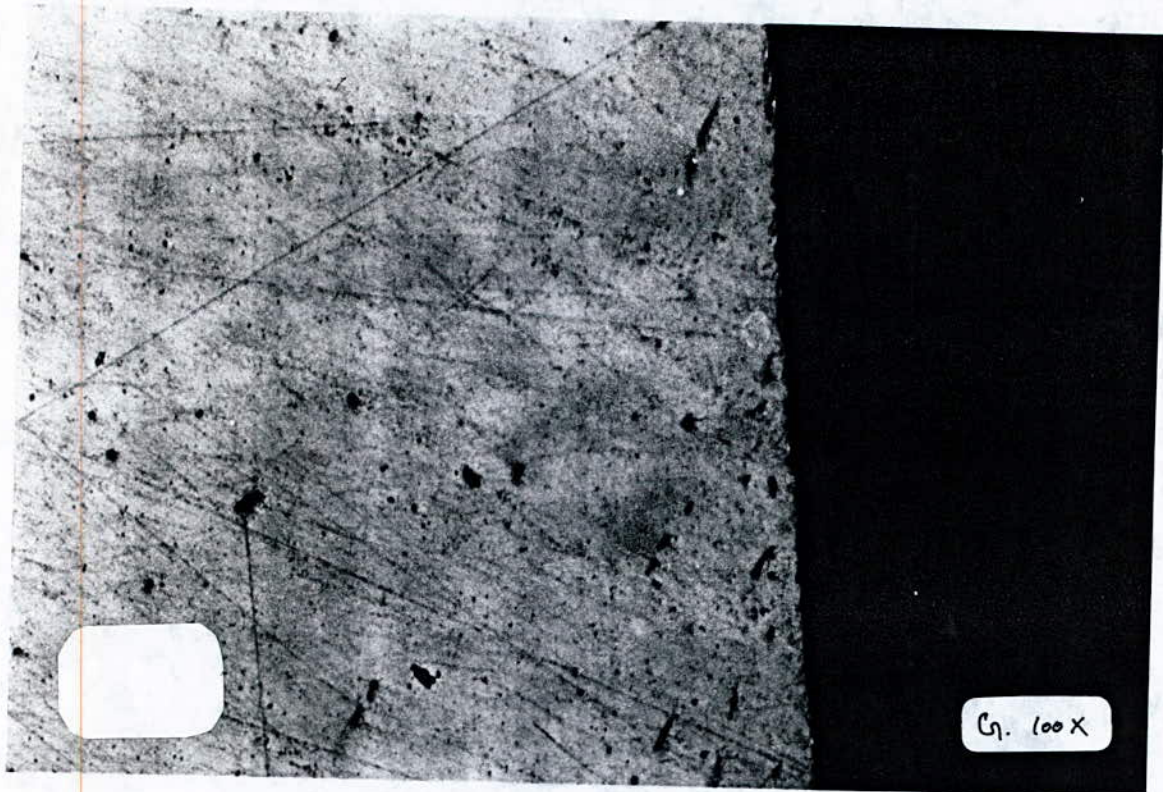


La cinétique de cette réaction est très faible due à la faible variation du potentiel. Le produit de corrosion $Ni(OH)_2$ sera en faible quantité. L'aire de la surface du nickel en contact avec l'acier perdra des ions Ni^{2+} qui formeront le produit de corrosion $Ni(OH)_2$ et qui sera par suite légèrement ou totalement dissous.

