

THESE

Présentée pour obtenir

LE DIPLOME DE DOCTORAT EN-SCIENCES
SPECIALITÉ : GÉNIE MÉCANIQUE

PAR

KAID-AMEUR Djilali

**COMPORTEMENT Á L'USURE DES MATÉRIAUX DE
CONSTRUCTION MÉCANIQUE SOUS L'EFFET DES FACTEURS
ENVIRONNEMENTAUX**

Soutenue le **03 septembre 2012.** devant le jury composé de:

Président:	Sadok Ahmed	Professeur	Université de Mostaganem
Examineur:	Bachir Bouiadjra abbes	Professeur	Université de S.Bel-Abbes
Examineur:	Achour Tarek	Maitre de conf.A.	Université de S.Bel-Abbes
Examineur:	Ouinass Djamel	Professeur	Université de Mostaganem
Rapporteur:	Hebbar Ahmed	Professeur	Université de Mostaganem

- Remerciements -

Je tiens tout d'abord à exprimer ma plus vive gratitude à Messieurs les membres du jury pour avoir accepté d'analyser ce travail et d'en être rapporteurs.

Je remercie profondément toute l'équipe du département de mécanique de l'université de mostaganem.

Je tiens également à remercier vivement le Professeur A.Hebbar, avec qui travailler est un plaisir, et sans qui certains des travaux présentés dans ce mémoire n'auraient pas vu le jour.

Je tiens également à remercier toute l'équipe du Hall de technologie de la faculté des sciences et de la technologie pour m'avoir soutenu pendant toute la durée de la préparation de ce travail, pour leurs aides, et pour les bons moments passés ensemble. Je tiens également à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont participé à la réalisation de ce travail. Un grand merci à ma famille pour son encouragement et son aide.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

I RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Tribologie

I.1.1.Diverses approches

I.1.2.Définitions

I.1.3.Sources des frottements

I.2.Comportement des matériaux de construction à l'usure

I.2.1.Mécanismes du frottement et de l'usure et relations avec les propriétés intrinsèques de surface

I.2.2.Surfaces frottantes (comportement des pièces en mouvement relatif au niveau des surfaces de contact)

I.2.3.Modèles de Bowden et Tabor sur le frottement

I.2.4.Phénomènes thermiques (Températures de frottement)

I.3.Usure

I.3.1.Usure des surfaces

I.3.2.Types d'usure

I.4.Traitement anti-usure

I.4.1.Traitements mécaniques

I.4.2.Traitements thermiques proprement dits

I.4.3.Traitements divers

I.4.4.Traitements superficiels par induction (principes et intérêts)

I.5.Effet de l'hydrogène sur les aciers

I.5.1.Généralités sur l'hydrogène

I.5.2.Mécanismes de pénétration de l'hydrogène

a- Pénétration à partir d'un environnement gazeux

b- Pénétration à partir d'un environnement liquide

I.5.3.Mécanismes de piégeage

a- Piège attractif

b- Piège physique

c- Piège mixte

I.5.4.Mécanismes de la fragilisation des métaux par l'hydrogène

I.6.Effet de l'eau de mer sur les aciers

I.6.1.L'oxygène et sa réduction sur les aciers

I.6.2. Le bio film et l'eau de mer

a- Morphologie du bio film

b- Composition du bio film

c- Transport de matière dans le bio film

I.6.3. Comportement des aciers inoxydables en eau de mer

a- Corrosion des aciers inoxydables en eau de mer

b- Corrosion caverneuse ou par crevasses

c- Corrosion influencée par les micro-organismes (CIM)

d- Evolution du potentiel de corrosion

e- Evolution des processus de réduction d'O₂ sur des aciers inoxydables en fonction du vieillissement en eau de mer

f-.Hypothèses proposées pour expliquer l'évolution du comportement électrochimique des aciers inoxydables en eau de mer naturelle

I.7.Méthodes statistiques de planification des expériences

I.7.1.Statistiques

- a- Traitement d'une variable
- b- Corrélation de deux variables
- I.7.2.Planification d'expérience
- I.7.2.1.Plans d'expériences
- I.7.2.2.Modèle mathématique

II EXPERIMENTATION

- II.1.Réalisation du banc d'essai
- II.2.Résultats des essais réalisés sur les échantillons « hydrogénés »
- II.3.Valeurs expérimentales des pertes de masse des échantillons immergés en eau de mer (oxydation)
- II.4.Détermination du modèle mathématique décrivant l'usure des échantillons « hydrogénés »
 - II.4.1.Calcul d'optimums et l'usure correspondante
 - II.4.2.Graphes et discussions
- II.5.Détermination du modèle mathématique décrivant l'usure des échantillons « immergés » en eau de mer
 - II.5.1.Calcul d'optimums et l'usure correspondante
 - II.5.2.Graphes et discussions

III CONCLUSION GENERALE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES

Résumé :

On a essayé par ce travail d'approcher le plus près que possible l'influence des facteurs les plus imposants sur l'usure comme la vitesse, la charge appliquée et la nature des matériaux de construction mécanique des pièces dites « antagonistes » ou en contact dans les différents mécanismes sous l'effet de facteurs d'environnement comme l'hydrogène et l'eau de mer.

En premier lieu, on a été amené à réaliser un dispositif assurant le maintien du « pion (frotteur)» avec la possibilité de recevoir des charges différentes tout en profitant de la variation de la vitesse du coulisseau de l'étau-limeur utilisé comme un banc d'essai (tribomètre) ; Ajoutant à ces deux paramètres d'influence, qui est la dureté des matériaux de construction mécanique considérés (XC48 et A60) fixés séparément à l'aide d'un étau à mors parallèles matérialisant ainsi le troisième paramètre . On signale que ces expériences ont été réalisées identiquement en deux contextes naturels différents (pour échantillons chargés en hydrogène et pour les échantillons immergés en eau de mer naturelle) caractérisant le quatrième paramètre. Etablir une série d'essais expérimentaux afin de relever des pesées de masses avant et après chaque essai d'une durée (01Heure) sur une balance électronique et déduire les « pertes de masse » engendrées, suite à l'usure causée par friction du pion sur la surface de contact de l'échantillon. Finalement, à l'aide de la méthode de « planification des expériences », on a pu établir un modèle mathématique régissant le phénomène (perte de masse en fonction des 04 facteurs d'influence suscités et par le biais d'un logiciel «SURFER 32 », on a eu la possibilité de représenter graphiquement chaque cas de figure présenté dans les chapitres VIII.A et VIII.B.

Abstract:

We tried to approach this work with as near as possible the influence of the most imposing of wear such as speed, applied load and nature of building materials mechanical parts called "antagonistic" or contact in the different mechanisms under the effect of environmental factors such as hydrogen and sea water. First, it has been necessary to provide a device for maintaining the "pin (wiper)" with the ability to receive different loads while enjoying the change in speed of the slide of the shaper used as an test rig (tribometer) Adding to these two parameters of influence, which is the hardness of materials engineering considered (XC48 and

A60) determined separately using a parallel-jaw vise materializing and the third parameter. It was noted that these experiments were performed identically in two different natural contexts (for samples loaded with hydrogen and for samples immersed in natural seawater) characterizing the fourth parameter. Establish a series of experimental tests to identify the mass weighed before and after each test period (01Hour) on an electronic balance and deduct the "mass loss" caused, due to wear caused by friction of the peg on the contact surface of the sample. Finally, using the method of "experimental design", it was established a mathematical model governing the phenomenon (mass loss based on 04 factors of influence mentioned above and through a software "SURFER 32", we had the opportunity to plot each configurations presented in Chapters VIII.A et VIII.B .

ملخص:

تطرقنا في هذه المذكرة إلى معرفة مدى ارتباط العوامل الأكثر تأثيرا على أسطح المماس للقطع الميكانيكية المكونة من الصلب بنوعيه (XC48 و A60) في أجواء طبيعية للمحيط العملي كالهيدروجين وماء البحر الطبيعي مع التآكل لأوجه التماس، ونذكر من بين العوامل المذكورة أعلاه (سرعة التحرك البيئي للقطع، قوة الضغط ما بين القطع و نوعية المادة المكونة للقطع أي الصلابة) حيث أنجزنا على متن آلة الكشط جهازا تجريبيا للاحتكاك بهدف القيام بتجارب متتالية للاحتكاك على مختلف القطع المهيأة في السابق (التزويد الهيدروجيني للأسطح والغطس للقطع حسب الفترات المعينة من القبل).

تستغرق كل تجربة ساعة من الزمن على امتداد 72 قطعة وعلى شطري محيطي التجريبتين (A و B) ثم تلي كل تجربة عملية الوزن الدقيق للتمكن من حساب فرق الكتل الذي يوافق كمية التآكل لكل قطعة.

بعدها قمنا باستغلال النتائج رياضيا بواسطة (الطريق الإحصائية لتنظيم التجارب)، وهذا للحصول على نموذج رياضي يربط كل العوامل السالفة الذكر مع حاصل كمية التآكل.

أخيرا، قمنا باستعمال برنامج 32Surfer لرسم بيانات معبرة على كل النماذج الرياضية.

INTRODUCTION GENERALE :

La théorie du frottement semble toujours en retard par rapport à la pratique, bien que le frottement soit impliqué dans de nombreuses disciplines scientifiques. Les industriels s'intéressent depuis de nombreuses années à l'élaboration et la caractérisation des matériaux en vue d'offrir des pièces mécaniques résistantes à l'usure.

L'un des enjeux majeurs de la tribologie est de maîtriser le frottement et l'usure des pièces. En effet, le frottement et l'usure qui se manifestent négativement au bon fonctionnement des ensembles et montages mécaniques et qui engendrent la résistance au déplacement, les pertes par frottement, la dissipation d'énergie, l'élévation de température, le bruit; causant ainsi les effets indésirables comme la perte de cote, la perte de fonction, l'émission de débris, les pollutions de l'environnement, les colmatages des interfaces, l'altération des propriétés mécaniques des composants, la fluctuation des frottements, la dégradation des surfaces et le grippage [1,2,3,4].

Dans le contexte économique actuel, cette compétitivité dépend fortement de la productivité et de la qualité des produits, ce qui se traduit pour les entreprises par des améliorations de la qualité de produits en un temps plus court. Dans un procédé de fabrication mécanique, depuis la mise en forme des métaux jusqu'à l'assemblage final du produit par exemple, cette augmentation de cadence entraîne souvent une accélération de l'usure des pièces ayant pour conséquences des pannes dues au grippage d'un palier ou d'une rotule qui seront d'autant plus lourdes que la cadence de production est plus élevée.

Afin d'augmenter la fiabilité des pièces en frottement et la durée de vie des outils, les ingénieurs proposent souvent des solutions au niveau de l'optimisation de la conception, du choix de matériaux et de traitements de surfaces et de la lubrification. L'enjeu sécuritaire et économique des machines exige souvent une validation préalable par des essais sur banc avant d'intégrer la nouvelle solution dans le système, notamment dans le domaine de transport et de production d'énergie. Le choix d'une méthode d'essais tribologiques représentatifs du système réel devient donc une étape incontournable dans la réussite de l'ensemble du projet.

En ce sens, on a élaboré expérimentalement notre travail afin de déterminer l'évolution de l'usure en fonction des paramètres de services tels que la force de contact entre les deux surfaces, la vitesse de mouvement relatif des deux surfaces, la nature du matériau de la pièce

(surface) sous l'effet de quelques éléments environnementaux tels que l'hydrogène et l'eau saline (de mer) ayant des impacts respectifs de fragilisation et d'oxydation, et la durée de fonctionnement ou de service. Où on tentera d'exprimer cette évolution mathématiquement et qui sera régie par un modèle polynomiale afin de déterminer les conditions optimales qui nous réduisent le plus fortement possible l'usure et de connaître aussi quel paramètre faut-il le corriger et ainsi situer exactement les échéances d'entretien et de maintenance des éléments faillibles et liés aux paramètres considérés.

Les surfaces usinées ne sont jamais parfaites, elles présentent au contraire des défauts de toutes sortes dus aux procédés d'usinage, aux outils, à la matière et à d'autres facteurs. On sait depuis longtemps que ces défauts influent profondément sur le fonctionnement et la tenue en service des mécanismes et la bonne exécution de leurs fonctions comme les guidages, l'étanchéité et la qualité de la fabrication, il existe toujours une échelle suffisamment petite pour qu'ils soient mesurables et la nécessité de les décrire ne date pas d'hier [5,6].

I.RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE :

I.1. Tribologie :

- La "tribologie" est la science des frottements qui interviennent lorsque deux surfaces en contact sont mises en mouvement l'une par rapport à l'autre, produisant une force qui s'oppose au mouvement.

La plupart de ces phénomènes relatifs aux frottements peuvent se comprendre en première approximation sur la base des lois phénoménologiques du frottement énoncées dès le 18ème siècle par Amontons et Coulomb (mais déjà mises en évidence par Léonard de Vinci 200 ans auparavant), à partir de la notion de coefficient de frottement.

I.1.1.Diverses approches :

-Approche économique[3] :

Le frottement et l'usure sont responsables de pertes économiques colossales. Voici quelques exemples chiffrés :En Angleterre (1966), le « Department of Education and Science » estimait à 1 000 000 000 de livres sterling par an les pertes du pays par frottement et usure. Les économies possibles étaient évaluées à :

50 M£ : consommation d'énergie par frottement (« pertes directes »),

10 M£ : frais de lubrification, main d'œuvre, ...

10 M£ : frais de lubrifiants,

230 M£ : maintenance et remplacement de pièces usées,

115 M£ : réparations et pertes par arrêt des machines,

100 M£ : investissements supplémentaires en machines.

On montre aussi dans cette étude que les pertes économiques provoquées par l'usure sont au moins 10 fois plus importantes que celles dues aux forces de frottement ;

En URSS, d'après Journal du frottement industriel, n°6, Janvier 1980 le frottement et l'usure coûtent 10 à 12 milliards de roubles par an (selon Kragelsky, le développement de la science relative à l'usure, au frottement et à la lubrification des corps durs en URSS,).

Aux USA une étude faite par l'ASME, (strategy for energy conservation through tribology, 1977)évalue les pertes dans les systèmes pistons-segments-chemises des moteurs à 0,7 % de la consommation totale d'énergie des États-Unis, soit 100 millions de barils de pétrole par an, coûtant 3 milliards de dollars dont 20 % récupérables en traçant mieux les pièces et en préparant mieux les surfaces.

Tandis qu' en France, on a calculé qu'en 1973, le quart du cuivre importé était destiné aux coussinets et autres pièces frottantes, représentant 2,5 % du déficit de la « balance commerciale », malgré les solutions de remplacement (traitement de l'acier ordinaire, utilisation de matières plastiques ou d'alliages d'aluminium).

Malgré que ces chiffres ne sont pas très récents, mais l'ampleur du phénomène, à quelques détails près, est la même de nos jours [3].

-Approche tribologique [4] :

C'est l'approche du chercheur qui, essayant de comprendre les choses et de découvrir des lois et des phénomènes nouveaux, doit étudier de plus en plus finement les surfaces, leurs substrats, ... Le « tribologue » travaille indifféremment à l'échelle de la machine, de la pièce, de l'aspérité, du cristal élémentaire, de la molécule, voire de l'atome ou de l'électron.

Pour étudier le frottement il faut non seulement posséder un vaste échantillon de connaissances scientifiques, mais aussi disposer du matériel indispensable : machines d'essais spécialisées ou non, appareils de mesure, d'observation ou d'analyse de toutes sortes. De plus, les expériences peuvent être fort longues lorsque l'on étudie le frottement et surtout les phénomènes d'usure, que l'on peut rarement simuler par des procédures accélérées comme on le fait couramment dans d'autres domaines.

Donc, la recherche en tribologie n'est pas facile et le frottement ne s'étudie pas avec des formules. Toutes ces particularités dissuadent fortement les universitaires qui souhaitent soutenir une thèse de choisir les domaines du frottement et de l'usure.

Comment expliquer que l'on continue de fabriquer certains mécanismes selon des méthodes archaïques, génératrices de frais de maintenance anormalement élevés, alors qu'en remplaçant le contact acier/acier des cônes de synchroniseurs de chars d'assaut par un contact cuivre/molybdène, la fiabilité est améliorée et la durée de vie multipliée par 10. le remplacement de coussinets en bronze par de l'acier traité dans les articulations de pelles mécaniques multiplie la durée de vie par 5 et diminue les coûts de 20 à 30 % (coussinets PEL).

Il n'est pas interdit de penser que certaines pannes à répétition, ou l'échange un peu trop fréquent de pièces dites « d'usure », voire la défaillance « programmée » de certains équipements ne relèvent pas seulement d'une faute de conception ou de l'absence de matériaux vraiment appropriés.

I.1.2. Définitions :

On observe deux types de frottements distincts:

1. Le "frottement statique" est celui qui oppose une résistance lorsqu'un objet posé sur un plan est à la limite du glissement pas alors qu'on lui impose une force de traction \vec{F}_T (tangentielle au plan). Cette opposition à la force de traction est par ailleurs expérimentalement proportionnelle au poids \vec{P} de l'objet.

Mais intervient une valeur limite de la force tangentielle de traction à partir de laquelle l'objet commence à glisser. Ce qui permet d'écrire:

$$\|\vec{F}_{T, \text{lim}}\| = \mu_s \cdot \|\vec{P}\| \dots\dots\dots (1)$$

où $\vec{F}_{T, \text{lim}}$ est donc la force limite de traction permettant de faire bouger l'objet initialement statique, μ_s est le "coefficient de frottement statique" sans dimensions et exprime la proportionnalité de la force limite de frottement avec le poids \vec{P} de l'objet.

Remarque: Dans la pratique, il est infiniment facile de déterminer ce coefficient avec un simple dynamomètre pour connaître la force limite et une balance pour connaître le poids de l'objet étudié.

On observe expérimentalement que contrairement à l'intuition, la force limite de traction est en première approximation indépendante de la surface de contact entre l'objet et le sol (dans les limites des cas physiques courants évidemment car plus la surface est petite, plus la pression est grande et alors la surface de contact peut devenir plastique aux hautes pressions).

Autrement dit, si un kilo de sucre est posé sur une table. Pour déplacer cet objet, de poids \vec{P} (la masse multipliée par la constante de gravité), il faut exercer une force \vec{F}_T parallèlement à la surface de la table. Mais l'expérience montre que cet objet ne déplacera pas tant que la force \vec{F}_T est inférieure à une force minimale $\vec{F}_{T,lim}$. Et Amontons et Coulomb ont montré que cette force minimale est directement proportionnelle via un coefficient de frottement statique au poids.

on détaille l'approche de la relation précédente en s'imaginant deux surfaces présentant des rugosités en dents de scie d'un angle α et imbriquées:

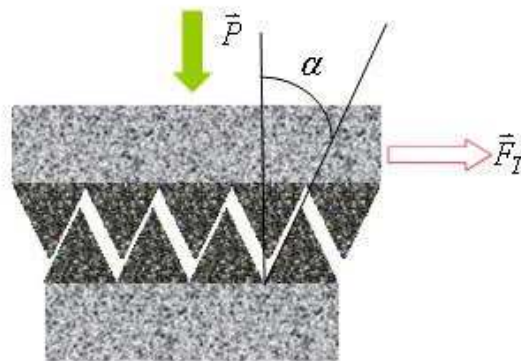


Fig.1 : Imbrication d'aspérités [3]

Si nous appliquons une force normale correspondant au poids \vec{P} et une force horizontale \vec{F}_T nous avons à cause des dents de scie dans le cas limite la situation suivante:

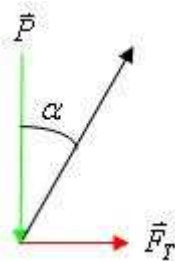


Fig.2 : Disposition d'efforts [3]

Nous voyons alors bien que la pièce mobile commencera à bouger que quand il y aura début de glissement soit lorsque:

$$\|\vec{F}_T\| = \tan \alpha \cdot \|\vec{P}\| \dots\dots\dots (2)$$

Pour simpliste qu'elle soit, cette approche permet de lier le frottement (statique) aux caractéristiques de la rugosité. De plus les valeurs expérimentales typiques des coefficients de frottement statique, de l'ordre de 0.3, correspondent à des pentes de la rugosité de surface de l'ordre de 15-20 degrés, ce qui est tout à fait compatible avec les caractéristiques typiques que l'on peut mesurer pour les rugosités de surfaces!

Cet argument repose cependant sur une hypothèse implicite : l'emboîtement parfait entre les rugosités des deux surfaces. Nous parlons dans ce cas de "surfaces commensurables". Ce n'est bien sûr pas le cas en général dans la nature : même à l'échelle atomique, deux surfaces idéales, présentent des légères différences de distance inter atomique qui empêchent l'emboîtement. Une légère disparité suffit à rendre très irrégulière la répartition des points de contact entre les deux surfaces contrairement au cas commensurable. Nous parlons alors de "surfaces incommensurables".

Autrement dit, nous aboutissons très vite à la conclusion que le frottement entre deux surfaces commensurables en tout point est non nul, tandis qu'il s'annule exactement si ces deux surfaces sont en tout point incommensurables.

2. Le "frottement dynamique" est celui qui oppose une résistance lorsqu'un objet posé sur un plan est déjà en glissement. Cette opposition à la traction est par ailleurs expérimentalement proportionnelle encore une fois au poids de l'objet tel que:

$$\|\vec{F}_T\| = \mu_D \cdot \|\vec{P}\| \dots\dots\dots (3)$$

Mais avec le "coefficient de frottement dynamique" (qui existe en plusieurs sous-familles: coefficient de roulement, de glissement,) qui est en général beaucoup plus petit que le coefficient de frottement statique:

$$\mu_S \ll \mu_D \dots\dots\dots (4)$$

Donc le frottement n'est pas le même au départ de notre objet que lors de son glissement. Cela correspond très bien à notre expérience quotidienne du frottement (lors de déplacements de meubles dans nos habitations par exemples).

A nouveau, nous remarquons expérimentalement que contrairement à l'intuition, la force de traction est indépendante de la surface de contact entre l'objet et le sol.

Ainsi, que l'on pose le kilo de sucre bien à plat ou sur la tranche, la force de frottement est la même (si la qualité de surface est la même de tous les côtés du paquet de sucre)!

Un autre fait étonnant concerne la valeur typique de ces coefficients de frottement, qui s'écarte assez peu de $\mu_{D,S} \cong 0.3$, pour des surfaces très différentes les unes des autres. La technologie permet toutefois de concevoir des surfaces avec des coefficients de frottement soit bien plus petits ($\mu_{D,S} \cong 0.001$) soit plus grand ($\mu_{D,S} \gg 1$).

Ces deux lois, sont appelées "lois de Coulomb":

$$\|\vec{F}_{T,lim}\| = \mu_S \cdot \|\vec{N}\| \quad \|\vec{F}_T\| = \mu_D \cdot \|\vec{N}\| \dots\dots\dots (5)$$

L'origine simpliste du frottement entre deux solides est donc dû au fait que:

- Tout solide n'est jamais lisse mais possède des aspérités qui rendent la surface de contact rugueuse (les aspérités s'imbriquent partiellement ou non et provoquent plus ou moins de frottement).
- Les impuretés entre les deux surfaces de contact sont souvent plus importantes au niveau des sources de frottement que les imbrications des aspérités de surface.
- Le frottement est faiblement dépendant de la surface car la rugosité à l'échelle atomique est telle que seulement un très faible pourcentage de la surface totale des deux objets sont réellement en contacts (surface de contact réelle est donc beaucoup plus petite que la surface de contacta apparente) ce qui explique que la force de traction tangentielle soit proportionnelle au poids car cela force la surface de contact réelle à augmenter [5].

-Gamme de variation :

Le facteur de frottement est une grandeur qui varie très fortement en fonction de très nombreux paramètres : état de surface et lubrification évidemment, mais aussi vitesse, pression, temps de maintien en charge, etc. On relève les ordres de grandeur suivants :

plus de 1	pour des surfaces dégazées dans le vide, avec parfois soudure immédiate
0,3 à 1	pour le frottement de deux métaux non préparés dans l'air, à sec
0,1 à 0,2	pour la plupart des métaux dans l'air avec les lubrifiants usuels (huile) dans le cas de la lubrification onctueuse
0,05 à 0,1	pour des surfaces préparées convenablement, lubrifiées avec du graphite, du bisulfure de molybdène ou certains acides gras
0,02 à 0,05	pour le frottement sur la glace, pour le PTFE sur lui-même sous charge suffisante à faible vitesse
0,01 à 0,001	pour les paliers lisses en régime hydrodynamique bien calculés, en l'absence de tout contact solide (par exemple, dans les anciens essieux de wagons)
0,0001	ou moins pour les guidages hydrostatiques ou aérostatiques
0,00001	ou moins encore pour les paliers magnétiques actifs
Dans ces deux derniers cas, le bilan énergétique global doit toutefois tenir compte de la puissance nécessaire à l'alimentation du palier en fluide sous pression ou en électricité	

Tab.1a : Quelques coefficients de frottement selon les paires de surfaces en contact. [10]

-Valeurs numériques indicatives :

Les valeurs qui suivent sont des ordres de grandeur donnés à titre purement indicatif. Du reste dans les documentations techniques on trouve souvent des données très divergentes.

couple de matériaux	facteur d'adhérence			facteur de frottement		
	à sec	limite	onctueux	à sec	limite	onctueux
acier doux sur						
acier doux (air sec)		1,2		1,2		
acier doux (vapeur d'eau)				1,2		
	à sec	limite	onctueux	à sec	limite	onctueux
acier mi-dur sur						
acier mi-dur	0,3			0,2	0,17	0,11
acier trempé	0,2	0,17	0,14	0,17	0,15	0,1
acier, boulonnerie				0,28 à 0,43		
acier, frettage par pression d'huile					0,12	
acier, frettage par pression de glycérine					0,18	
acier, frettage à chaud					0,14	
id., surfaces dégraissées				0,2		
alliages de WOOD	0,7		0,1			
aluminium (alliages)				0,16	0,12	0,08
antifriction base étain		0,25		0,8	0,20	0,11
antifriction base plomb		0,25		0,55		0,10 à 0,08

bisulfure de molybdène						
70 MPa					0,07	
350 MPa					0,05	
1 400 MPa					0,045	
2 800 MPa					0,023	
<p>Le facteur de frottement est moins élevé en ambiance sèche Dans les huiles de viscosité moyenne, 1 % de bisulfure de molybdène peut diviser f par 2</p>						
acier mi-dur (suite) sur						
bronze	0,35	0,18	0,1	0,3	0,1	0,08
caoutchouc				1 à 4		
carbure de tungstène	0,5	0,15				
chlorure de polyvinyle				0,5		
cuir				0,18 à 0,35	0,12 à 0,18	
cupro-plomb	0,2			0,2	0,12	0,08
fonte	0,4	0,18	0,1	0,4		0,05 à 0,1
graphite				0,1		
indium en film mince			0,08			
nickel (aboutit au grippage)				0,6 à 0,8		
nylon				0,3		
poly méthacrylate de méthyle				0,45		

polystyrène				0,5		
P.T.F.E.				0,05		
	à sec	limite	onctueux	à sec	limite	Onctueux
acier inoxydable sur						
alliage léger traité Zinal				0,2		
aluminium sur						
aluminium (air sec)				1,9		
aluminium (vapeur d'eau)				1,1		

Tab.1b: Quelques coefficients de frottement selon les paires de surfaces en contact. [10]

I.1.3. Sources des frottements :

Les causes du frottement, telles qu'on les imagine de nos jours, sont multiples et interdépendantes.

À partir de 1950 Bowden et Tabor ont énoncé pour la première fois des idées claires sur le sujet, mais il est intéressant de considérer les cheminements de leurs raisonnements qui ont été suivis au cours des siècles.

Une étude complète du problème ne saurait se limiter aux seules surfaces d'objets réputés secs et propres, puisqu'une partie au moins des résistances passives a son origine à l'intérieur même des matériaux et dans les films lubrifiants solides, liquides et gazeux dont on fait largement usage dans les machines. Le frottement immédiat entre deux pièces mécaniques, c'est-à-dire celui qui a lieu sans interposition du moindre produit, lubrifiant ou autre, est l'exception. Le frottement médiat, qui met en jeu d'autres éléments que les deux pièces dont on veut assurer le contact, est la règle.

-Imbrication des aspérités [4]:

Léonard de Vinci (1500) s'intéressa à l'étude de la mécanique, ses recherches sur les mouvements l'ont amené à pressentir les notions d'inertie, de moment, de rendement, de frottement, de centre de gravité. Cent ans avant Galilée, il entrevit également la notion de conservation de l'énergie.

Il a beaucoup plus dessiné de mécanismes qu'il n'en a réalisés. Ses esquisses de machines à mesurer les forces de frottement, très semblables à celles qui seront réalisées par Coulomb trois siècles plus tard, sont les ancêtres des tribomètres.

Les lois fondamentales de Léonard de Vinci, qui furent redécouvertes deux siècles plus tard par Guillaume Amontons (1699), s'énoncent ainsi :

Les forces de frottement varient en proportion des forces normales aux surfaces en contact ;

Elles sont indépendantes de l'aire apparente de contact des surfaces en présence ;

Elles dépendent des matériaux et de l'état de leurs surfaces.

Guillaume Amontons remarqua que l'effort des polisseurs de glace ne dépendait pas de l'aire du polissoir mais seulement de l'effort normal de pression.

Bernard Forest de Bélidor (1737) imaginait les surfaces comme formées d'aspérités hémisphériques régulières (des atomes), celles d'une surface devant être franchies par celles de l'autre.

Si l'on dispose trois sphères selon un arrangement triangulaire, une quatrième sphère venant se loger dans la « niche » formée par les trois premières doit franchir un obstacle avant qu'on puisse la faire glisser. Une fois qu'elle est « montée » au-dessus des autres, le déplacement doit être plus facile.

La valeur de l'effort tangentiel nécessaire pour déplacer une rangée de sphères par rapport à l'autre à l'effort normal qui presse les deux rangées, et trouva la valeur (selon Belidor 1737) :

$$f = (1/8)^{1/2} \approx 0,35 \dots \dots \dots (6)$$

Cette valeur correspond bien aux valeurs du facteur de frottement obtenues avec des matériaux communs comme le bois, le fer, la pierre frottant à sec dans l'air. Elle rend compte aussi du fait que le facteur de frottement statique est généralement un peu plus fort que le facteur de frottement dynamique : il est généralement plus facile d'entretenir un mouvement que de le provoquer.

Mais la théorie de Bélidor fut assez vite contestée et Navier, qui réédita en 1819 les travaux de Bélidor ou il conclut que la résistance provenant du frottement est indépendante de la grandeur des surfaces en contact, ce qui a été confirmé depuis ; qu'elle est à peu près la même pour le bois, le fer, le cuivre, le plomb ;

Il est en effet assez facile d'imaginer que pour que la théorie de Bélidor ait un sens, les atomes des deux pièces doivent s'imbriquer les uns dans les autres, ce qui est hautement improbable avec les objets usuels.

Non seulement il faudrait que les atomes aient la même organisation au niveau des deux surfaces, ce qui n'est guère possible qu'avec des cristaux parfaits, mais ils devraient en outre avoir des structures de même dimension et convenablement orientées. Cela fait beaucoup de conditions.

Coulomb [5] complète les travaux précédents en remarquant la différence réelle mais souvent légère des efforts de frottement statique et dynamique, a admis qu'en outre :

Les forces de frottement sont pratiquement indépendantes de la vitesse de glissement des surfaces. Et il réalisa de nombreuses expériences en 1780. Quelques éléments de son appareillage sont reproduits dans la figure ci-contre.

On estimait le coefficient de frottement sec des métaux à des valeurs de l'ordre de $1/3$ à $1/4$. Les travaux ont été souvent repris par la suite, en particulier par Arthur Morin qui effectua un grand nombre de mesures sur des corps très variés, lubrifiés ou non, confirmant ainsi les lois.

En 1847, Gustave Adolphe Hirn [11], distinguait le frottement médiat et le frottement immédiat, suivant la présence ou non de lubrifiant. S'il put confirmer les résultats de Coulomb relatifs au frottement sec, en revanche il reconnut l'influence d'autres facteurs en présence de

lubrifiant : étendue des surfaces en regard, charge, vitesse, durée des essais, température. Il essaya même l'air comme lubrifiant, trouvant alors des coefficients de frottement de 1/10 000.

-Formation et cisaillement de jonctions :

Selon Fichter [4] : « de même que l'on peut constater, sur deux corps rugueux frottant l'un sur l'autre, l'arrachement de petites particules, de même on trouve que deux surfaces polies, adhérant l'une à l'autre, par cohésion, ne peuvent être séparées par traction normale (à sec ...) sans l'arrachement de parties de ces surfaces. On est en droit de conclure qu'il y a eu, en ces points, soudure véritable ».

Les Britanniques Frank P. Bowden et David Tabor [12], établissent des théories fondées sur l'adhésion. Dans le frottement de glissement des métaux et d'autres matériaux, outre les phénomènes d'enchevêtrement des rugosités, il se produirait une succession de soudures partielles suivie de l'arrachement des éléments amenés en contact. Cette théorie explique de nombreux phénomènes comme le transfert de matière entre deux corps et le frottement sur les films minces solides, mais en laisse d'autres.

La première idée est l'exiguïté des zones de contact : les mesures de Bowden pour une aire théorique de contact de 21 cm² (telle que l'on pourrait la dessiner sur un plan) donnent le tableau ci-après.

L'aire réelle de contact est mesurable à partir de la résistance électrique. Elle est minuscule, indépendante de l'aire théorique, et dans un large domaine elle varie proportionnellement à la charge. Il en résulte de très fortes pressions (pour notre exemple 1 000 N/mm²) qui, paradoxalement, ne changent pas avec la charge.

Aire et charge de contact	
Charge	Aire effective de contact
en daN	en cm ²
500	0,0500
100	0,0100
5	0,0005
2	0,0002

Les fortes pressions et les fortes températures sont deux facteurs favorables à la diffusion mutuelle des atomes des deux pièces. Elles se produisent ici simultanément. Si une filiation

cristalline est possible, des microsoudures se forment et il faut les cisailier ou les arracher pour que le glissement se poursuive.

Cela différencie deux modes de frottement, le frottement par cisaillement, acceptable, et le frottement par soudure, généralement très néfaste, dont nous reparlerons à propos de l'usure. Dans les cas extrêmes il y aura grippage, arrêt du mouvement relatif par frottement interfacial.

-Energie de déformation [12] :

Des auteurs comme « sir John Leslie » (1804), « Gumbel » (1921), « Epifanov » (1934) ou « Ling » (1967) attribuent la résistance de frottement au travail de déformation des solides et en particulier, d'après Ling, au travail de déformation plastique. Le frottement n'est pas une simple action superficielle : il concerne aussi les pièces sur une certaine profondeur, du fait des lois de l'élasticité et de la résistance des matériaux.

Les déformations pouvant survenir sous l'effet du frottement sont de deux sortes : irréversibles, lorsqu'elles entraînent des déformations qui persistent après que leur cause a été supprimée, et réversibles, lorsque le matériau n'est pas sorti de son domaine élastique.

Le niveau de contraintes atteint dans les zones de contact fait que l'apparition de déformations plastiques irréversibles est dans tous les cas hautement probable, même dans des matériaux réputés fragiles, car ces derniers peuvent parfois se déformer sans se rompre lorsqu'ils sont soumis à des compressions triaxiales suffisamment importantes.

La résistance aux glissements moléculaires est relativement faible dans les matériaux homogènes et constitués d'arrangements ordonnés de particules de même taille (comme cela se produit pour les structures cubiques à face centrées et hexagonales compactes, par exemple). On montre que les glissements sont plus faciles lorsqu'ils se produisent dans les directions de plus fortes densités atomiques. Par contre, pour les matériaux hétérogènes, les glissements sont plus difficiles : le fer pur, par exemple, est relativement mou, on peut le durcir en substituant dans le réseau cristallin des atomes plus petits ou plus gros que les atomes de fer, ou encore en insérant de petits atomes dans les interstices que laissent entre eux

les gros atomes métalliques. Ceci doit être soigneusement « dosé » : un excès d'atomes étrangers augmente en effet la fragilité.

-Théories globales :

D'après Kragelsky (URSS) [12], le frottement a une double nature, mécanico-moléculaire. Il est déterminé par la déformation en volume du matériau et par le fait de surmonter les liens adhésifs (jonctions soudées) développés entre les parties de surfaces frottantes au contact ; Le frottement à l'échelle macroscopique est donc un phénomène complexe, jamais assimilable à un processus simple ou à une succession de processus simples, même en se bornant à des corps physiquement et chimiquement mieux définis que les matériaux industriels. Il doit être considéré comme le résultat statistique de divers phénomènes thermodynamiques élémentaires agissant simultanément en de nombreux points des couches superficielles ou sub-superficielles.

-Manifestations du frottement :

Le frottement et l'adhérence engendrent des efforts mécaniques (des forces et des couples) s'opposant aux mouvements relatifs et les déformations des objets. Ces efforts apparaissent au niveau des surfaces en contact et aussi au sein même des matériaux solides ou fluides qui se déplacent ou se déforment. Le frottement est un problème à trois dimensions, il concerne donc des volumes et pas seulement des surfaces ; Ainsi on peut considérer que les frottements sont des résistances passives. Contrairement à ce que nous croyons l'usure est de multiforme, et ne peut être réduite à une simple perte de matière. Sous ce terme se cachent des phénomènes diversifiés, qui provoquent un ensemble de transformations géométriques et physicochimiques des couches superficielles soumises au frottement. L'usure provoque des pertes économiques énormes mais elle n'est pas toujours nuisible. Les usinages par abrasion (affûtage, meulage, rectification, rodage pris dans ce sens) ne sont rien d'autre que de l'usure ; on cherche alors à enlever le maximum de matière avec un minimum d'énergie, tout en laissant sur les pièces des surfaces utilisables. [12]

I.2. Comportement des matériaux de construction à l'usure :

I.2.1. Mécanismes du frottement et de l'usure et relations avec les propriétés intrinsèques de surface :

Les relations entre les propriétés de surface d'un matériau et son comportement tribologique sont aujourd'hui encore mal connues. Plusieurs mécanismes macroscopiques ou microscopiques interviennent dans un contact glissant, d'origine mécanique (déformations plastiques, élastiques, rhéologiques) ou d'origine physico-chimique (forces d'interaction, modification chimiques des surfaces). Ils gouvernent le comportement du contact. Le but premier de cette opération scientifique est d'une part de pouvoir isoler chacune des contributions de ces mécanismes et d'autre part d'en évaluer le poids respectif. La démarche suivie dans cette opération scientifique consiste à mener :

- Premièrement des expérimentations tribologiques simples et permettant le contrôle d'un maximum de paramètres (environnement, température, géométrie, pressions de contact)
- Deuxièmement des caractérisations fines des propriétés mécaniques et physico-chimiques de la surface des matériaux considérés, et ce à plusieurs échelles, nanométriques, micrométriques et millimétriques.

Avec le temps, on a élaboré empiriquement des matériaux remplissant les fonctions des lubrifiants et d'anti-usure comme le graphite, $MO S_2$ ou $Ti N$ en couches minces. Ajouté à cela la découverte de nouveaux matériaux de propriétés intéressantes mais aussi complexes et ayant un comportement mécanique « viscoélastique ou viscoplastique ». Ce qui laisse à déterminer l'influence de leurs propriétés sur les propriétés de surface et le comportement tribologique des matériaux. [1]

Le frottement et l'usure font intervenir les interfaces (entre les surfaces de contact) ou se produisent des transformations. Ces surfaces présentent une constitution de différentes couches : couche adsorbée (appartenant au solide); couche écrouie par usinage ; couche intacte mais accessible aux efforts. Et de là on remarque que le phénomène du frottement est lié à la structure granulaire que renferment les matériaux cristallins et les coefficients de

frottement varient en fonction du mouvement (glissement, pivotement ou roulement). La répartition de la chaleur due au frottement est inégale à travers les diverses couches des pièces en contact et dans les interfaces.

Donc finalement l'usure, est un phénomène difficile à identifier, vu la multitude des facteurs présents dans les surfaces et qui sont liés au frottement dépendant : De la nature des matériaux en contact ; La présence ou non du film fluide ; La qualité de l'état de surface des pièces en contact.

I.2.2. Surfaces frottantes (comportement des pièces en mouvement relatif au niveau des surfaces de contact) :

Frank P. Bowden et David Tabor [2] ont ainsi présenté les choses : « Les surfaces, même les plus polies, sont grossières à l'échelle atomique ». Les surfaces usinées ne sont jamais parfaites, elles présentent au contraire des défauts de toutes sortes dus aux procédés d'usinage, aux outils, à la matière et à d'autres facteurs. On sait depuis longtemps que ces défauts influent profondément sur le fonctionnement et la tenue en service des mécanismes et la bonne exécution de leurs fonctions : guidages, étanchéité, quelle que soit la qualité de la fabrication, il existe toujours une échelle suffisamment petite pour qu'ils soient mesurables et la nécessité de les décrire ne date pas d'hier.

Plus la qualité d'une surface est proche de la perfection, plus elle est difficile à obtenir et plus son coût est élevé. Des surfaces inutilement précises causent des pertes économiques qui peuvent être considérables.

En réalité, les surfaces se présentent comme suit :

Surface d'un corps : elle est constituée par l'ensemble des points qui délimitent la portion de l'espace où se trouve la matière de ce corps.

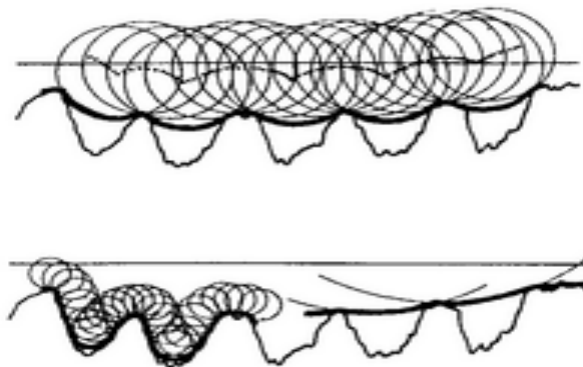
Surface géométrique : c'est la surface parfaite, idéale. Sur le dessin, elle est définie géométriquement par le bureau d'études, à l'aide de cotes nominales.