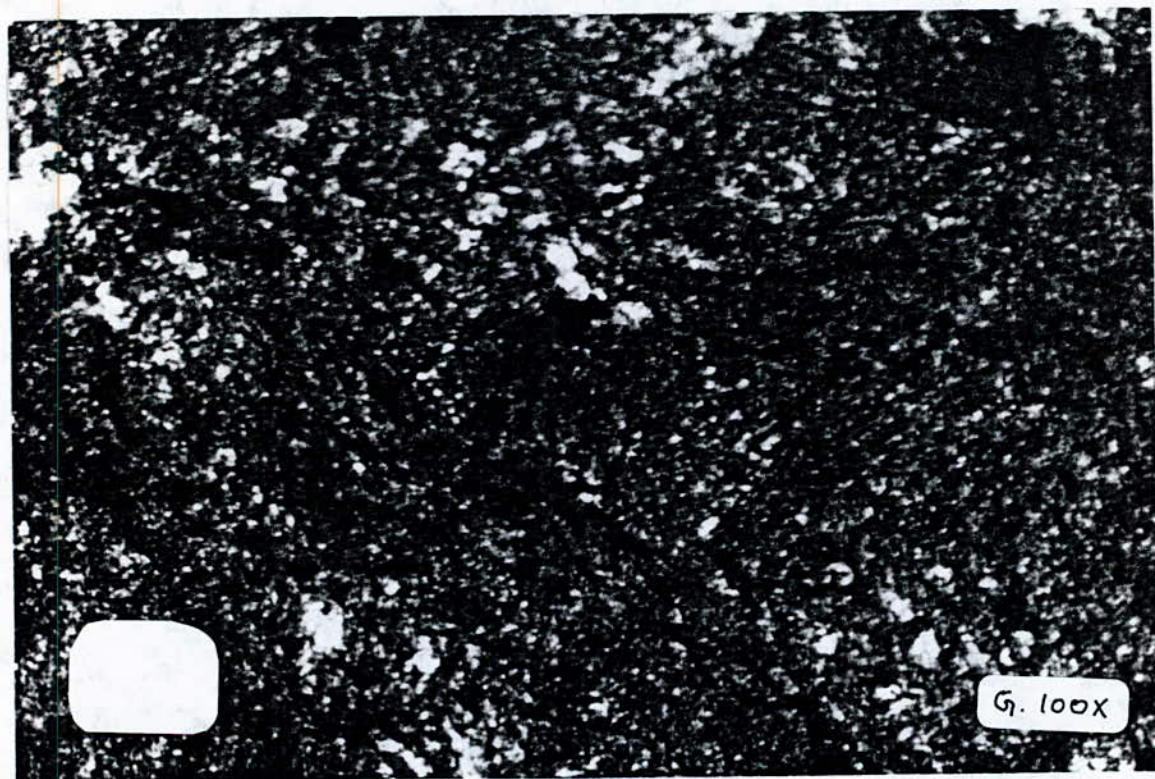
Les potentiels d'oxydation de l'acier inoxydable et du cupro-nickel sont assez éloignés. La cinétique de la réaction est relative à la variation du potentiel entre l'acier inoxydable et le cupro-nickel ($V \simeq 0,18$ v). La vitesse de cette réaction est plus grande que celle du premier couple galvanique



Le cupro-nickel se corrode au contact de l'acier. Cette corrosion donne un produit de corrosion de forme $Cu(OH)_2$. La couche corrodée se dépose sur l'aire de contact de la surface



micrographie 26: nickel pur (essai dans la sueur)



micrographie 27: nickel pur (Aspect de la surface)

de l'acier inox avec celle du cupronickel

La vitesse de dissolution du produit de corrosion $\text{Cu}(\text{OH})_2$ est plus grande que celle du $\text{Ni}(\text{OH})_2$ ⁽¹⁾. La variation de l'épaisseur de la couche de corrosion est presque nulle.

7/ Essai d'immersion dans la sueur :

Les échantillons des différents matériaux sont immergés complètement dans la sueur. La réaction se déroule entre la solution et l'échantillon. Le test se déroule à température ambiante pendant un temps de 408 h. Les résultats sont les suivants :