Surface spécifiée : elle résulte de la surface géométrique, transformée par le bureau des études qui prescrit les limites de réalisation de cette surface à l'aide de symboles et de valeurs numériques en complément des cotes nominales du dessin.

Surface réelle : c'est celle qui est obtenue au cours de la fabrication.

Surface mesurée : elle résulte de l'exploration de la surface réelle par des instruments de mesure. Le degré d'approximation de la surface mesurée par rapport à la surface réelle dépend de la technique de mesure appliquée, de la précision de l'instrument de mesure utilisé et de la nature même de la surface réelle.

Les ordres de défauts



Profils mesurés

Fig. 3 : Présentation des surfaces. [3]

En pratique, on distingue plusieurs ordres de défauts :

1er ordre : écarts de forme et de position : les défauts de planéité, cylindricité, parallélisme, perpendicularité se constatent avec un comparateur dont la touche de rayon R décrit une surface enveloppe appelée parfois surface apparente. On obtient l'écart du premier ordre par référence à la surface géométrique.

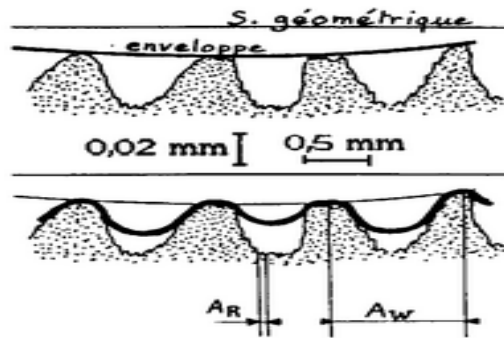


Fig. 4 : Ordre de défauts (Ondulation et rugosité de 3^{ème} ordre)

2^e ordre : ondulation : l'écart des positions de deux palpeurs coaxiaux, dont l'un est le palpeur de rayon R précédemment utilisé pour déterminer le défaut de forme et l'autre une sphère de très petit rayon r, possède généralement une longueur d'onde moyenne ou pas moyen A_W , dont l'ordre de grandeur est un petit nombre de mm. L'ondulation est une oscillation de basse fréquence provenant essentiellement des imperfections des machines-outils.

3^{ème} et 4^{ème} ordre : rugosité : ces micros ondulations, dues à des vibrations de haute fréquence, accompagnent le passage des outils coupants et l'enlèvement de la matière. Le 3^{ème} ordre correspond à des stries ou sillons, défauts périodiques ou pseudo périodiques de pas A_R voisin de 0,1 mm, le 4^e ordre provient des arrachements qui, eux, sont apériodiques.

5^{ème} et 6^{ème} ordre : ils correspondent respectivement aux structures cristalline et moléculaire

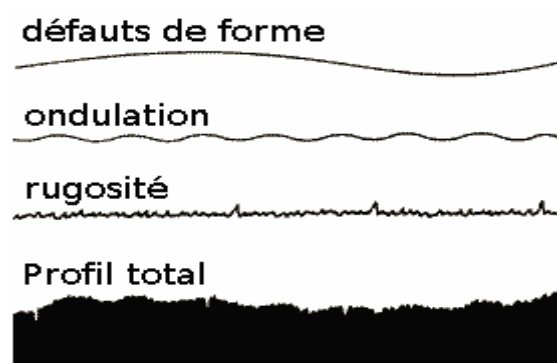


Fig. 5 : Profil total [5]

Le profil total est la somme des écarts du premier au quatrième ordre.

Ce découpage est parfaitement arbitraire : il y a autant de défauts de forme et donc de rugosités, que de manières de choisir le rayon R qui engendre la surface apparente. Comme l'a fait remarquer l'Ingénieur Général Nicolau [6]: « une surface n'est pas rugueuse en soi, mais par rapport à une surface déterminée qui la touche. C'est ainsi, par exemple, que l'on pourrait imaginer une surface qui apparaîtrait très rugueuse au toucher de l'homme et qui serait parfaitement lisse pour le ciron qui la parcourrait. À monter et descendre les côtes sur un sol qui, à l'échelle de ses pattes, prendrait le caractère d'une patinoire, cet animalcule n'aurait que la sensation d'erreur superficielle de forme ».

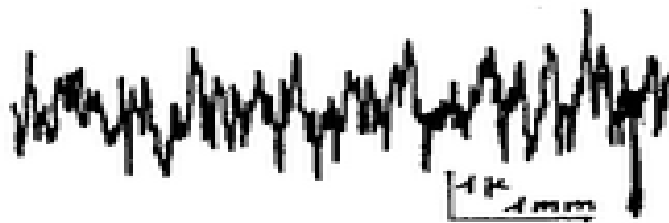


Fig. 6 : Enregistrement des états de surfaces [7]

I.2.3. Modèles de Bowden et Tabor sur le frottement [8]:

Les surfaces impliquées dans un contact mécanique présentent une rugosité microscopique. Leurs contacts effectifs mettent en jeu un ensemble de « micro -contacts » entre les aspérités des surfaces, dont l'aire totale réelle ne représente qu'une faible proportion de l'aire apparente; d'où on définit le rapport suivant :

$$\frac{\text{Aire réelle de contact}}{\text{Aire apparente}} = \frac{A_r}{A_n} = \frac{A_r F_z}{A_n F_z} = \frac{\text{Pression nominale } P}{\text{Pression plastique } H} \quad (7)$$

H: valeur caractéristique de la dureté du matériau et représente une pression de saturation au niveau du contact et des rapports, on écrit que la force de cisaillement est proportionnelle à

l'aire réelle de contact. La résistance totale au cisaillement des micro contacts s'exprime alors :

$$F_x = \tau A_r \dots\dots\dots(8)$$

Il est essentiel de noter que dans τ , est cachée toute l'ignorance des mécanismes de rupture des contacts

Le frottement entre deux surfaces conduit essentiellement à trois processus physiques fondamentaux :

- le cisaillement des micro-jonctions adhésives,
- le labourage des surfaces par aspérités,
- le cisaillement du film intercalaire entre les aspérités.

Bowden et Tabor [6] privilégient les deux premiers processus le troisième est lié aux études appropriées de la lubrification.

On suppose que la force tangentielle est : $F_x = (F_x)_{\text{labourage}} + (F_x)_{\text{cisaillement}}$

Le coefficient de frottement s'écrit (le cisaillement des micro jointures est dominant en cas ou la pente des aspérités est suffisamment faible)

$$\mu = (F_x / F_z) = (\tau A_r / P_r A_r) = (k A_r / H A_r) = (k / H) \dots\dots\dots(9)$$

τ est la contrainte de cisaillement , que l'on suppose être la contrainte de cisaillement du matériau le plus tendre k,

$$k = Y/2 = H / 6 \dots\dots\dots(10)$$

(D'après le critère de Tresca $\tau_{\text{max}} = 1/2 (\sigma_1 - \sigma_2) = k = 1/2 Y$ avec $3Y = H$)

dans ces conditions le coefficient de frottement doit être :

$$\mu = 1/6 = 0.166$$

en fait, ce n'est pas toujours le cas mais dans cette théorie « Bowden et Tabor » admettent que la présence d'une couche de « contamination » entre les aspérités des surfaces limite la contrainte de cisaillement, et donc que : $\tau < k$. ainsi on écrit : $\tau = f k$.

Donc le coefficient de frottement $\mu = f (k / H)$

$0 < f < 1$, ou f est un paramètre appelé de « contamination ».

L'application de la relation $F_x = A_r \tau$ est évidente, si on souhaite obtenir une force minimale de frottement, il est donc nécessaire de minimiser l'aire de contact réelle et la contrainte de cisaillement.

C'est ce qui est reporté sur la figure suivante :

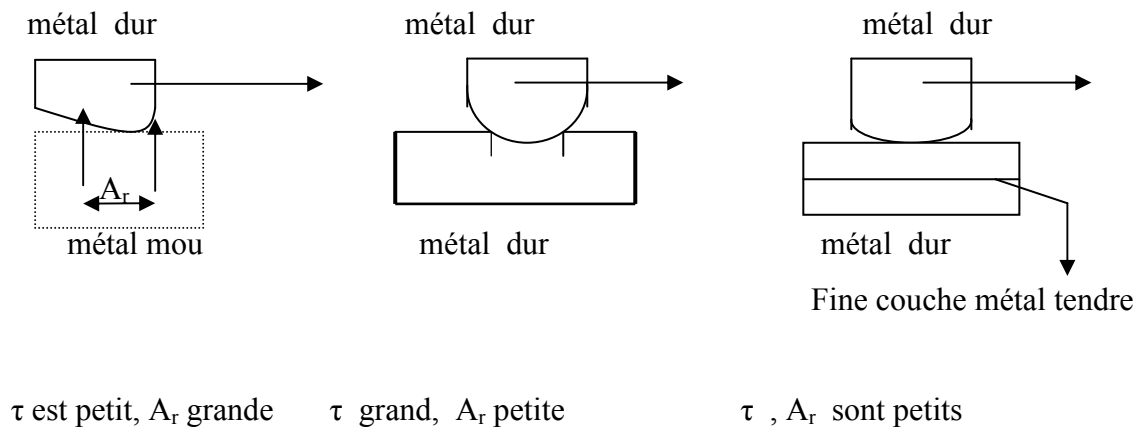


Fig. 7 : Aires de contact [8]

Pour minimiser l'aire de contact, on privilégie l'emploi de métaux durs, comme les aciers trempés.

Pour minimiser le cisaillement, on recouvre la surface de contact par un film mince d'un métal tendre, comme (le plomb ou l'argent).

L'épaisseur du dépôt reste un paramètre important. Il est en général nécessaire de déposer un film, dont l'épaisseur est comprise entre 0,1 et 1 μm .

-Identification des coefficients de frottement (premières approches) [10] :

Les forces de frottement correspondent à des pertes d'énergie appartenant à deux catégories :

- d'une part, celles qui correspondent à la rupture des ponts créés par l'adhérence, donc au cisaillement épidermique.
- d'autre part, celles qui correspondent aux diverses déformations : labourage et constitution du bourrelet frontal, déformation plastique des petites aspérités, glissements dans et entre les grains du matériau.

-Valeur des coefficients de frottement :

La valeur d'un coefficient de frottement de glissement selon COURTEL [9] dépend par ordre d'importance décroissant :

- du couple de matériaux en contact.
- de la lubrification.
- de l'état de surface des matériaux.
- de la température.

La valeur d'un coefficient d'adhérence pour un couple de matériaux donnés est supérieure ou égale à la valeur du coefficient de frottement de glissement pour ce même couple de matériaux, du fait de l'influence de l'état de surface.

Ce qui permet de confondre les deux valeurs, pour une première approche et dans la majorité des cas.

La valeur d'un coefficient de frottement ne dépend pas :

- de la nature géométrique et de l'aire de la surface de contact.
- de l'intensité de l'effort normal.

I.2.4. phénomènes thermiques (Températures de frottement) :

Les résistances passives produisent de la chaleur qui se répartit inégalement entre les deux corps, de sorte que le choix du matériau de la pièce la mieux ventilée est extrêmement important. On s'intéresse au cas de frottement « sec » (sans lubrification).

BOWDEN a pris un élément de thermocouple en fer, frotte sur une plaque réalisée en « Constantin : alliage à base de titane » (constitue l'autre élément du thermocouple), la tension électromotrice est mesurée à l'aide d'un oscilloscope et on obtient le graphe des variations de cette tension en fonction du temps (sur la même figure), deux températures sont définies :

θ_m = température moyenne du contact de surface A_n (elle est stable dans le temps si la vitesse de déplacement relatif des deux corps est constante)

θ_f = nommée température « éclair » ou « flash », varie énormément (fluctuations) correspondant à des impulsions de courtes durées mais très élevées et on admet qu'elle est due à des chocs des aspérités. Ces deux températures sont élevées par rapport à l'ensemble des pièces frottantes.

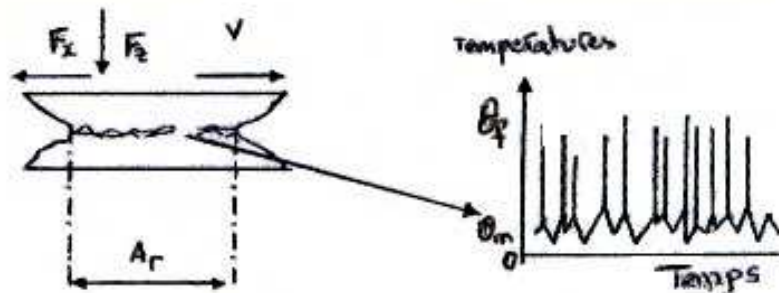


Fig. 8 : Observation expérimentale réalisée par BOWDEN [11]

-Calcul de la température moyenne de surface :

Considérons « q » la quantité de chaleur dégagée par unité de surface et de temps, exprimée par :

$$q = (\mu F_Z V) / A_n \text{ (unité en [joules/m}^2\text{s] ou en [watt/ m}^2\text{])} \dots\dots\dots(11)$$

avec :

μ : coefficient de frottement, F_Z la charge normale appliquée sur le corps frotteur, V vitesse de glissement et A_n l'aire apparente de contact .on peut écrire l'équation du terme « q »

$$\text{aussi : } q = \mu P V = T.V \dots\dots\dots (12)$$

Sur le tableau suivant des résultats expérimentaux sont relevés mettant en valeur tous les facteurs des équations précédentes : (Tableau (2))

P (pa)	μ	T (pa)	V (m/s)	T+2a / V(s)	Q (W / m ²)
10 ⁹	0.1	10 ⁸	1	10 ⁻⁴	10 ⁸
10 ⁷	0.1	10 ⁶	0.001	10 ⁻¹	10 ⁶

Tab 2 : Résultats expérimentaux des facteurs [11]

Cas d'étude : un contact circulaire de rayon a (avec 2a=100 μ m) est soumis à une pression P, et une vitesse V.

On constate que les flux de chaleur sont énormes en négligeant les pertes thermiques par convection et par radiation ,le flux se partage par conduction entre les deux corps (avec une partie du flux δq contribue à l' échauffement du corps frotteur et la différence $(1-\delta)q$ produit un échauffement du plan de l'autre pièce , δ est appelé coefficient de partage et compris entre]0,1[)

$$Q \text{ (quantité totale de la chaleur)} = A_n q \dots\dots\dots(13)$$

Le problème consiste à déterminer les températures de deux corps qui résultent de ces deux flux ; dans l'exemple du glissement d'un frotteur sur un corps plan, on peut remarquer que la source de chaleur est statique par rapport au frotteur et qu'elle est en mouvement par rapport au plan (corps).

-Cas thermiques considérés :

Le cas classique (source de chaleur statique), ou le frotteur est considéré comme un solide semi-fini soumis à une densité de flux de chaleur constante.

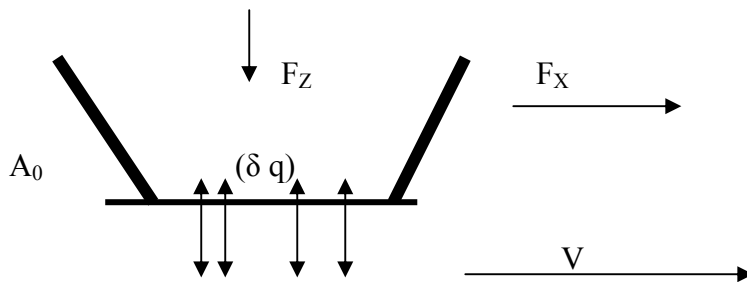


Fig. 9 : Contact d'un frotteur sur un plan et répartition des flux [12]

θ_0 est appelée la température ambiante du frotteur loin de la zone de contact ou l^* est la valeur de cette distance ,après une période transitoire la température à l'intérieur du frotteur reste stable .

à l'équilibre le gradient de température $d\theta / dz$ est constant et la température de surface produite par $(\delta.q)$ est :

$$\theta_s - \theta_0 = (\delta.q.l^*) / k_1 \dots\dots\dots (14)$$

ou k_1 est la conductibilité thermique du frotteur en $[J / (s. m.^{\circ}C)]$

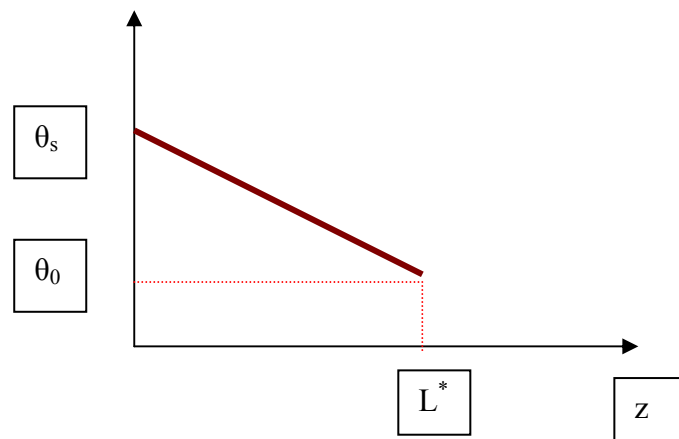


Fig. 10:Gradient thermique pour un contact statique [13]

En général, l^* est de l'ordre de la demi largeur du contact « a » ,et fonction de la forme de la pièce , et surtout de la capacité calorifique du fluide baignant le contact .Si le fluide est de l'air , l'évacuation de la chaleur se fait mal et l^* est grande ; si le fluide est de l'eau, l^* est petite ;si le fluide est un hydrocarbure, l^* a une valeur intermédiaire et dans ce cas l'équation (14) devient :

$$\theta_s - \theta_0 = (\delta.q.a) / k_1 \dots\dots\dots (14')$$

En revanche, le cas de la source de chaleur en mouvement pose un problème délicat (démonstration de JEAGER) [14]. La température de surface $\theta(x,y)$ n'est pas uniforme sur l'aire de contact, son profil ressemble à celui indiqué dans la figure suivante (9). De plus, le gradient $d\theta/dz$ peut être très fort. Ainsi pour l'acier [source de chaleur de 10^8 watt/m^2 à 7 m/s produit une température de 700°C en surface alors qu'à $70 \mu\text{m}$ en dessous la température n'est plus que de 70°C].

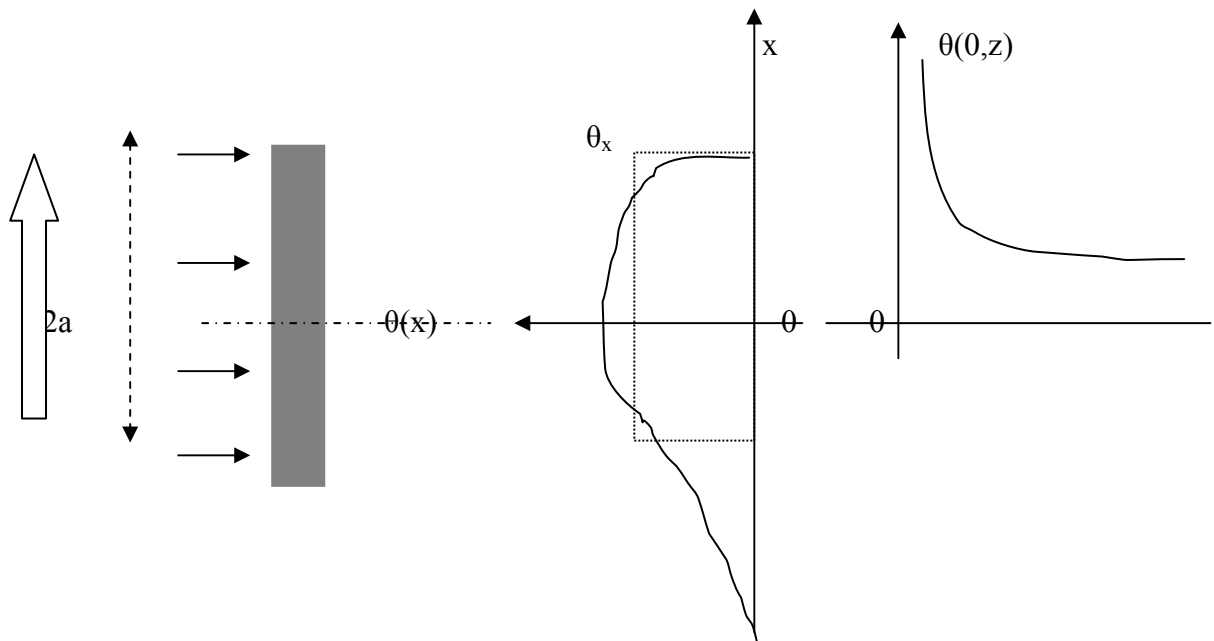


Fig. 11 : Répartition de la température sur l'aire de contact [14]

On fait apparaître deux temps : $t_c = 2a / V$; t_c est la durée de contact

$t_d = a^2 / \alpha$ (α est la diffusivité thermique de l'acier)

et pour comparer ces deux temps on calcule le rapport, qui est le nombre de Péclet

$$\Phi = t_d / t_c = (V / 2a) \cdot (a^2 / \alpha) \text{ et d'où } \Phi = (V \cdot a) / 2\alpha \dots\dots\dots (15)$$

-si $\Phi < 0.2$ les deux sources en contact sont considérées statiques et en considérant que les deux corps ont la même conductibilité thermique, le coefficient de partage est $\delta = 0.5$;

-si $\Phi > 200$ la source de chaleur n'est plus considérée comme statique.

L'élévation de la température moyenne d'une source de chaleur est donnée par Jeager :

$$\theta_s - \theta_0 = \left(\frac{[(1 - \delta) \cdot q \cdot a]}{k_2} \right) \cdot [\alpha_2 / V \cdot a]^{-1/2} \dots \dots \dots (16)$$

	Diffusivité α (m ² /s)	Conductivité k J / (s m °C)
Acier au carbone	$1.3 \cdot 10^{-5}$	46 - 55
Acier inoxydable	$4.0 \cdot 10^{-6}$	14.6
Laiton	$3.0 \cdot 10^{-5}$	111
Cuivre	$1.1 \cdot 10^{-4}$	386
Polystyrène	$6.5 \cdot 10^{-7}$	0.125
Polyéthylène	$1.3 \cdot 10^{-7}$	0.33
Verre sodocalcique	$3.8 \cdot 10^{-7}$	0.84
Carbure de tungstène	$3.0 \cdot 10^{-5}$	102

Tab 3 : Indications sur les caractéristiques thermiques de quelques matériaux [15]

Pour une valeur de $a = 100 \mu\text{m}$, dans la même expérience Jeager a calculé le coefficient de Peclet Φ :

	Acier	Oxyde de fer	Zircone	
Diffusivité α	$1.3 \cdot 10^{-5}$	$4.5 \cdot 10^{-6}$	$5.4 \cdot 10^{-7}$	
Conductivité k	46	3.2	2.1	
t_c (s)	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	V=10 m/s
t_d (s)	$7.7 \cdot 10^{-4}$	$2.2 \cdot 10^{-3}$	$1.9 \cdot 10^{-3}$	
Φ	76	220	190	
t_c (s)	$1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$	V = 1 m/s
t_d (s)	$7.7 \cdot 10^{-4}$	$2.2 \cdot 10^{-3}$	$1.9 \cdot 10^{-3}$	
Φ	$7.6 \cdot 10^{-3}$	$2.2 \cdot 10^{-2}$	$1.9 \cdot 10^{-2}$	

Tab. 4 : Calculs comparés [16]

On constate que lorsque V est faible $\Phi=0$ et $\delta=0.5$.

Tenant compte des équations (6),(7)et (8),on écrit que la température de surface est la même

pour les deux surfaces en contact et cela nous donne le coefficient de partage de la quantité de chaleur

$$\delta = k_1 / [k_1 + k_2 \cdot (V a / \alpha_2)^{-1/2}] \dots\dots\dots (17)$$

On admet que les deux corps ont la même conductibilité thermique et en corrigeant cela on écrit : $\delta = 1 / (2 + [2 \Phi]^{-1/2})$; qu'on peut représenter graphiquement

On remarque l'évolution presque « hyperbolique » ou Φ est négligeable pour $\delta < 0.1$ et que pour $\Phi > 50$, δ est négligeable ..[il en résulte que les températures relevées en dessous de la surface de contact ne sont pas fiables vu la taille relativement importante des thermocouples]

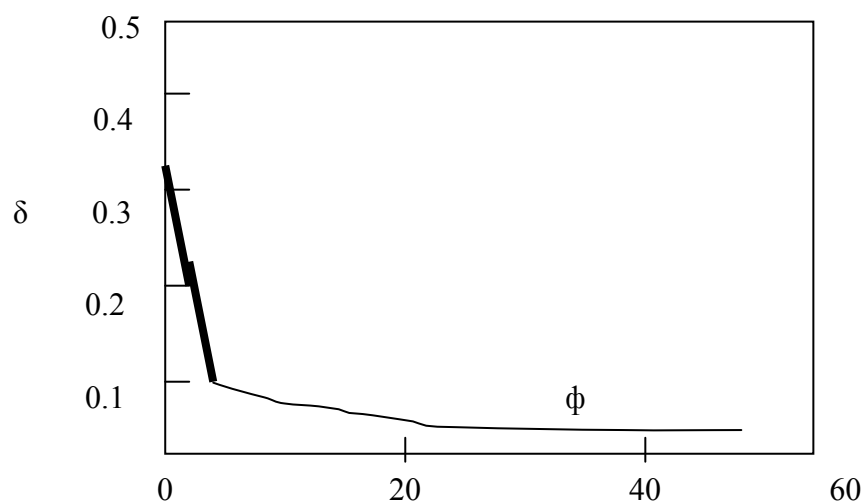


Fig12 : Répartition en profondeur de la température à partir de la surface en contact [17]

-Cartes des températures :

On peut établir des résultats expérimentaux des diagrammes tel que le diagramme « pression-vitesse »(établi par ASHBY[12]),ou le diagramme représentant les isothermes 100,200 et 400 des températures moyennes de surface et des températures « éclairs » en fonction de la vitesse V, du nombre de Peclet Φ et de la pression P/ H avec (coefficient de frottement pris à 0.1 et une valeur de Φ conséquente et fixe ,(P/ H)_{LIMITE} =1 et un rayon de contact a = 100µm)

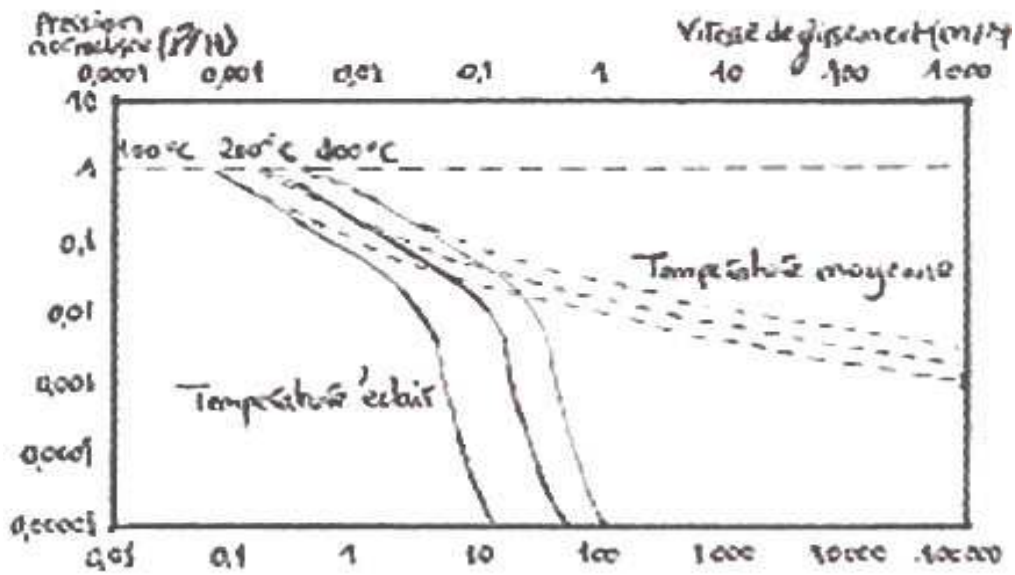


Fig. 13 : Evolution de la température de surfaces en fonction de V , Φ et P/H [18]

Et de là deux types d'application sont déduites de ce diagramme :
 domaines d'usure et domaine d'emploi des mécanismes ou les courbes montrent les températures limites de fonctionnement des paliers frottant à sec ou mal-lubrifiés voir figure (11).

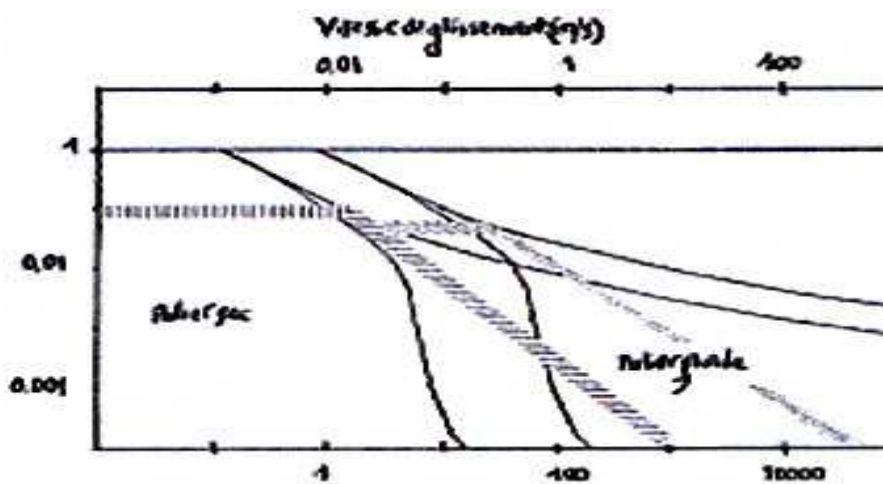


Fig.14 : Comportement de la puissance engendrée ($P.V$) selon la viscosité du lubrifiant [19]

[($P.V$) est en fonction de (P/H) en ordonnée et de Φ en abscisse]

Le domaine d'emploi des mécanismes, tels que les paliers est déterminé par le produit ($P.V$) ou P représente la charge maximale par l'aire de la surface « projetée » du palier (largeur x

diamètre) et (P.V) représente la puissance moyenne engendrée dans le palier et qui doit s'équilibrer avec la puissance thermique évacuée.

Quelques (P.V) maxima admissibles, pour différents paliers :

- lubrifiant solide..... P.V=1 Mpa m /s
- graissé.....P.V = 1.5 Mpa m /s
- bain d'huile.....P.V =8 Mpa m /s
- vilebrequin de voiture.....P.V =60 à 250 Mpa m /s
- moteurs de compétition..... P.V =650 Mpa m /s

I.3.Usure :

I.3.1.Usure des surfaces :

Selon la plupart des spécialistes [J. M. GEORGES, Stefan KORECK (Ford), Masami NAKADA (Toyota)], les définitions établies à la littérature technique spécialisée, l'usure correspond à la « perte progressive de matière de la surface active d'un corps par suite du mouvement relatif d'un autre corps sur cette surface ».

Du point de vue du mécanicien, la notion d'usure s'applique plus généralement à tout évènement conduisant à une perte de fonction des composants ou des systèmes, en général, on associe à l'usure la détérioration due à l'usage.

L'usure est un ensemble de phénomènes qu'on ne peut interpréter facilement, étant la cause de « naissance » de débris, l'usure engendre une perte de masse, de cote, de forme avec autres transformations physiques et chimiques de surfaces.

L'usure varie en fonction de la vitesse, de la température et du temps mais pas de manière progressive car certaines formes d'usure sont régulières et d'autres varient brusquement.

L'usure est à éviter autant que l'on peut pour ses effets négatifs mais parfois, on en a besoin comme dans le cas de l'affûtage des outils, de rodage des surfaces dites « neuves » d'un mécanisme [27].

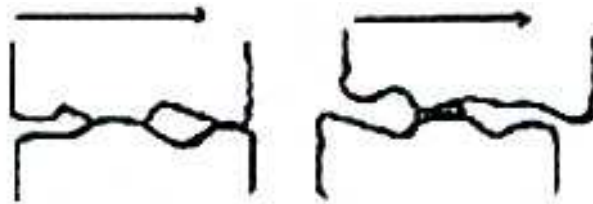


Fig. 15 : Représentation schématique d'un contact glissant produisant une particule (selon Archard

-Phases de la vie d'un mécanisme :

Un mécanisme passe normalement par trois phases ou (classes) d'usure successives, selon la quantité du matériau perdue par un élément actif d'un tribosystème, on distingue :

-L'usure douce ou ultra-douce : Le système s'use peu. Les surfaces restent lisses et les particules ont une dimension de l'ordre du micromètre.

-L'usure sévère : Les surfaces des corps sont modifiées, et la taille des particules dépassent 100 microns.

-L'usure catastrophique : La durée de vie est énormément réduite

Le test d'usure révèle trois différentes phases d'usure dans la vie d'un mécanisme comme le montre la figure (16),

OA : l'usure est rapide, AB : utilisation normale de la machine

BC : la destruction des éléments de la machine

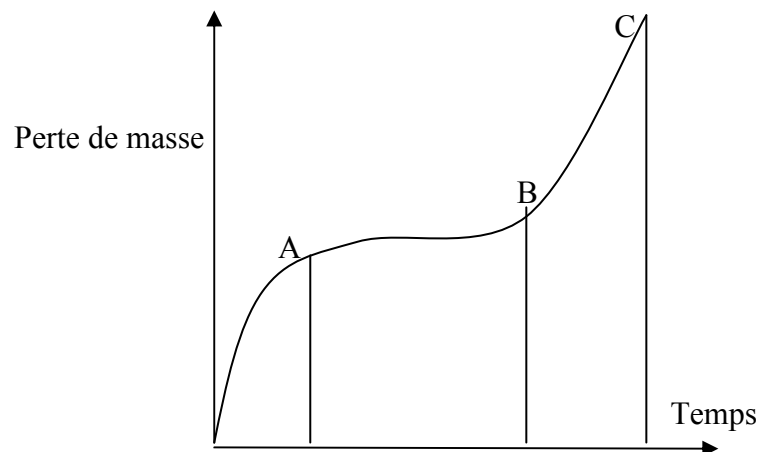


Fig. 16 : Vie d'un mécanisme

La superfinition des surfaces lors du rodage : les actions sur les grosses aspérités diminuent avec le temps, les pics sont arasés progressivement tandis que les vallées restent intactes. Le taux d'usure et le facteur de frottement baissent, les portées s'améliorent, les films d'huile s'amincissent. Une nouvelle topographie remplace la rugosité originale de la pièce.

Si l'usure se ralentit lors de la mise en fonctionnement, on constate une amélioration de l'état de surface, et réciproquement.

-La vie utile correspond au régime d'usure douce : La couche superficielle très dure qui semble se former est éliminée petit à petit sous forme de petites écailles. L'usure douce diminue la rugosité, alors que l'usure sévère l'accroît.

-La vieillesse d'une surface se caractérise par une usure sévère qui aboutit à la mise hors d'usage [28].

I.3.2. Types d'usure :

KRAGELSKY [29] distingue cinq (05) types d'usure :

a.)La « déformation élastique » du matériau par les saillies du corps antagoniste a lieu si les contraintes ne dépassent pas la limite d'écoulement dans la zone de contact. L'usure n'est alors possible que par fatigue, le passage répété du corps frottant produisant des microfissures de traction perpendiculaire à la surface.

b.)Le « repoussage plastique » se produit si les contraintes de contact atteignent la limite d'écoulement et si le matériau contourne les saillies du corps antagoniste. L'usure résulte dans ce cas, après un petit nombre de cycles, de la fatigue provoquée par le contact frottant.

c.)La « micro coupe » survient si les contraintes dans la zone de contact atteignent la limite de rupture ou si le contournement des saillies par le matériau déformé s'interrompt. La détérioration a lieu juste au moment de l'interaction. La coupe est due aux aspérités, aux particules détachées et aux arrêtes des cavités déjà formées.

d.)La « rupture par cisaillement » de l'interface de friction ne provoque pas de détériorations immédiates mais s'ajoute aux contraintes et aux déformations agissant au contact, favorablement le processus de fatigue.

e.)La « rupture par arrachement » a lieu quand la résistance de l'interface dépasse celle du matériau sous-jacent, ce qui peut conduire au « grippage ». L'adhésion des aspérités est favorisée par les déformations plastiques et le raclage des couches oxydées.

Les nombreuses formes d'usure sont classées en plusieurs groupes :

- Abrasion, déformation ou coupe par corps durs,
- adhésion, jonctions intermétalliques, micro grippages,
- corrosion, réactivité avec l'ambiance,
- corrosion de contact,

- sur contraintes provoquant des accidents brusques,
- fluage, déformation sans perte de matière,
- fatigue, endommagement sous des efforts répétés,
- phénomènes divers : cavitation, érosion, dissolution.

L'usure comporte une part importante de réactions chimiques ; Des couches superficielles chimiquement inertes peuvent parfois être plus résistantes au frottement que des couches dures, surtout en présence de milieux agressifs.

-Difficultés de l'étude et de l'expertise :

L'usure est un phénomène évolutif et irréversible. La compréhension d'un phénomène d'usure nécessite un enregistrement continu des divers paramètres permettant de caractériser l'état du système étudié au fil du temps. Mais l'inconvénient reste le nombre important des paramètres (caractéristiques géométriques des surfaces frottantes, l'état physico-chimique des matériaux sur une profondeur suffisante, l'état et la composition du film d'huile, les facteurs thermiques et mécaniques, etc.

Mais ce là n'est réalisable que pour des essais en laboratoire contrairement à un mécanisme réel en fonctionnement.

-Usure par abrasion :

Cette forme de dégradation est généralement combattue, mais aussi utilisée pour l'usinage : Des taux d'usure importants sont recherchés et obtenus avec des outils abrasifs en rectification, affûtage, etc. L'abrasion coûte très cher, on lui attribue à peu près le tiers du total des pertes économiques dues à l'usure.

Elle concerne de nombreux mécanismes fonctionnant dans des conditions sévères : machines agricoles, matériels de travaux publics, matériel minier.

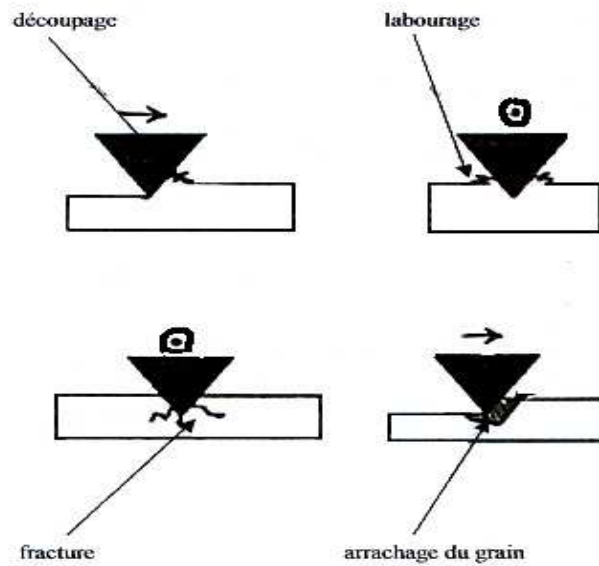


Fig. 17 : Les quatre modes d'usure abrasive [29]

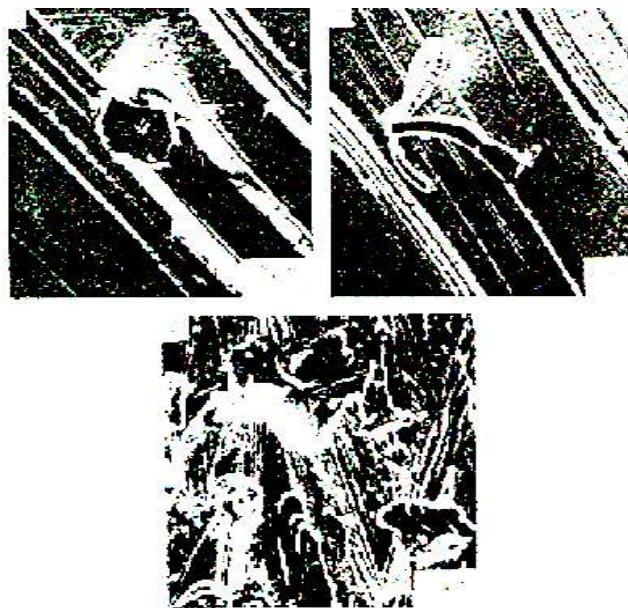


Fig. 18 : Les micros rayures, les micros coupes et les micros fractures sur des surfaces d'acier usées par des abrasifs minéraux durs [30].

Pendant l'usure abrasive, on a le déplacement de matière, produit par des particules dures, ou par des protubérances dures. Un corps dur déforme plastiquement, avec ou sans enlèvement de matière un corps plus mou,

On peut distinguer :

-L'usure abrasive à deux corps : les sillons sont formés parallèlement à la direction de déplacements des aspérités abrasives.

-L'usure abrasive à trois corps : les particules abrasives dures sont libres dans l'interface et déforment plastiquement les surfaces frottantes en créant des empreintes.

L'usure peut résulter des protubérances d'une des pièces ou des particules qui circulent dans l'interface. On peut distinguer deux modes d'usure par abrasion.

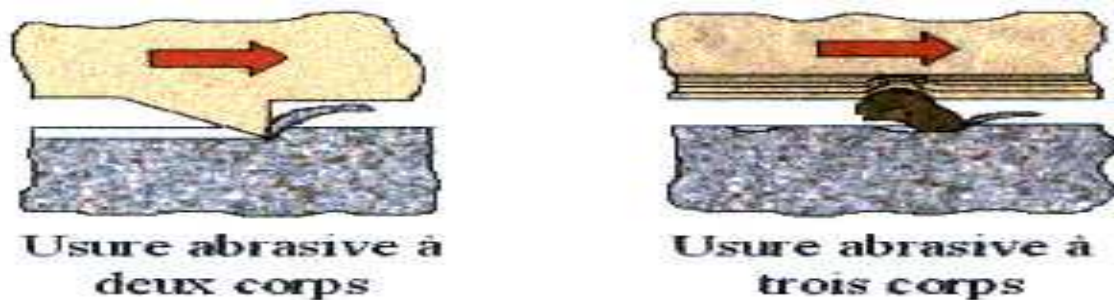


Fig. 19 : Usure abrasive [30]

L'usure croît dès que la dureté de l'abrasif atteint 0,7 fois celle de la surface usée et se stabilise quand elle atteint 1,7 fois. L'abrasion par coupe, fonction de la forme des aspérités est négligeable si le rapport des duretés est compris entre 0,8 et 1,3.