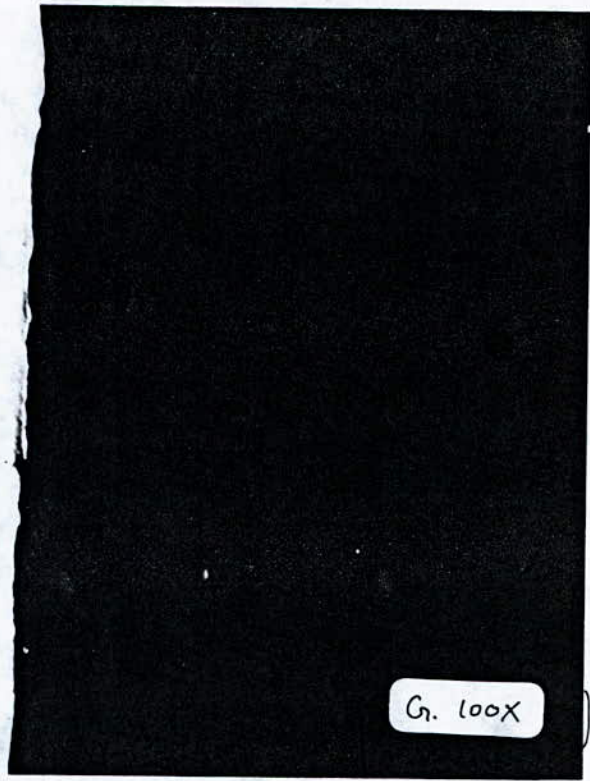
Matériau	mesures initiales			mesures finales			variations		
	masse (g)	diam. (mm)	épai. (mm)	masse (g)	diam. (mm)	épais. (mm)	Δm (g)	Δd (mm)	Δe (mm)
Nickel pur	11.876	30.56	1.81	11.8709	30.54	1.81	-0.005	-0.02	0
Cupro-Nickel	7.016	24.54	1.64	7.0069	24.56	1.635	-0.009	-0.08	-0.005
Acier inox	6.159	24.64	1.66	5.9362	24.42	1.64	-0.2228	-0.022	-0.02

Observation :

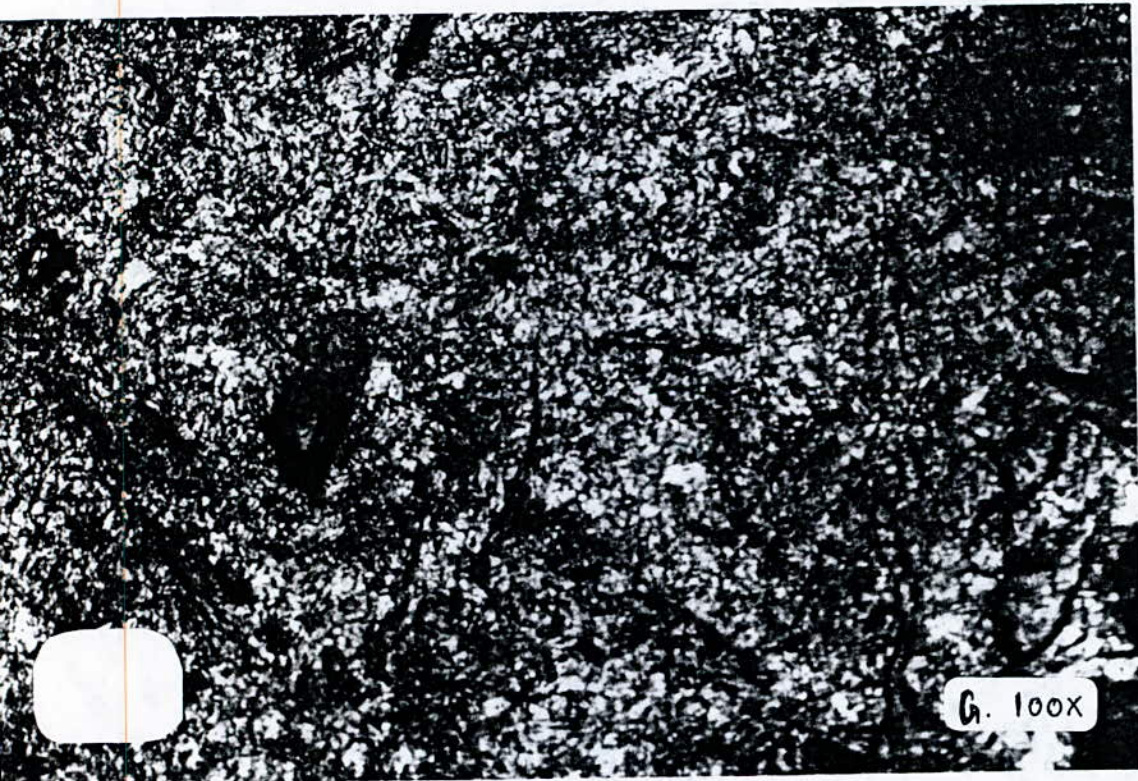
Cet essai montre la corrosion intense des échantillons pour le Nickel pur la corrosion est uniforme, la corrosion débute au niveau du cordon (taux d'écrouissage au niveau du cordon est inférieur au taux d'écrouissage au milieu de la pièce). Le taux de corrosion est de l'ordre de 0,31 (g/m²/jour) ($1,884 \cdot 10^{-9} \mu\text{m}/\text{an}$) (micrographie : 26,27).