Les débris émis par les surfaces possèdent une dureté bien supérieure à celle des matériaux en présence, provoquant une abrasion à trois corps. Ceci est dû à l'écrouissage et à l'oxydation, cette dernière dépendant entre autres de l'humidité atmosphérique.

L'abrasion modifie profondément les couches superficielles qui deviennent comparables à celles obtenues par laminage. Les surfaces durcissent et résistent mieux à l'abrasion elle-même.

L'usure dépend des vitesses relatives des surfaces et des particules, de la forme et de la résistance des grains. Elle croît avec la taille de ces derniers, se stabilisant pour une dimension critique voisine de 0,1 mm, et varie selon que les contraintes sont faibles ou fortes, les charges agissent directement ou indirectement, en brisant ou en déformant les grains abrasifs. Les caractéristiques de l'ambiance modulent l'abrasion mais influent en général assez peu si la vitesse d'usure est grande [31].

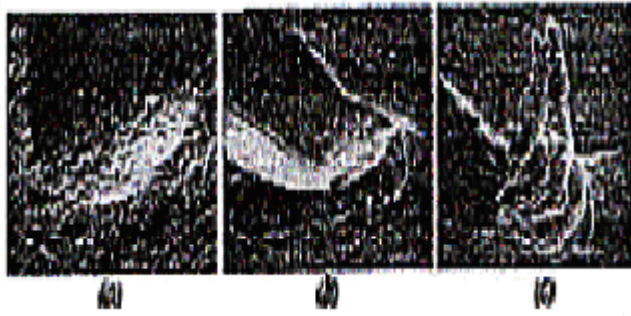


Fig .20 : Les rayures sur une surface selon les modes de l'usure

(a) déformation ou labourage ; (b) bourrelet plastique ; (c) copeau (observés par Challen, Oxley, Childs ou $\theta_a=5^\circ$, $\theta_b=25^\circ$, $\theta_c=60^\circ$) [31].

Il est essentiel que les particules et les débris d'usure soient évacués des zones frottantes. Il faut impérativement prévoir des voies de ruissellement par moletage, si aucune circulation de lubrifiant ne permet cette évacuation.

L'usure des matériaux purs est à peu près inversement proportionnelle à leur dureté mais le rapport de proportionnalité varie avec leur structure.

Généralement on diminue l'abrasion en augmentant la dureté superficielle sur une profondeur importante.

Une meilleure résistance à l'oxydation et à la corrosion donne moins d'oxydes abrasifs, l'érouissage augmente la dureté et la résistance à l'usure.

Certains polymères résistent bien à l'abrasion, car ils absorbent beaucoup d'énergie avant de se fragmenter.

Les revêtements durs sont souvent une solution. Cependant, si l'abrasif n'est pas dur, le degré de pénétration D_p est déterminé expérimentalement en fonction du rapport « f » [$f = \tau / k$ ou f est une contrainte de cisaillement, τ contrainte mesurée dans l'interface et k est la contrainte d'écoulement du matériau égale à $H / 6$ avec H : aire de contact].

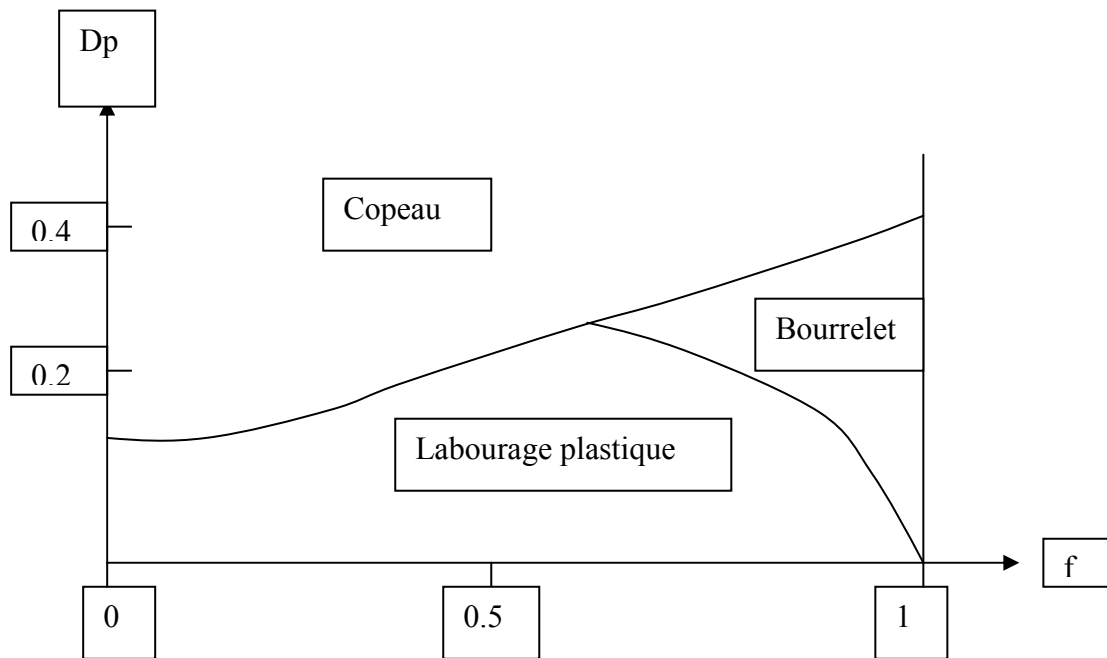


Fig. 21: Modes d'usure dans un contact abrasif [32].

-Usure par adhésion [34] :

Contrairement à ce qui se passe dans le cas de l'abrasion, de brusques changements de régime d'usure peuvent résulter de légères modifications des paramètres.

Pour des surfaces non-lubrifiées, le coefficient de frottement ne s'amplifie pas mais le taux d'usure peut varier d'un facteur très important.

Il faut insister sur la solidité des soudures formées par usure adhésive. La matière d'une pièce est transférée sur l'autre pendant le mouvement par soudage en phase solide. Et si les métaux sont mutuellement solubles, forment des alliages par diffusion.

L'effet de la charge est double :

L'échauffement et la rupture des films d'oxydes favorisent l'usure adhésive, comme pour les engrenages lourdement chargés.

La vitesse a deux effets opposés, facilite la formation de films d'huile. C'est dans le vide que les risques de grippage sont les plus élevés.

couples compatibles	
acier	argent, antimoine
chrome	argent, cadmium, or
molybdène	argent, cuivre, or, palladium
tungstène	argent, cuivre
argent	cobalt, rhénium

Tab. 5 : Couple de matériaux compatibles [34]

On peut métalliser les pièces par électrolyse afin de rendre compatible les paires de métaux comme exemple : L'étain en couches minces sur le solide en aluminium d'une part et l'acier de l'autre part (ex : axe en acier et coussinet en aluminium avec des couches minces en étain) ; Mais il faut tenir compte aussi du milieu environnant (milieu chimique, lubrifiant) et maîtriser ce genre de procédés pour éviter toute conséquence négative (comme la fragilisation par l'hydrogène) [33].

On peut aussi traiter les métaux ferreux par : Trempe, cémentation, nitruration ou carbonitruration avec un choix de matériaux dont les duretés sont différentes de l'ordre de 100HV pour éviter l'adhésion entre les surfaces de contact et ainsi le grippage sans oublier un bon polissage des surfaces en fin d'usinage des pièces [34].

-Usure par corrosion, usure chimique [35]:

La corrosion n'est pas directement liée aux mouvements des pièces, mais elle interagit avec le frottement. Les pièces sont « rongées » et portent de nombreuses piqûres ou crevasses.

L'usure est aggravée par les contraintes mécaniques et le frottement. La corrosion peut par exemple éliminer le plomb d'un cuproplomb (alliage de plomb), le métal est devenu alors poreux en surface.

-Corrosion de contact [36] :

La corrosion de contact est strictement liée aux zones de contact, cette forme d'usure est propre à des mécanismes où les assemblages sont soumis à de petits déplacements tangentiels rapides ou à des vibrations sous forte charge « usure induite par petits débattements ».

Les surfaces commencent par se colorer, puis elles se creusent de cavité remplies de débris émis.

Les métaux ferreux produisent en abondance l'oxyde de fer de couleur rouge et brune ($Fe_2 O_3$), sous forme de particules plates et allongées. Ce phénomène ne concerne pas seulement les métaux, mais il se produit aussi avec certaines matières plastiques.

La corrosion de contact s'attaque particulièrement aux pièces de haute qualité tels que les moteurs d'avion, clavetage et cannelures, manchons et emmanchements, roulements, mors de machine, portées de culasse sur bâtis de moteurs.

-Sur contraintes[36] :

Le passage d'un curseur sur une surface engendre un ensemble de contraintes, parmi lesquelles :

- Des tensions, immédiatement à l'arrière du curseur, pouvant causer des accidents
- Des compressions sous la moitié du curseur, pouvant causer le fluage,
- Un cisaillement maximal à une certaine profondeur, engendrant le phénomène de fatigue.

Ses effets avec les défauts superficiels laissent apparaître des fissures sillonnant la surface dont la direction est perpendiculaire au mouvement.

-Fluage superficiel [37]:

On remarque des écoulements de matière sans grand relief et très étalés. Le matériau flue sous l'effet de contraintes de compression suivant les trois axes de l'espace, même s'il est fragile comme le cas d'un acier cimenté.

-Fatigue [37]:

L'usure par fatigue est lente et habituellement cachée par l'abrasion ou l'adhésion. Causée par le frottement de roulement ou de glissement sous fortes charges répétées, ce cas est rencontré essentiellement dans les engrenages et les roulements dont elle constitue le mode normal de destruction.

Une longue phase de vieillissement précède les accidents visibles car la pièce peut garder une apparence intacte mais si elle est atteinte. Il existe deux sortes d'avaries différentes :

a- La fatigue superficielle par écrouissage :

Elle est due aux contraintes maximales de traction ou de compression car le premier signe visible est une apparence brunie, un éclat brillant du métal et la disparition des marques d'usinage.

L'accident typique est le piquage des engrenages prenant la forme d'un « V » se rangeant suivant la direction du mouvement et peut être néfaste si le métal a tendance de le propager.

b- La fatigue profonde ou écaillage :

Après un long temps de vieillissement, il se produit une émission brutale de particules dont la surface atteint quelques mm^2 , la profondeur quelques dixièmes de mm et dont la taille est sans rapport avec la structure du métal. L'usure s'étend par le bord des zones écaillées attaquant progressivement les sous-couches dont l'aspect est poli.

-Lubrifiants et fatigue de surface [38] :

La présence d'huile a un effet bénéfique sur la propagation des fissures en réduisant la variation des contraintes, mais elle peut aussi multiplier par « 10 » cette propagation à cause d'autres effets : Ouverture des fissures par pression hydraulique, pollution par des produits provoquant une corrosion, eau dissoute entraînant une fragilisation par l'hydrogène.

-Erosion [39]:

L'érosion est une usure abrasive particulière, causée par des impacts de particules solides contenues dans un fluide en mouvement ou par des particules liquides en milieu gazeux.

Lors des chocs, il y a ébranlement du matériau de la surface, les dégâts sont fonction de l'énergie cinétique, donc de la masse et du carré de la vitesse de la particule.

L'enlèvement de matériau croît très vite avec la vitesse. Le comportement est très différent selon la nature du matériau. L'érosion diffère de l'abrasion car elle est liée à l'énergie cinétique des particules qui « bombardent » les surfaces à grande vitesse, créent des petits cratères par déformation plastique du matériau. La perte de matière résulte de la coupe ou des déformations des aspérités formées par les impacts successifs.

-Cavitation [40] :

La cavitation exige un mouvement relatif entre un solide et un fluide. Elle concerne d'abord les organes pour fluides, pompes, hélices de bateaux, mais aussi certains mécanismes lubrifiés tels que les coussinets de moteurs ou engrenages.

Des trous, à peu près hémisphériques, apparaissent hors de la zone frottante ou à sa limite puis l'ensemble de la surface est usé. La destruction, souvent catastrophique, est très rapide et très bruyante.

-Fatigue thermique[41] :

C'est une dégradation par alternance d'échauffements et de refroidissements, qui touchent pièces comme les cylindres de laminoirs, les matrices de forge, mais aussi les surfaces rectifiées dans de mauvaises conditions.

La fissuration finale a un aspect caractéristique de mosaïque, dit de « faïençage ». Les fissures sont plus ou moins polygonales et suivent les joints de grains et s'enfoncent dans les matériaux perpendiculairement à la surface.

-Usure par dissolution [42] :

Si on prend l'exemple des outils d'usinage, On constate une usure catastrophique d'outils de coupe utilisés dans des conditions sévères. Le carbure de tungstène, vers 1100°C, migre dans les copeaux de métaux ferreux et l'outil est littéralement « usé » par le fer chaud.

La figure suivante illustre l'évolution de l'usure entre la rugosité de la surface de contact et la distance cumulée de glissement tout au long de la durée de vie de la pièce (surface de contact).

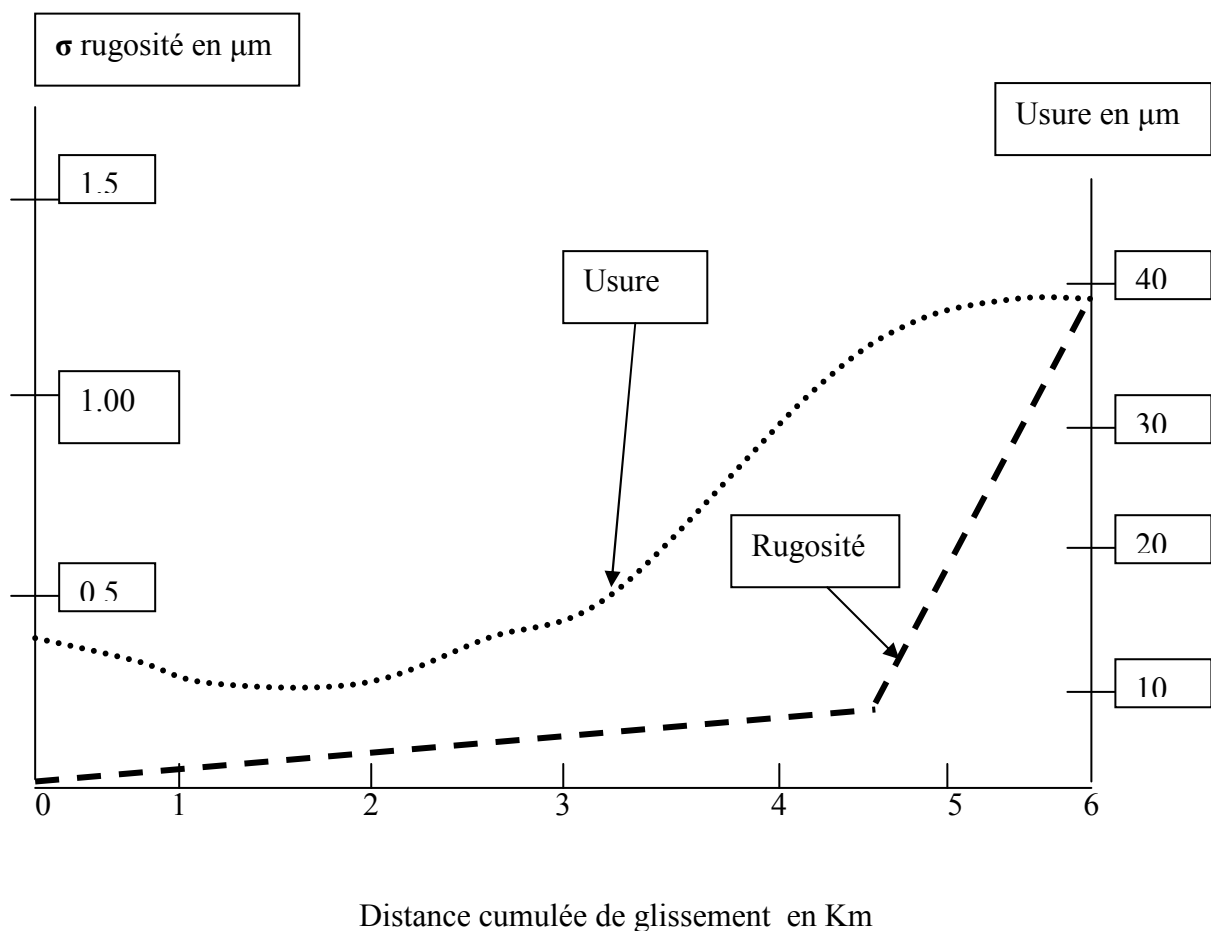


Fig. 22 : Evolution de l'usure et de l'écart type de la rugosité [42]

On révèle dans le tableau suivant la relation entre le type d'usure et les surfaces usées,

TYPE D'USURE	SURFACE USEE	PARTICULES D'USURE
Adhésive	- transferts - déformations plastiques	- taille relativement importante (10µm et plus)
Abrasives à deux corps	- surface d'aspect texturé - rayures parallèles	- micro copeaux
Abrasives à trois corps	- surface d'aspect aléatoire - indentations - déformations plastiques	- écailles - métal fortement déformé plastiquement
Corrosive	- films de surface colorés - aspect non uniforme	- lames minces de produit de réaction chimique
Délamination - fatigue (matériaux ductiles)	- fractures parallèles à la surface - piqûres, écaillages - déformations plastiques	- particules en feuille - épaisseur faible
Fracturation (matériaux fragiles)	- fractures en fer à cheval, perpendiculaires à la surface de frottement - faciès de fracturations	- grosses particules - particules d'aspect fracturé, anguleuses
Fretting	- trace d'usure en forme d'anneau, ou localisée - fractures débutant en surface de profondeur variable	- agglomérats en périphérie de la zone de contact
Erosion	- aspect aléatoire - traces d'impacts, rayures fortes déformations plastiques	- micro copeaux
Cavitation	- "cavités" - défauts dans des zones de dépression	- micro écailles

Tab.6 : Constat de dégâts sur les surfaces usées selon le type d'usure [43].

I.4.Traitements anti-usure :

I.4.1.Traitements mécaniques :

Ils s'appliquent aux métaux susceptibles d'être améliorés par écrouissage. Le but est d'augmenter la dureté et de créer des contraintes résiduelles de compression :

-Grenailage de précontrainte :

Peu utilisé en frottement, il élève la résistance à la fatigue de pièces de toutes sortes : ressorts, arbres.

-Moletage et galetage :

Ils améliorent le « poli », l'exactitude des cotes, la dureté et la résistance (galetages dits de surface, dimensionnel, de renforcement). On peut atteindre 45 HRC et l'on traite ainsi les aciers, surtout dans l'industrie automobile, les superalliages, les alliages de titane. Les surfaces galetées résistent d'avantage à la fatigue et portent mieux que les surfaces rectifiées, se comportant comme si elles étaient déjà rodées. Elles s'usent parfois moins que les surfaces trempées. On ne « galette » pas les aciers écrouis tels que les aciers étirés à froid.

-Polissage mécanique :

On sait depuis les travaux de Beilby [20] qu'il y a fusion ou au moins ramollissement des points hauts de la surface des pièces et que leur matière vient combler les vallées.

-Finitions électrochimiques :

L'électro-polissage est le processus inverse de la galvanoplastie : il dissout les couches superficielles. Étudié en tant que technique en 1910 par Bentel et Shpital'Sku [21], il fut appliqué industriellement vers 1930 grâce aux travaux de Jacquet. Les pointes sont enlevées les premières, mais la rugosité initiale n'est pas réduite à zéro car une fois les plus gros reliefs détruits, l'attaque est uniforme. L'enlèvement des couches externes révèle la structure du métal et les défauts éventuels, contrairement aux actions mécaniques qui créent un écrouissage plus ou moins fort. L'élimination des rayures élève la résistance à la fatigue mais, en même temps,

l'absence de contraintes résiduelles de compression la diminue. Les surfaces sont remarquablement propres et ne présentent pas les inclusions provoquées par le polissage mécanique.

I.4.2.Traitements thermiques :

On ne doit jamais faire froter une pièce d'acier qui n'a pas subi les traitements de normalisation, trempe et revenu, éliminant au maximum les structures austénitiques et ferritiques. En frottement, on utilise souvent la trempe superficielle et donc les aciers alliés ou spéciaux spécialement conçus pour elle.

Parmi les techniques nouvelles, signalons les traitements localisés par faisceaux d'électrons et par laser. Le durcissement par trempe laser est particulièrement prometteur car il supprime la déformation et l'usinage ultérieur des pièces [22].

-Traitements thermochimiques de diffusion :

Des atomes étrangers, formant des solutions solides le plus souvent interstitielles, distordent les réseaux cristallins et augmentent la dureté superficielle en créant des contraintes résiduelles de compression, ce qui améliore la résistance à la corrosion et à l'oxydation. On distingue :

-La diffusion de métalloïdes, carbone, azote, soufre, bore, par voie liquide (bains de sels) ou gazeuse et plus récemment, par bombardement ionique. Elle concerne 60 000 tonnes de pignonnerie par an dans l'industrie automobile. Le carbone est à la base de presque tous les traitements de l'acier.

-La diffusion de métaux, aluminium et chrome notamment, améliore la résistance à l'oxydation à haute température [22].

-Cémentation :

C'est un cas particulier de la carbonituration. On carbonitrate en général des pièces peu massives en acier mi-dur sur une profondeur voisine de 0,3 mm, puis on trempe en huile

chaude. La cémentation convient plutôt à des pièces massives en acier doux traitées vers 0,8 mm, puis trempées en huile froide.

On peut cémenter sur une profondeur de plusieurs millimètres. Les atomes de carbone, dont le diamètre vaut 0,63 fois celui des atomes de fer, provoquent de grandes distorsions des réseaux cristallins et s'insèrent mieux dans les structures cubiques que dans les cubiques à face centrée. La diffusion de carbone doit toujours être suivie d'une trempe.

Dans le cas de contacts ponctuels ou linéiques, la profondeur du traitement doit atteindre environ deux fois celle du cisaillement hertzien maximal. La résistance à cœur des pièces est optimale vers 850108 daN/mm². On dispose de programmes de calcul définissant les caractéristiques des couches cémentées en fonction de l'usage prévu.

La cémentation n'est pas un traitement spécifique de l'usure adhésive, mais on peut la faire suivre d'une sulfuration à basse température. Il est toujours dommage de rectifier les pièces cémentées trempées à cause du relâchement des contraintes résiduelles de compression. La fragilisation des pièces cémentées par l'hydrogène peut être telle que des ruptures fragiles différées se produisent sous des contraintes anormalement basses. Une déshydrogénation aussi complète que possible est obtenue par un revenu sous vide ou dans un gaz inerte.

La cémentation sous vide présente des avantages importants de temps et de coût, tout en diminuant les distorsions des pièces par suite d'un maintien à température moins long. On note comme exemple d'application le traitement d'engrenage du réducteur d'hélicoptères [22].

-Nitruration :

Elle fut découverte en 1923 par un technicien de la firme Krupp qui, ayant chauffé un acier dans une atmosphère d'ammoniac, observa une dureté superficielle anormalement élevée. La nitruration nécessite des aciers contenant un peu d'aluminium, 1,2 % par exemple. L'azote s'intercale dans le fer pour former une solution solide interstitielle et ouvre la voie à des atomes plus gros qui sans lui ne pénétreraient pas. Il se combine en partie avec le fer, mais seulement en surface, pour former du nitrure Fe₄N. La nitruration a d'importants avantages : faibles déformations pendant le traitement, dureté élevée, bon frottement même sous

lubrification aléatoire, bonne résistance au revenu et à la corrosion, sauf sur les aciers inoxydables. C'est un traitement « complet » à cause de l'azote qui prévient le grippage et des contraintes résiduelles de compression qui sont créées. L'azote est le métalloïde le plus recommandable pour le frottement du fer sur le cuivre ou le bronze. Les couches nitrurées sont excellentes pour les faibles pressions superficielles et il faut tout tenter pour les utiliser à l'état brut. Leurs propriétés dépendent peu du procédé utilisé mais beaucoup de la microstructure obtenue. Les inconvénients sont le temps de traitement qui peut atteindre 70 h, une faible profondeur durcie donc une faible usure tolérable, peu de résilience, de faibles contraintes et déformations admissibles en service ainsi qu'un léger gonflement des pièces [22].

-Nitruration ionique :

Les Allemands l'ont inventée en 1930 et appliquée en secret aux tubes des canons à longue portée [23]. Ce procédé utilise le plasma d'un arc électrique à basse tension et haute intensité à la pression atmosphérique, arc dans lequel l'azote présent est ionisé. Les ions accélérés percutent la pièce et s'y implantent, le nitrure de fer FeN est absorbé à sa surface et transformé en nitrures d'ordre inférieur. Le four de traitement ressemble à un gros tube à décharge où la cathode supporte les pièces à traiter, l'anode étant constituée par les parois. On peut durcir une pièce dont l'usinage est entièrement terminé. Aucun autre traitement thermo-chimique ne conserve aussi bien la géométrie et l'état de surface. Il est conseillé pour des aciers de résistance 900 à 1100 N/mm², d'où la nécessité d'un prétraitement pour obtenir les caractéristiques voulues à cœur. La profondeur courante est 0,3 mm et le gonflement de l'ordre de 5 microns.

-Carbonitruration :

L'introduction simultanée d'azote et de carbone suivie d'un durcissement par trempe améliore la résistance à la fatigue par flexion-torsion, à la fatigue superficielle sous charge modérée et à l'usure abrasive. La profondeur, fonction de l'usure admissible, doit être au moins deux fois celle du cisaillement maximal. Ce traitement n'est pas spécifique de l'usure adhésive [23].

-Boruration :

Le traitement est réalisé entre 800 et 1050 °C, le bore diffusé sur 20 à 400 microns se combine pour donner du borure de fer. On obtient une très grande résistance à l'usure par abrasion et une bonne résistance à la corrosion. Les applications sont variées : hélices, vis transporteuses, poinçons, matrices, pompes pour matières abrasives, guides, glissières, galets, outillage de moulage d'alliages légers ou de zinc. Un procédé moderne s'appelle BORUDIF[23].

-Chromisation :

Ce procédé industrialisé aux U.S.A. [23], dès 1919 est une cémentation au chrome donnant une couche superficielle extrêmement dure et un excellent coefficient de frottement. Après 90 minutes à 1075 °C dans des vapeurs de fluorure de chrome, la couche de diffusion atteint 0,1 mm. Le procédé français DIKROM utilise l'iodure de chrome. L'acier chromisé porte un véritable revêtement de carbures de chrome extrêmement durs provoqué par la rétrodiffusion du carbone de l'acier vers la couche chromisée

-Stanal :

Ce traitement contre l'usure, le grippage et la corrosion est une diffusion de divers métaux, principalement d'étain. Après dépôt électrolytique d'un alliage poly-métallique, la diffusion et la liaison entre la couche et le support sont assurées par chauffage à 600 °C. Ce traitement qui concerne la majorité des alliages ferreux et fontes est difficile en présence de nickel, de chrome ou de plus de 2 % de carbone.

La facilité de lubrification sous très forte charge, la sécurité sous lubrification aléatoire, multiplient plusieurs dizaines de fois la durée de vie de pièces frottant dans l'eau douce ou salée sans huile ni graisse. La résilience est accrue et le frottement de certains aciers inoxydables devient possible [23].

Forez :

Le respect de la règle des trois couches est idéal : on crée une couche superficielle très mince à base d'étain, une couche de diffusion dure et ductile forme des phases dures de l'alliage binaire cuivre-étain, capable d'accommoder et de régénérer par frottement le manteau protecteur d'étain, et une zone de transition réalise l'accrochage des couches superficielles.

Le gonflement est de 25 à 30 microns, les pièces doivent être finies avant traitement. Le Forez multiplie la charge de rupture des films d'huile, augmente la résilience ainsi que la résistance à la fatigue et à la corrosion. Il permet par exemple de remplacer le bronze des roues de réducteurs à roue et vis sans fin par de l'acier [23].

-Manganisation :

Une diffusion de manganèse forme en surface une structure d'acier Hadfield qui durcit très fortement par écrouissage. On peut si nécessaire produire simultanément une sous-couche carburée. Parmi les applications : frottement dans l'eau, cames, engrenages, pistes de roulement [23].

-Chromaz :

Combinaison d'une nitruration et d'un revêtement de chrome. L'association des deux techniques n'est pas évidente : les sociétés sont rarement spécialistes de l'un et de l'autre, par ailleurs il est très difficile de préparer une surface nitrurée pour la chromer correctement. Le nouveau traitement est actuellement appliqué pour des outillages de forge [23].

-Traitements de diffusion divers :

Les aciers inoxydables peuvent être durcis par l'étain déposé par immersion et diffusé pendant 48 h : le composé défini FeSn dissout le nickel et le chrome et forme une couche continue de dureté élevée [23].

-Traitements de conversion :

-Tenifer :

Trois heures à 560-565 °C dans un bain de cyanures avec soufflage d'oxygène, donnent sur les aciers au carbone une couche superficielle de 10 à 15 microns (épaisseur à ne pas dépasser) de cémentite Fe₃C et de nitrure de fer Fe₄N, très dure mais adhérente et peu fragile, et une sous-couche de plusieurs dixièmes de mm contenant du nitrure de fer et de l'azote. Le Tenifer diminue la sensibilité de l'épiderme aux soudures, améliore la dureté superficielle et les qualités frottantes, augmente la résistance à l'usure, à la corrosion, et peut doubler la résistance à la fatigue. On traite des pièces variées : essieux, vilebrequins, engrenages, chemises de moteurs, glissières, galets, vis, poinçons, moules de coulée d'alliages légers, fusées de roues, axes, leviers, pièces de pompes à eau, de machines à coudre, à calculer, à écrire [23].

-Sulfurations en général :

Comme on le verra dans le chapitre consacré aux lubrifiants, le soufre joue depuis longtemps un grand rôle dans les problèmes de frottement. Son action reste pourtant mystérieuse et la composition exacte des couches obtenues par sulfuration n'est pas exactement élucidée. On traite des matériaux divers :

- fers, fontes et aciers,
- aciers inoxydables et réfractaires à moins de 25 % de nickel et 15 % de chrome,
- aciers rapides,
- bronze sans aluminium ni plomb.

On ne frotte pas les pièces traitées par sulfuration sur du chrome dur et de les usiner par abrasion [23].

-Sulfinuz :

Nécessite 3 h à 550°C dans un bain de sels assez complexe comprenant une base inactive de chlorures et carbonates alcalins et alcalinoterreux et des sels actifs soufrés protégés par du cyanure. Il y a surcarburation des couches superficielles et introduction interstitielle de soufre

et d'azote qui favorisent mutuellement leur pénétration. L'enrobage des grains facilite l'accommodement avec un minimum d'écrouissage.

Le Sulfinuz n'abaisse pas le coefficient de frottement mais la microcouche de sulfure de fer inhibe les soudures tandis que les contraintes résiduelles de compression peuvent augmenter de 60 % la pression au-delà de laquelle apparaissent les premières fissures de surtension. Il n'y a pas d'augmentation de la dureté, contrairement à ce que l'on pourrait croire.

Le Sulfinuz est un traitement cher, mais qui peut résoudre des problèmes de frottement à chaud. L'association nitruration plus Sulfinuz est la meilleure solution contre l'abrasion par fil, à condition de ne jamais rectifier entre les deux traitements [23].

-Sulficad :

Le Sulfinuz amélioré par la présence de cadmium permet à l'acier de frotter sur les alliages légers. Le fort abaissement du coefficient de frottement permet des applications dans les milieux oxydants, aqueux, ou en ambiance marine. Le Sulficad s'applique sur des pièces terminées, éventuellement très précises. Ses applications sont toutefois limitées en raison de la toxicité du cadmium [23].

-Sursulf :

Traitement entre 560 et 570 °C pendant 2 à 5 h dans un bain non polluant de cyanates et carbonates alcalins. La teneur en cyanures est faible, même en cas d'incident, l'adaptation d'installations pour le Sulfinuz et le Ténifer est immédiate et la consommation de sels très réduite.

La couche de nitrures et sulfures de fer, épaisse de plus de 20 microns, est très dure et très ductile. La diffusion d'azote atteint 0,5 mm. Les propriétés antigrippantes sont remarquables, comme la tenue à l'usure, à la fatigue et à la corrosion. On traite tous les aciers qui peuvent supporter la température prescrite [23].

-Sulfurations à basse température [23]:

Elles concernent des pièces déjà traitées par cémentation, carbonituration, trempe, revenu et rectification éventuelle. Ces traitements courts et très simples ne provoquent ni déformation, ni chute de dureté importante, mais ils peuvent diminuer la résistance à la fatigue et faciliter la corrosion par l'huile.

-L'HEPATISATION agit à 140-150 °C en milieu liquide. Le traitement, de 10 min à 1 h, donne une couche gris-noir.

-La NITRUCOLORATION est une nitruration suivie d'une hépatisation.

-Le SULF BT est une électrolyse en bains de thiocyanates fondus vers 185-195 °C qui donne en 10 min. une couche de sulfure de fer épaisse de 57 microns, avec une perte de cote de 46 microns au diamètre.

-La SULFURATION IONIQUE donne en 1h à 200 °C une couche de sulfure de fer hexagonal de 2 à 4 microns de couleur variable du gris au verdâtre.

-Phosphatation :

Les phosphatations modernes font intervenir du zinc pour obtenir une couche de phosphate double de fer et de zinc qui peut être imprégnée. La phosphatation au zinc ou PARKERISATION est dite cristalline par opposition à la phosphatation amorphe. En emboutissage et tréfilage, la phosphatation des tôles permet de retenir suffisamment de lubrifiant. La phosphatation au manganèse ou PARCOLUBRITE crée à la surface des pièces en acier une couche de 4 à 5 microns de phosphates complexes de fer et de manganèse capables de retenir un film lubrifiant, voir un lubrifiant solide dans une résine polymérisable. Applications : segments de pistons, chemises, tiges d'amortisseurs [23].

-Pentratage :

Par oxydation puis huilage (c'est une manière de brunissage), on obtient une surface d'un beau noir profond améliorant le frottement et la lubrification.

-Traitements des alliages légers :

Les alliages d'aluminium sont peu adaptés au frottement à cause de la solubilité de l'aluminium dans la plupart des métaux et en particulier dans l'acier, et de sa sensibilité à la déchirure par frottement excessif et surcontrainte de traction [23].

-Zinal :

Un dépôt galvanique à base de cuivre et d'indium chauffé pendant 3 h vers 170 °C forme sur 15 à 20 microns une couche de diffusion parfaitement homogène et régulière, dure, conductrice de la chaleur et de l'électricité, pouvant suivre sans se briser les déformations éventuelles du substrat. Il se produit un gonflement de l'ordre de 15 microns.

L'indium ralentit tout grippage contre l'acier ou le chrome, la pièce s'en recouvre dès le début du frottement, permettant même le glissement dans l'ultravide. On note une amélioration de la tenue des films d'huile. Les meilleurs antagonistes sont les aciers, le chrome dur, le molybdène et dans certains cas les alliages d'aluminium. Le Zinal permet de remplacer par l'aluminium les alliages cuivreux des fourchettes de boîtes de vitesses, le bronze ou l'acier revêtu de molybdène des cônes de synchroniseurs. On l'utilise aussi pour les convoyeurs ou les freins d'automobiles.

-Oxydation anodique :

Elle forme en surépaisseur une couche d'alumine de 0,04 à 0,1 mm, à la fois très dure et très résistante à l'usure, mais de faible conductivité thermique et sensible aux chocs et aux surpressions hertziennes. Cette couche est poreuse et on peut « remplir » les pores par des films de lubrifiants liquides ou solides.

-Traitement des alliages cuivreux :

Le DELSUN traite les principaux alliages cuivreux, bronzes et laitons. Un dépôt chimique poly métallique (étain, cadmium, antimoine, indium) diffuse de 1 à 2 heures à 400 °C. Cela crée une phase très dure et très ductile en surface, couverte d'un fin manteau anti-grippage régénéré lors du frottement. Il est quasi impossible de faire gripper un acier et un matériau antagoniste traité, les performances restent correctes dans l'eau, d'où l'emploi en robinetterie. La surépaisseur vaut 7,5 microns et la rugosité optimale avant traitement 1 à 3 microns. Le

DELSUN double les pressions hertziennes tolérables et augmente la résistance à l'abrasion. On l'utilise sur des synchroniseurs, coussinets, fourchettes, engrenages, roues à vis sans fin, écrous, vérins, chemises, segments, clapets, vannes, tiges de commande, matrices pour tôles inoxydables, matériel électrique, pompes à engrenages [23].

I.4.3. Traitements divers :

-Chromaluminisation :

Cette diffusion simultanée de chrome et d'aluminium est spécifique des superalliages réfractaires à base de nickel et de cobalt utilisés dans les turboréacteurs. Elle en protège en particulier les ailettes contre l'érosion par les gaz de combustion qui circulent à grande vitesse [23].

-Tifran :

Le titane est léger, résiste bien aux contraintes et à la corrosion, mais grippe facilement sur lui-même ou sur l'acier. On a essayé, sans grand succès, diverses solutions :

- nouveaux lubrifiants,
- dépôts galvaniques : argenture, cadmiage, chromage,
- dépôts par projection : molybdène, carbure de tungstène
- diffusion de métallos : azote, bore, carbone,
- oxydation anodique.

Le Tifran réalise par diffusion en phase gazeuse à 700 °C une couche de 10 à 60 microns composée principalement d'oxydes, résistante au grippage et à l'usure, et qui rend possible la tenue de films lubrifiants de MoS₂ ou de PTFE. Cette couche peut frotter sur elle-même ou sur l'acier, mais pas sur le titane nu [23].

-Magnadise :

Les alliages de magnésium sont difficiles à protéger de l'abrasion et de la corrosion. Le traitement Magnadise de la société Générale Magnaplate Corporation, Linden, USA, forme une couche d'oxyde de magnésium poreuse, d'épaisseur 0,076 à 0,5 mm, imprégnée de PTFE

ou de MoS₂ et incrustée dans le réseau cristallin. Cette couche est très dure, lisse et glissante [23].

-Molynuz (pour divers métaux) :

Par électrolyse dans un bain aqueux de « para molybdate » et de sulfure d'ammonium, on réalise une couche de MoS₂ trois fois plus durable que celles obtenues par friction [23].

I.4.4. Les traitements superficiels par induction (principes et intérêts) :

Le « décolletage » est grand utilisateur des ces procédés de traitements car il produit beaucoup de pièces à fortes sollicitations, en volume 30% des pièces sont concernées. La particularité est que ces traitements superficiels sont de plus en plus intégrés dans les ateliers de décolletage.

Pour rappel, le traitement par induction (trempe superficielle) a pour but l'obtention d'une structure martensitique dans une couche superficielle comprise entre 0,3 et 5 mm. Pour cela la couche superficielle est portée en quelques secondes à la température d'austénitisation puis refroidie énergiquement et rapidement afin d'éviter le transfert thermique par conduction vers l'intérieur de la pièce.

Cette montée rapide en température s'effectue grâce à un générateur de tension Haute Fréquence (inducteur) constituant le primaire d'un transformateur, la pièce à traiter étant le secondaire. Comme les courants induits sont suffisamment intenses, les pertes par effet joule qu'ils subissent échauffent la périphérie de la pièce.

Ce traitement se prête bien aux moyennes et grandes séries, il permet d'avoir des cadences élevées, il est peu consommateur d'énergie, il utilise des aciers à faibles coûts [24].

-Dépôt d'un alliage par traitement « LASER » :

Dans l'acier on sait modifier les propriétés d'un métal par refusion de sa surface avec apport simultané d'éléments d'alliages. Le principe est le suivant : injection de poudre coaxialement dans un faisceau laser sur une pièce en aluminium. L'énergie entraîne la fusion de la poudre et de la surface de la pièce, on forme ainsi un alliage de surface d'environ 1 mm d'épaisseur

avec une bonne liaison métallique

Les éléments d'apport sont le cuivre, le nickel, le fer, le chrome, le cobalt, le molybdène. La dureté de l'alliage atteint 250 HV à 0,2 mm d'épaisseur pour un alliage à 40 % de cuivre et 350 HV à 0,2mm d'épaisseur pour un alliage à 25% de fer. La technique s'applique aussi bien au rechargement, apport par fusion du matériau seul, il permet d'élaborer des composites d'aluminium renforcés de particules de titane, de tungstène, de silicium [25].

-Aluminium en céramique :

Ce traitement consiste à transformer par un procédé non polluant la surface de l'aluminium en céramique dure. Cette couche atteint en surface 1400 à 2100 HV. Son épaisseur va de 50 à 120 μm . elle possède une remarquable résistance à l'usure, à la corrosion, une bonne protection thermique.

Le traitement, réalisé à température ambiante, se fait aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur, n'occasionnant aucune déformation ou perte des caractéristiques mécaniques. La couche de céramique peut être travaillée sans problème. Cette nouveauté ouvre des horizons pour l'aluminium (allègement des structures, de mécanismes, suppression du grippage entre pièces, remplacement de matériaux onéreux ou difficiles à mettre en œuvre) [26].

I.5.Effet de l'hydrogène sur les aciers :

I.5.1.Généralités sur l'hydrogène :

L'hydrogène ne se trouve dans l'atmosphère qu'à l'état de traces; il est généré, à partir des hydrocarbures (pétrole et ses dérivés), et à partir de l'eau, puisqu'il représente la fraction la plus légère de la molécule H_2O . L'hydrogène moléculaire H_2 est un gaz incolore, extrêmement inflammable, très léger, qui n'entretient pas la vie et réagit facilement en présence d'autres substances chimiques.

L'hydrogène est le plus petit des atomes et son faible rayon atomique fait qu'il est du même ordre de grandeur que la taille des sites interstitiels dans un réseau métallique. Il peut donc se trouver facilement en solution d'insertion dans les métaux usuels. Le tableau I.1.rassemble quelques grandeurs caractéristiques.

Trois isotopes	$^1\text{H}_1$ $^2\text{H}_1$ $^3\text{H}_1$		
Masse H	1,008 g		
Diamètres	d M -H	0,150 nm	
	d H - H	0,074 nm	
	r H	0,053 nm	
Taille des sites interstitiels	Fe (c.c.)	site tétraédrique	ri ~ 0,034 nm
		site octaédrique	ri ~ 0,019 nm
	Fe (c.f.c.)	site tétraédrique	ri ~ 0,029 nm
		site octaédrique	ri ~ 0,019 nm

Tab.6. Quelques grandeurs caractéristiques relatives à l'hydrogène, [60]

Le type de site interstitiel occupé est généralement directement en relation avec la taille des sites disponibles et dépend donc, pour une température donnée, du métal considéré et de sa structure cristalline. Dans le cas du fer et de ses alliages à la température ambiante, les sites interstitiels privilégiés sont les sites tétraédriques pour une structure cubique à corps centré (c.c.c.) et les sites octaédriques pour une structure cubique à face centrée (c.f.c.). Les sites d'insertion octaédriques et tétraédriques sont présentés sur la figure.21.

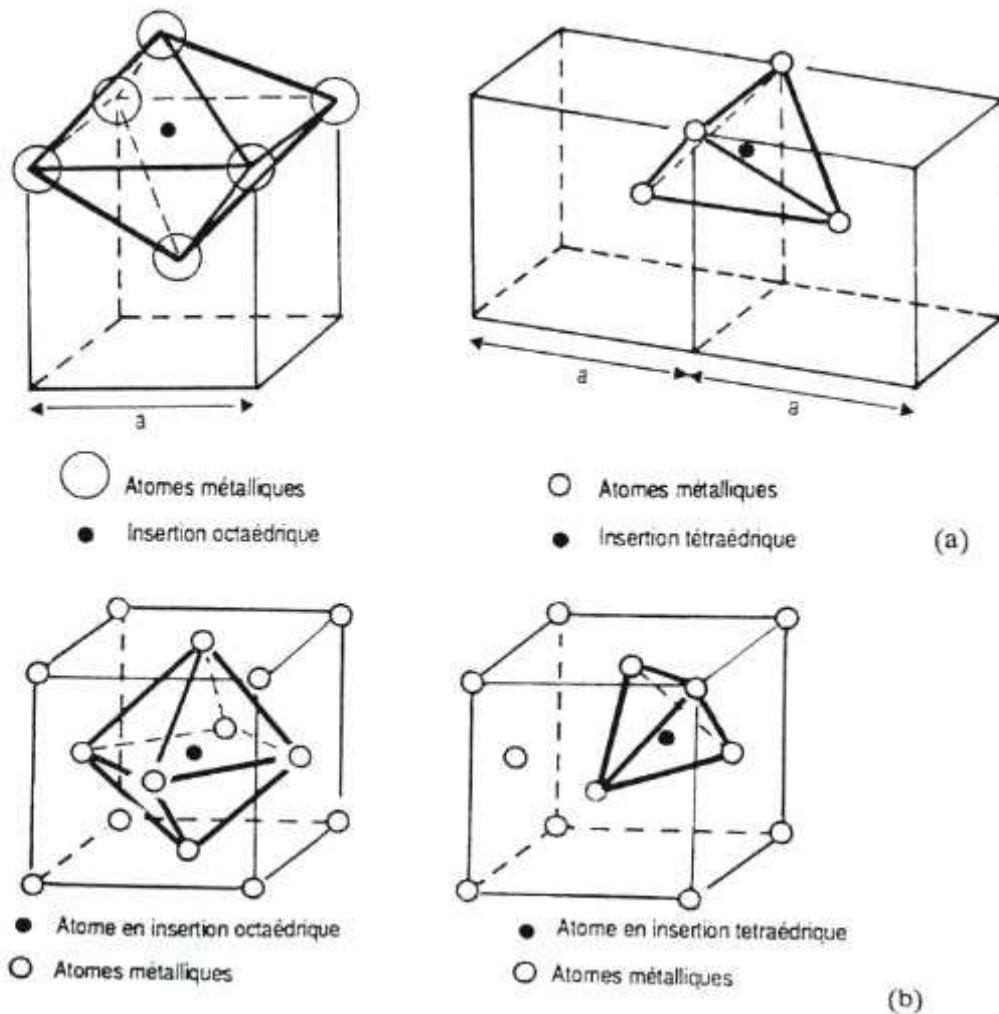


Fig. 23. Insertions octaédrique et tétraédrique, [60]

(a) dans structure c.c.c. (b) dans structure c.f.c.

Sa taille, sa masse et l'existence d'une forte densité de sites interstitiels disponibles, font que l'atome d'hydrogène possède une mobilité élevée dans la plupart des réseaux métalliques c.c.c. A la température ambiante, elle est généralement supérieure de plus de 10 ordres de grandeur à celle des autres interstitiels. L'hydrogène est en fait le seul élément pour lequel les vitesses de diffusion sont directement mesurables à la température ambiante.

Le comportement au niveau «électronique » est décrit par Chêne [60]. Il constate que l'aptitude de l'hydrogène interstitiel à transférer tout ou partie de sa charge électronique aux atomes proches voisins est à l'origine de son rôle particulier sur la cohésion des réseaux métalliques et notamment son effet fragilisant. L'hydrogène peut en effet simultanément modifier l'environnement électronique des atomes du métal donc les liaisons M-M et

favoriser la rupture de ces liaisons en diminuant l'énergie nécessaire au passage des électrons initialement engagés dans celle-ci, d'un état délocalisé à un état localisé. Cette propriété semble être associée à sa particularité de ne former des liaisons qu'avec des orbitales s dont le caractère non directionnel facilite le transfert électronique.

La solubilité dépend donc de la structure cristalline. Dans le fer, elle est environ 100 fois plus élevée dans la structure c.f.c. que dans la structure c.c.c. (a). La solubilité dépend sûrement de l'état sous lequel l'hydrogène peut se présenter. Par ailleurs, la solubilité théorique apparaît toujours inférieure à la solubilité réelle. Ce phénomène est le résultat de piégeage de l'hydrogène sur les défauts microstructuraux : dislocations, joints de grains et interfaces précipités – matrice.

Ce sont également ses propriétés électroniques particulières qui confèrent à l'hydrogène, en dépit de sa petite taille, un volume molaire partiel très élevé. Cette grandeur représente l'aptitude de l'hydrogène interstitiel à distordre le réseau métallique qu'il occupe. Sa valeur élevée se traduit par une forte aptitude de l'hydrogène à ségréger dans des champs de contrainte favorisant une dilatation des sites interstitiels, c'est-à-dire dans les zones des contraintes hydrostatiques de traction [62].

I.5.2. Mécanismes de pénétration de l'hydrogène :

a-Pénétration à partir d'un environnement gazeux :

L'absorption de l'hydrogène dans un métal nécessite la dissociation de la molécule H₂ au contact de la surface. L'interaction «métal-hydrogène » peut être représenté par les réactions suivantes [60]:

- 1) adsorption moléculaire $H_2 (g) + 2M \rightarrow MH_2 \text{ ads}$
- 2) dissociation $MH_2 + M \rightarrow 2MHads$
- 3) pénétration $MHads \rightarrow M + Hads$

En faisant l'hypothèse d'une solution diluée et d'un taux de recouvrement faible, l'activité de l'hydrogène dissous s'exprime pour un domaine de température et de pression d'hydrogène donné, selon la loi de Sieverts :

$$a(H_{\text{abs}}) = K [p(H_2)]^{1/2} \quad (18)$$

Où $p(H_2)$: pression d'hydrogène et K une grandeur fonction des constantes de vitesse des réactions citées ci-dessus.

Conformément à l'équilibre de la réaction de pénétration, la solubilité S est proportionnelle à l'activité $a(H_{\text{abs}})$, et peut s'exprimer, pour une solution diluée, sous la forme :

$$S = S_0 \cdot [p(H_2)]^{1/2} \exp[-\Delta H_S / k T] \quad (19)$$

Où ΔH_S est l'enthalpie de dissolution ; $S_0 =$ constante.

Cette expression illustre l'importance des deux paramètres : pression de l'hydrogène $p(H_2)$ et la température.

La présence d'impuretés dans l'atmosphère gazeuse est un autre paramètre très important car l'adsorption d'impuretés sur la surface peut se traduire à la fois par un blocage de certains sites d'adsorption (donc par une diminution du taux de recouvrement) et par une modification de l'énergie de liaison $M - H_{\text{ads}}$; il en résulte une modification du mécanisme et/ou de la cinétique de pénétration de l'hydrogène [60].

b-Pénétration à partir d'un environnement liquide :

Tout mécanisme de corrosion électrochimique implique l'existence, à l'interface « électrolyte-électrode ».

Dans tout environnement contenant de l'eau ou qui est source de cations H^+ (c'est ce type d'environnement dans lequel la corrosion électrochimique est rencontrée dans la majorité des cas pratiques), la réaction cathodique a une très forte probabilité d'être une réaction conduisant au dégagement d'hydrogène à la surface de la cathode.

Les mécanismes de décharge cathodique de l'hydrogène ainsi que l'absorption d'hydrogène qui leur est associée dépendent de nombreux paramètres :

- nature de l'électrolyte (pH, pureté, teneur en oxygène dissous, etc.)
- nature et état structural du métal (courant d'échange, hétérogénéités chimiques ou structurales sur la surface – film superficiel, impuretés, défauts, etc.)
- conditions de polarisation (densité de courant et surtout surtension d'hydrogène).

Les vitesses relatives de chacune de ces étapes conditionnent l'absorption d'hydrogène.

Elles dépendent de trois paramètres principaux : taux de recouvrement en hydrogène adsorbé Hads ; énergie d'adsorption ; surtension d'hydrogène sur la surface.

L'entrée de l'hydrogène à partir d'un environnement liquide il faut remarquer le rôle primordial de certaines impuretés dans la solution [63]. Il y a des espèces qui augmentent la surtension de l'hydrogène et ralentissent la recombinaison de l'hydrogène atomique en hydrogène moléculaire, favorisant ainsi la pénétration. On les appelle parfois des «poisons ». Ce sont des espèces inorganiques (H₂S, As₂O₃, Hg₂Cl₂, CO, CS₂, KCN, KSCN), ainsi que certaines espèces organiques. Par contre, il y a aussi d'autres espèces qui, dans l'environnement liquide, diminuent la surtension de l'hydrogène et facilitent sa recombinaison. Ce sont certains groupes de molécules organiques contenant par exemple des radicaux -NH, -CH, -OH. Il y a aussi le rôle des impuretés contenues dans le métal, qui sera discuté dans la partie concernant les facteurs métallurgiques intervenant dans le processus de fragilisation des métaux par l'hydrogène.

-Solubilité, perméabilité et diffusion de l'hydrogène :

L'hydrogène se dissout sous forme atomique ou protonique dans le fer et les aciers et se localise dans les sites cristallographiques les plus probables, tétraédriques ou octaédriques. La solubilité de l'hydrogène dépend de la structure de l'acier ; ainsi elle est beaucoup plus importante dans l'austénite, réseau cubique à faces centrées (c.f.c), que dans la ferrite a, réseau cubique centré (c.c.c.) [63],

A la température ambiante, la concentration d'hydrogène diffusible est donc environ 500 fois plus grande dans les aciers inoxydables austénitiques que dans les aciers peu alliés.

Les phénomènes de diffusion, provoqués par un gradient de potentiel chimique, résultant soit d'une variation de la concentration en hydrogène, soit d'un gradient de contrainte ou encore d'un gradient de température[64].

La diffusion est un phénomène thermiquement activé. La loi d'Arrhenius lie la température au coefficient de diffusion:

$$D=D_0 \cdot \exp \left[-\frac{E_d}{RT} \right] \quad (20)$$

Où D_0 : facteur de fréquence dépendant généralement du matériau et de la structure cristallographique [$m^2 \cdot s^{-1}$] ;

E_d : énergie d'activation de la diffusion [$\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$] ;

R : constante de gaz parfait ($R = 8,31 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) ; T : température [K].

Pour la diffusion d'hydrogène dans un système «fer – H », les valeurs de ces constantes sont :

$D_0 \approx 1\cdot 10^{-7} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ et $E_d \approx 13,4 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$. [64]

La diffusion interstitielle n'est pas le seul mode de transport de l'hydrogène dans le métal ; on connaît d'autres mécanismes, comme le transport par les dislocations mobiles, ou les « courts-circuits de diffusion ».

Le transport de l'hydrogène par les dislocations mobiles intervient en général lors d'une déformation plastique locale (fond de fissure par exemple). Il existe un champ supplémentaire de contraintes autour des dislocations. Ce champ de contraintes y favorise l'accumulation des atomes. L'hydrogène est « accroché » (piégé) par la dislocation et la suite dans son mouvement.

Donovan [64] a proposé une relation pour le transport d'hydrogène dû à une dislocation mobile en fonction de la densité de dislocations mobiles, la concentration en atomes d'hydrogène piégés autour d'une dislocation de longueur unité et la vitesse moyenne des dislocations mobiles. Il a montré que dans le cas de la structure c.f.c à la température ambiante, le flux d'hydrogène transporté par les dislocations mobiles est du même ordre de grandeur que le flux global, ce qui explique que le mode de transport par diffusion y joue un rôle secondaire. Dans une structure a (c.c.c.), la vitesse de transport par les dislocations mobiles est 105 fois supérieure à celle du transport par diffusion.

I.5.3.Mécanismes de piégeage :

La diffusion de l'hydrogène dans les métaux est perturbée par la présence de défauts dans le réseau cristallin. Ces défauts ayant une énergie d'interaction avec l'hydrogène plus élevée que celle des sites interstitiels du réseau, ils provoquent une localisation de l'hydrogène. On les appelle « pièges » de l'hydrogène et la probabilité d'en sortir est faible [65,] dépendant de cette énergie d'interaction.

Le passage de l'hydrogène dans les aciers présente alors un retard, dû à la réaction de piégeage apparaît plus faible, car les formules ne tiennent pas compte de la réaction de

piégeage. On parle alors d'un coefficient « effectif » (D_{eff}), ou aussi coefficient « apparent » (D_a).

Pour la première fois, le phénomène de piégeage et son influence dans le transport de l'hydrogène dans les aciers a été reconnu par Darken et Smith (1949). Depuis, de très nombreuses études ont pris en considération ce phénomène.

Pressouyre [65] a donné deux raisons principales pour lesquelles la probabilité de saut est modifiée dans le réseau:

- La première tient à l'existence d'une force «poussant» l'hydrogène dans une direction préférentielle; dans ce cas, la hauteur moyenne de saut reste inchangée, mais la probabilité pour l'atome de passer au-dessus de la barrière de potentiel est dissymétrique.
- La deuxième raison est liée à toute discontinuité physique du réseau, ce qui fait ici changer la hauteur moyenne de saut. Ainsi les pièges peuvent être identifiés en plusieurs catégories, (fig.24).

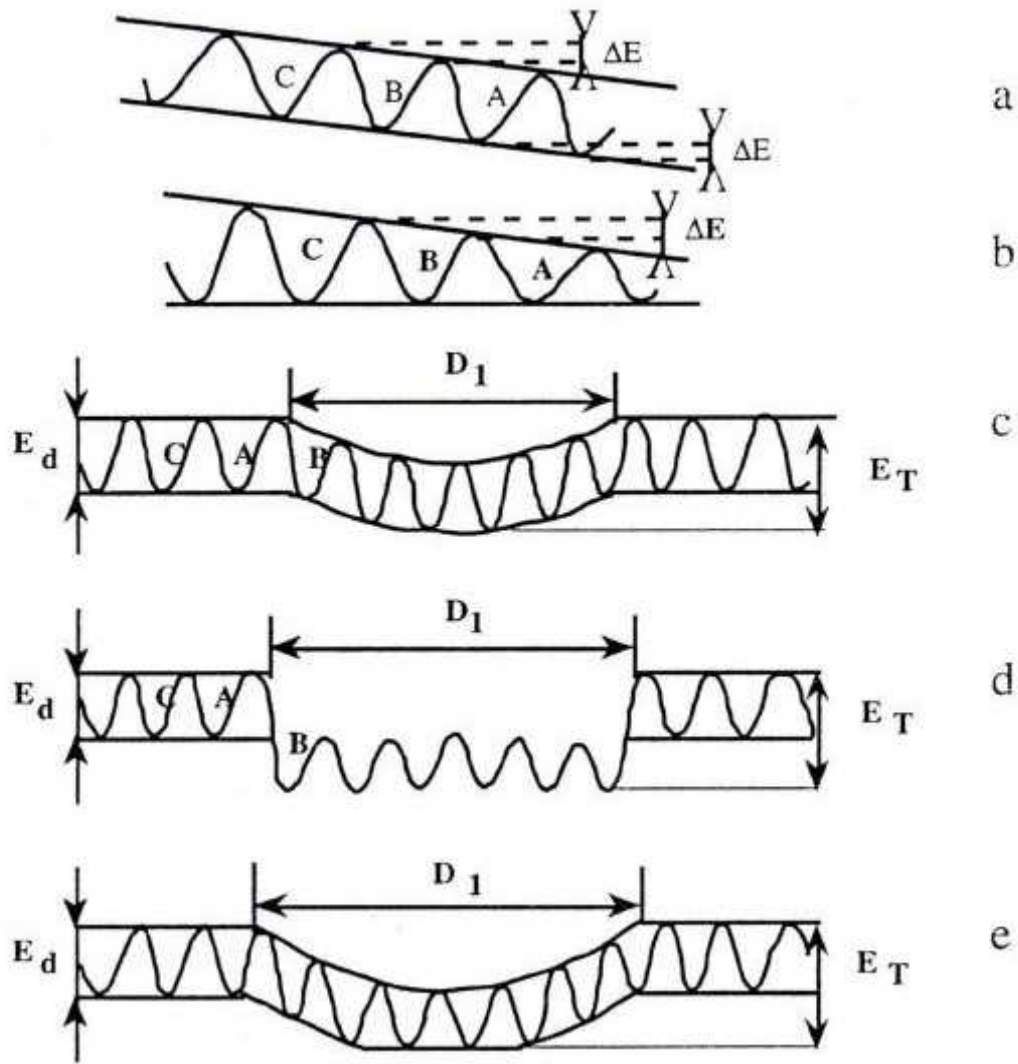


Figure.24 Variation énergétique des sauts de diffusion [65]:

Par existence:

a) d'une force agissant sur l'atome d'hydrogène

b) de perturbations physiques du réseau

Par piégeage :

c) piège attractif,

d) piège physique,

e) piège mixte.

a-Piège attractif :

Il résulte de l'existence de forces d'attraction pouvant maintenir en place un atome d'hydrogène dans un réseau. Elles ont quatre origines:

- .-électroniques
- .-contraintes
- .-thermiques
- .-gradient de potentiel chimique.

Il existe des pièges de taille atomique. Les éléments, à gauche du fer dans la classification périodique, peuvent attirer l'hydrogène ainsi que les atomes de substitution de plus petite taille que le fer.

- Les forces d'attraction d'origine électronique ont lieu chaque fois qu'un défaut introduira un manque d'électrons.
- .-Les forces engendrées par les contraintes doivent leur origine à l'existence de zones de tension où la solubilité de l'hydrogène est plus grande, par exemple dans la zone de traction au cœur d'une dislocation coin.
- Les forces dues au gradient de température accroissent la solubilité de l'hydrogène avec l'augmentation de la température.

b-Piège physique :

Ce sont des discontinuités du réseau cristallin, où l'état énergétique est favorable pour y placer de l'hydrogène. C'est le cas par exemple des joints de grains incohérents, des interfaces « particules – réseau », dislocations.

c-Piège mixte :

Ce sont des combinaisons de pièges attractifs et de pièges physiques comme les dislocations, avec le champ tridimensionnel de contraintes autour de chaque dislocation.

La réversibilité ou irréversibilité du piège est liée à son énergie de dé piégeage: il est évident que les pièges où l'énergie de piégeage est égale à celle de dé-piégeage sont des pièges réversibles, c'est-à-dire où est facilitée la probabilité pour l'hydrogène des' échapper.

Les phénomènes de piégeage ont les effets suivants [65] :

- augmenter la solubilité apparente de l'hydrogène ;
- diminuer sa diffusivité apparente ;
- introduire une éventuelle dépendance dans la cinétique de pénétration de l'hydrogène vis-à-vis de son activité sur la surface, ce qui n'est pas prévisible à partir des lois classiques de la diffusion ;
- .-favoriser des phénomènes de concentration locale qui sont à l'origine des mécanismes de la fragilisation par l'hydrogène.

I.5.4.Mécanismes de la fragilisation des métaux par l'hydrogène :

Au cours des années, ont été élaborées plusieurs théories ou mécanismes qui cherchent à expliquer le principe de la fragilisation par l'hydrogène - la cause de la dégradation des aciers sous l'action de l'hydrogène. La dégradation des propriétés mécaniques du fer par l'action de l'hydrogène est connue depuis longtemps. Ce phénomène a été mis en évidence déjà en 1875 par Johnson [65]. Depuis, les recherches fondamentales et appliquées concernant ce phénomène, se sont multipliées.

Dans la littérature existent plusieurs modes de classification des phénomènes de la fragilisation par l'hydrogène:

- .-Pressouyre [65] avait proposé une classification dans le cas des aciers, basée sur les domaines d'apparition des problèmes dans l'industrie: élaboration de l'acier, transformation de l'acier, problèmes en service;
- .-Fidelle [66] a établi une classification graphique des principaux modes d'action de l'hydrogène dans les métaux. Cette classification montre comment le comportement des matériaux peut être prédit à partir de tableau de Mendeleïev;
- une classification basée sur l'aspect phénoménologique des différents types de manifestations des phénomènes de fragilisation par l'hydrogène est réalisée par Hirth et Johnson et élargie par Coudreuse [66].

La figure 22. Présente une classification possible, selon Coudreuse [66], des différents types d'endommagements à partir de la source d'hydrogène :

-La source d'hydrogène est dite interne lorsque la fissuration intervient dans un matériau qui n'est pas exposé à un environnement susceptible de provoquer l'introduction d'hydrogène; l'hydrogène se trouve déjà présent dans le matériau, introduit au cours de l'histoire du matériau.

La source d'hydrogène est considérée comme externe lorsque le matériau se trouve dégradé en présence de l'environnement hydrogénant.

- Forte et faibles activités en hydrogène traduisent le fait que des quantités importantes ou négligeables d'hydrogène puissent être introduites dans le volume du matériau.

-Le 3ème critère pris en compte est la contrainte : on a distingué contraintes appliquées et contraintes internes, bien que dans les cas réels, il soit difficile de faire la distinction puisqu'il y a souvent conjugaison de ces deux types de contraintes.

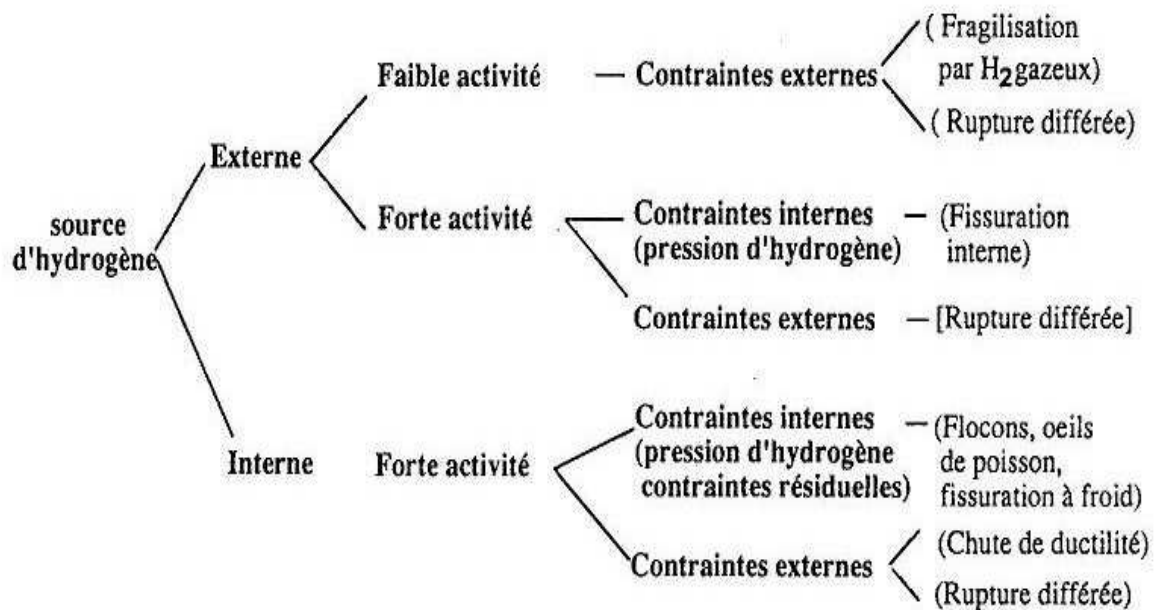


Fig.25. Classification des phénomènes de fragilisation par l'hydrogène [67]

Cette classification suggère les points suivants :

- Tous les phénomènes faisant intervenir une fissuration interne du matériau nécessitent une activité importante de l'hydrogène associée à des contraintes internes (contraintes résiduelles, ou provenant de pressions élevées d'hydrogène);
- Le phénomène de rupture différée peut être observé dans de nombreux cas :
 - hydrogène interne ou externe
 - forte ou faible activité en hydrogène.

-Les principaux modèles de fragilisation par l'hydrogène :

La plupart des théories ont été développées pour expliquer des cas concrets de fragilisation par l'hydrogène. Mais l'hétérogénéité des cas individuels fait que la plupart des théories existantes expliquent bien des dégradations spécifiques des aciers, et s'avèrent insuffisantes dans de nombreux autres cas. On ne peut pas prétendre qu'il y a une théorie universelle qui pourrait prendre en compte tous les cas de fragilisation par l'hydrogène.

Nous citons successivement les types de mécanismes des principales théories suivantes sans les détailler ; et que toutes ces théories ne s'intéressent qu'à la dégradation telle qu'elle est mentionnée à la (fig.23).

- Pression interne de l'hydrogène (Zapffe, Sims)
- .-Théorie de l'énergie de surface (Petch)
- .-Décohésion (Troiano, Oriani)
- .-Structure électronique du métal (Fidelle)
- .-Interactions « hydrogène – déformation plastique » (Bastien, Azou, Lynch)
- .-Formation des hydrures ou transformation de phases (Birnbaum)

I.6. Effets de l'eau de mer sur les aciers :

-L'oxygène dans l'eau de mer[68] :

L'oxygène joue un rôle important dans les mécanismes de corrosion du fer et des alliages du fer en milieu aéré. Les caractéristiques de la molécule d'oxygène ainsi que les mécanismes de sa réduction tant d'un point de vue thermodynamique que cinétique ; nous résumerons les résultats obtenus par les auteurs ayant étudié la réduction de l'oxygène sur le fer et les aciers inoxydables.

I.6.1. L'oxygène et sa réduction sur les aciers :

Dans l'eau de mer aérée, la concentration en oxygène dissous est très variable puisqu'elle dépend des facteurs physiques, chimiques et biologiques suivants : échanges à l'interface air-mer, diffusion et mélanges au sein de la masse d'eau, utilisation dans les phénomènes de photo-oxydation, les réactions d'oxydation chimique, les mécanismes de respiration et dénitrification par les organismes aquatiques, la production par la photosynthèse. La dissolution de l'oxygène est gouvernée par des lois physiques et dépend de la pression atmosphérique, de la température et de la salinité de l'eau. La solubilité de l'oxygène décroît lorsque la température et la salinité augmentent, mais elle s'accroît avec la pression. La solubilité de l'oxygène est de $2,810^{-4}$ mol l⁻¹ à 20°C en eau pure alors qu'elle est réduite à $2,3 \cdot 10^{-4}$ mol l⁻¹ à 20°C pour une salinité de 35. En général, la concentration en oxygène dissous est comprise entre 0 et $5 \cdot 10^{-3}$ /mol [69].

- Réduction de l'oxygène sur le fer :

L'état de surface constitue un élément déterminant dans les mécanismes de réduction de O₂. Aussi, nous distinguerons le fer "passif " ou "oxydé" et le fer "nu". Il est en effet difficile d'obtenir un état de surface stable sur le fer. De multiples changements sont susceptibles de se produire au niveau de la surface: ils peuvent résulter d'interactions entre des produits de la réaction de réduction de O₂ (OH⁻ ou H₂O₂) et le métal ou encore des produits de corrosion (Fe²⁺) en solutions neutres ou alcalines, des couches contenant des espèces Fe(II) et Fe(III),

dont la cohésion est assurée par des liaisons hydrox et oxo. La nature exacte de ces couches demeure cependant méconnue. En fonction des propriétés de ces couches superficielles, ces dernières seraient susceptibles de jouer le rôle de barrière de contact entre l'oxygène et le métal. Mais, ces couches pourraient aussi être des sites privilégiés pour la réduction de O_2 ou de H_2O_2 . Les différentes études menées jusqu'à présent montrent que la réduction de O_2 sur le fer a lieu à des potentiels où une réduction partielle des oxydes de surface est observée [69]. Il faut également préciser que la proportion Fe(II)/Fe(III) dans le film, dépend du potentiel de l'électrode. Selon Delahay, la réduction de O_2 sur le fer en solution phosphate à pH 6, fait apparaître un nombre apparent d'électrons variant de 2 à 4 au potentiel de -0,2 V à un potentiel inférieur à -0,6 V. Ces résultats indiquent une production de peroxyde d'hydrogène dont la quantité décroît lorsque le potentiel diminue. Cette dépendance du nombre d'électrons avec le potentiel de l'électrode a aussi été observée par Jovancicevic et Bockris[70].

Un transfert à 2 électrons a lieu sur le fer passivé (rendu passif) en milieu borate (pH 8,4), c'est à dire que le produit final de la réaction est le peroxyde d'hydrogène. Les auteurs soulignent l'importance de la chimisorption de l'oxygène sur la surface ($O_2 \rightarrow O_{2ads}$) considérée comme une étape déterminante pour la réduction d' O_2 sur des surfaces catalytiques. Sur une surface de fer nu, le mécanisme à 4 électrons est prédominant ; on observe par contre la production d'une faible quantité de H_2O_2 ; ceci a été notamment mis en évidence par la technique de l'électrode tournante à disque et à anneau (ETDA) [70]. Dans ce cas, l'étape déterminante serait la formation préalable d'ion super oxyde O_2^- suivi d'étapes chimique ou électrochimique permettant une rupture de la liaison O-O. Des résultats quelque peu différents ont été formulés par Zecevic et al[71]. D'après la technique de l'ETDA en milieu borate pH 9,8, la réduction de O_2 sur une surface de fer oxydé (30 min à 0V) se fait selon un mécanisme en série avec production d'un intermédiaire H_2O_2 . Ce peroxyde ne subit pas de décomposition catalytique. Sur une surface pré-réduite (30 min à -1V), il leur a été difficile de distinguer un mécanisme parallèle d'un mécanisme en série, car les résultats sont peu reproductibles et très peu de H_2O_2 est détecté à l'anneau (moins de 0,5% du courant de réduction). Ces mêmes auteurs ont remarqué que les cinétiques de réduction de O_2 étaient plus rapides sur les surfaces peu oxydées ou pré réduites (constante de vitesse = -0,157 V) que sur les surfaces oxydées (constante de vitesse = -0,110 à -0,130 V).

Gojkovic et al. [72] ont proposé deux modèles réactionnels pour la réduction de O_2 sur du fer passivé en milieu borate ($7,4 < \text{pH} < 13,8$). Ces modèles reposent tous deux sur le fait que l'adsorption de O_2 sur les sites $Fe(II)_{ox}$ est l'étape déterminante de la réaction. Selon le premier modèle, le centre actif permettant l'adsorption de O_2 est l'ion $Fe(II)_{ox}$ du film d'oxydes. $Fe(II)_{ox}$ est en effet capable de coordonner O_2 par des liaisons de type donneur-accepteur établies par transfert partiel ou complet d'électrons de $Fe(II)$ à O_2 . $Fe(II)_{ox}$ est alors transformé en $Fe(III)_{ox}$ alors que O_2 laisse place à O_2

-. Un complexe de type $Fe(III)_{ox}(OH_2)...O_2$

- est alors constitué [73]. Le second modèle suppose une adsorption de O_2 via O_2

- sur le film d'oxydes composé d'espèces $Fe(II)_{ox}(OH)_2$, aboutissant cette fois à un complexe $Fe(II)_{ox}(OH_2)...O_2$

-. L'adsorption directe de O_2 sur $Fe(II)_{ox}$ serait peu probable pour des raisons d'encombrement stérique : la surface est supposée couverte de molécules d'eau ou de groupements hydroxyles provenant de l'électrolyte, gênant alors l'accès de O_2 aux sites $Fe(II)_{ox}$ [74].

Selon Gojkovic et al. [73], la température de formation d'un film passif sur le fer en milieu basique (NaOH) ne semble pas avoir d'influence sur la réduction de O_2 , bien que les propriétés électro-catalytiques des films passifs soient rapidement rétablies lorsque la température est modifiée.

L'atmosphère (azote ou oxygène) pendant le traitement de passivation (30 minutes à 0V) du fer ne semble pas non plus avoir de répercussion significative sur la réduction de O_2 selon Zecevic et al [75].

Zecevic et al. [77] ont constaté que la réduction de H_2O_2 était plus rapide sur des surfaces peu oxydées ou pré-réduites que sur des surfaces peroxydées. Tandis que, la réduction de H_2O_2 dépend du pH de la solution en raison de l'équilibre acido-basique du couple H_2O_2/OH_2 .

Comme pour l'oxygène, les mécanismes précis de réduction de H_2O_2 sur le fer sont difficiles à établir car des interactions spécifiques entre H_2O_2 et le film passif sont susceptibles de se produire, rendant l'étape déterminante de la réaction dépendante du potentiel.

Les mécanismes réactionnels impliqueraient alors une coordination préalable de H_2O_2 avec un centre $Fe(III)$ précédant une réduction de l'espèce adsorbée. Par ailleurs, la vitesse de

décomposition de H_2O_2 sur le fer passivé en milieu alcalin est très lente ($1,8 \cdot 10^{-11} \text{ mol cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) [76].

Zecevic et al. [77] ont présumé la formation d'un film non conducteur formé par réaction de Fe avec H_2O_2 . Ce film serait responsable de la baisse de l'activité électro catalytique du fer pour la réduction de O_2 et de H_2O_2 . Les processus de réduction de O_2 sur le fer sont donc complexes puisqu'ils semblent dépendre de l'état du film d'oxydes et notamment du rapport Fe(II)/Fe(III) .

I.6.2. Le bio-film et l'eau de mer [88] :

En milieu aquatique, des cellules microbiennes adhèrent aux surfaces, croissent et se reproduisent ; c'est la phase initiale de formation d'un bio-film. Pour survivre et se protéger des agressions extérieures, les bactéries produisent des exo polysaccharides (EPS). Ce réseau polymérique, emprisonnant les micro-organismes, des matières particulaires, des débris a donné naissance au concept du bio-film. Des études bibliographiques complètes sur le biofilm ont été présentées dans les travaux de L'Hostis et de Benzoudid-Rollet. Puisqu'elles sont à l'origine du bio-film, on rappelle quelques notions élémentaires sur les différentes catégories de bactéries

-Les bactéries :

Toutes les bactéries font partie des procaryotes, terme désignant les organismes possédant une structure cellulaire simple où le matériel génétique est diffus dans toute la cellule.

Chez les eucaryotes (levures, champignons, plantes, animaux...), le matériel génétique est inclus dans un noyau cellulaire délimité par une membrane plasmique. La nature des cellules bactériennes est variée car elle dépend de l'environnement. Il est possible d'effectuer des classifications en fonction de différents paramètres liés à la forme et au métabolisme des organismes :

- Les bactéries sont couramment caractérisées par leur morphologie. D'une taille moyenne d'un micromètre, les bactéries sont sphériques ou coccoïdes (coques) ou encore en forme de

bâtonnets (bacilles). Les espèces coccoïdes peuvent se regrouper par paire ou former des amas, des chaînes. Les bacilles forment des chaînettes.

- Pour synthétiser leur propre matière, les bactéries ont besoin d'énergie. Cette énergie, véhiculée sous la forme d'adénosine triphosphate (ATP) provient d'une suite de réactions d'oxydoréduction catalysées par des enzymes. Le métabolisme repose généralement sur la dégradation du carbone : elles sont dites autotrophes si le carbone est d'origine minérale (CO₂), et hétérotrophes lorsqu'il est de nature organique. Si les bactéries utilisent aussi la lumière dans leur métabolisme, elles font partie des phototrophes, alors qu'elles sont dites chimiotrophes quand l'énergie est issue d'une réaction chimique.
- L'oxygène est un paramètre important : des bactéries aérobies ne se multiplient qu'en présence de O₂ ; les bactéries n'utilisant pas d'oxygène dans leur métabolisme sont dites anaérobies strictes et elles sont anaérobies facultatives quand elles se développent aussi bien en milieu oxygéné que dépourvu de O₂.
- Selon la température du milieu se multiplient les bactéries psychrophiles (0 à 20 °C), mésophiles (20 à 50 °C) ou thermophiles (> 50 °C).
- La majorité des colonies bactériennes répertoriées sont neutrophiles, c'est à dire qu'elles vivent dans des milieux proches de la neutralité (pH : 6 à 8). Elles sont acidophiles et alcalinophiles lorsqu'elles se développent respectivement dans des milieux acides ou basiques.

-Formation du bio film :

Les différentes étapes de la formation d'un bio film à la surface d'un matériau immergé en eau de mer ont été mises en évidence dans divers travaux.

La phase initiale concerne les premières minutes d'exposition : c'est l'adsorption de macromolécules organiques (exo polymères, protéines, glycoprotéines, acides humiques...) et de particules inorganiques présentes dans le milieu ou produites par des microorganismes [78].

Le film primaire ainsi constitué est essentiel, car les propriétés de surface (tension de surface, énergie de surface, mouillabilité) qui le caractérisent, conditionnent l'adhésion ultérieure des bactéries. La colonisation de la surface par les bactéries, après quelques heures d'exposition,

se produit en deux étapes [79] : une adhésion réversible est tout d'abord observée, régie par des interactions faibles entre le support et les bactéries ; l'accrochage deviendrait irréversible à partir du moment où les bactéries fixées sécrètent des polymères extracellulaires, qui assurent la cohésion du bio-film.

Si les conditions physico-chimiques à l'interface métal-solution sont favorables, la croissance et la multiplication des bactéries colonisatrices, sous la forme de micro-colonies, se poursuit pour atteindre un état stationnaire, rythmé par des étapes de détachement et de nouvelles adhésions assurant ainsi l'évolution de différentes populations bactériennes au sein d'un bio-film mature. A cela, il faut ajouter la présence de micro-algues [80], lorsque le milieu est éclairé.

L'adhésion des bactéries, la formation du bio film et son développement sont conditionnés par différents facteurs :

- La température de l'eau de mer joue un rôle certain dans la formation d'un bio-film puisqu'elle intervient dans la vitesse de croissance bactérienne, les cinétiques des réactions chimiques et enzymatiques, la concentration en oxygène dans l'eau de mer.
- Le pH intervient dans les mécanismes d'adsorption des bactéries puisqu'il semble modifier les double couches électrostatiques du support et des bactéries [81].
- Pour se développer, les bactéries ont besoin de carbone, d'azote, d'hydrogène et d'oxygène, éléments à la base de la vie de la plupart des organismes vivants. Les matières organiques dissoutes dans l'eau de mer (acides organiques, acides aminés, oses, polysaccharides....) constituent donc une source nutritive essentielle. Ces substances jouent également un rôle important dans la formation du film primaire.
- La composition chimique du support, et notamment sa toxicité, influence la vitesse décolonisation des bactéries et leur morphologie⁶⁸. L'adhésion des micro-organismes est favorisée par les irrégularités présentes à la surface des métaux immergés: les joints de grains dans les films d'oxydes recouvrant les aciers inoxydables présentent une énergie de surface élevée améliorant l'attachement et le développement des bactéries.
- Les conditions hydrodynamiques sont importantes puisqu'elles déterminent non seulement les caractéristiques du transfert de matière (nutriments, bactéries...) vers le bio-film, mais également les forces de cisaillement [82], influençant de ce fait l'épaisseur et la morphologie du bio-film. Selon Lewandowski et Walser [83], l'épaisseur du bio-film est maximale dans des conditions hydrodynamiques transitoires, c'est à dire intermédiaires entre les régimes

laminaire et turbulent. Lorsque l'écoulement est faible, la vitesse de colonisation de la surface est rapide et un état stationnaire est très vite atteint, l'apport de nutriments étant limité. Au contraire, si le flux est important, le transfert de matière n'est plus limitant et la croissance des micro-organismes est très rapide, bien que l'attachement initial des cellules sur les surfaces soit rendu plus difficile.

Lorsque les forces de cisaillement sont élevées, le bio-film est plus fin et plus dense [84].