Le cupro-nickel perd en épaisseur (0,172 ion / an). Il est moins résistant que le nickel pur dans la sueur (micrographie :28,29).

(1) voir annexe " corrosion handbook " (UHLIG)



micrographie 28: ~~Cupro-nickel~~ (Essai dans la sueur)



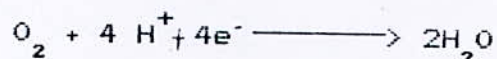
micrographie 29: Cupro-nickel (Aspect de la surface)

L'acier inoxydable est très actif, le taux de corrosion par pénétration est donné par 0,4724 (cm/an). Cette perte est liée à l'aspect extérieur car il y a formation de piqûres (micrographie : 30,31).

Interprétation :

Le mécanisme de corrosion pour le nickel pur et le cupro-nickel se fait par un dépôt soluble. Les vitesses de formation du film corrosif par dépôt de produit de corrosion et de dissolution de ce même produit sont presque égales ; la corrosion est sous dépôt soluble obtenu par le mécanisme de précipitation-redissolution

Les réactions qui en découlent sont :

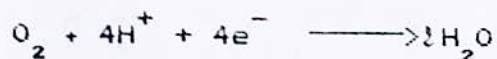
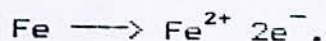


Les deux réactions globales sont :



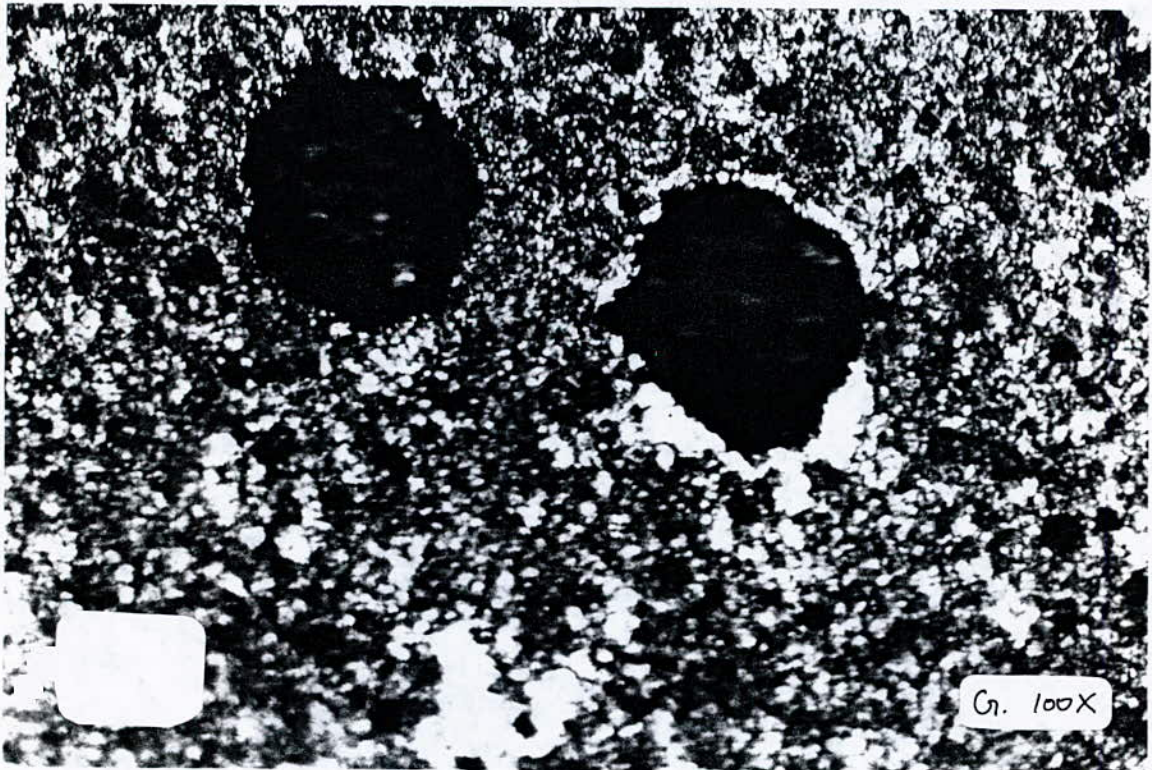
Les ions Ni^{2+} et Cu^{2+} passe en solution à nouveau après la transition par l'intermédiaire du dépôt de corrosion (corrosion sous dépôt soluble).