-Propriétés physico-chimiques du bio-film :

Comme nous venons de le voir dans le paragraphe précédant, le développement d'un bio film dépend de différents paramètres, ce qui lui confère des caractéristiques structurales et chimiques variées.

a- Morphologie du bio-film :

Les études récentes, basées sur l'emploi de techniques microscopiques (Microscope Electronique à Balayage MEB, Microscope Electronique à Transmission MET, Microscope Laser à Balayage Confocal MLBC, Microscope à Force Atomique MFA) montrent que les bio films n'ont pas une structure plane et régulière où les cellules seraient réparties de façon homogène, car les bio films adoptent des structures complexes constituées de cellules et d'amas de bactéries (micro-colonies), répartis aléatoirement dans un réseau de polymères fortement hydratés décrivant des pores ou des canaux[85]. Costerton a proposé un modèle pour décrire le bio-film. L'épaisseur d'un bio-film est très variable puisque la structure d'un bio-film est elle-même non uniforme. Selon Characklis [86], un bio-film peut s'étendre de quelques micromètres à plusieurs centimètres suivant le milieu de croissance, la nature des bactéries, le support, l'âge. Des épaisseurs de 30 à 70 μm ont été mesurées par microscopie sur des échantillons de platine immergés entre 2 et 24 mois en eau de mer (Baie de Delaware, USA) [87]. Les films microbiens développés sur des supports en or après 10 jours en eau de mer circulante (Brest) atteignent des épaisseurs de 4 à 8 μm , comme l'ont montré des techniques électrochimiques [88].

b- Composition du bio film :

Un bio film est composé principalement de cellules bactériennes et de polysaccharides extracellulaires⁸⁰ ; sa particularité est d'être fortement hydraté puisque la teneur en eau atteint 80 à 95 %. Les exo polysaccharides sont majoritairement composés de sucres courants comme le glucose, le galactose, le mannose, le rhamnose ou encore de l'acide glucuronique [89]. Selon la nature des cellules excréant les EPS, de l'acide uronique, des hexoamines ou des protéines sont également décelés. La nature des bactéries fixées et leur densité peuvent être très diverses. Selon Fera, les formes sphériques (coques) et en bâtonnets (bacilles) constituent les premiers types bactériens à se fixer ; ensuite se développent des formes filamenteuses pédonculées. Lorsque le bio-film s'est développé à la lumière, on y détecte aussi des micro-algues, essentiellement sous la forme de diatomées [90] La présence d'algues microscopiques implique une activité photosynthétique et donc une production d'oxygène.

Un bio-film ainsi constitué peut délimiter des zones où les conditions chimiques à l'interface métal-bio-film sont différentes de celles observées dans le milieu environnant.

L'activité métabolique des micro-organismes modifie en effet la composition chimique au voisinage de la surface. Grâce notamment à l'utilisation de micro-électrodes [91], introduites dans le bio-film, des informations ont été recueillies sur les teneurs en oxygène dissous, en protons, en cations métalliques...

Les concentrations en oxygène dissous peuvent être très variables dans le bio-film : des zones anoxiques sont observées à côté de régions aérées [85]. L'hétérogénéité morphologique du bio-film (pores et amas) liée à la complexité du métabolisme des micro-organismes explique ces résultats : l'oxygène est susceptible d'être consommée par les bactéries (aérobies), ce qui entraîne un appauvrissement local en O₂ ; parallèlement, la présence de micro algues (bio-film formé en zone éclairée) assure une production d'O₂ via la photosynthèse. On admet généralement que la concentration en O₂ dans les pores est la même que dans la solution.

Des modifications locales du pH sont susceptibles de se produire puisque des acides sont produits lors du métabolisme de certaines bactéries : c'est le cas des bactéries sulfo-oxydantes qui excrètent de l'acide sulfurique. Dans l'ensemble, les résultats obtenus en eau de mer

naturelle sont très variables : certains auteurs observent des zones du bio-film où le pH est acide alors que d'autres ne notent pas de différences avec le pH de l'eau de mer [90]. Selon Little et al. [92], il existerait dans les bio-films développés en l'absence de lumière, des régions plutôt acides et d'autres à caractère basique.

Les bio-films seraient également susceptibles de contenir du peroxyde d'hydrogène issu du métabolisme des micro-organismes [93]. Il est en effet connu que certains organismes marins produisent du H₂O₂ à partir de l'oxygène dissous. Des biologistes s'intéressant aux marées rouges toxiques ont montré que certains phytoplanctons, type *Chattonella Marina*, forment du H₂O₂ ainsi que l'ion superoxyde [94]. Oda et al. [94] ont mentionné que ces espèces possèdent des compartiments pouvant accumuler H₂O₂. Selon Palenik et Morel⁹⁶, H₂O₂ provient de la dégradation d'amines primaires sous l'action d'amine oxydases des phytoplanctons marins.

La respiration cellulaire de bactéries marines aérobies telles que la *Pseudomonas nautica* 617, engendre une production de H₂O₂ par l'intermédiaire d'une oxydase [95].

La chélation de ces derniers est susceptible de se faire via une interaction entre les charges négatives des polymères et les charges positives des cations métalliques présents dans le milieu. Des éléments tels que Cu, Mg, Ca, Pb, Fe, Zn, Ni, Cd et Cr, sous leurs formes ioniques, peuvent être fixés par les EPS [96]. Ainsi, de faibles concentrations en manganèse et en fer (25 µM) ont été détectées par des méthodes volta métriques à une microélectrode Hg-Au introduite dans un biofilm marin (20 à 400 µm d'épaisseur) développé sur une plaque en platine [87]. Cependant, les teneurs en métaux contenus dans un bio-film dépendent de sa nature ce qui explique là encore l'hétérogénéité des résultats. Le bio-film apparaît également enrichi en sulfure, potassium ou encore calcium [92].

c-Transport de matière dans le bio-film :

Parce que le bio film a une structure polymérique plus ou moins dense, on lui attribue souvent un rôle de barrière de diffusion aux transports de matière par diffusion (nutriments, cellules, oxygène....etc). Il est cependant très difficile de modéliser des profils de concentration types dans le bio-film car les paramètres à prendre en compte sont multiples (diffusion moléculaire, vitesse de consommation par les micro-organismes...etc). Les travaux récents de Xu et al. [87]

ont montré que la distribution des espèces chimiques dans le film microbien n'est pas uniforme, ce qui confirme l'hétérogénéité des bio-films (clusters microbiens, pores interstitiels...). Le flux de matière dans le bio-film est commandé par la géométrie et l'orientation des pores [97]. Les valeurs des coefficients de diffusion répertoriées dans la littérature sont souvent très différentes selon les auteurs, probablement parce que les bio-films examinés n'étaient pas les mêmes (nature, âge, épaisseur, densité, structure...) [98] et parce que la méthode expérimentale permettant le calcul est différente. Pour l'oxygène, les coefficients de diffusion dans un bio-film représentent 40 à 100% de leurs valeurs dans l'eau [99]. Plus récemment, De Beer et al. [85] et L'Hostis [88] ont montré que les coefficients de diffusion dans les bio-films ne sont pas très différents de ceux mesurés dans le milieu environnant. Ce résultat n'est pas surprenant si on considère que le bio-film est constitué de 80 à 95 % d'eau et qu'il comporte des pores dans lesquels l'eau circule librement. Selon Mattila et al [100], le recouvrement partiel de la surface par le bio-film rend l'oxygène directement accessible à la surface. Du fait de la nature polymérique du bio-film, on lui attribue aussi des propriétés Viscoélastiques [101].

Le bio-film est donc non uniforme, fortement hydraté, constitué d'amas bactériens, de micro-algues, de polymères extracellulaires et de pores. Ses propriétés sont liées au pouvoir fixateur des EPS, à l'activité métabolique des micro-organismes vivant dans le bio-film et créant une interface métal-bio-film où les conditions chimiques sont différentes du reste de la solution. Ce dernier point nous amène à nous interroger sur les conséquences de la présence d'un bio-film marin sur l'évolution du métal. C'est ce qui est abordé dans le paragraphe suivant.

I.6.3. Comportement des aciers inoxydables en eau de mer :

a-Corrosion des aciers inoxydables en eau de mer [102]. :

Les aciers inoxydables exposés à l'eau de mer naturelle sont sujets à de la corrosion localisée telle que la corrosion par piqûres, la corrosion cavernueuse ou la corrosion sous contrainte ou encore la corrosion bactérienne, également appelée corrosion influencée par les micro-organismes (CIM). Ces formes de corrosion sont largement décrites dans les publications scientifiques. Le choix d'un acier inoxydable devant être immergé en eau de mer est donc

important ; cela nécessite une bonne connaissance des propriétés du matériau à l'égard de la corrosion dans le milieu d'exposition. A cet effet, il existe des recommandations et des tests spécifiques permettant de prévoir la tenue de l'alliage à la corrosion.

Une forme de corrosion avec des vitesses très élevées peuvent conduire à la perforation des structures, connue sous le nom de La corrosion par piqûres résulte d'une rupture locale de la couche d'oxydes, amorcée par des ions Cl⁻. Plusieurs mécanismes de piqûres ont été proposés. L'amorçage dépend de la stabilité du film d'oxydes, de l'épaisseur du film, de la composition de l'alliage, de l'agressivité du milieu. La propagation des piqûres s'effectue à partir de la rupture locale du film, où le métal actif est exposé au milieu environnant.

Expérimentalement, la détermination du potentiel de piqûres est délicate car la dispersion des résultats est importante.

b-Corrosion caverneuse ou par crevasses :

Ce type de corrosion est spécifique des zones confinées à la jonction de deux structures sous un joint ou un dépôt; les échanges convectifs avec la solution y sont réduits, ce qui limite localement la concentration en oxygène dissous et favorise la diminution du pH ; celui-ci atteint alors une valeur critique (pH de dé passivation) en dessous de laquelle le film n'est pas stable. Le métal se dissout à l'état actif entraînant une accumulation de cations métalliques neutralisés par la pénétration des ions chlorures. Un couplage galvanique s'établit alors : la caverne est le siège de la réaction anodique (oxydation du métal) alors que le reste de la surface constitue le siège de la réaction cathodique (réduction de l'oxygène) [107]. Selon plusieurs études [104], les bio-films marins augmentent la vitesse de propagation de la corrosion par crevasse sur des alliages peu résistants. La résistance des aciers inoxydables à la corrosion par crevasse a été étudiée notamment lors du projet européen " Marine Science and Technology" MAST II [105].

L'action combinée de contraintes mécaniques et d'un milieu agressif conduit à l'apparition de fissures, qui peuvent avoir un caractère inter granulaire, trans-granulaire ou mixte.

En milieu chloruré, la corrosion sous contrainte peut apparaître sous la forme de piqûres ; elle survient lorsque le potentiel du métal atteint une valeur critique confondue avec le potentiel de piqûre (cas de la Corrosion sous contrainte).

c-Corrosion influencée par les micro-organismes (CIM) :

De tous les micro-organismes pouvant provoquer la corrosion, les plus répandus sont les bactéries anaérobies réductrices des sulfates ou des thiosulfates. Celles-ci se développent en milieu désaéré ou sous des dépôts, dans les vases. Une large description des cas de corrosion attribués à la CIM sur différents matériaux, et surtout sur les aciers inoxydables, est disponible dans la littérature spécialisée [106]. Différents mécanismes sont proposés pour expliquer les processus intervenant dans la CIM : formation de cellules de concentration (oxygène, pH, cations métalliques), production de métabolites agressifs par les micro-organismes (acides organiques ou inorganiques). Mais, les mécanismes ne sont pas complètement connus.

d-Evolution du potentiel de corrosion :

Dans cette partie, nous emploierons indifféremment les termes de potentiel de corrosion ou de potentiel d'abandon. Ce potentiel caractérise un métal en équilibre avec un milieu donné. Le potentiel est mesuré entre une électrode de travail (matériau en acier inoxydable) et une électrode de référence au calomel saturée (ECS), dans un milieu donné (eau de mer). C'est une grandeur qui est très utilisée en milieu marin pour suivre l'évolution des matériaux métalliques tels que les aciers inoxydables et pour évaluer les risques de corrosion [108]. Les études relatives à l'évolution du potentiel d'abandon des aciers inoxydables en eau de mer naturelle sont nombreuses. On sait qu'une augmentation du potentiel d'abandon des aciers inoxydables se produit lorsque ceux-ci sont immergés en eau de mer naturelle circulante. Les travaux du programme européen MAST II[109], réalisés en collaboration avec des laboratoires ouverts sur différentes mers, ont en effet clairement démontré que l'élévation du potentiel d'abandon est indépendante de la situation géographique, de la saison, de la composition et de la microstructure de l'alliage. Le potentiel atteint est de l'ordre de 0,3 à 0,4 V après 30 jours d'immersion. Cette étude confirme les observations de Mollica et Trevis qui ont été les premiers à relier l'élévation du potentiel d'abandon et établissement d'un bio-film. Par la suite, l'augmentation du potentiel d'abandon d'échantillons en acier inoxydable a été relatée dans de nombreux travaux, quelle que soit la composition de l'alliage exposé [110]. Il a été constaté que le temps précédant l'augmentation du potentiel (temps d'incubation) et la

vitesse d'augmentation de celui-ci sont influencés par la vitesse de circulation de l'eau, la saison, la température.

Selon Mollica et Trevis, l'augmentation de ce potentiel est faible lorsque la vitesse d'écoulement de l'eau est importante. (Aciers inoxydables 316L et 304L immergés pendant 30 jours, vitesses de circulation (0,35 à 5,2 m s⁻¹) aux débits élevés, le temps avant augmentation du potentiel est plus long et le degré d'anoblissement semble plus faible. Des mêmes observations ont été faites lors du programme européen [111]. Les vitesses d'écoulement élevées semblent donc défavoriser la fixation des bactéries. Cependant, ces résultats ne font pas l'unanimité puisqu'ils sont contredits par quelques auteurs, qui constatent que la vitesse de circulation d'eau (de 0,05 à 4,2 m s⁻¹) est sans effet sur l'évolution du potentiel des alliages; au bout de 50 jours, ce dernier atteint 300 mV [112].

L'équipe de Mattila [100] ne constate pas d'augmentation du potentiel de corrosion (alliage 316L) pour de faibles débits d'eau de mer (inférieurs à 1 cm s⁻¹), ce qu'ils expliquent par le fait que le Bio-film est faiblement attaché à la surface. Lorsque la circulation de l'eau est arrêtée, le potentiel chute d'environ 100 mV en 4 jours [113] : l'eau est dite "biologiquement morte" puisque l'apport de matière organique et biologique a été stoppé.

Bien que l'augmentation du potentiel ait été observée dans les travaux cités précédemment, certains auteurs ne partagent pas cet avis puisqu'ils n'observent pas d'augmentation significative du potentiel [92]. Leurs résultats, concernant des alliages 316 ou 304 immergés dans l'océan Pacifique ont été contestés par Bardal et al [114] et par les travaux des participants au programme européen MAST [109]. Cette divergence pourrait avoir pour origine l'éclairage pendant l'exposition des aciers. Là encore, les constats sur l'effet de la lumière divergent d'une étude à l'autre. Alors que les travaux du programme MAST [109] et ceux de Bardal et al. [114] ne montrent aucune influence de l'éclairage, Dexter et Zhang [115] constatent que le potentiel d'abandon est plus élevé, de 100 à 200 mV, lorsque les échantillons sont au contact d'une eau de mer non éclairée. Cette différence peut être expliquée par la présence d'algues sur les surfaces éclairées et donc d'une activité photosynthétique susceptible de modifier le pH, les concentrations en dioxyde de carbone et oxygène dans le bio-film. Les travaux de Motoda montrent que l'augmentation du potentiel

d'abandon est plus rapide en l'absence de lumière, mais le potentiel final est le même avec ou sans éclairage. A l'inverse, selon les travaux de Little et al [90], le maintien à l'obscurité ne produit pas d'élévation du potentiel des aciers inoxydables, résultat également observé sur du titane [116], bien que les surfaces soient couvertes d'un bio-film. Les auteurs ne donnent pas d'explications, mais on peut penser que le bio-film obtenu était suffisamment épais et dense pour créer des conditions favorables au développement de bactéries anaérobies sulfato-réductrices. Ringas et al. [117] ont en effet constaté une diminution du potentiel d'abandon des aciers inoxydables en présence de bactéries sulfato-réductrices.

Lorsque l'influence de la lumière naturelle (alternance jour-nuit) est analysée [118], l'enregistrement du potentiel montre des valeurs plus élevées le jour et une diminution la nuit. Mansfeld et ses collaborateurs n'observent pas d'effet de la luminosité sur le potentiel, ce dernier conservant une valeur faible comprise entre -100 et 0 mV. Selon les différents résultats, il est difficile d'avoir une idée claire sur l'influence de l'éclairement.

Dans toutes les expériences décrites précédemment, l'accent a été mis sur l'influence du bio film et des micro-organismes (bactéries, micro-algues) sur l'augmentation du potentiel d'abandon des aciers inoxydables. La majorité des travaux réalisés dans des eaux de mer dépourvues de micro-organismes (artificielle et naturelle) confirment le rôle du bio-film dans l'augmentation du potentiel d'abandon des alliages. Dans tous les cas cités, sauf celui des expériences de Dupont, une augmentation modérée du potentiel se produit ; la valeur finale est comprise entre 0 et 100 mV, c'est à dire qu'elle demeure inférieure de 200 à 300 mV à celle mesurée en milieu naturel. Cette évolution pourrait résulter de la formation d'une couche d'oxydes stable au contact de l'eau de mer. Dupont, lui ne constate pas de variation du potentiel dont une valeur reste voisine de -180 mV. Les résultats de Little et al. sont toujours en contradiction puisque le potentiel mesuré en milieu stérile est supérieur à celui observé en milieu naturel [119].

Toujours dans le but d'étudier l'influence du bio film sur le vieillissement des aciers inoxydables, Scotto et al. ont montré que le potentiel d'abandon chute lorsque de l'azote de sodium, inhibiteur de l'activité respiratoire est ajouté au milieu. Cette observation n'apporte aucune information relative à l'effet du bio-film, car cette espèce chimique possède des

propriétés réductrices, ce qui suffit à expliquer la chute du potentiel. Dans une eau de mer préalablement irradiée (10^5 lux), il n'y a pas d'élévation du potentiel ; les conditions d'irradiation ne sont pas très précises mais ce procédé ne semble pas avoir d'influence sur la densité de bactéries à la surface des aciers.

Finalement, on peut retenir plusieurs travaux publiés que l'évolution du potentiel de corrosion des aciers inoxydables en eau de mer naturelle est affectée par la composition chimique du milieu mais aussi par le développement d'un bio film sur la surface. Des valeurs de potentiel d'abandon comprises entre 0,2 et 0,45 V est ainsi généralement mesurées en milieu naturel, alors qu'elles ne dépassent pas 0,1 V en eau de mer dépourvue de microorganismes [120].

Bien que l'étude des aciers inoxydables en eau de mer naturelle suscite l'attention de nombreux chercheurs, des hypothèses ont été formulées sans qu'elles soient validées. Dexter les a exposées en se référant à la théorie du potentiel mixte appliqué à un métal passif. Il peut y avoir différentes causes à l'augmentation du potentiel d'abandon. Elle peut en effet être due à une modification de la branche anodique, correspondant à l'oxydation du métal. Selon Scotto et Varjonen, cette hypothèse est peu probable car le courant de passivation n'évolue guère avec la formation d'un bio film. On peut donc penser que l'augmentation du potentiel d'abandon peut provenir d'une évolution des processus cathodiques de réduction de l'oxygène. La réaction étant gouvernée par la cinétique, les facteurs susceptibles de la diminuer (espèces adsorbées...) ou de la catalyser sont multiples, notamment en présence d'un bio film [121].

e-Evolution des processus de réduction d'O₂ sur des aciers inoxydables en fonction du vieillissement en eau de mer [122] :

On remarque donc, que l'état de surface des aciers inoxydables joue un rôle important dans les processus de réduction d'O₂. Le développement d'un bio-film lors de l'exposition de ces matériaux à l'eau de mer induit des modifications certaines comme nous venons de le voir dans l'étude du potentiel d'abandon. Avant de présenter plus en détail les travaux sur les processus cathodiques à la surface des aciers inoxydables, l'étude de la réaction de réduction

d'O₂ en fonction du vieillissement des alliages est abordée de différentes manières suivant les auteurs :

- (1) en traçant des courbes intensité potentiel dans la région où l'oxygène est réduit (potentiodynamique).
- (2) en mesurant le courant lorsque l'alliage est polarisé (potentiostatique); l'acier inoxydable est soit polarisé pendant l'exposition, soit après le vieillissement.
- (3) en enregistrant le courant d'un couple galvanique formé entre l'acier inoxydable (cathode) et un autre métal (anode : zinc, cadmium, fer, étain, molybdène...etc.). Le potentiel du couple est choisi de façon à « contrôler » la zone de réduction d'O₂. L'alliage est donc polarisé pendant la durée du vieillissement.

On remarque aussi que les mesures sont réalisées directement dans le milieu de vieillissement, stagnant ou en circulation, ou dans une cellule indépendante. L'aération du milieu est plus ou moins bien contrôlée. Les électrodes sont immobiles. Compte tenu des multiples conditions d'analyse de la réduction de O₂, il est parfois difficile de comparer les expériences entre elles. Mollica et Trevis sont parmi les premières personnes à s'être intéressées à l'évolution de cette réaction. Ils ont constaté que les processus sont modifiés lors du vieillissement des aciers inoxydables, quelle que soit la composition chimique de l'alliage : la vague de réduction de l'oxygène est déplacée vers des potentiels plus élevés (entre 0 et 0,3 V) et l'amplitude du courant augmente ; les expressions de "dépolariation cathodique" et de "catalyse de la réduction de O₂ par le bio-film" sont alors employées. Des conclusions similaires ont été formulées dans les années (80) par d'autres auteurs. La vitesse de circulation de l'eau de mer affecte le courant de réduction d'O₂ : une vitesse de circulation élevée semble retarder le phénomène de déplacement du potentiel. Mais, le mécanisme de réduction de l'oxygène n'a pas été réellement étudié ; il est généralement admis que O₂ est réduit en eau selon le processus à 4électrons. Motoda et al. Ainsi que Shams El Din et al. sont un peu plus précis dans l'analyse : ils distinguent une nouvelle vague de réduction vers 0 V dont l'amplitude croît avec le vieillissement de l'alliage, alors que la vague initiale (vers -0,6 V) ne subit pas de variations importantes. Les études les plus récentes évoquent la possibilité d'une modification de la vitesse, donc du mécanisme de réduction de O₂, avec le vieillissement de la surface. Au moyen de la technique de l'électrode vibrante (SVET), Mollica et al. ont établi une cartographie de la densité de courant, au potentiel de -0,8 V, sur des surfaces en acier

inoxydable couvertes ou non de bio-film ; ils ont déduit que la réduction de O_2 à la surface d'une électrode vieillie en eau de mer naturelle se produit selon deux cinétiques différentes, une lente et une rapide, sur des zones distinctes. Selon Shams El Din et al., le processus de réduction d' O_2 , initialement à 4 électrons se transforme en une réaction à 2 fois 2 électrons quand l'alliage a vieilli en milieu naturel ; ce résultat est cependant douteux car le rapport des courants des deux vagues n'est pas de 2 comme il devrait l'être. De façon à établir un lien avec l'effet du bio-film, quelques expériences ont été effectuées en eau de mer artificielle et en eau mer naturelle filtrée ($0,2\mu m$). Tous les auteurs concluent que la présence de micro-organismes dans le milieu d'exposition des alliages entraîne des modifications de la réaction de réduction d' O_2 . Là également, les travaux ne donnent aucune information sur les mécanismes, mais se contentent de souligner l'absence d'évolution de la vague cathodique avec le temps d'exposition des alliages dans le milieu artificiel.

On remarque que dans toutes les expériences citées, les conditions hydrodynamiques sont trop mal définies pour permettre une étude correcte des mécanismes de réduction d' O_2 .

f-Hypothèses proposées pour expliquer l'évolution du comportement électrochimique des aciers inoxydables en eau de mer naturelle :

De nombreuses hypothèses ont été formulées pour expliquer l'évolution de la réaction de réduction de O_2 des aciers inoxydables en eau de mer naturelle. Les réflexions de Salvago et al. rajoutent à la liste des hypothèses la possibilité d'une action par des poly pyrroles, ces derniers ayant la propriété de catalyser la réduction d' O_2 . L'idée d'une influence des oxydes manganiques est également étudiée par quelques équipes, des dépôts de manganèse ayant été mis en évidence dans des bio-films recouvrant des surfaces de platine. Scotto et al. suggèrent une action catalytique des enzymes produites dans le bio-film (métabolisme des bactéries) : le transfert électronique de la surface vers l'enzyme est susceptible d'être facilité par des médiateurs (polypeptides, protéines). Cependant, aucune des hypothèses n'a été vérifiée expérimentalement. De ce fait, elles doivent être analysées avec précaution [123].

Chandrasekaran et Dexter ont proposé que du peroxyde d'hydrogène puisse être produit, dans le biofilm, par des organismes de ce milieu complexe. En effet, la présence du peroxyde

d'hydrogène dans des bio-films formés sur des plaques de platine a été mise en évidence en utilisant un test colorimétrique spécifique des espèces peroxydes, et elle a été ensuite confirmée par une analyse volta métrique. De faibles teneurs en peroxyde d'hydrogène ont été détectées à l'aide de microélectrodes introduites dans le biofilm, mais les auteurs ne donnent pas de concentration précise. Certains organismes marins produisent en effet du peroxyde d'hydrogène .Il est donc tout à fait possible d'envisager une action de H₂O₂. Par ailleurs, l'acidification au sein du bio-film. Eashwar et ses collaborateurs rejettent la théorie d'une acidification locale : selon leurs résultats, l'anoblissement ne se produit qu'en présence de lumière, et, est de ce fait lié à l'existence de diatomées qui au contraire augmentent le pH. De plus, ils pensent que le pouvoir tampon de l'eau de mer est suffisamment fort pour maintenir la neutralité (pH 8).

Récemment, Olsen et al. ont démontré qu'un dépôt d'oxydes de manganèse formé par des bactéries mangano-oxydantes (milieu de culture) sur des aciers inoxydables induit une augmentation du potentiel d'abandon.

Il est probable que les oxydes de surface sont alors affectés par la présence du bio-film, ce dernier induisant des modifications chimiques à l'interface métal-bio-film[124].Le film se stratifie après 14 jours en eau de mer naturelle, les oxydes de fer migrant dans la zone externe du film.Ce dernier point montre l'importance des oxydes recouvrant les aciers inoxydables et la nécessité d'accorder plus d'intérêt à leur évolution avec le temps d'immersion en eau de mer [124].

I.7.Méthodes statistiques de planification des expériences :

I.7.1. Statistiques :

La **statistique** est une branche des mathématiques appliquées concernant la planification, le résumé et l'interprétation d'observations. La théorie des probabilités est largement utilisée dans le développement de la théorie des statistiques.

Dans la démarche statistique, le statisticien se fixe une hypothèse et détermine ensuite si celle-ci s'accorde avec les faits (matérialisés par des chiffres). Cette méthode s'oppose donc au plus récent « Data-Mininig » où aucune hypothèse n'a à être faite, et où le programme essaie de déterminer par lui-même les corrélations significatives.

La démarche statistique demande:

1. la planification d'expériences
2. le résumé statistique de données
3. l'interprétation de données statistiques.

Dans certaines formes de résumés statistiques, surtout la collecte d'information, la planification elle-même disparaît au profit des deuxième et troisième étapes. Dans ces disciplines les données sont collectées sans contrôle de la personne faisant l'analyse et le résultat devient plus un mode opérationnel qu'un consensus sur le sujet.

Certaines sciences utilisent des statistiques appliquées à leur domaine utilisant une terminologie spécifique (Bio statistique, Géostatistique, Statistique ...).

-Lois statistiques :

La répartition des probabilités, ou de la densité de probabilité, des phénomènes aléatoires suit souvent des lois relativement simples. Les lois de probabilité les plus connues sont [52] :

-La loi uniforme sur un intervalle $[a ; b]$: chacune des valeurs numériques réelles qui appartiennent à l'intervalle $[a ; b]$ à la même probabilité d'apparition (la loi uniforme la plus usitée est celle qui concerne l'intervalle $[0 ; 1]$)

-La loi normale, ou loi de Gauss- Laplace, avec sa courbe en cloche caractéristique, dite encore « gaussienne » (la loi normale la plus usitée est celle dont l'espérance mathématique vaut 0 et dont l'écart type vaut 1)

-La loi binomiale (ou alternative répétée), qui permet par exemple de répondre à la question : quelle chance y a-t-il d'obtenir 5 fois « pile » en jouant 11 fois de suite à pile ou face

-La loi de Poisson (loi des événements rares)

-La loi de χ^2 (qui sert au test du χ^2)

-La loi de student, utilisée dans le test de Student à la place de la loi normale, lorsque l'on ne dispose que d'un faible nombre d'observations.

-La loi de Pareto (20% des phénomènes contribuent à 80% des effets)

La connaissance d'un phénomène probabiliste se résume parfois à la seule connaissance de ses paramètres principaux, par exemple :

-L'espérance mathématique (la moyenne « théorique ») et l'écart type « σ » la loi de Gauss s'impose alors si aucune autre information n'est disponible)

-La moyenne seule (une distribution exponentielle négative est alors le choix le plus pertinent)

-Son intervalle (hors de toute autre information - ce qui est rarement le cas - seule la distribution uniforme conviendrait)

Dans la pratique, toute information additionnelle pourra être utilisée par la suite pour améliorer ces distributions.

a-Traitement d'une variable :

Dans le cas le plus simple, on fait n mesures, et on obtient n valeurs (x_i).

Une fois que l'on a collecté les résultats du sondage, il faut estimer E et σ . On utilise pour cela des estimateurs sans biais, en général la moyenne arithmétique pour estimer l'espérance

$$\hat{E} = X = (1/n) \cdot \sum_{(i=1 \dots n)} x_i \dots \dots \dots (21)$$

et la variance empirique corrigée pour le carré de l'écart type (ou variance)

$$\text{Relation (10) : } \sigma^2 = [1/(n-1)] \cdot \sum_{(i=1 \dots n)} (x_i - X)^2 \dots \dots \dots (22)$$

Il faut ensuite faire des tests pour vérifier que la loi choisie est judicieuse, notamment le test du χ^2 (ou Khi-deux, prononcer « ki-deux »).

b-Corrélation de deux variables :

Lorsque l'on collecte deux valeurs (x_i, y_i) par mesure, on travaille en fait avec deux variables aléatoires X et Y . X et Y sont dites corrélées si la connaissance de la valeur de X permet d'améliorer la qualité (la précision) de la prédiction de la valeur de Y . Concrètement, cela peut vouloir dire que le paramètre X influence le paramètre Y , ou que Y influence X , ou encore que X et Y ont une origine commune. On calcule pour cela un coefficient de corrélation (voir régression linéaire).

Souvent, un phénomène physique obéit à une loi simple, affine :

$$Y = a \cdot X + b$$

C'est le cas le plus simple de variables corrélées. à partir de mesures de couples de valeurs (x_i, y_i) , on veut établir a et b . Ceci s'appelle la régression linéaire.

D'autres phénomènes sont corrélés de manière exponentielle, ou sous forme de puissance (voir série statistique à deux variables en mathématiques élémentaires)

L'utilisation de cette notion est souvent abusive, car le fait que deux variables aléatoires soient corrélées ne signifie généralement pas qu'elles soient dépendantes l'une de l'autre (c'est-à-dire que la connaissance de la valeur de l'une permette de connaître exactement la valeur de l'autre). D'autre part, il faut être conscient qu'une corrélation n'induit pas toujours une relation de cause à effet entre les deux phénomènes mesurés (ils peuvent être corrélés à un phénomène source commune).

I.7.2. Planification d'expérience :

Planifier une expérience c'est choisir parmi les expériences réalisables celle dont on peut penser qu'elle apportera l'information la plus pertinente compte tenu du but poursuivi (qui peut être par exemple l'estimation des paramètres d'un modèle de structure donnée ou la discrimination entre plusieurs structures de modèles). C'est une étape importante de la modélisation, car un protocole mal conçu peut ruiner toute tentative d'interprétation des données.

Planification d'expériences optimise une fonctionnelle de F. Il existe souvent plusieurs paramétrisations possibles pour un même modèle. Ainsi par exemple, pour un modèle de compartiments, peut-on utiliser soit les micro-paramètres décrivant les échanges entre compartiments, soit les macro-paramètres

Le but final est donc définir le modèle mathématique décrivant le phénomène en une relation entre les différentes variables considérées. Pour y parvenir une expérimentation s'impose ou on va valoriser plusieurs paramètres envisagés afin de connaître l'influence des variations sur le phénomène [53]. Selon D. Benoit [54], tout résultat d'expérience ne peut être exact d'où les erreurs causées par :

-Considération que des variables importantes, qualifiées de principales.

-L'appareil de mesure n'est pas parfait.

-Les valeurs données aux variables ne sont pas estimées avec une infinie précision. (d'où l'introduction de la notion d'incertitude de mesure, amenant à utiliser en physique et en chimie, la loi de Student pour déterminer les incertitudes (intervalle de confiance))

Dans ces domaines la loi de Student, son utilisation se réduit souvent à multiplier l'estimateur de l'écart type par deux ou par trois pour avoir l'erreur acceptable.

Le calcul d'erreur constitue un ensemble de méthodes de calcul permettant d'estimer les erreurs sur des résultats au départ de incertitudes ou erreur sur les mesures..

De ce fait l'expérimentateur est amené à choisir un plan d'expériences, lui permettant d'aboutir au résultat voulu sans effectuer un nombre élevé d'essais.

I.7.2.1.Plans d'expériences [55]:

-Plan d'expériences du type 2^k :

Principe : Le tableau des données est du type suivant :

X_1	X_2	...	X_n	Réponse : Y
X_{11}	X_{12}	...	X_{1n}	Y_1
*	*	*	*	*
*	*	*	*	*
*	*	*	*	*
X_{n1}	X_{n2}	...	X_{nn}	Y_n

Dans lequel on a n variables et l'on a réalisé n expériences. Ce tableau permet de définir un modèle linéaire de régression multiple et l'analyse de variance permet de déterminer quels sont les facteurs dont l'influence est significative à un risque donné.

On appelle **facteurs**, les paramètres supposés influencer la **réponse** qui caractérise le comportement du phénomène étudié. Il est important de pouvoir attribuer à chacun des facteurs deux **niveaux**, l'un sera qualifié de « niveau bas » de valeur -1 , l'autre de «niveau haut» de valeur $+1$.

-Plan d'expériences du type 2^{k-p} :

Pour des expériences comprenant cinq ou plusieurs paramètres les plans 2^k nécessitent plusieurs essais. A cause des interactions de faibles influences, il y'a possibilité de réduire le nombre d'expériences avec une précision peu réduite (par exemple un plan de type 2^7 nécessitant 128 expériences peut être remplacé par un plan du type de 2^{7-4} pour devenir un plan de type 2^3 nécessitant ainsi 08 expériences).

-Plans d'expériences de 2^{ieme} ordre :

On utilise ce type de plans lorsque le type précédent nous donne un modèle mathématique inadéquat, malgré les répétitions des expériences douteuses. Les plans de 2^{ieme} ordre dure plus longtemps, cause pour laquelle on considère que les paramètres les plus influant.

-Plan d'expériences du type 3^k :

Dans ce type on ajoute un 3^{ième} niveau intermédiaire de valeur 0 entre les deux premières de valeurs +1 et -1 , en cas de nécessité on peut introduire deux autres de valeurs $-\alpha < -1$ et $+\alpha > +1$

-Plan d'expérience du type composé $2^k 3^{k'}$:

Ce type est utilisé lorsqu' on prévoit des effets quadratiques de quelques paramètres parmi les autres comme on peut par exemple dissocier un plan de type 3^5 avec (243 expériences) , à un plan composé de $(2^3 \cdot 3^2)$ avec (72 expériences) ou même simplifier à un plan réduit de type 2^{3-1} d'où le plan composé de $(2^2 \cdot 3^2)$ avec (36 expériences). Avec les coefficients $b_0 = Y - 2/3 b_{ii}$

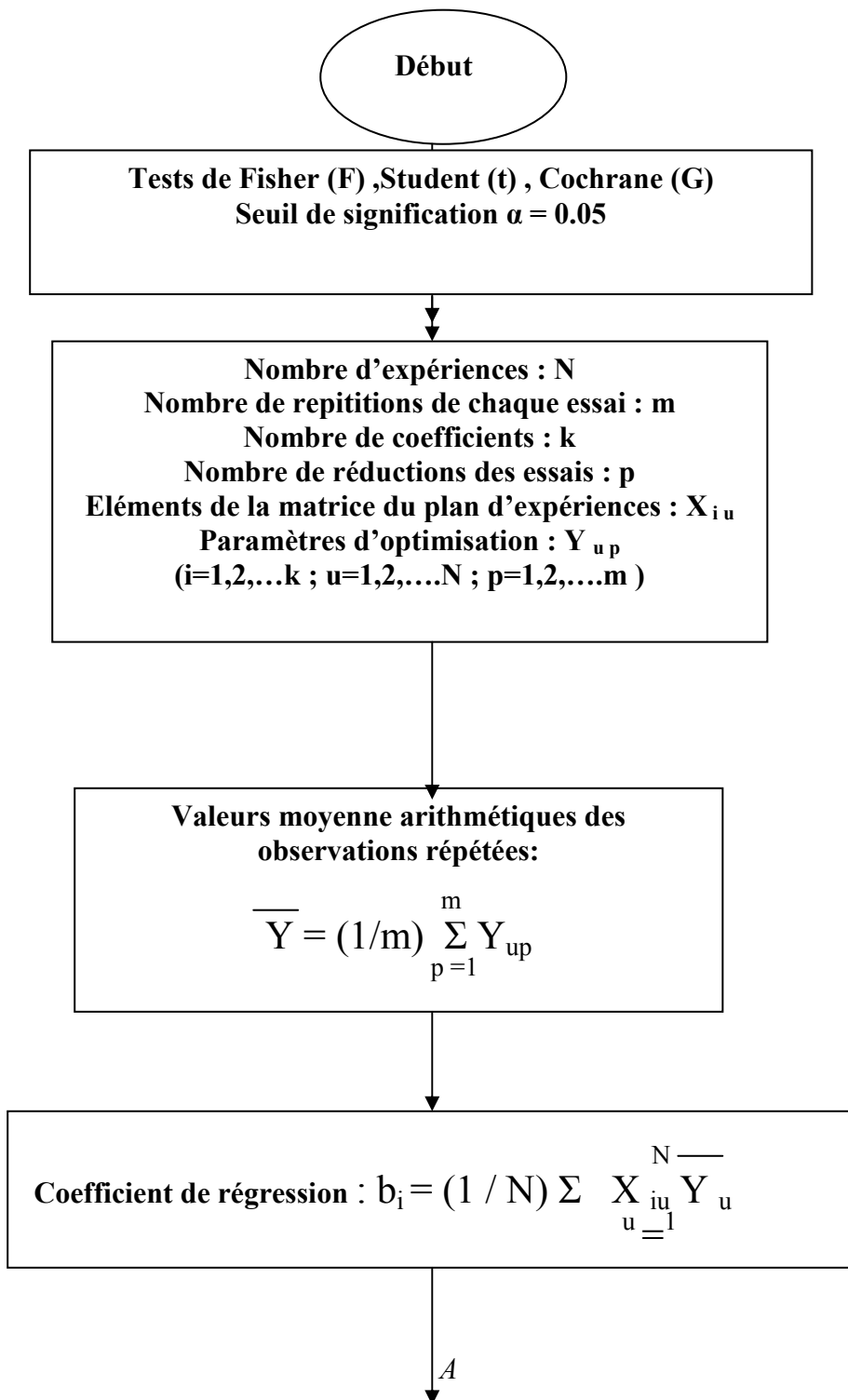
I.7.2.2.Modèle mathématique :

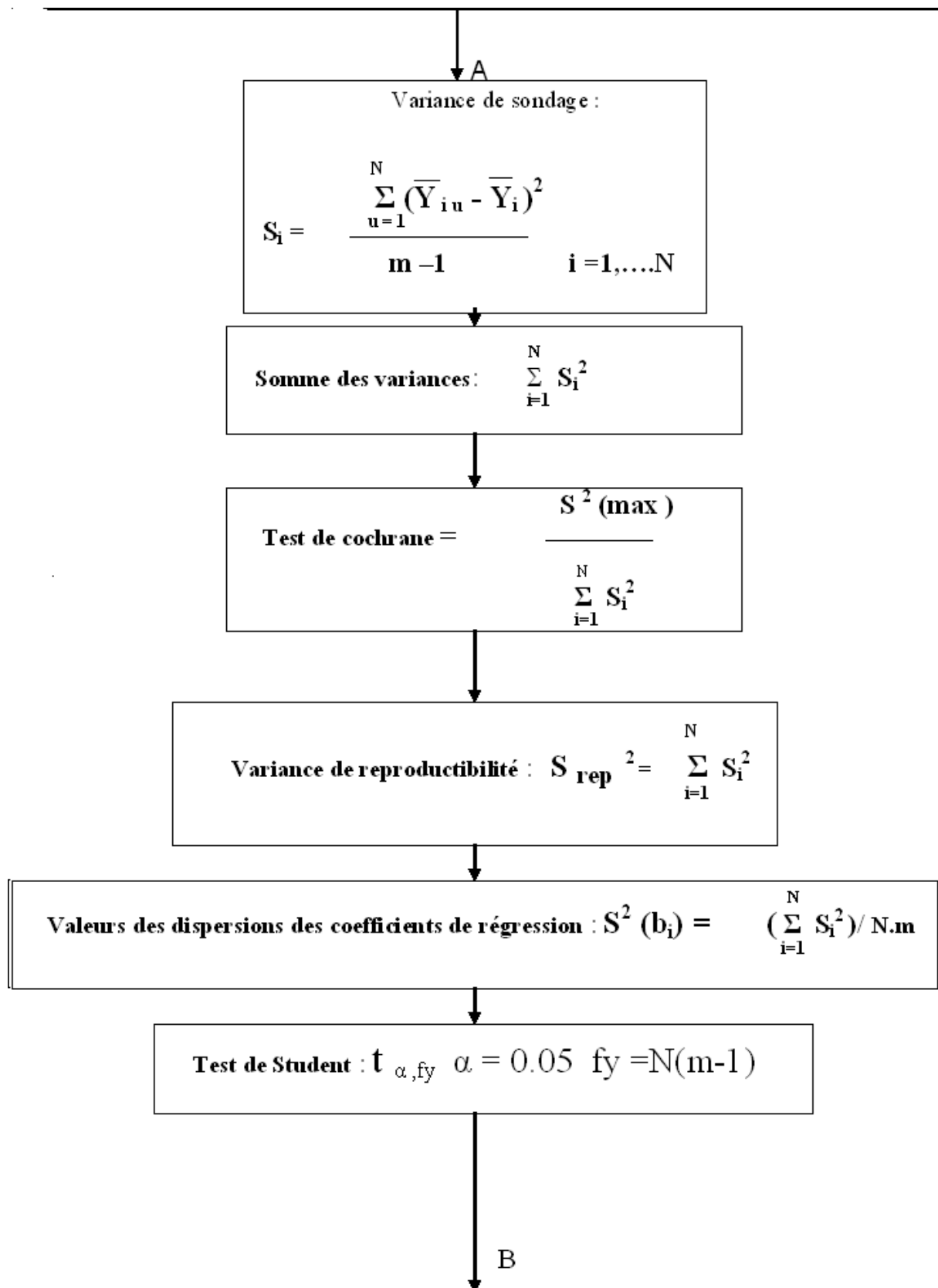
Modèle mathématique se présente en utilisant les méthodes statistiques , sous forme polynomiale , qui est une partie de la série de Taylor : $Y_i = \beta_i X_{ij}$ (X : matrice des données d'entrée , β = matrice des coefficients de régression et Y = matrice des données de sortie)

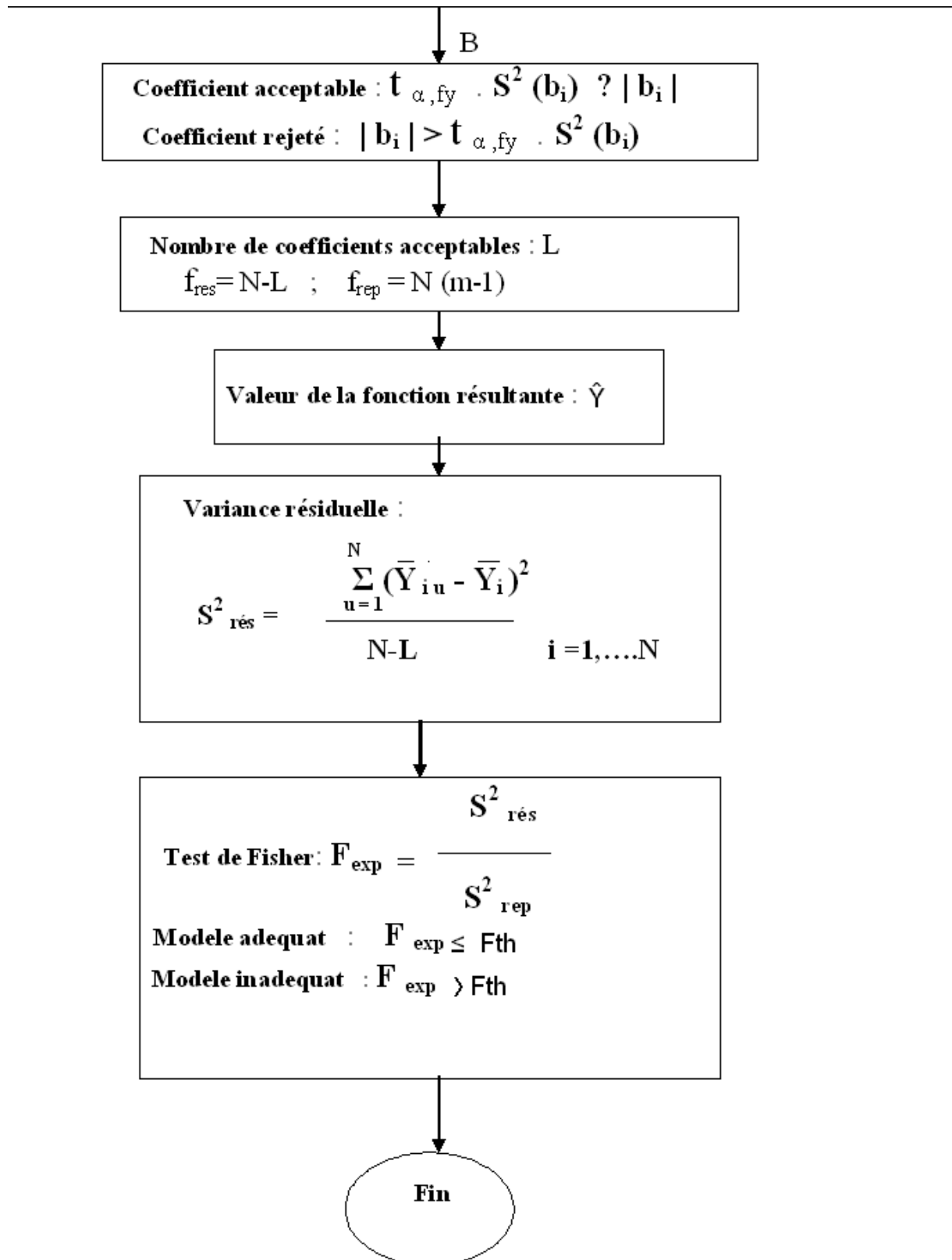
-Analyse de régression :

Une fois le modèle mathématique obtenu (équation de régression) , on procède à l'analyse statistique des résultats afin de vérifier la signification de ces coefficients de régression et l'adéquation du modelé ,suivant l'algorithme suivant :

-Algorithme de calcul [56] :







II. EXPERIMENTATION :

Il existe de nombreuses méthodes d'essais tribométriques qui nous donnent une caractérisation du frottement, de la lubrification et de l'usure.

Un tribomètre est un dispositif d'essais utilisé pour caractériser le comportement d'un couple de matériaux dans des conditions données lors d'un déplacement relatif.

On utilise des concepts géométriques simples dans les études du comportement tribologique.

Les configurations classiques sont:

Essai pion sur disque à mouvement de rotation continu

Essai pion sur cylindre

Essai pion à mouvement alterné

Essai 4 billes

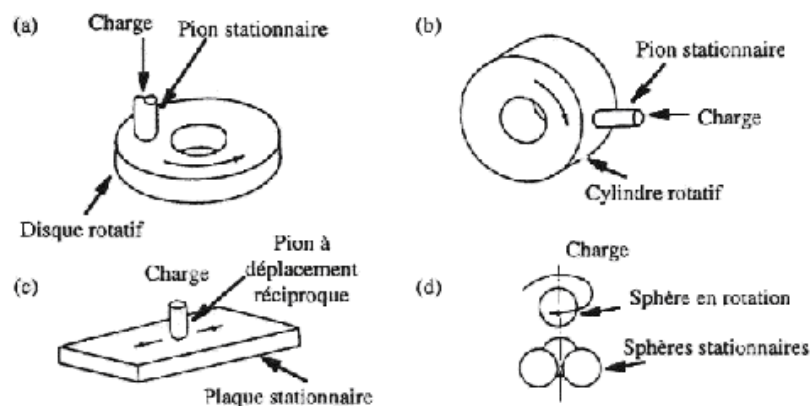
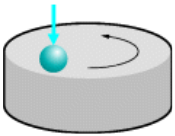
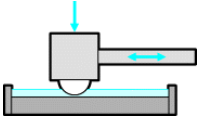
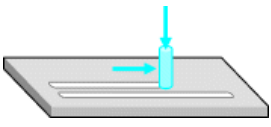
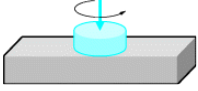
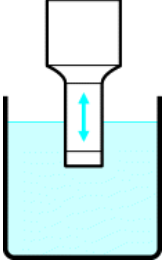
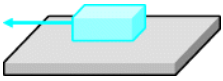
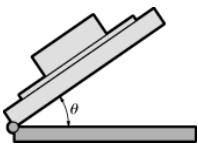
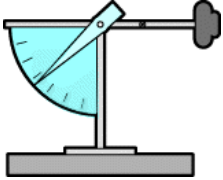
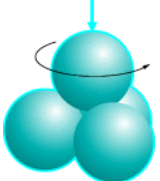
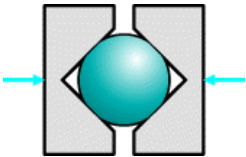
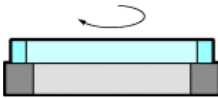
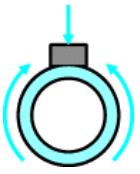
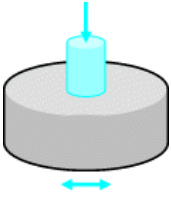
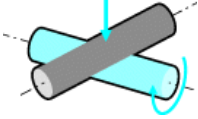
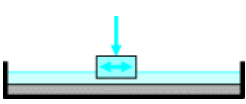
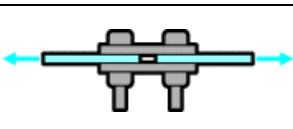
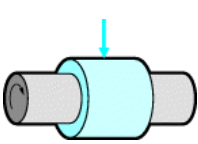
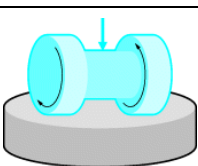
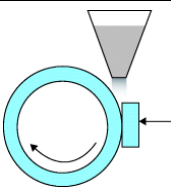


Fig.26 : Les configurations classiques de tribomètre [5]

Mais pour des essais plus spécifiques adaptés au milieu réel de service des composantes mécaniques, on a pu fabriquer des tribomètres répondant aux exigences des paramètres selon les contextes probables et respectant des normes d'étude bien définies [5].

Configuration	Objet du test	Domaine d'application	Norme
	Mesure du coefficient de frottement et de l'usure en mouvement continu	Roulement à billes, glissière à billes	ASM G-99, DIN50326, ISO 7148
	Mesure du coefficient de frottement et de l'usure en mouvement alternatif	Roulement à billes, glissière à billes, matériaux autolubrifiants, lubrifiants, segment/chemise	ASM G-133, ISO 7148, G-181
	Mesure de l'usure par abrasion	Outils de travail au sol, mines, carrières, travaux public, machinismes agricoles	ASTM G-132
	Mesure du seuil de grippage d'un couple de matériaux	Vannes, pompes, glissières	ASTM G-98
	Essai de cavitation par ultrason	Paliers, vannes, pompes	ASTM G-32
	Essai de mesure de coefficient de frottement plan/plan	Film plastique, bois, panneau de particules, chaussée	ASTM D1894, D2394, D3247, NF P98-220-1, C1028
	Essai de mesure de coefficient de frottement statique avec plan incliné	Plaque tissé, panneau de particules, dépôts	ASTM D3248, D3334, D4518
	Essai de mesure de coefficient de frottement par pendule	Bois, caoutchouc, chaussée	ASTM D4103, EN 13036-4
	Essais quatre billes	Lubrifiants, graisses	ASTM D2266, D4172, D5183, D2783

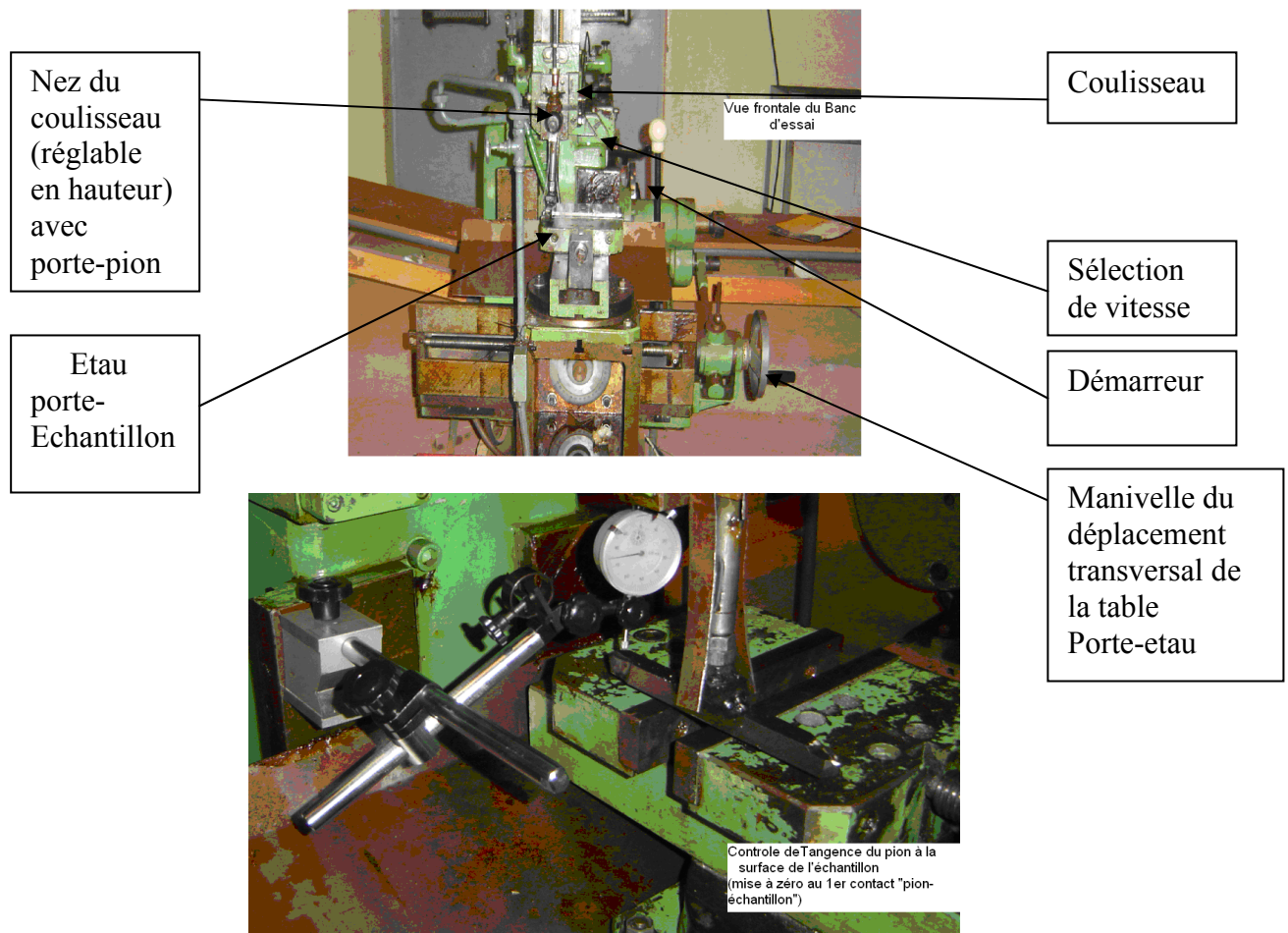
	Essai pion et blocs en V	Lubrifiants, graisses	ASTM D2670,
	Essai bague sur bague	Matériaux autolubrifiants pour butée	ASTM D3702
	Essai bloc sur bague	Matériaux, lubrifiants, graisses	ASTM D3704, G77, G137
	Essai pion sur plaque	Matériaux polymères pour prothèses	ASTM F732
	Essai cylindres croisés	Matériaux métalliques	ASTM G83
	Essais d'abrasion – test Miller	Abrasivité des granulats, résistance à l'abrasion de matériaux	ASTM G-75
	Mesure de coefficient de frottement des pièces boulonnées		NF P22-461
	Mesure de comportement tribologique pour palier lisse	Matériaux anti-friction	ISO-7148-2
	Essai d'abrasion Taber	Matériaux, revêtements	ASTM F-1978
	Essai d'abrasion	Matériaux, revêtements	ASTM G-65

Tab.8 : Différents modes d'essais tribologiques [5]

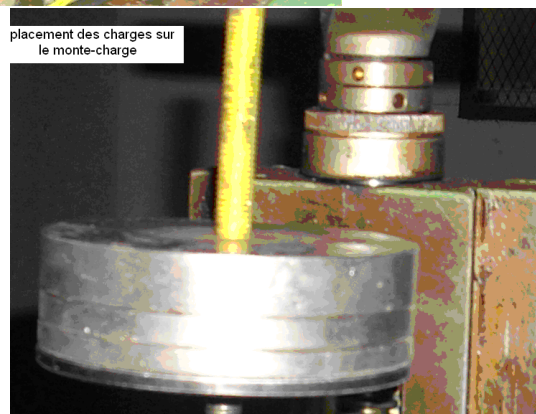
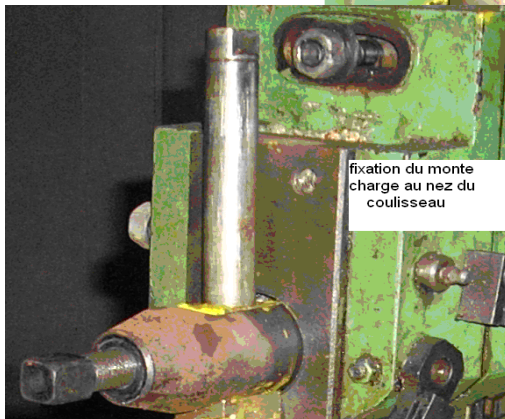
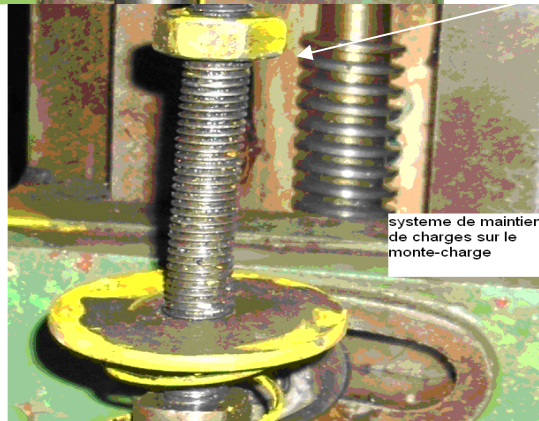
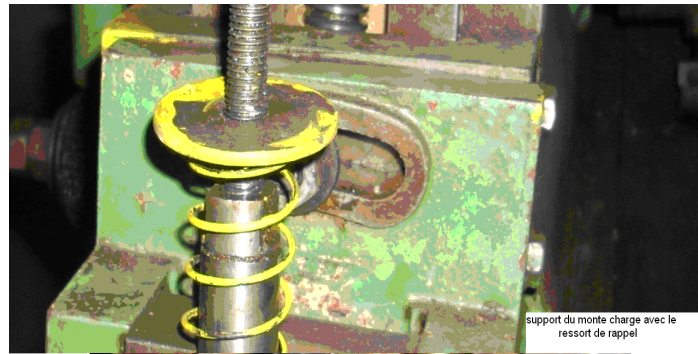
II.1. Réalisation d'un banc d'essai :

Dans notre cas ,on va opter pour l'essai pion à mouvement alterné (c),ainsi notre banc d'essai est constitué d'un « Etau –Limeur » produisant le mouvement translatoire alterné du « pion » frotteur et qui est maintenu au nez du coulisseau par un dispositif fixé par la vis de blocage est réglable en hauteur afin de pouvoir procéder à la « tangence » du pion à la surface de la pièce soumise à l'essai d'usure ; ce dispositif pouvant accueillir de différentes masselottes que l'on peut fixer par serrage (contre-écrou ,écrou, rondelle d'appui, charges).

Photos du banc d'essai (TRIBOMETRE) :



Porte-pion et Comparateur de tangence



Photos Dispositif porte pion avec masselottes



Balance électronique (lecture au 1/10 mg)

Quelques échantillons destinés aux tests d'usure



-Matériaux des pièces d'essai :

-pion frotteur :

Acier Rapide Supérieur « ARS » type **HS2-9-2** :

C% = 0.95 à 1.05 ; Si%=0.70 ; Mn%=0.4 ; P%= 0.03 ; S%=0.03 ; Cr%= 3.50 à 4.50 ; Mo%= 8.20 à 9.20 ; V%= 1.70 à 2.20 ; W%= 1.50 à 2.10.

(Dureté après trempe 68HRC = 1150 à 1200 daN/mm²)

{Test effectué au laboratoire de la PMO-PMA de sidi bel-abbés le 04 / 03 / 2008}

Les aciers utilisés sont (**X₁**) : **A60** (nouvelle norme E 335 Re=335MPa, Rm=600MPa de dureté Vickers H_v =118) et **XC48** (nouvelle nuance C45- R_e=375 à 580 MPa , Rm=710 MPa A% = 15 et de dureté Vickers H_v =224) [NF EN 10027-1].

La mesure de dureté Vickers se fait avec une pointe pyramidale normalisée en diamant de base carrée et d'angle au sommet entre faces égal à 136°. L'empreinte a donc la forme d'un carré ; on mesure les deux diagonales d₁ et d₂ de ce carré à l'aide d'un appareil optique. On obtient la valeur d en effectuant la moyenne de d₁ et d₂. C'est d qui sera utilisé pour le calcul de la dureté. La force et la durée de l'appui sont également normalisées.

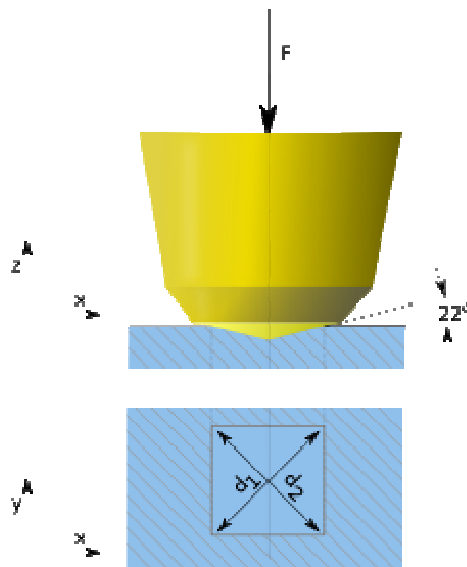
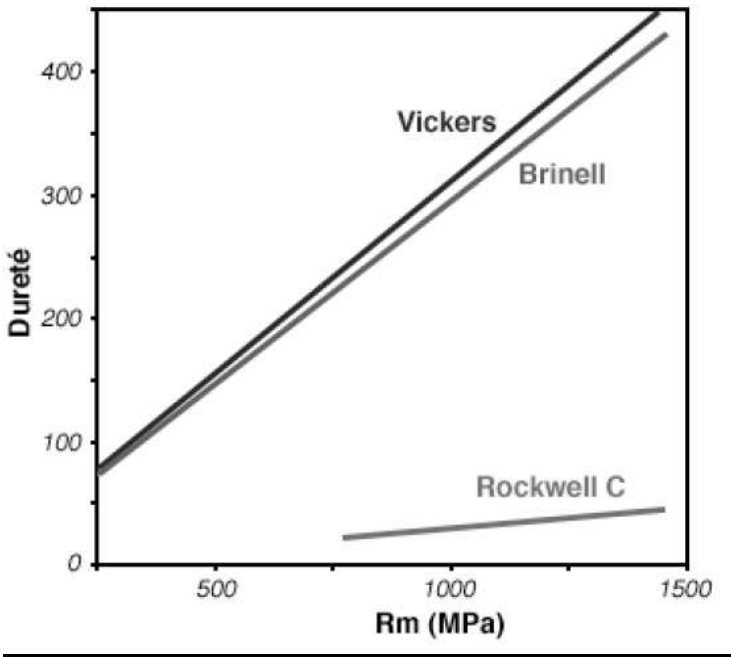


Fig.27 : Essai de dureté Vickers [EN ISO 6507-1]

$$HV = \frac{2F \cdot \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{g \cdot d^2}$$

HV = Dureté Vickers.
F = Force appliquée [N]
d = Moyenne des diagonales de l'empreinte [mm]
g = Accélération terrestre. [m s⁻²] (9.80665)

[EN ISO 6507-1 : Essai de dureté Vickers]



[EN ISO 6507-1 : Variation duretés en fonction de la résistance]

-Temps d'essai :

Il est choisi égal à une heure après un test « pilote » tenant compte de la condition ou l'usure est théoriquement la plus faible et après que la lecture expérimentale de la perte de masse est significative .

La condition du test est établie à :

- X₁ (dureté) = -1équivalent à 118 Hv
- X₂ (vitesse) = +1équivalent à 0.4 m/s
- X₃ (charge) = +1équivalent à 20 Newtons
- X₄ (temps de chargement) = -1équivalent à 2 heures

-La vitesse de coulissement (X_2) est sélectionnée sur la machine en coups par minute (C/min) mais elle est convertie en mètre par seconde (m/s) ou $[V(C/min) \times 2L(m)] / 60s$ (L est la longueur de la course parcourue par le pion frotteur entre les deux points « mort » du coulissement) et qui est à 02 niveaux 0.08 et 04 « m/s »

-La charge (X_3) est en newton est à 02 niveaux 5 et 20 newtons

-Le temps de chargement en hydrogène(X_4) est à 03 niveaux (2,4 et 6 heures) qui se fait par électrolyse :

Décomposition chimique de certaines substances sous l'effet d'un courant électrique.

L'électrolyse se réalise dans une cuve contenant un électrolyte ($H_2 SO_4$) dans lequel sont plongées deux électrodes reliées aux bornes d'un générateur de courant continu.

On appelle Anode l'électrode reliée à la borne positive du générateur et Cathode celle reliée à la borne négative du générateur.

L'ensemble constitue une cellule d'électrolyse.

Lors de l'électrolyse :

- l'anode est le siège d'une réaction d'oxydation : avide d'électrons, elle se comporte comme un oxydant.;
- la cathode est le siège d'une réaction de réduction : source d'électrons, elle se comporte comme un réducteur.
- la pièce métallique constituant la cathode est plongée avec une anode dans la solution (acide sulfurique) appelée (l'électrolyte) contenant des ions de H_2+ ;
- le générateur positionné entre l'anode et la cathode délivre un courant continu ;
- la pièce métallique gagne des électrons et attire les ions de H_2+ qui adhèrent à sa surface.

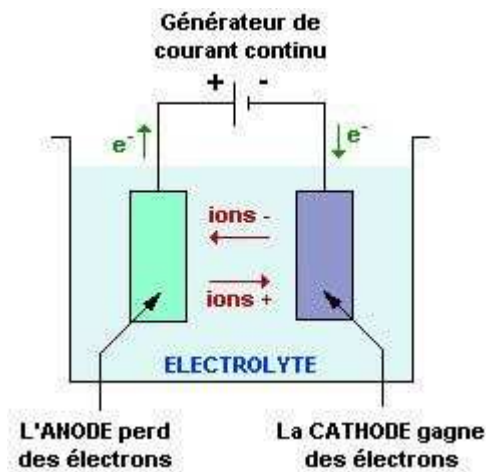
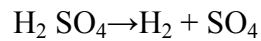


Fig.28 : installation d'électrolyse [62]

La décomposition de l'acide sulfurique par électrolyse s'écrit de manière globale:



Cette décomposition nécessite un apport d'énergie électrique, dépendant essentiellement de l'enthalpie et de l'entropie de réaction. Les valeurs classiques des potentiels de cellules industrielles sont de l'ordre de 1.7 à 2.1 V, ce qui correspond à des rendements d'électrolyse de 70 à 85 %. La consommation électrique des électrolyseurs industriels (auxiliaires compris) est généralement de 4 à 6 kWh/Nm³, et il convient d'éliminer en permanence la chaleur dégagée liée aux irréversibilités [62].

II.2.Résultats des essais réalisés sur les échantillons « hydrogénés »:

(Valeurs expérimentales des pertes de masse (en gramme) des échantillons chargés en hydrogène (H₂)) :

(X ₁)	(X ₂)	(X ₃)	(X ₄)	Y ₁	Y ₂	Y ₃	\bar{Y} g				
118	-	0.08	-	5	-	2	-	0.0062	0.0069	0.0071	0,00673333
118	-	0.08	-	5	-	6	+	0.0080	0.0078	0.0082	0,008
118	-	0.08	-	5	-	4	0	0.0075	0.0071	0.0077	0,00743333
224	+	0.4	+	20	+	2	-	0.0112	0.0118	0.0109	0,0113
224	+	0.4	+	20	+	6	+	0.0113	0.0119	0.0110	0,0114
224	+	0.4	+	20	+	4	0	0.0115	0.0121	0.0111	0,01156667
118	-	0.08	-	20	+	2	-	0.0127	0.0130	0.0122	0,01263333
118	-	0.08	-	20	+	6	+	0.0140	0.0138	0.0135	0,01376667
118	-	0.08	-	20	+	4	0	0.0135	0.0136	0.0130	0,01336667
118	-	0.4	+	5	-	2	-	0.0090	0.0101	0.0104	0,00983333
118	-	0.4	+	5	-	6	+	0.0108	0.0098	0.0101	0,04263333
118	-	0.4	+	5	-	4	0	0.0095	0.0083	0.0090	0,00893333
224	+	0.08	-	5	-	2	-	0.0048	0.0052	0.0061	0,00536667
224	+	0.08	-	5	-	6	+	0.0050	0.0047	0.0049	0,00486667
224	+	0.08	-	5	-	4	0	0.0055	0.0061	0.0058	0,0058
224	+	0.4	+	5	-	2	-	0.0065	0.0060	0.0069	0,00646667
224	+	0.4	+	5	-	6	+	0.0066	0.0069	0.0070	0,00683333
224	+	0.4	+	5	-	4	0	0.0064	0.0071	0.0068	0,00676667
224	+	0.08	-	20	+	2	-	0.0085	0.0090	0.0080	0,0085
224	+	0.08	-	20	+	6	+	0.0093	0.0097	0.0101	0,0097
224	+	0.08	-	20	+	4	0	0.0091	0.0085	0.0088	0,0088
118	-	0.4	+	20	+	2	-	0.0159	0.0151	0.0161	0,0157
118	-	0.4	+	20	+	6	+	0.0170	0.0177	0.0173	0,01733333
118	-	0.4	+	20	+	4	0	0.0161	0.0168	0.0159	0,01626667

Tab.9 : Valeurs expérimentales des pertes de masse

Les masses sont pesées en « gramme » à l'aide d'une balance électronique à affichage digital avec une précision de 10⁻⁴ gramme soit 10⁻¹ milligramme

Calcul de régression suivant l'ordre du tableau de calcul du plan : type ($2^3 3^1$) :

N°	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₁ X ₄	X ₂ X ₃	X ₂ X ₄	X ₃ X ₄	X ₁ X ₂ X ₃	X ₁ X ₂ X ₄	X ₁ X ₃ X ₄	X ₂ X ₃ X ₄	X ₁ X ₂ X ₃ X ₄	X ₄ *	\bar{Y}
1	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	1/3	6,733
2	+	-	-	0	-	-	0	+	0	0	+	0	0	0	0	- 2/3	5,8
3	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	1/3	4,263
4	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+	1/3	6,466
5	-	-	+	0	+	-	0	-	0	0	+	0	0	0	0	- 2/3	13,366
6	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-	1/3	9,7
7	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	+	1/3	15,7
8	+	+	+	0	+	+	0	+	0	0	+	0	0	0	0	- 2/3	11,566
9	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-	1/3	8,000
10	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	1/3	5,366
11	-	+	-	0	-	+	0	-	0	0	+	0	0	0	0	- 2/3	8,933
12	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	-	1/3	6,833
13	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	1/3	12,633
14	+	-	+	0	-	+	0	-	0	0	-	0	0	0	0	- 2/3	8,800
15	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	-	1/3	17,333
16	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-	1/3	11,3
17	-	-	-	0	+	+	0	+	0	0	-	0	0	0	0	- 2/3	7,433
18	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	1/3	4,866
19	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	+	-	1/3	9,833
20	+	+	-	0	+	-	0	-	0	0	-	0	0	0	0	- 2/3	6,766
21	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+	1/3	13,766
22	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	1/3	8,5
23	-	+	+	0	-	-	0	+	0	0	-	0	0	0	0	- 2/3	16,266
24	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	1/3	11,4

Tab.10 : valeurs codées des paramètres expérimentaux

II.3. Valeurs expérimentales des pertes de masse des échantillons immergés en eau de mer (oxydation) :

(L'ordre des lignes établi suit la chronologie d'exécution expérimentale)

N°	(X ₁)	(X ₂)	(X ₃)	(X ₄)	Y ₁	Y ₂	Y ₃	\bar{Y}
1	118(-)	0.08 (-)	01(-)	5(-)	1,1137	1,1231	1,1857	1,14083333
2	118(-)	0.08 (-)	01(-)	20(+)	1,3239	1,3092	1,327	1,32003333
3	118(-)	0.08 (-)	01(-)	12.5 (0)	1,2087	1,2109	1,2787	1,23276667
4	224(+)	0.4 (+)	02(+)	5(-)	0,1437	0,1529	0,1609	0,1525
5	224(+)	0.4 (+)	02(+)	20(+)	0,1702	0,1795	0,1836	0,17776667
6	224(+)	0.4 (+)	02(+)	12.5 (0)	0,1513	0,1607	0,1729	0,16163333
7	118(-)	0.08 (-)	02(+)	5(-)	1,3827	1,3989	1,4217	1,4011
8	118(-)	0.08 (-)	02(+)	20(+)	1,5039	1,5152	1,6274	1,54883333
9	118(-)	0.08 (-)	02(+)	12.5 (0)	1,4615	1,4683	1,5089	1,47956667
10	118(-)	0.4 (+)	01(-)	5(-)	1,3521	1,387	1,3098	1,34963333
11	118(-)	0.4 (+)	01(-)	20(+)	1,5786	1,5817	1,5053	1,5552
12	118(-)	0.4 (+)	01(-)	12.5 (0)	1,4912	1,4998	1,5007	1,49723333
13	224(+)	0.08 (-)	01(-)	5(-)	0,5089	0,5127	0,5077	0,50976667
14	224(+)	0.08 (-)	01(-)	20(+)	0,6699	0,6731	0,6803	0,6744333
15	224(+)	0.08 (-)	01(-)	12.5 (0)	0,6123	0,6537	0,6975	0,6545
16	224(+)	0.4 (+)	01(-)	5(-)	0,1827	0,1983	0,1607	0,18056667
17	224(+)	0.4 (+)	01(-)	20(+)	0,2086	0,2126	0,2174	0,21276667
18	224(+)	0.4 (+)	01(-)	12.5 (0)	0,1959	0,215	0,1997	0,20353333
19	224(+)	0.08 (-)	02(+)	5(-)	0,2153	0,2312	0,2019	0,21613333
20	224(+)	0.08 (-)	02(+)	20(+)	0,4172	0,4338	0,4902	0,44706667
21	224(+)	0.08 (-)	02(+)	12.5 (0)	0,3105	0,3199	0,3301	0,32016667
22	118(-)	0.4 (+)	02(+)	5(-)	1,6172	1,6831	1,6358	1,6456667
23	118(-)	0.4 (+)	02(+)	20(+)	2,0399	2,0375	2,0478	2,04173333
24	118(-)	0.4 (+)	02(+)	12.5 (0)	1,9099	1,9189	1,9295	1,91943333

Tab.11 : Valeurs expérimentales des pertes de masse

Les aciers utilisés sont : A60 de dureté Vickers (X₁) H_v =118 et XC48 de dureté Vickers H_v =224

La vitesse de coulissement (X₂) est sélectionnée sur la machine en coups par minute (C/min) mais elle est convertie en mètre par seconde (m/s) ou $[V(C/min) \times 2L(m)] / 60s$ (L est la longueur de la course parcourue par le pion frotteur entre les deux points « mort » du coulissement) et qui est à 02 niveaux 0.08 et 04 « m/s »

Le temps d'immersion en eau de mer (oxydation accélérée) (X₃) est à 02 niveaux (01 et 02 mois) [échantillons mis dans deux filets (1 et 2 mois) en plastique déployés accrochés et suspendus à un « bloc rock » isolé au port de pêche de la « salamandre-Mostaganem » .

La charge (X_4) est à 03 niveaux 5, 12.5 et 20 Newtons

Les masses sont pesées en « gramme » à l'aide d'une balance électronique à affichage digital avec une précision de 10^{-4} gramme soit 10^{-1} milligramme

Calcul de régression suivant l'ordre du tableau de calcul du plan : type ($2^3 3^1$) :

N°	X_1	X_2	X_3	X_4	X_1 X_2	X_1 X_3	X_1 X_4	X_2 X_3	X_2 X_4	X_3 X_4	X_1 X_2 X_3	X_1 X_2 X_4	X_1 X_3 X_4	X_2 X_3 X_4	X_1 X_2 X_3 X_4	X_4^*	\bar{Y} (G)
1	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	1/3	1.1408
2	+	-	-	0	-	-	0	+	0	0	+	0	0	0	0	-2/3	0,6545
3	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	1/3	1,5552
4	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+	1/3	0,1805
5	-	-	+	0	+	-	0	-	0	0	+	0	0	0	0	-2/3	1,4795
6	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-	1/3	0,4470
7	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	+	1/3	1,3120
8	+	+	+	0	+	+	0	+	0	0	+	0	0	0	0	-2/3	0,1616
9	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-	1/3	1,3200
10	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	1/3	0,5097
11	-	+	-	0	-	+	0	-	0	0	+	0	0	0	0	-2/3	1,4972
12	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	-	1/3	0,2127
13	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	1/3	1,4011
14	+	-	+	0	-	+	0	-	0	0	-	0	0	0	0	-2/3	0,3201
15	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	-	1/3	2,0489
16	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-	1/3	0,1525
17	-	-	-	0	+	+	0	+	0	0	-	0	0	0	0	-2/3	1,2327
18	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	1/3	0,6671
19	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	+	-	1/3	1,3496
20	+	+	-	0	+	-	0	-	0	0	-	0	0	0	0	-2/3	0,2035
21	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+	1/3	1,5488
22	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	1/3	0,2161
23	-	+	+	0	-	-	0	+	0	0	-	0	0	0	0	-2/3	1,9102
24	+	+	+	+	+	+	0	+	+	+	+	+	+	+	+	1/3	0,1777

Les pertes de masse moyennes (\bar{Y}) sont en gramme (g)

Tab.12. valeurs codées des paramètres expérimentaux

**II.4.Détermination du modèle mathématique décrivant l'usure des échantillons
« hydrogénés »:**

N°	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₁ X ₄	X ₂ X ₃	X ₂ X ₄	X ₃ X ₄	X ₁ X ₂ X ₃	X ₁ X ₂ X ₄	X ₁ X ₃ X ₄	X ₂ X ₃ X ₄	X ₁ X ₂ X ₃ X ₄	X _i *	\bar{Y} (mg)
1	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	1/3	6,733
2	+	-	-	0	-	-	0	+	0	0	+	0	0	0	0	- 2/3	5,800
3	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	1/3	4,263
4	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+	1/3	6,466
5	-	-	+	0	+	-	0	-	0	0	+	0	0	0	0	- 2/3	13,366
6	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-	1/3	9,700
7	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	+	1/3	15,700
8	+	+	+	0	+	+	0	+	0	0	+	0	0	0	0	- 2/3	11,566
9	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-	1/3	8,000
10	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	1/3	5,366
11	-	+	-	0	-	+	0	-	0	0	+	0	0	0	0	- 2/3	8,933
12	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	-	1/3	6,833
13	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	1/3	12,633
14	+	-	+	0	-	+	0	-	0	0	-	0	0	0	0	- 2/3	8,800
15	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	-	1/3	17,333
16	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-	1/3	11,300
17	-	-	-	0	+	+	0	+	0	0	-	0	0	0	0	- 2/3	7,433
18	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	1/3	4,866
19	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	+	-	1/3	9,833
20	+	+	-	0	+	-	0	-	0	0	-	0	0	0	0	- 2/3	6,766
21	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+	1/3	13,766
22	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	1/3	8,500
23	-	+	+	0	-	-	0	+	0	0	-	0	0	0	0	- 2/3	16,266
24	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	1/3	11,4
Coeff. regressin	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₁₂	b ₁₃	b ₁₄	b ₂₃	b ₂₄	b ₃₄	b ₁₂₃	b ₁₂₄	b ₁₃₄	b ₂₃₄	b ₁₂₃₄	b ₄₄	Somme \bar{Y}
	-1.53	0.9	2.87	-0.023	0.037	0.4	-0.50	0.49	-1.12	0.53	-0.22	0.38	-0.35	0.33	-0.58	-0.320	231.622

-Détermination du modèle mathématique (selon l'algorithme de calcul [56]:

$\bar{Y} = \sum \bar{Y}_i$: somme des moyennes arithmétiques des pertes de masse lues par ligne
 Variance de sondage .

$$S_i^2 = \sum ((Y_i - \bar{Y})^2) / 2$$

-Variance résiduelle

$$\hat{Y}_i = \sum (B_i X_{ui} + B_{ij} X_{u,ij} + B_{ii} X_{ui}^*)$$

Valeur moyenne arithmétique des observations répétées

$$\bar{Y}_u = \frac{1}{m} \sum_{p=1}^m Y_{up} = (231,622/3) = 77,207$$

- m est le nombre de répétition de lecture des Y_i (i=1, 2,3)

-Calcul des coefficients de régression:

$$\beta_u = \frac{\sum_1^N X_i^* \bar{Y}}{\sum_1^N X_i^{*2}}$$

$$X_4^* = X_4^2 - (2/3)$$

$$\beta_0 = \bar{Y} - \frac{2}{3} \sum \beta_{ii} = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N X_{iu} \bar{Y}_u \quad B_i = 231,622 - 0,666 * (-0,323) = 231,84$$

$$b_1 = (-36,89633 / 24) = -1,5373; \quad b_2 = (21,69567 / 24) = 0,9039;$$

$$b_3 = (69,03767 / 24) = 2,8765; \quad b_4 = (-0,37033 / 16) = -0,02314562 ;$$

$$b_{12} = (0,90233 / 24) = 0,03759 ; \quad b_{13} = (9,56688 / 24) = 0,4;$$

$$b_{14} = (-7,792 / 16) = -0,49 ; \quad b_{23} = (11,90433 / 24) = 0,39862$$

$$b_{24} = (-17,96967 / 16) = -1,1231 ; \quad b_{34} = (8,50233 / 16) = 0,5313 ;$$

$$b_{123} = (-5,43833 / 24) = -0,2265 ; \quad b_{124} = (6,10367 / 16) = 0,3814 ;$$

$$b_{134} = (-5,63633 / 16) = -0,3522 ; \quad b_{234} = (5,36967 / 16) = 0,3356;$$

$$b_{1234} = (-9,30367 / 16) = -0,5814; \quad b_{44} = (-1,708/5,33) = -0,320$$

Le modèle mathématique global décrivant l'usure (Y) en fonction des paramètres influents et de leurs interactions:

$$Y(X_i) = 231,87 - 1,53X_1 + 0,9X_2 + 2,87X_3 - 0,023X_4 + 0,037X_1X_2 + 0,4X_1X_3 + 0,17X_1X_4 + 0,49X_2X_3 - 1,12X_2X_4 + 0,53X_3X_4 - 0,22X_1X_2X_3 + 0,38X_1X_2X_4 - 0,35X_1X_3X_4 + 0,33X_2X_3X_4 - 0,58X_1X_2X_3X_4 - 0,32X_4^2 \dots\dots\dots(23)$$

-Variance de reproductibilité

$$S^2_{rep} = \frac{\sum_{i=1}^N S_i^2}{N}$$

$$S^2_{rep} = [(34,1/24)] = 1,42$$

-Valeurs des distributions des coefficients de régression :

$$S^2(B_i) = \frac{S^2_{rep}}{N \cdot m}$$

$$S^2(B_i) = [1,42] / 24 \cdot 3 = 0,0197$$

-Test de « Student »:

$$-t_{(\alpha, fy)} = [\alpha=0,05, N(m-1)] = t_{(\alpha, fy)} = t_{[\alpha=0,05, 48]} = 2,0086 \text{ [Tableau 1 Annexe]}$$

Coefficient acceptable doit être supérieur ou égal à $|b_i|$:

$$t_{\alpha, fy} \cdot S^2(b_i) = |b_i| = 2,0086 \cdot 0,0197 = 0,0396$$

-Considérant uniquement les coefficients de régression significatifs, le modèle aura la forme:

$$Y(X_i) = 231,87 - 1,53X_1 + 0,9X_2 + 2,87X_3 + 0,4X_1X_3 + 0,17X_1X_4 + 0,49X_2X_3 + 1,12X_2X_4 + 0,53X_3X_4 - 0,22X_1X_2X_3 + 0,38X_1X_2X_4 - 0,35X_1X_3X_4 + 0,33X_2X_3X_4 - 0,58X_1X_2X_3X_4 - 0,32X_4^2 \dots\dots\dots(23-1)$$

-Test de Cochran:

$$G_{max} = \frac{S^2(\max)}{\sum_{i=1}^N S_i^2} = (0,028 / 3,41) = 0,0082$$

Inférieur au facteur de Cochran théorique $G_{th} = 0,1907$ [Tableau 2 Annexe] pour (m=3 et N=24) ce qui nous laisse dire que les dispersions sont « Homogènes ».