Le mécanisme de la corrosion de l'acier inoxydable se fait par piqûres :





micrographie 30: Acier inox (Essai dans la sueur)



micrographie 31: Acier inox (Aspect de la surface)

La présence des anions provoque la corrosion au niveau des sites préférentiels qui induit à la formation de micropiqûres. La zone entourant la piqûre est entourée par les anions qui sont en faible quantité, donc la dissolution du métal sera faible et le dépôt de corrosion sera aux alentours de la piqûre.

REMARQUE

Pendant l'immersion le métal interagit avec la solution et il y a formation d'un composé MCl . La concentration de ce composé dans la solution influe sur le type de corrosion (une forte concentration provoque une corrosion par piqûre ou par crevace). Ce produit MCl est sous forme d'ions ; les ions Cl^- jouent le rôle de catalyseur car il provoque la réaction :



Cl^- favorise la formation de l'oxyde qui vient en premier lieu sans oublier la formation d'autres produits mais qui viennent en second ordre avec des quantités très faibles comparées avec le produit de corrosion principal "MOH"

CONCLUSION

Les différents paramètres (frottement, milieu corrosif, aération, température, etc...) sont pris séparément, mais en réalité, dans notre vie quotidienne, ces différents paramètres influent tous en même temps sur les pièces conduisant alors à une dégradation plus rapide que l'estimation calculée.

Les milieux choisis sont censés refléter le comportement de ces pièces vis-à-vis de l'état naturel d'utilisation. Les essais à l'eau de mer et au brouillard salin caractérisent l'effet de l'aération sur les matériaux utilisés et surtout l'influence de l'oxygène sur les phénomènes de corrosion.

Les résultats obtenus classés dans le tableau suivant :

MATERIAU	RESISTANCE A LA CORROSION	RESISTANCE A L'USURE	REISTANCE AU TERNISSEMENT (Brillan.)
Nickel pur	1	2	2
Cupronickel	3	3	3
Acier inox	2	1	1

D'après ces résultats nous pouvons dire que l'acier inoxydable ferritique est meilleur que le cupronickel et équivalent au nickel mais ses avantages reposent sur les paramètres suivants : son coût, sa légèreté, le procédé d'élaboration des flans et de fabrication des monnaies, ce qui diminue les frais d'obtention des pièces finales prêtes à la circulation.

On peut recommander l'utilisation de l'acier inox austénitique (ASTM 304) au lieu du cupronickel à cause de la haute résistance à la corrosion et au ternissement, du fait, du haut pourcentage des éléments d'addition Cr+Ni (éléments qui élèvent la résistance à la corrosion et à l'usure). Le prix de l'acier inox austénitique est proche de celui de l'acier inox ferritique, et le coût d'élaboration de ses flans et de fabrication de ses pièces est le même ce qui favorise son utilisation.

Du point de vue économique on dresse le tableau ci-dessous qui représente l'avantage de l'utilisation de l'acier inox à la place du cupronickel pour les pièces de 1 DA. et à la place du nickel pur pour les pièces de 5 DA (pour l'année 1990), pour une tonne de pièces

TYPE DE PIECES	MATERIAU	NOMBRE DE PIECES	DIFFERENCES DE PIECES	DIFFERENCE DE PRIX PAR RAPPORT A L'ACIER INOX
Pièces de 5 DA	Acier inox	96200	+ 22400	
	Nickel pur	83.300	-	+ 6.000 \$
Pièces de 1 DA	Acier inox	162.300	12.900	-
	Cupronickel	139.900	-	+ 2.000 \$

A N N E X E

TABLEAU I - Série standard des f. e. m. des métaux

Métal - Ion d'Equilibre	Potentiel d'électrode / Potentiel Normal d'électrode d'hydrogène
Au - Au ⁺³	1.498
Pt - Pt ⁺²	1.2
Pd - Pd ⁺²	0.967
Ag - Ag ⁺	0.799
Hg - Hg ⁺²	0.788
Cu - Cu ⁺²	0.337
H ₂ - H ⁺	0.000
Pd - Pd ⁺²	- 0.126
Sn - Sn ⁺²	- 0.136
Ni - Ni ⁺²	- 0.250
Co - Co ⁺²	- 0.277
Cd - Cd ⁺²	- 0.403
Fe - Fe ⁺²	- 0.440
Cr - Cr ⁺³	- 0.244
Zn - Zn ⁺²	- 0.763
Al - Al ⁺³	- 1.662
Mg - Mg ⁺²	- 2.363
Na - Na ⁺	- 2.714
K - K ⁺	- 2.925

TABLEAU II - Effet des éléments d'addition sur la résistance à la corrosion par piqûres pour les aciers inox

Taux de corrosion	Perte de masse
Elément	Effet sur la résistance à la corrosion
Inch / an (ipy)	274 x p
On / an (copy)	3050
Dunce / feet ² / jour	
Chrome	Augmente
Nickel	Augmente
Molybdène	Augmente
Silicon	Diminue sauf en présence de Mo il augmente
Titane	Augmente la résistance dans le pelchlorure de Fer Fe Cl ₃ et dans d'autre milieu il n'a pas d'effet
Soufre	Diminue
Silicium	Diminue
Carbone	Diminue
Azote	Augmente

TABLEAU IV - Série galvanique des métaux et alliages commerciaux dans l'eau de mer

Platine
Or
Graphite
Titane
Argent
Chlorimet 3 (62 Ni, 18 Cr, 18 Mo)
Hastelloy C (62 Ni, 17 Cr, 15 Mo)
Acier inoxydable austénitique au Mo (passif)
Acier inoxydable 18 - 8 (passif)
Acier inoxydable ferritique 17 - 30 % Cr (passif)
Inconel (80 Ni, 13 Cr, 7 Fe) (passif)
Nickel (passif)
Monel (70 Ni, 30 Cu)
Cupro-nickel (60 - 90 Cu, 40 - 10 Ni)
Bronzes (Cu - Sn)
Cuivre
Brasses (Cu - Zn)
Chlorimet 2 (66 Ni, 32 Mo, 1 Fe)
Hastelloy B (60 Ni, 30 Mo, 6 Fe, 1 Mn)
Inconel (actif)
Nickel (actif)
Étain
Plomb-étain
Acier inoxydable austénitique au Mo (actif)
Acier inoxydable austénitique (18 - 8) (actif)
Ni Résistant (au Fer)
Acier inoxydable au chrome, 13 % (actif)
Acier

BIBLIOGRAPHIE

- 1 - Grand Larousse Encyclopédique (1982)
- 2 - Rapport technique VDM "Monnaies VDM" (1986)
- 3 - LACOURCELLE - Protection contre la corrosion
- 4 - UHLIG - "The corrosion handbook" (1966)
- 5 - UHLIG - "Corrosion et protection" (1970)
- 6 - AKIMOV - "Théorie et méthode d'essai de la corrosion des métaux" (1971)
- 7 - J.L. CROLET - "Métaux - corrosion - industrie n°757 (1988)
- 8 - G. FONTANA - "Corrosion engineering" (1988)
- 9 - JALLEKAT et K. QUANG - "Métaux - corrosion - industrie" n° 721 (1985)
- 10 - Techniques de l'Ingénieur "Milieux corrosifs" (1986)
- 11 - P. POUPEAU - "Diagramme d'équilibre", M70 (1986)
- 12 - J.M. DEFRANOUX - "Corrosion en milieu aqueux de métaux et alliages M150 (1986)
- 13 - J. HOCHMANN - "Aciers inoxydable" M320, M323 (1986)
- 14 - BOULET - "Usure" B585 (1986)
- 15 - A. TOUAN - "Aspect des surfaces frottantes" Conférence A.T.T.T. du 8/11/1986.
- 16 - G. COLIN - "Les mécanismes de l'usure et du frottement" Conférence A.T.T.T. du 6/11/1986.
- 17 - R. GHRAB - "Thèse de fin d'études", réalisation d'un Appareil d'usure, (1988)
- 18 - J.BARBERRY Technique de l'ingénieur "données numérique" M433, (1986)