Test de Fischer:

$$\text{Total des } (\hat{Y} - Y_{\text{moy}})^2 = \mathbf{11922046,3 \text{ mg}^2}$$

$$F_{\text{exp}} = \frac{S_{\text{rés}}^2}{S_{\text{rep}}^2}$$

$$S_{\text{rés}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_{iu} - \bar{y}_i)^2}{N-L}$$

Où L est le nombre des coefficients significatifs

On rappelle que l'unité de cette somme $(\bar{Y} - \hat{Y})^2$ est en mg^2

(On multiplie par 10^{-6})..pour la conversion de l'unité en gr^2

$$S_{\text{rés}}^2 = [11,9220463 / (24-15)] = [11,9220463 / 9] = \mathbf{1,324}$$

Et delà on déduit que le facteur de « Fischer » expérimental (F_{exp}) de la relation :

$$F_{\text{exp}} = (1,324 / 1,42) = \mathbf{0,932}$$

F_{th} (facteur de Fischer théorique est « tiré » du Tableau 3 Annexe

F_{th} est le point dont les coordonnées sont $f_1 = N-L$ et $f_2 = N(m-1)$

- $f_1 = 10$ et $f_2 = 48$ et d'après la table de Fischer $f_2 = 48$ est compris entre les valeurs

remarquables de f_2 (40 et 60) qui donne avec $f_1 = 10$ les 02 valeurs $F_{\text{th}} = (1,99 ; 2,08)$, ce qui

nous permet de dire que $F_{\text{exp}} < F_{\text{th}}$ d'où le modèle mathématique décrit le phénomène

d'une manière **adéquate**.

II.4.1.Calcul d'optimums et l'usure correspondante:

Il y'a plusieurs méthodes de calcul qui nous permettent la détermination des optimums, parmi lesquelles, on cite la méthode des deux dérivées, la méthode de cramer, la méthode de la plus grande pente .En ce qui concerne nos six cas, on a utilisé la méthode de Cramer :

-La règle de Cramer (ou méthode de Cramer ou des déterminants) [57]:

est un théorème en algèbre linéaire qui donne la solution d'un **système de Cramer**, c'est-à-dire un système d'équations linéaires avec autant d'équations que d'inconnues et dont le déterminant de la matrice de coefficients est non nul, en termes de quotients de déterminants.

En calcul, la méthode est moins efficace que la méthode de résolution de Gauss pour des grands systèmes (à partir de 4 équations) dont les coefficients dans le premier membre sont explicitement donnés. Cependant, elle est d'importance théorique pour la raison qu'elle donne une expression explicite pour la solution du système, et elle s'applique dans des systèmes où par exemple les coefficients du premier membre dépendent de paramètres, ce qui peut rendre la méthode de Gauss inapplicable.

*Premier cas :

$X_1=0$; $X_2=0$ et le modèle devient :

$$Y(X_3, X_4) = 231,87 + 2,87X_3 + 0,53X_3X_4 - 0,32 X_4^2 \dots\dots\dots(23-1a)$$

Déterminons la direction du gradient en calculant les valeurs des dérivées partielles :

$$(dY / dX_3) = 2,87 + 0,53 X_4 \qquad (dY / dX_4) = 0,53 X_3 - 0,64 X_4$$

$$(d^2 Y / dX_3^2) = 0 \qquad (d^2 Y / dX_4^2) = -0,64$$

Et de là on va résoudre le système

$$(dY / dX_3) = 0 \qquad 2,87 + 0,53 X_4 = 0 \qquad 0 \qquad +0,53 X_4 = -2,87$$

$$(dY / dX_4) = 0 \qquad \leftrightarrow \qquad 0,53 X_3 - 0,64 X_4 = 0 \qquad \leftrightarrow \qquad 0,53 X_3 - 0,64 X_4 = 0$$

Calculons les valeurs des deux équations:

*Troisième cas :

$X_1=0$; $X_4=0$ et le modèle devient :

$$Y(X_2, X_3) = 231,87 + 0,9X_2 + 2,87X_3 + 0,49X_2X_3 \dots\dots\dots(23-1c)$$

Déterminons la direction du gradient en calculant les valeurs des dérivées partielles :

$$(dY / dX_2) = 0,9 + 0,49 X_3 \qquad (dY / dX_3) = 2,87 + 0,49 X_2$$

Et de là on va résoudre le système

$$\begin{aligned} (dY / dX_2) = 0 & \quad 0,9 + 0,49 X_3 = 0 & \quad 0 & \quad + 0,49 X_3 = -0,9 \\ (dY / dX_3) = 0 & \quad 2,87 + 0,49 X_2 = 0 & \quad 0,49 X_2 & \quad + 0 = -2,87 \end{aligned}$$

Calculons les valeurs des deux équations:

$$X_3 = (-2,87 / 0,49) = -5,85$$

$$X_2 = (-0,9 / 0,49) = -1,83$$

Donc l'optimum a pour coordonnées : (-5,85 ; -1,83).

(-5,85 ; -1,83) sur l'intervalle [-25 ; 25] ;

Et en divisant par « 25 » pour le ramener à l'échelle [-1 ; 1] l'optimum devient :

(-0,23 ; -0,073) et converti en valeurs réelles on obtient : **(0,2032m/s; 11,95 N) ;**

Et la quantité de l'usure aura la valeur **Y= 0,2673gr**

*Quatrième cas :

$X_2=0$; $X_3=0$ et le modèle devient :

$$Y(X_1, X_4) = 231,87 - 1,53X_1 - 0,5X_1X_4 - 0,32 X_4^2 \dots\dots\dots(23-1d)$$

Déterminons la direction du gradient en calculant les valeurs des dérivées partielles :

$$(dY / dX_1) = -1,53 - 0,5 X_4 \qquad (dY / dX_4) = -0,5 X_1 - 0,64 X_4$$

Et de là on va résoudre le système

$$\begin{aligned} (dY / dX_1) = 0 & \quad -1,53 - 0,5 X_4 = 0 & \quad 0 & \quad -0,5 X_4 = 1,53 \\ \leftrightarrow & & \leftrightarrow & \\ (dY / dX_4) = 0 & \quad -0,5 X_1 - 0,64 X_4 = 0 & \quad -0,5 X_1 - 0,64 X_4 = 0 \end{aligned}$$

Calculons les valeurs des deux équations:

$$X_4 = (1,53 / -0,5) = -3,06$$

$$X_1 = ((0,64 * -3,06) / -0,5) = 3,916$$

Donc l'optimum a pour coordonnées : (3,916 ; -3,06).

(3,916; -3,06) sur l'intervalle [-25 ; 25] ;

Et en divisant par « 25 » pour le ramener à l'échelle [-1 ; 1] l'optimum devient :

(0.156 ; -0,1224) et converti en valeurs réelles on obtient : **(179,26 Hv ; 3,75 h)** ;

Et la quantité de l'usure aura la valeur : **Y = 0,0673 gr**

*Cinquième cas :

$X_2=0$; $X_4=0$ et le modèle devient :

$$Y(X_1, X_3) = 231,87 - 1,53X_1 + 2,87X_3 + 0,4X_1X_3 \dots\dots\dots(23-1e)$$

Déterminons la direction du gradient en calculant les valeurs des dérivées partielles :

$$\begin{aligned} (dY / dX_1) = -1,53 + 0,4 X_3 & \quad (dY / dX_3) = 2,87 + 0,4 X_1 \end{aligned}$$

Et de là on va résoudre le système

$$\begin{aligned} (dY / dX_1) = 0 & \quad -1,53 + 0,4 X_3 = 0 & \quad 0 & \quad 0,4 X_3 = 1,53 \\ \leftrightarrow & & \leftrightarrow & \\ (dY / dX_3) = 0 & \quad 2,87 + 0,4 X_1 = 0 & \quad 0,4 X_1 + 0 = -2,87 \end{aligned}$$

Calculons les valeurs des deux équations:

$$X_1 = (-2,87 / 0,4) = -7,175$$

$$X_3 = (1,53 / 0,4) = 3,825$$

Donc l'optimum a pour coordonnées : (-7,175 ; 3,825).

(-7,175 ; 3,825) sur l'intervalle [-25 ; 25] ;

Et en divisant par « 25 » pour le ramener à l'échelle [-1 ; 1] l'optimum devient :

(-0,287 ; 0,153) et converti en valeurs réelles on obtient **(155,79 Hv; 13,64 N)** ;

Et la quantité de l'usure aura la valeur : **Y=0,8826 gr**

*Sixième cas :

$X_3=0$; $X_4=0$ et le modèle devient :

$$Y(X_1, X_2) = 231,87 - 1,53X_1 + 0,9X_2 \dots\dots\dots(23-1f)$$

$$(dY / dX_1) = -1,53$$

→ Le système ne possède pas de solutions d'où l'inexistence d'optimum

$$(dY / dX_2) = 0,9$$

-Calcul des valeurs réelles des paramètres d'expérimentation :

On détermine les valeurs réelles des paramètres d'expérimentation à partir de leurs valeurs codées par la relation suivante : $x_i = X_i \cdot \Delta x + x_{i0}$ ou x_i est la valeur réelle du paramètre d'expérimentation ; $\Delta x = x_{i0} - x_{i-1}$; x_{i0} : valeur moyenne réelle des paramètres x_i et X_i : valeur codée des paramètres.

Après calcul, on obtient les résultats suivants permettant la substitution des valeurs codées des paramètres par leurs valeurs réelles :

Tableau des valeurs codées et réelles des paramètres aux points culminants :

Paramètres	Valeurs codées	Valeurs réelles
Dureté Vickers (Hv) X_1	-0.3	155.1
	0.64	204.92
	0.44	194.32
	-0.48	145.56
	-0.14	163.58
	-0.5	144.5
	-0.24	158.28
	-0.6	139.2
	0.8	213.4

<u>Vitesse</u> (mètre/seconde) X_2	0.4	0.304
	-0.38	0.179
	-0.72	0.124
	0.26	0.281
	0.7	0.352
	-0.24	0.201
	-0.12	0.22
	-0.32	0.188
	-0.16	0.214
	-0.3	0.192
<u>Charges (Newtons) X_3</u>	-0.84	6.2
	-0.6	8
	0.42	15.65
	0.52	16.4
	-0.64	7.7
	-0.12	11.6
	0.04	12.8
	0.03	12.72
	0.12	13.4
	-0.16	11.3
<u>Temps de chargement</u> <u>en hydrogène (heures)</u> X_4	0.2	14
	-0.32	3.36
	0.76	5.52
	-0.12	3.76
	-0.82	2.36
	-0.1	3.8
	-0.08	3.84
	0.12	4.24
	-0.84	2.32
	0.8	5.6
	0.1	4.2
	-0.7	2.6
-0.06	3.88	
0.7	5.4	
-0.2	3.6	

II.4.2. Graphes et discussions:

- premier cas :

Si on maintient les deux paramètres(X_1 ; X_2) constants à leurs valeurs moyennes , le modèle aura la forme ($Y(X_3, X_4)$) et une surface de réponse (Fig.29):

$$Y(X_3, X_4) = 231,87 + 2,87X_3 + 0,53X_3X_4 - 0,32X_4^2$$

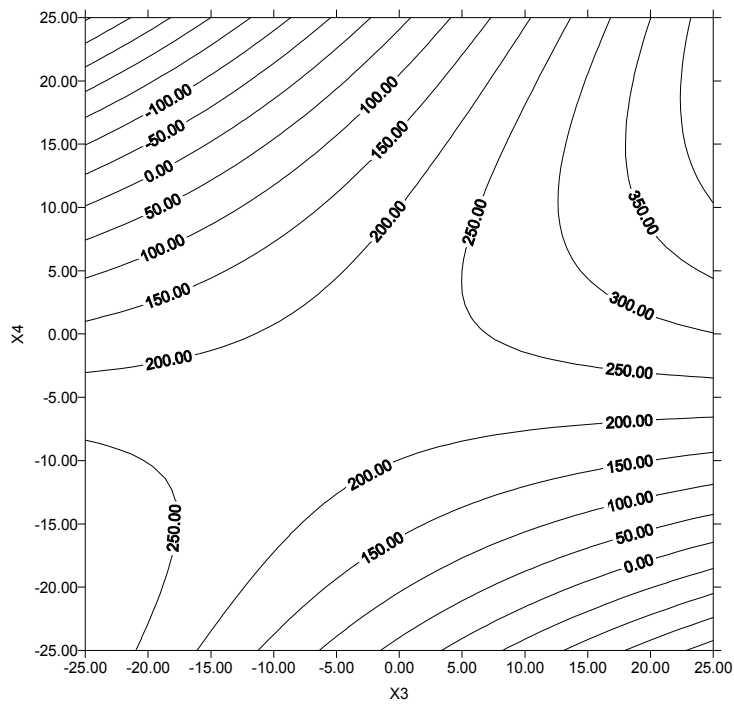


Fig.29 a : Effet de la charge et du temps de chargement en hydrogène sur l'usure

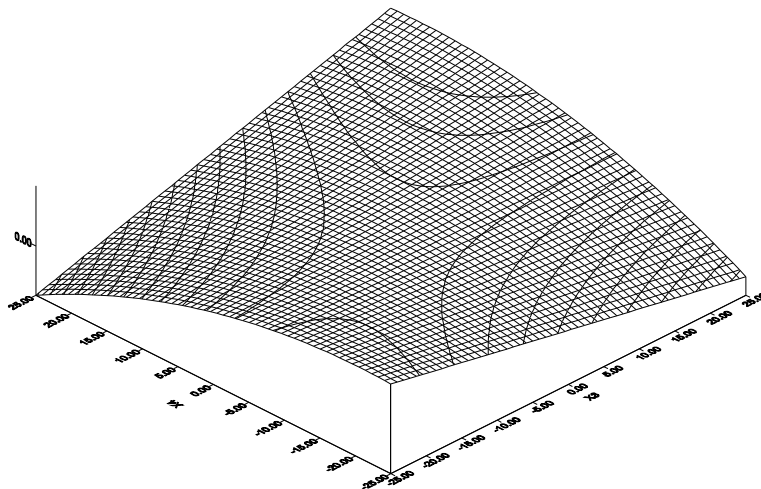


Fig.29 b : Effet de la charge et du temps de chargement en hydrogène sur l'usure

On observe de cette figure qu'avec une augmentation de la charge entre [20 à 6,2] Newtons et avec une variation du temps de chargement de [2 à 3,36] heures, l'usure décroît non linéairement et lentement. Elle croît linéairement et rapidement lorsque le temps de chargement diminue de 6 à 5,52 h avec une augmentation de la charge de 5 à 8N; alors qu'elle croît non linéairement et rapidement pour une variation de 5,52 à 3,76h avec une baisse de charge de 8 à 45,65N. elle décroît non linéairement et lentement quand la charge s'élève de 16,4 à la charge maximale 20N avec une diminution du temps de chargement de 6 à 3,76h, elle croît aussi linéairement et rapidement avec l'augmentation du temps de chargement de 2 à 2.36 heures simultanément avec la diminution de la charge de 20 à 16,4N puis elle croît non linéairement et rapidement à partir de 16,4 allant jusqu'à 7,7N au moment où le temps de chargement passe de 2,36 à 3,8 heures.

L'allure globale du graphe tend vers un point optimum qui est un « minimax » dont les coordonnées sont (10,54 N ; 3,56 h) où vaut 0,2779 g.

- deuxième cas :

Si on maintient les deux paramètres (X_1 ; X_3) constants à leurs valeurs moyennes, le modèle aura la forme ($Y(X_2, X_4)$) et une surface de réponse (Fig.30):

$$Y(X_2, X_4) = 231,87 + 0,9X_2 - 1,12X_2X_4 - 0,32X_4^2$$

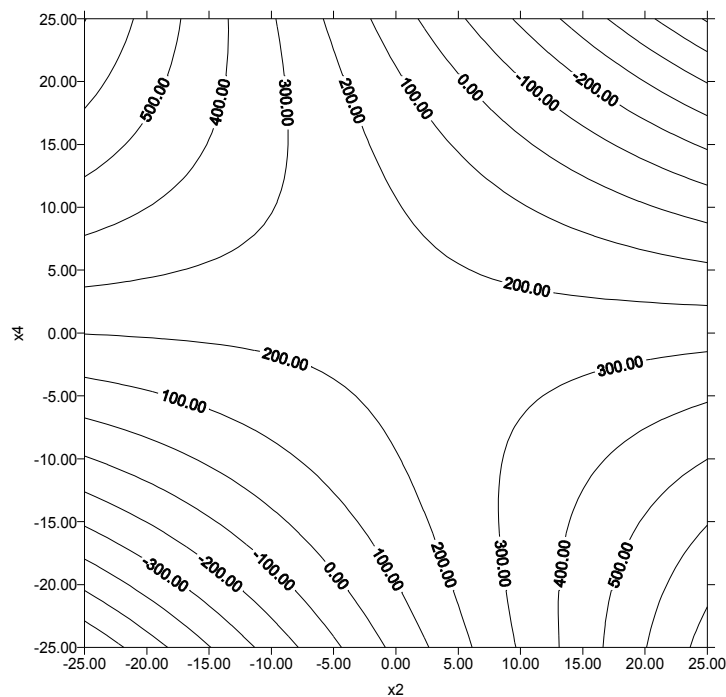


Fig.30 a : Effet de la vitesse et du temps de chargement en hydrogène sur l'usure

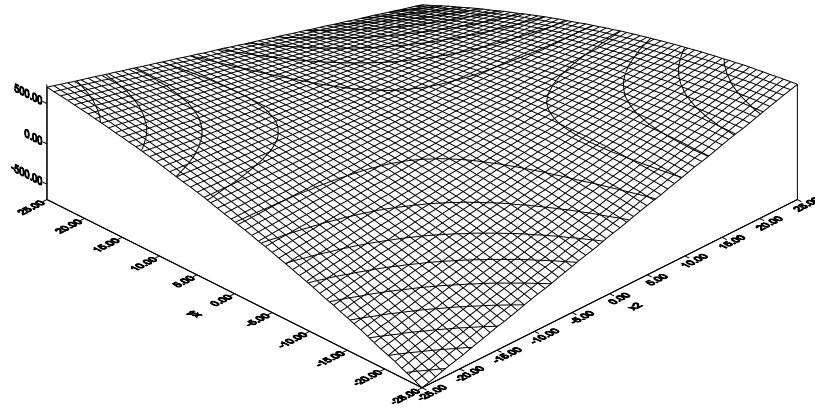


Fig.30 b : Effet de la vitesse et du temps de chargement en hydrogène sur l'usure

La chute de la vitesse de 0,4 à 0,304m/s et l'augmentation du temps de chargement de 2 à 3,84h entraîne une décroissance non linéaire et lente de l'usure de même que lorsque la vitesse augmente de 0,08 à 0,179m/s avec une réduction du temps de chargement de 6 à 4,24h .Tandis que l'usure croît linéairement et rapidement pour une augmentation simultanée de la vitesse entre 0,08 et 0,124m/s et du temps de chargement de 2 à 2,32h ; l'usure continue à croître non linéairement et lentement au de là de la vitesse 0,124 à 0,281m/s avec une augmentation du temps de chargement de 2,32 à 4h ,l'usure croît linéairement et rapidement pour une diminution de la vitesse de 0,4 à 0,352m/s continue mais d'une manière non linéaire et lente quand la vitesse baisse de 0,352 à 0,201m/s avec la diminution du temps de chargement de 5,6 à 4,2h.

Dans ce cas l'usure possède un point optimum qui est un minimax aux coordonnées réelles (0,23 m/s; 4,06 h) ou elle égale la valeur de 0,2257 g.

- troisième cas :

Si on maintient les deux paramètres (X_1 ; X_4) constants à leurs valeurs moyennes , le modèle aura la forme $Y(X_2, X_3)$ et une surface de réponse (Fig.31):

$$Y(X_2, X_3) = 231,87 + 0,9X_2 + 2,87X_3 + 0,49X_2X_3$$

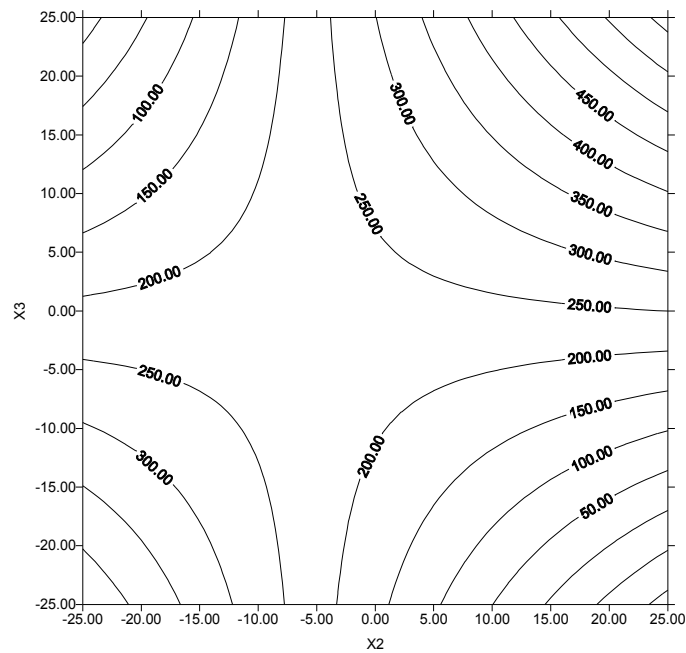


Fig.31 a : Effet de la vitesse et de la charge sur l'usure

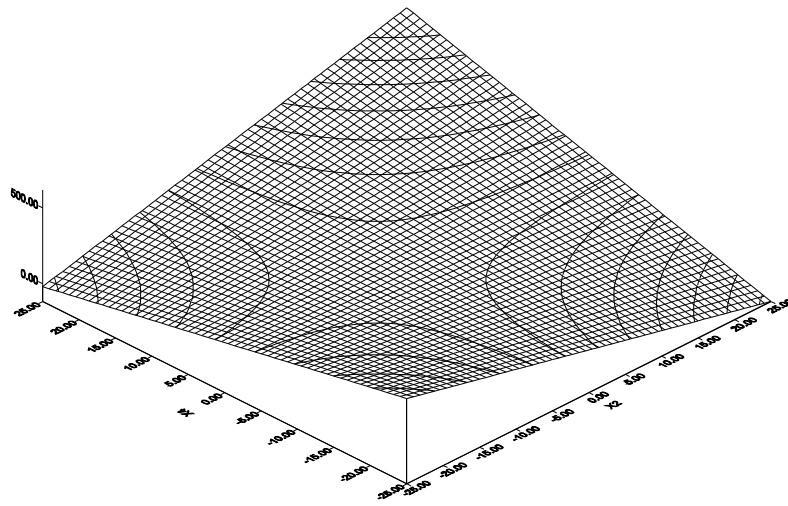


Fig.31 b : Effet de la vitesse et de la charge sur l'usure

De ce graphe on constate que l'usure augmente non linéairement et lentement lorsque la vitesse diminue de 0,4 à 0,22m/s avec une diminution de la charge de 11,6 à 5N, cette esquisse de l'usure se répète quand la vitesse augmente de 0,08 à 0,188m/s et au même moment ou la charge diminue de 20 à 18,2N.

L'usure décroît non linéairement et lentement avec la diminution de la vitesse de 0,4m/s à 0,214m/s et la chute de la charge de 20 à 12,5N, cette configuration se reproduit avec la diminution de la charge entre 11,3 et 5N et une augmentation de la vitesse de 0,08 à 0,192m/s. Cette représentation montre que l'usure possède un point optimum de coordonnées réelles (0,203 m/s ; 11.95 N) qui est un minimax ou sa valeur est de 0,2673 g.

- quatrième cas :

Si on maintient les deux paramètres (X_2 ; X_3) constants à leurs valeurs moyennes, le modèle aura la forme ($Y(X_1, X_4)$) et une surface de réponse (Fig.32):

$$Y(X_1, X_4) = 231,87 - 1,53X_1 - 0,5X_1X_4 - 0,32 X_4^2$$

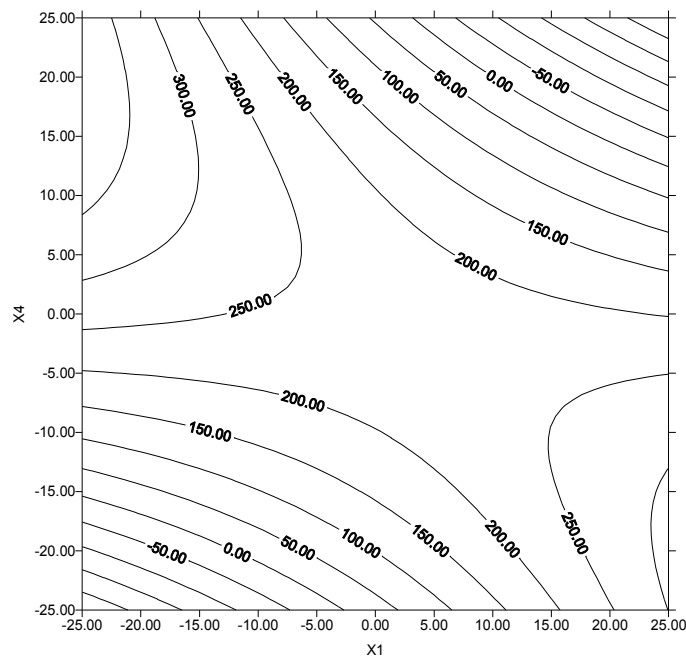


Fig.32 a : Effet de la dureté et du temps de chargement en hydrogène sur l'usure

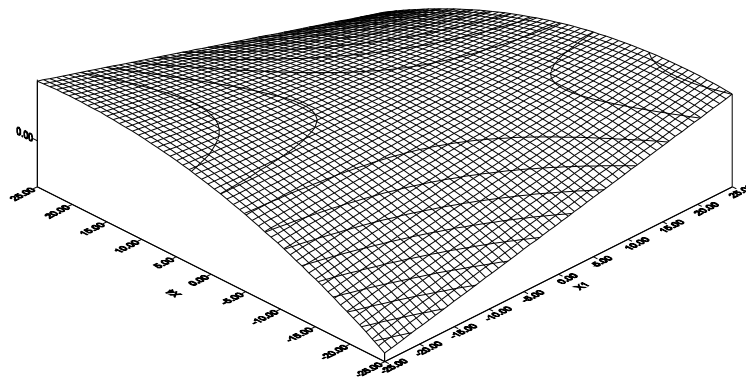


Fig.32 b : Effet de la dureté et du temps de chargement en hydrogène sur l'usure

Dans ce cas, l'usure présente un point optimum qui est un minimax dont les coordonnées sont (179,26 Hv ; 3,75 h) ou sa valeur est égale à 0,067 g.

L'usure croît linéairement et rapidement avec une augmentation simultanée de la dureté de 118 à 155,1 Hv et du temps de chargement de 2 à 2,6h, en augmentant respectivement la dureté de 155,1 à 204,92 Hv et du temps de chargement de 2,6 jusqu'à 3,6h, l'usure continue à croître mais d'une manière non linéaire et lente, alors qu'elle décroît non linéairement et lentement avec une augmentation de la charge de 118 à 139,2 Hv avec une diminution de du temps de chargement de 6 à 3,88h, cette décroissance se reproduit aussi de la même façon pour une diminution du temps de chargement de 3,6 à 2h et une baisse de dureté de 224 à 213,4 Hv.

De la valeur maximale de la dureté 224 à 194,32 Hv et une diminution du temps de 6 à 5,3h l'usure croît rapidement et linéairement et continue sa croissance mais non linéairement et lentement pour une diminution simultanée de la dureté de 194,32 à 145,56 Hv et du temps de chargement à partir de 5,4 à 4h.

- cinquième cas :

Si on maintient les deux paramètres (X_2 ; X_4) constants à leurs valeurs moyennes, le modèle aura la forme ($Y(X_1, X_3)$) et une surface de réponse (Fig.33):

$$Y(X_1, X_3) = 231,87 - 1,53X_1 + 2,87X_3 + 0,4X_1X_3$$

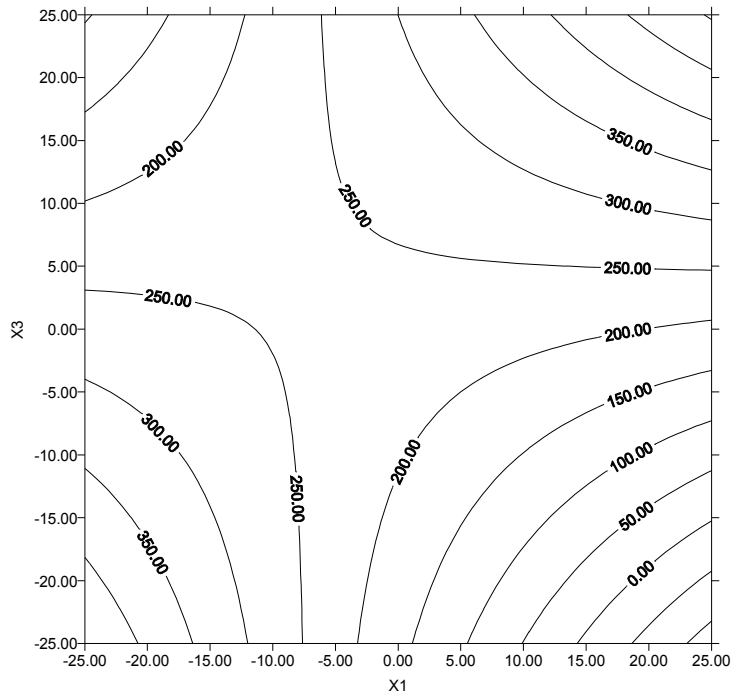


Fig.33 a : Effet de la dureté et de la charge sur l'usure

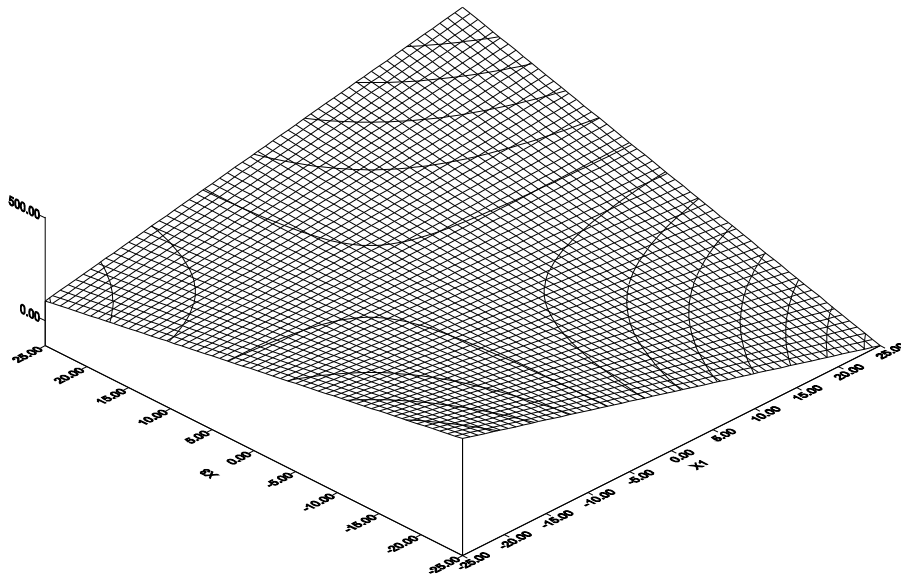


Fig.33 b : Effet de la dureté et de la charge sur l'usure

De ce graphe, on observe une croissance non linéaire et lente de l'usure quand la dureté augmente de la charge de 5 à 12,72 N et la dureté diminue de 224 à 163,58 Hv, l'évolution de l'usure demeure de la même manière lorsque la dureté chute de 144,5 à 118 Hv avec une diminution de la charge de 20 à 15,5 N ; cependant l'usure décroît non et non linéairement et lentement pour une augmentation simultanée et respective de la dureté et de la charge entre

[118 ; 155,1] Hv et [5 ;13,4]N et aussi lorsque la dureté et la charge diminuent respectivement de 224 à 158,28 Hv et de 20 à 14 N.

L'usure est égale à 0,8825 g au point optimum de coordonnées (155,79 Hv ; 13,64 N) caractérisant un minimax.

- sixième cas :

Si on maintient les deux paramètres (X_3 ; X_4) constants à leurs valeurs moyennes, le modèle aura la forme ($Y(X_1, X_2)$) et une surface de réponse (Fig.34):

$$Y(X_1, X_2) = 231,87 - 1,53X_1 + 0,9X_2$$

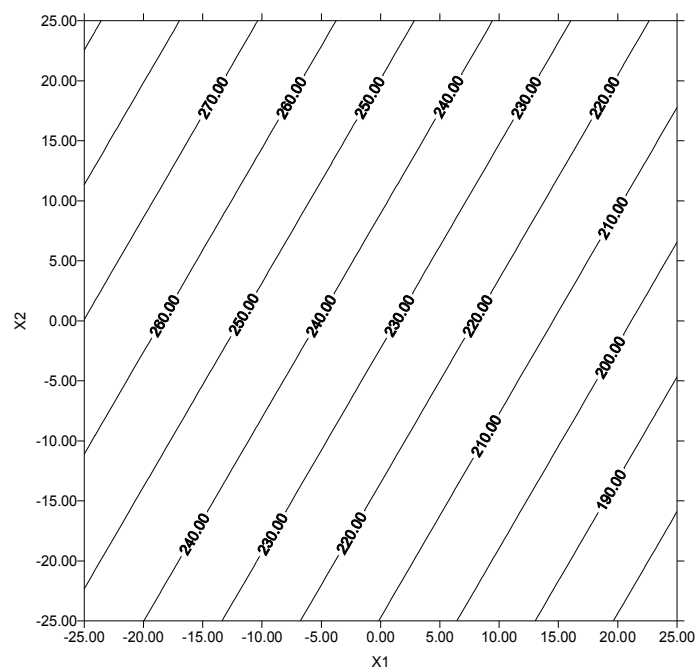


Fig.34 a : Effet de la dureté et de la vitesse sur l'usure

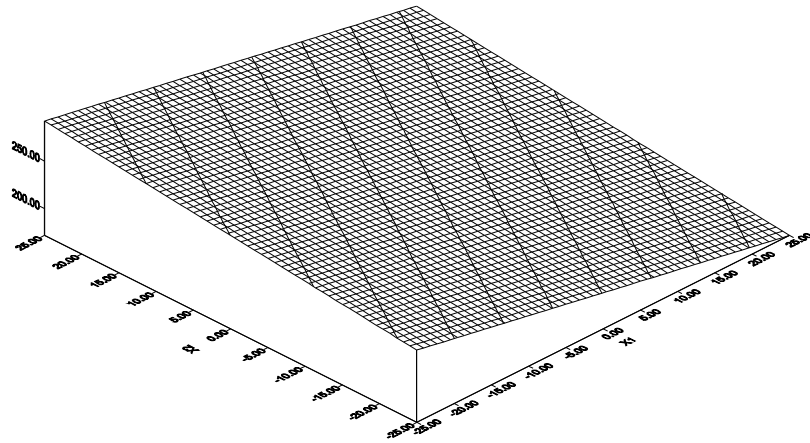


Fig.34 b : Effet de la dureté et de la vitesse sur l'usure

Dans ce cas, le graphe ne présente aucun optimum et l'usure augmente continuellement et rapidement avec la diminution de la dureté et l'augmentation de la vitesse.

II.5. Détermination du modèle mathématique décrivant l'usure des échantillons « immergés » en eau de mer:

N°	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₂₃	X ₃₄	X ₃₄	X ₁₂₃	X ₁₂₄	X ₁₃₄	X ₂₃₄	X ₁₂₃₄	X ₄₄	(g) \bar{Y}
1	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	1/3	1,140
2	+	-	-	0	-	-	0	+	0	0	+	0	0	0	0	- 2/3	0,6545
3	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	1/3	1,5552
4	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+	1/3	0,1805
5	-	-	+	0	+	-	0	-	0	0	+	0	0	0	0	- 2/3	1,4795
6	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-	1/3	0,4470
7	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	+	1/3	1,3120
8	+	+	+	0	+	+	0	+	0	0	+	0	0	0	0	- 2/3	0,1616
9	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-	1/3	1,320
10	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	1/3	0,5097
11	-	+	-	0	-	+	0	-	0	0	+	0	0	0	0	- 2/3	1,4972
12	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	-	1/3	0,2127
13	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	1/3	1,4011
14	+	-	+	0	-	+	0	-	0	0	-	0	0	0	0	- 2/3	0,3201
15	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	-	1/3	2,0489
16	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-	1/3	0,1525
17	-	-	-	0	+	+	0	+	0	0	-	0	0	0	0	- 2/3	1,2327
18	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	1/3	0,6671
19	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	+	-	1/3	1,3496
20	+	+	-	0	+	-	0	-	0	0	-	0	0	0	0	- 2/3	0,2035
21	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+	1/3	1,5488
22	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	1/3	0,2161
23	-	+	+	0	-	-	0	+	0	0	-	0	0	0	0	- 2/3	1,9102
24	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	1/3	0,1777
Coeff. regression	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₁₂	b ₁₃	b ₁₄	b ₂₃	b ₂₄	b ₃₄	b ₁₂₃	b ₁₂₄	b ₁₃₄	b ₂₃₄	b ₁₂₃₄	b ₄₄	$\sum \bar{Y}$
	-0,579	-0,0073	0,027	0,104	-0,136	-0,106	-0,045	0,036	0,0158	0,031	0,025	-0,052	-0,024	0,026	-0,034	-1,19	21,67

-Détermination du modèle mathématique (selon l'algorithme de calcul [56]):

$\bar{Y} = \sum \bar{Y}_i$: Somme des moyennes arithmétiques des pertes de masse lues par ligne
 Variance de sondage :

$$S_i^2 = \sum ((Y_i - \bar{Y})^2) / 2 = \text{somme des variances de sondage}$$

-Variance résiduelle

$$\hat{Y}_i = \sum (B_i X_{ui} + B_{ij} X_{u,ij} + B_{ii} X_{ui}^*)$$

Valeur moyenne arithmétique des observations répétée

$$\bar{Y}_u = \frac{1}{m} \sum_{p=1}^m Y_{up} = (21,7 / 3) = 7,23$$

Calcul des coefficients de régression:

$$\beta_u = \frac{\sum_1^N X_i^* \bar{Y}}{\sum_1^N X_i^{*2}}$$

D'où $b_{44} = (-6,35426662 / 5,33) = -1,191$

$$X_4^* = X_4^2 - (2/3)$$

$$\beta_0 = \bar{Y} - \frac{2}{3} \sum \beta_{ii} = 21,7 - 0,666 * (-1,19) = 22,49$$

$$B_i = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N X_{iu} \bar{Y}_u$$

$b_1 = (-13,89303333 / 24) = -0,5795$; $b_2 = (-0,175833 / 24) = -0,0073$;

$b_3 = (0,651966 / 24) = 0,02712$; $b_4 = (1,876666 / 16) = 0,1042$;

$b_{12} = (-3,276166 / 24) = -0,1362$; $b_{13} = (-2,577966 / 24) = -0,1064$;

$b_{14} = (-0,823666 / 16) = -0,0457$; $b_{23} = (0,876433 / 24) = 0,0364$;

$b_{24} = (0,284733 / 16) = 0,0158$; $b_{34} = (0,56633 / 16) = 0,0314$;

$b_{123} = (0,609966 / 24) = -0,0253$; $b_{124} = (-0,94653 / 16) = -0,0525$;

$b_{134} = (-0,043333 / 16) = -0,0240$; $b_{234} = (0,482266 / 16) = 0,0267$;

$b_{1234} = (-0,643266 / 16) = -0,03573$; $b_{44} = (-1,708/5,33) = -1,191$

Le modèle mathématique global décrivant l'usure (Y) en fonction des paramètres influents et de leurs interactions:

$$Y(X_i) = 23,28 - 0,579X_1 - 0,0073X_2 + 0,027X_3 + 0,104X_4 - 0,136X_1X_2 - 0,106X_1X_3 - 0,045X_1X_4 + 0,036X_2X_3 + 0,0158X_2X_4 + 0,031X_3X_4 + 0,025X_1X_2X_3 - 0,052X_1X_2X_4 - 0,024X_1X_3X_4 + 0,026X_2X_3X_4 - 0,035X_1X_2X_3X_4 - 1,19X_4^2 \dots\dots\dots(24)$$

Variance de reproductibilité :

$$S^2_{rep} = \frac{\sum_{i=1}^N S_i^2}{N}$$

$$S^2_{rep} = [(532,93 \cdot 10^{-3}) / 24] = \mathbf{22,2 \cdot 10^{-3}}$$

-Valeurs des distributions des coefficients de régression

$$S^2(B_i) = \frac{S^2_{rep}}{N \cdot m}$$

$$S^2(b_i) = [(0,0222) / 24 \cdot 3] = \mathbf{30,84 \cdot 10^{-5}}$$

-Test de « Student »:

$$-t(\alpha, fy) = [\alpha=0,05, N(m-1)] = t(\alpha, fy) = [\alpha=0,05, 48] = 2,0086$$

Coefficient acceptable doit être supérieur ou égal à $|b_i|$:

$$t_{\alpha, fy} \cdot S^2(b_i) = |b_i| = 2,0086 \cdot 30,84 \cdot 10^{-5} = \mathbf{61,94 \cdot 10^{-5} = 0,62 \cdot 10^{-3}}$$

-Considérant uniquement les coefficients de régression significatifs, le modèle aura la forme:

$$Y(X_i) = \mathbf{23,28 - 0,579X_1 - 0,0073X_2 + 0,027X_3 + 0,104X_4 - 0,136X_1X_2 - 0,106X_1X_3 - 0,045X_1X_4} \\ + \mathbf{0,036X_2X_3 + 0,0158X_2X_4 + 0,031X_3X_4 + 0,025X_1X_2X_3 - 0,052X_1X_2X_4 - 0,024X_1X_3X_4} \\ + \mathbf{0,026X_2X_3X_4 - 0,035X_1X_2X_3X_4 - 1,19X_4^2} \dots\dots\dots(24-1)$$

Test de Cochran:

$$G_{max} = \frac{S^2(max)}{\sum_{i=1}^N S_i^2}$$

$G_{max} = (0,008050601 / 0,053293) = \mathbf{0,0874}$ on Remarque bien que les dispersions sont homogènes car $G_{max.exp}$ est inférieur à $G_{th} = 0,1907$ selon le test de Cochran (15,24) interpolé entre les G_{th} des coordonnées [(10,24) ou $G_{th} = \mathbf{0,1113}$ et (16,24) ou $G_{th} = \mathbf{0,0942}$]

Test de Fischer:

$$F_{exp} = \frac{S^2_{rés}}{S^2_{rep}}$$

$$S^2_{\text{rés}} = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{Y}_{iu} - \bar{Y}_i)^2}{N-L}$$

$$S^2_{\text{rés}} = [(84,6099 / (24-15))] = [84,61 / 9] = \mathbf{9,401}$$

Et delà on déduit que le facteur de « Fischer » expérimental (F_{exp}) de la relation :

$$F_{\text{exp}} = (9,401 / 22.2) = \mathbf{0,423}$$

F_{th} [facteur de Fischer théorique est « tiré » du tableau de Fischer (Annexe)]

F_{th} est le point dont les coordonnées sont $f_1 = N-L$ et $f_2 = N(m-1)$.

- $f_1=8$ et $f_2 = 48$ et d'après la table de Fischer $f_2= 48$ est compris entre les valeurs

remarquables de f_2 (40 et 60) qui donne avec $f_1 =8$ les 02 valeurs $F_{\text{th}} = (\mathbf{2,10; 2,18})$ ce qui

nous donne le droit de dire que $F_{\text{exp}} < F_{\text{th}}$ d'où le modèle mathématique décrit le phénomène

d'une manière largement **adéquate**.

II.5.1.Calcul d'optimums et l'usure correspondante:

-Calcul des valeurs réelles des paramètres d'expérimentation :

Pour convertir les valeurs codées des paramètres en valeurs réelles, on utilise la relation suivante : x_i (valeurs réelles) = X_i (valeurs codées) . Δx + x_{i0}

Tableau des valeurs codées et réelles des paramètres aux points culminants :

Paramètres	Valeurs codées	Valeurs réelles
<u>Dureté Vickers (Hv)</u> <u>X₁</u>	-1	118
	-0,75	131,5
	1	224
<u>Vitesse</u> <u>(mètre/seconde) X₂</u>	-1	0,08
	-0,85	0,104
	-0,75	0,12
	-0,63	0,1392
	-0,6	0,144
	1	0,44
<u>Charges (Newtons) X₃</u>	-1	5
	-0,3	10,25
	-0,25	10,625
	0,2027	14,02025
	0,3	14,75
	0,65	18,125
<u>temps de chargement en</u> <u>hydrogène (heures) X₄</u>	-1	1
	-0,6	1,2
	-0,5	1,25
	-0,35	1,325
	-0,25	1,375
	-0,15	1,425
	-0,05	1,475
	0,15	1,575
	0,3	1,65
	0,8	1,9
1	2	

II.5.2.Graphes et discussions:

- premier cas :

En maintenant X_1 et X_2 fixées à leur valeurs réelles moyennes ($X_1=0, X_2=0$) le modèle se réduit comme suit :

$$Y(X_3, X_4)=23.28+0.027X_3+0.104X_4+0.031X_3 X_4 -1.19X_4^2 \dots\dots\dots(24-1a)$$

Et il aura une représentation graphique à la figure (Fig.35) où on constate que lorsque la durée d’immersion augmente de 1 mois à 1,2mois l’usure croit linéairement et rapidement pour toute la variation de la charge de 5 Newtons à 20 Newtons puis l’usure continue cette croissance linéaire mais lentement quand la durée d’immersion passe de 1,2mois à 1,475mois ;

L’usure décroît linéairement et rapidement au déplacement de la durée d’immersion de la valeur 1,575 mois à 1,9 mois. Alors qu’au-delà de 1,9mois jusqu’à 2 mois, l’usure décroît toujours de la même manière que précédemment mais lentement avec la variation de la charge de 18,125 Newtons à 20 Newtons et pour une augmentation de la durée de 1,475 mois à 1,575 mois, l’usure tend à croître jusqu’aux valeurs extrêmes. Dans ce cas le modèle ne possède pas un optimum.

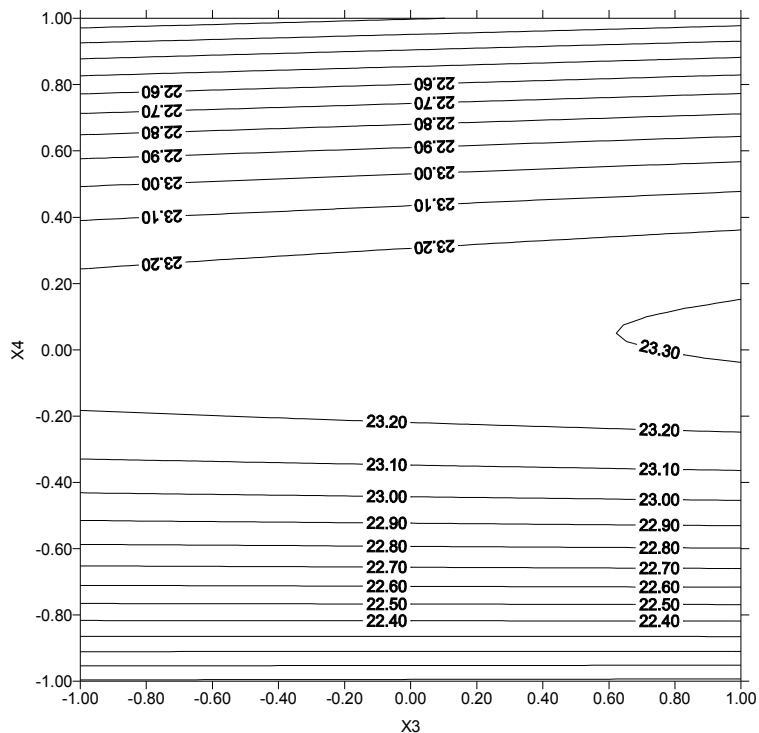


Fig.35a : Effet de la charge et la durée d’immersion sur l’usure

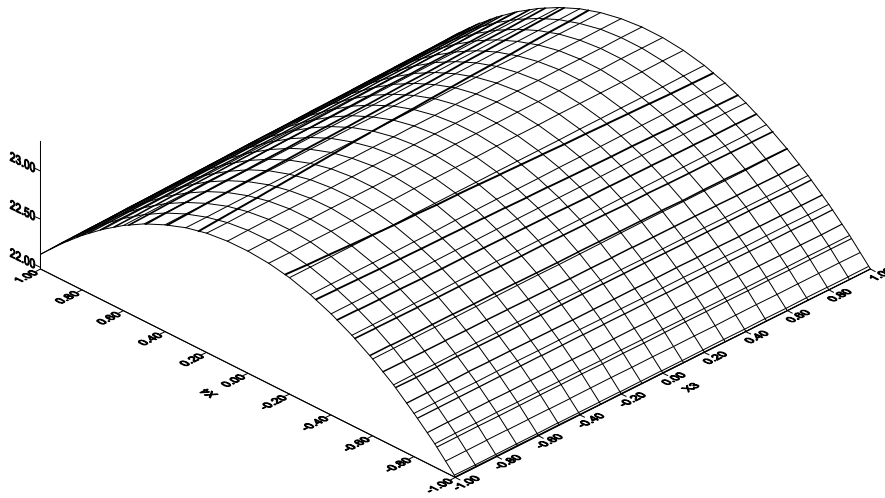


Fig.35 b : Effet de la charge et la durée d’immersion sur l’usure

- deuxième cas :

En maintenant X_1 et X_3 fixées à leurs valeurs réelles moyennes ($X_1 = 0$, $X_3 = 0$) le modèle devient :

$$Y(X_2, X_4) = 23.28 - 0.0073X_2 + 0.104X_4 + 0.158X_2 X_4 - 1.19X_4^2 \dots\dots\dots(24-1b)$$

Et qui se déploie graphiquement à la figure suivante (Fig.36) où on constate que l’usure croit linéairement et rapidement quand on augmente la durée d’immersion de 1 mois à 1,325 mois pour des vitesses allant de 0,08 m/s jusqu’à 0,4 m/s et lorsque la durée augmente de 1,375 mois à 1,65 mois l’usure maintient sa croissance puis elle régresse linéairement et rapidement pour une variation de la durée d’immersion de 1,65 à 1 mois.

On remarque aussi que l’usure se maintient à ses hautes valeurs plus longtemps pour des faibles valeurs de la vitesse alors qu’elle se maintient moins longtemps lorsque la vitesse croit vers 0,4m/s.

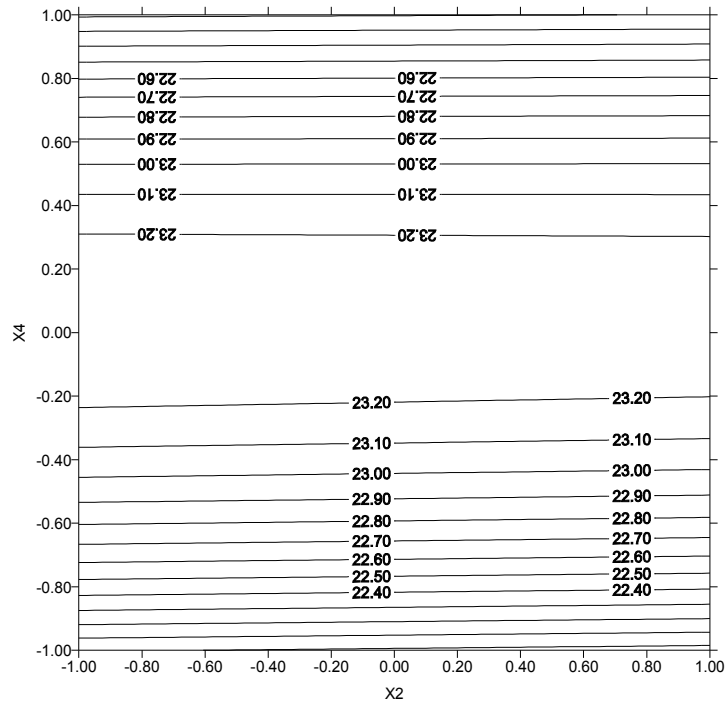


Fig.36 a : Effet de la vitesse et la durée d'immersion sur l'usure

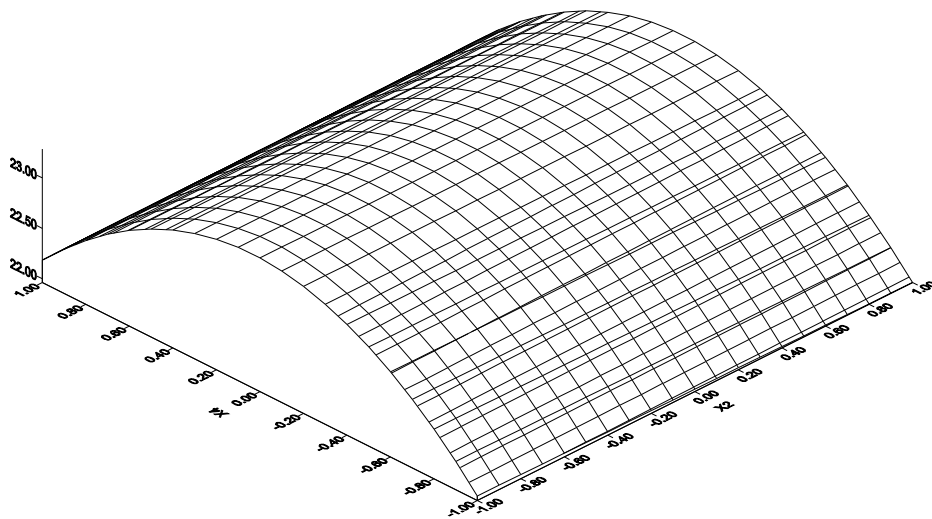


Fig.36 b : Effet de la vitesse et la durée d'immersion sur l'usure

- troisième cas :

Pour des valeurs (X_1, X_4) maintenues à leur moyenne $(X_1=0, X_4=0)$ le modèle devient :

$$Y(X_2, X_3) = 23.28 - 0.0073X_2 + 0.027X_3 + 0.036X_2X_3 \dots\dots\dots(24-1c)$$

Et qui décrit graphiquement le phénomène d'usure à la figure (Fig.37).

Quand la vitesse diminue de 0,104 m/s à 0,08 m/s, l'usure décroît non linéairement et rapidement pour des valeurs de la charge allant de 10,25 Newtons à 5 Newtons ; Cette même évolution de l'usure se répète quand la charge descend de sa valeur maximale 20 Newtons jusqu'à 14,75 Newtons avec la variation de la vitesse de 0,4 m/s à 0,144 m/s.

Cependant, l'usure croît non linéairement et rapidement lorsque la charge augmente de 5 Newtons à 14,75 Newtons et pendant que la vitesse varie de 0,1392 m/s à 0,4 m/s. cette courbe possède un optimum qui est un minimax aux coordonnées (0,2027 ; -0,75) correspondant aux coordonnées réelles (0,12 m/s; 14,02025 N) où l'usure égale $Y=23,7182$ g

***[les coordonnées de l'optimum sont calculées par la méthode de Cramer]**

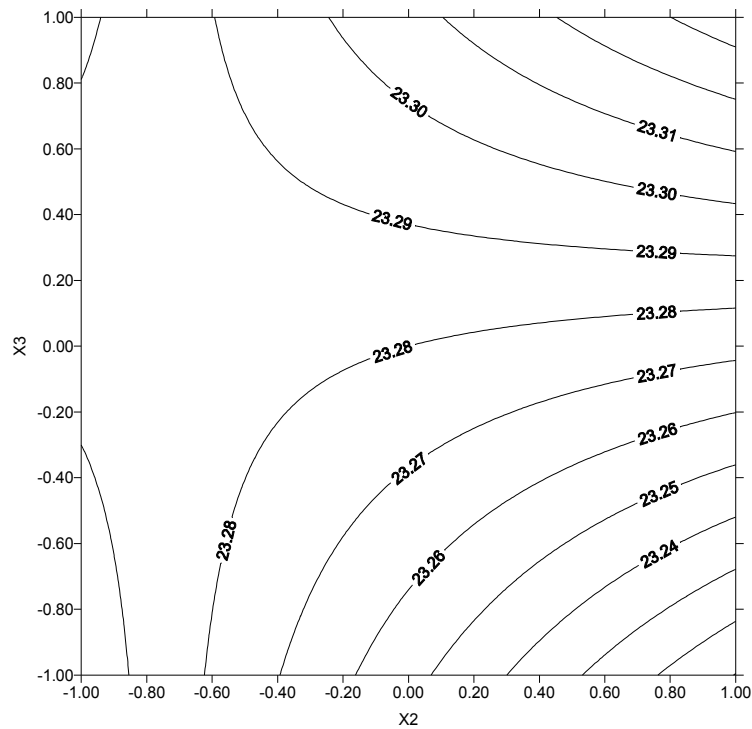


Fig.37 a : Effet de la vitesse et de la charge sur l'usure

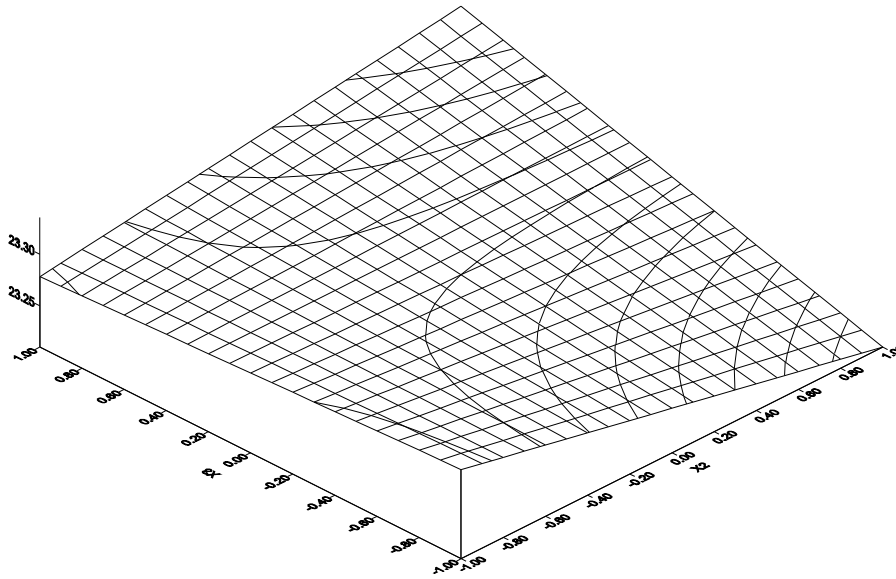


Fig.37 b : Effet de la vitesse et de la charge sur l'usure

- quatrième cas :

En maintenant cette fois ci les valeurs X_2 et X_3 à la moyenne ($X_2 = 0, X_3 = 0$), le modèle devient :

$$Y(X_1, X_4) = 23.28 - 0.579X_1 + 0.104X_4 - 0.045X_1X_4 - 1.19X_4^2 \dots\dots\dots(24-1d)$$

Et qui à comme graphe la figure (Fig.38), où l'usure croit linéairement et lentement lorsque la durée d'immersion augmente de 1, 2 mois pour une dureté variant de 224 Hv à 131,5 Hv , alors qu'elle croit non linéairement et lentement quand on augmente la durée d'immersion de 1,25 mois à 1,425 mois ; Mais elle décroît non linéairement et lentement pour une diminution de la durée d'immersion de 2 mois à 1,65 mois. Le modèle ne présente aucun optimum dans ce cas de figure.

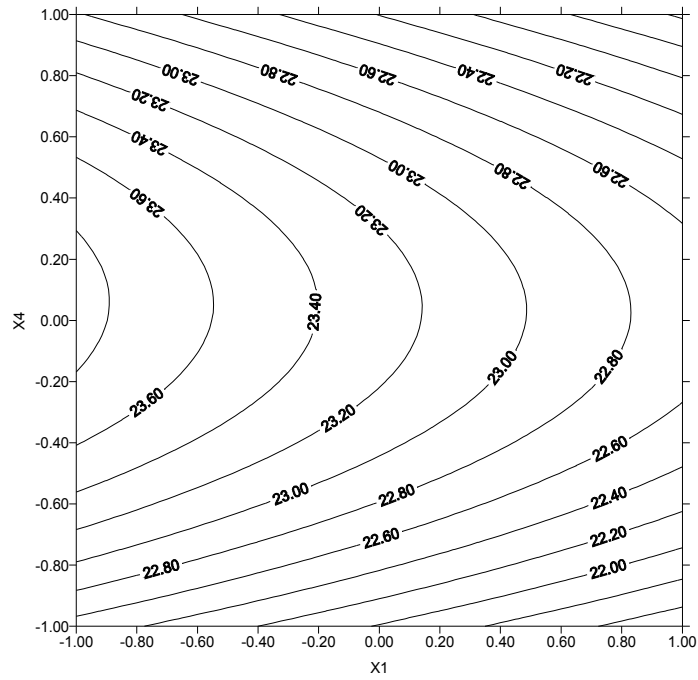


Fig.38 : Effet de la dureté et la durée d'immersion sur l'usure

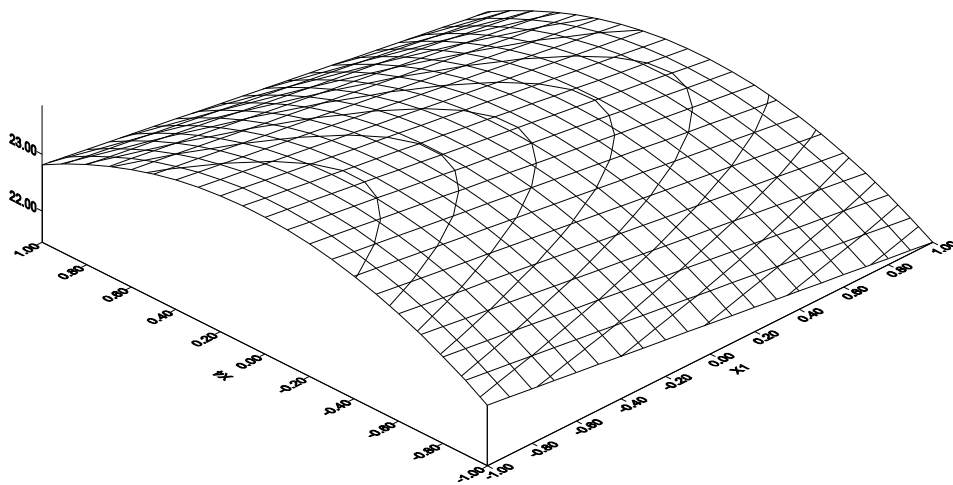


Fig.38 b : Effet de la dureté et la durée d'immersion sur l'usure

- cinquième cas :

Dans ce cas on maintient X_2 et X_4 à la valeur moyenne ($X_2 = 0, X_4 = 0$) le modèle devient :

$$Y(X_1, X_3) = 23.28 - 0.579X_1 + 0.027X_3 - 0.106X_1 X_3 \dots\dots\dots(24-1e)$$

On constate d'après le graphe de la figure (Fig.39) qu'en augmentant la charge de 5 Newtons à 20 Newtons, l'usure croît linéairement et rapidement pour une dureté variant de 118 Hv à 224 Hv, alors que l'usure décroît linéairement et rapidement avec la diminution de la charge. D'après le graphe ce modèle ne possède pas un optimum.

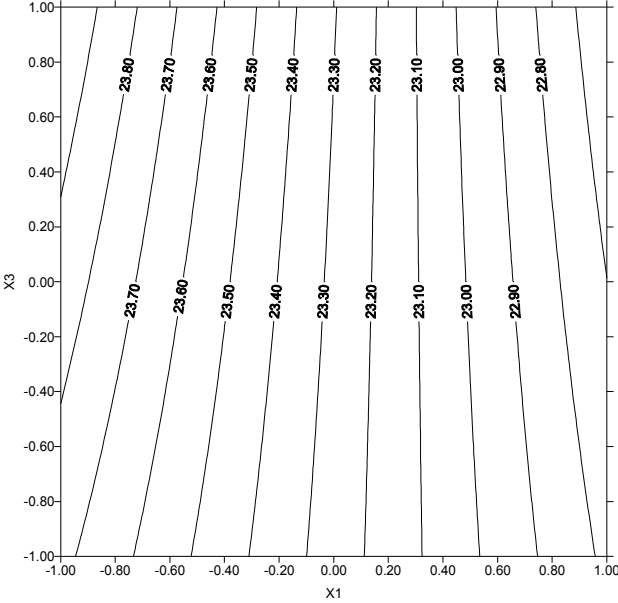


Fig.39 a : Effet de la dureté et de la charge sur l'usure

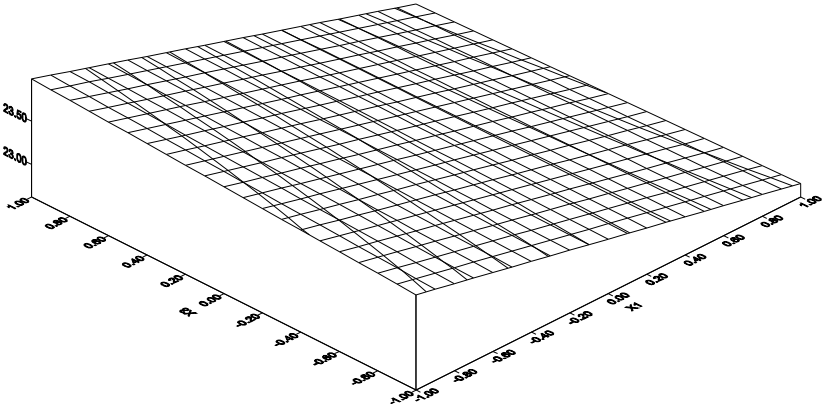


Fig.39 b : Effet de la dureté et de la charge sur l'usure

- sixième cas :

Dans ce cas on maintient X_3 et X_4 à la valeur moyenne ($X_3 = 0, X_4 = 0$) le modèle devient :

$$Y(X_1, X_2) = 23.28 - 0.579X_1 - 0.0073X_2 - 0.136X_1X_2 \dots\dots\dots(24-1f)$$

Le graphe de la figure (Fig.40) qu'en augmentant la vitesse de 0,08 à 0,4 m/s, l'usure croit linéairement et rapidement pour une dureté variant de 118 à 224 Hv, alors que l'usure décroît linéairement et rapidement avec la diminution de la vitesse. Le graphe de ce modèle ne présente aucun optimum.

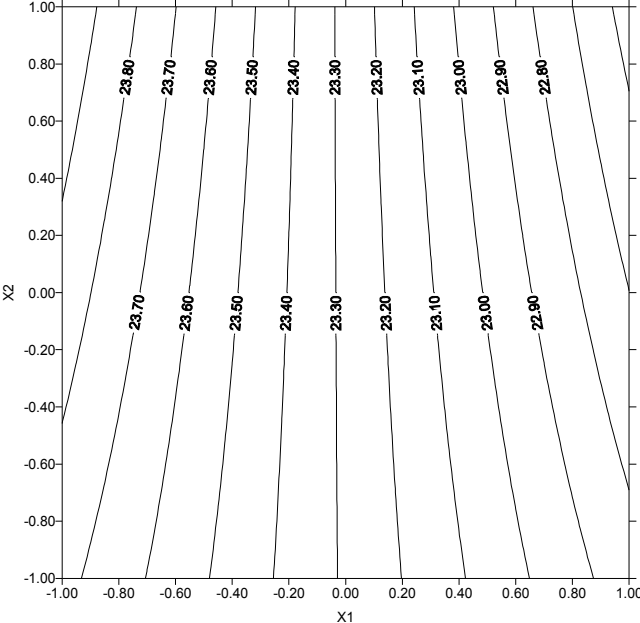


Fig.40 a : Effet de la dureté et de la vitesse sur l'usure

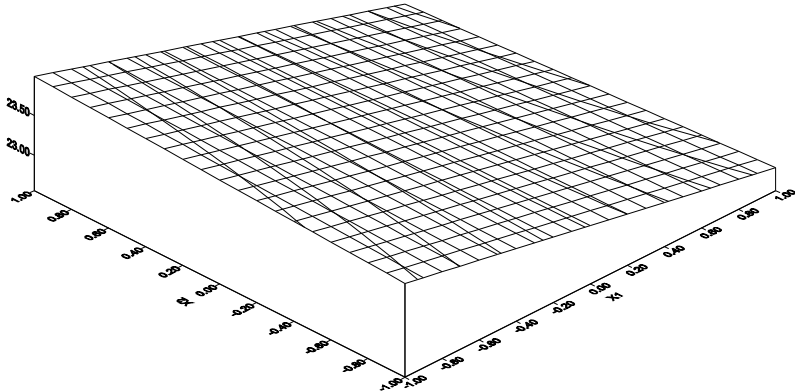


Fig.40 b : Effet de la dureté et de la vitesse sur l'usure

III.CONCLUSION:

En s'intéressant à l'effet que peuvent engendrer les paramètres d'environnement (hydrogène et l'eau de mer) sur l'usure des aciers considérés et à l'issue de la recherche bibliographique parmi les différents travaux liés à l'usure des matériaux de construction mécanique et suite aux divers essais (soixante douze « 72 = 24 x 3 lectures ») effectués au volet expérimental de la thèse, on a pu observer que l'usure est et restera un phénomène difficile à quantifier et à maîtriser mais très possible de l'atténuer en apportant quelques régulations optimales sur les paramètres influents sur ce phénomène comme (duretés des pièces en contact , vitesse de service relative entre les pièces en contact, charges appliquées aux surfaces de contact et [la durée de chargement en hydrogène ou la durée d'immersion en eau de mer] des surfaces de contact) .

L'étude expérimentale nous a permis d'établir la relation de ces paramètres avec l'usure est l'exprimer par un modèle mathématique résultant d'une méthode statistique de planification des expériences ;

Ce modèle est représenté graphiquement en fixant à chaque cas deux paramètres parmi les quatre considérés à leur valeur moyenne afin de nous permettre la visualisation de l'effet que peuvent appliquer les deux autres paramètres non fixés, cette opération nous a offert six graphes des six cas probables appelés « Surface de réponse » nous permettant d'observer le suivant :

A-Chargement en hydrogène :

- Dans cinq des six cas observés , l'usure possède un point optimum qui est un « Mini Max » qu'on peut calculer ces coordonnées par des méthodes numériques (méthode de Cramer...)
- Les valeurs réelles des facteurs influant sur l'usure équivalentes aux coordonnées « codées » des « Mini Max » permet de signaler que l'usure est la plus importante au voisinage des valeurs moyennes des différents facteurs
- L'usure est proportionnelle avec la vitesse, la charge et la durée de chargement en hydrogène mais inversement proportionnelle avec la dureté . (c'est à dire que la

croissance de l'usure est liée à la croissance de la vitesse , de la charge et de la durée et que la diminution de l'usure est liée à la croissance de la dureté).

- L'usure diminue considérablement avec la diminution simultanée de la vitesse et de la charge appliquée tout en maintenant une dureté moyenne et la durée de chargement en hydrogène moyenne (voir surface de réponse du sixième cas à la figure 34).
- Le temps de chargement en hydrogène associé à chacun des trois autres paramètres induit à des « minimax » d'usure comme on le remarque aux (deuxième, quatrième et cinquième) cas et cela ne peut que signifier l'effet fragilisant de l'hydrogène sur la surface de contact.
- Le temps de chargement influe moins sur l'usure quand la dureté du matériau est importante comme le prouve la configuration graphique du cinquième modèle réduit ou l'usure est la plus faible (0,067 g) au point optimum correspondant.
- l'effet de l'hydrogène sur la tenue à l'usure des aciers est lié beaucoup plus à la dureté de l'acier, donc à sa structure métallurgique s'appauvrit en carbone quand la dureté augmente est cette interaction peut être expliquée par la diminution des lacunes structurelles qui constituent un site d'accueil pour les petits atomes d'hydrogène responsable de la fragilisation superficielle de l'acier conduisant à son mauvais comportement à l'usure.

B-Immersion en eau de mer :

- La vitesse et la charge influent en alternance sur l'usure quand la durée d'immersion est maintenue à sa valeur moyenne comme le mentionne le graphique du troisième modèle réduit (Fig.37) ou il présente une perte de masse optimale.
- L'effet de la vitesse et de la charge sur l'usure est identique lorsqu'ils agissent simultanément chacun avec la durée d'immersion où l'usure varie paraboliquement avec une concavité négative sur les plans (X_4, Y) et (X_4, Y) des graphes respectifs

(Fig.35 et Fig.36) ce qui signifie que l'usure est influencé plus par la durée d'immersion que par la charge et la vitesse.

- La durée d'immersion agit « fatalement » sur les aciers moins durs que sur les aciers dont la dureté est importante résistant ainsi à la perte de masse même lorsque la durée d'immersion est considérable comme on l'observe au quatrième cas (Fig.38).
- Quand la durée d'immersion est maintenue à sa moyenne, la charge et la vitesse agissent négativement sur la résistance à l'usure des aciers moins durs alors que les aciers dits « dur » présentent une bonne tenue à l'usure (Fig.39 et Fig.40).

-Il est bon de noter que l'évolution d'un acier immergé en milieu marin est régie non seulement par des interactions chimiques de l'eau de mer, mais également par des facteurs biologiques liés à la présence d'un bio film causant des conséquences de l'activité métabolique des micro-organismes qui le peuplent car ils attirent plus d'oxygène au niveau des surfaces particulièrement sensibles à l'usure par corrosion.

-Si on fait une intersection des deux expérimentations, on remarque bien que le comportement des aciers à l'usure est en étroite relation avec la structure métallurgique des aciers (proportion du carbone en présence) avant qu'il soit influencé par les paramètres expérimentaux et des conditions de leurs utilisations.

-REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] CAUBET, Jean-Jacques .- Théorie et pratique industrielle du frottement .- Paris, Dunod-Technip, 1964.
- [2] Bowden F.P. , Tabor D, vol I and II, clarendon . Press oxford, 1950-1954
- [3] ARMBRUSTER, M. .- Le contrôle qualité et la tribologie. In : Revue pratique du contrôle industriel, n° 131, Février 1985, p. 28-34.
- [4] GODET, M. .- Les fondements mécaniques de la tribologie. In : Mécanique Matériaux Électricité, 1972.
- [5] d'AGRAIVES, B.C. .- Présentation d'un programme d'étude comparative sur les mesures du coefficient de frottement. In : Revue française de mécanique, n° 6, 1978. p. 31-42.
- [6] La mécanique des surfaces : une technologie, un art, bientôt une science. In : Industries et techniques, n° 452, 1er mai 1881, p.20-25.
- [7] (anamorphose «image volontairement déformée, dont l'aspect normal ne peut être perçu qu'à l'aide d'un miroir courbé ou d'un changement de perspective » ZAMBELLI, G. et VINCENT, L. .- Matériaux et contacts, une approche tribologique.- Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 1998.- ISBN 2-88074-338-9
- [8] J.M.Georges, Frottement, usure et lubrification (la tribologie ou sciences des surfaces) éditions EYROLLES (2000) ISBN 2-212-05823-3, CNRS .Editions(2000) ISBN 2-271-05668-3
- [9] COURTEL, Robert .- Frottement. Lubrification. Usure. Connaissances de base. In: Techniques de l'Ingénieur, notice B 585, décembre 1968.
- [10] COURTEL, Robert.- Le coefficient de frottement et sa mesure. In : Usine nouvelle, numéro de printemps 1964, p. 449-465.
- [11] BOWDEN et TABOR.- Friction et lubrification.- Paris, Dunod, 1956
- [12] L.C.Lim et M.F. Ashby. Acta metall, 35, pp.1-24, 1987 et repris par J.M.Georges dans aspects macroscopiques de frott.et usure, 2000)
- [13] Carslaw H.S, Jeager J.C, heat conduction in solids, 2nd edition, oxford university press, London 1979.
- [14] Carslaw H.S, Jeager J.C, heat conduction in solids, 2nd edition, oxford university press, London 1979.
- [15] Carslaw H.S, Jeager J.C, heat conduction in solids, 2nd edition, oxford university press, London 1979.

- [16] Carslaw H.S, Jeager J.C, heat conduction in solids, 2nd edition, oxford university press, London 1979.
- [17]L.C .Lim et M.F. Ashby. Acta metall, 35, pp.1-24, 1987 et repris par J.M.Georges dans aspects macroscopiques de frott.et usure, 2000)
- [18]L.C.Lim et M.F. Ashby. Acta metall, 35, pp.1-24, 1987 et repris par J.M.Georges dans aspects macroscopiques de frott.et usure , 2000)
- [19]CAUBET, Jean-Jacques.- Nouveaux paramètres dans la lutte contre l'usure. In : Matériaux Mécanique Électricité, 1972.
- [20]MENARD, D., VANDERSCHAEVE, A., RISBET, A. et DEPOISIER, J.-Cl. .- Structure fine de surfaces métalliques après frottement : observations par microscopie électronique en transmission. In : Mécanique Matériaux Électricité, n° 398, mars-avril 1983, p. 3-7.
- [21]OUDAR, Jacques.- La chimie des surfaces.- Paris, Presses universitaires de France, 1973. Collection SUP.
- [22]HUGOT-LE GOFF, Anne .- Quelques développements récents des méthodes d'examen et d'analyse des surfaces. Conférence G.A.M.I. du 5 mars 1975.
- [23]WEHBI, D., QUINIOU, J.-F. et ROQUES-CARMES, C. .- Rôle de la rugosité des surfaces en science des matériaux. In : Traitement thermique, n° 222, 1988, p. 63-73
- [24]Maîtriser l'usure et le frottement.- Paris, Ministère de l'Industrie, 1980. Collection Programme National d'Innovation, n° 3. Diffusé par LA DOCUMENTATION FRANCAISE.
- [25]Estimation de l'usure par examen des lubrifiants. In : Achats et entretien, n° 407, mai 88, p. 37-45.
- [26] J.M.Georges, Frottement, usure et lubrification (la tribologie ou sciences des surfaces) éditions EYROLLES (2000) ISBN 2-212-05823-3, CNRS .Editions (2000) ISBN 2-271-05668-3
- [27] Archard J.F., J.appl.phys. 29, p, 981, 1953
- [28] KRAGELSKY, I.-V. .- Le calcul de l'usure. In : Mécanique, matériaux, électricité, n° 265-1, 1972, p. 39-45.
- [29] Krajelskii I .V. Friction and wear, butterworths. London, 1965.[30]COURTEL, Robert .- Sur l'observation de certains dommages périodiques causés aux surfaces par le frottement, et leur interprétation. - C.R. Acad. des sciences, Paris, 16 Octobre 1961.
- [31]Kapoor A ., Johnson K.L., Williams J., Wear,172,pp.206-196,1994

- [32] Kapoor A ., Johnson K.L., Williams J., Wear,175,pp.81-92,1995.
- [33] COURTEL, Robert .- Sur l'observation de certains dommages périodiques causés aux surfaces par le frottement, et leur interprétation. - C.R. Acad. des sciences, Paris, 16 Octobre 1961
- [34] FLAMAND, Louis .- Analyse mécanique des avaries dans les contacts lubrifiés. In : Revue pratique du contrôle industriel, n° 101, Février 1980, p. 42-45 et n° 102, Avril 1980, p. 47-56.
- [35] TABOR, D. .- Les mécanismes de l'usure : un bref tour d'horizon. In : Mécanique, Matériaux, Électricité, n° 265-1, 1972, p. 8-11.
- [36] PLAY, Daniel .- Usure et frottement sec. Conférence, École Centrale de Lyon, Journées d'Écully, septembre 1978.
- [37]PRONIKOV, A.-S. .- Fondements théoriques du calcul de l'usure des pièces de machines. In : La machine-outil française, n° 203, novembre 1964.
- [38] J.M.Georges ,Frottement, usure et lubrification (la tribologie ou sciences des surfaces)éditions EYROLLES (2000)ISBN 2-212-05823-3,CNRS .Editions(2000) ISBN 2-271-05668-3
- [39] J.M.Martin ,T.Le-Morgne, B.Vacher, M.I.De Barros (ou théorie HSAB développé par Pearson aux USA)en collaboration avec Nippon Mitsubishi Oil Corporation et AGIP)« ADDITIFS ANTI-USURE ET REDUCTEURS DE FROTTEMENT »
- [40] J.M.Martin ,T.Le-Morgne, B.Vacher, M.I.De Barros (ou théorie HSAB développé par Pearson aux USA)en collaboration avec Nippon Mitsubishi Oil Corporation et AGIP)« ADDITIFS ANTI-USURE ET REDUCTEURS DE FROTTEMENT »
- [41] JOUAN, A. .- Aspect des surfaces frottantes suivant les modes de dégradation et d'usure. In : Traitement thermique, n° 208, 1987.
- [42] J C. Bell et R Coy .new directions in tribology ,I.M.Hunthings , Mech. .Eng.Publ . , Londres , p.197 ,1997)
- [43] Krajelskii I.V. friction and wear , butterworths . London ,1965.
- [44] George J.M edition microscopic aspects of adhesion and lubrication Tribology .ser , 7 ,1982.
- [45] Bowden F.P , Tabor D. the friction and lubrication of solids , vol .I and II , clarendon .press , oxford ,1950 –1954
- [46] George J.M edition microscopic aspects of adhesion and lubrication Tribology .ser ,7 ,1982.

- [47] George J.M edition microscopic aspects of adhesion and lubrication Tribology .ser ,7 ,1982.
- [48] J.M George lubrification limite 1978
- [49]H.Tomizaxa et T.Fisher,ASLE Transactions,30,p,41,1987.
- [50]J.C. Bell et K.M. Delargy, Leeds-Lyon Symp., tribology series , 29, Dawson D. et al .(ed), p, 387,1995.
- [51]J.S.Sheasby, T .A . Caughlin., Leeds-Lyon Symp., tribology series , 31, Dawson D. et al .(ed), p, 685,1995.
- [52] Statistiques, encyclopédie «[http// www. Wikipédia.fr](http://www.Wikipédia.fr) » du 13 Oct. 2004.
- [53] J. GOUPY, Plans d'expériences, Technique de l'ingénieur, 1999- P E 230
- [54] BENOIT, notions sur les plans d'expériences, Inst français du pétrole 1975
- [55] « A.HEBBAR, Manuscrit, « Méthodes statistiques de planification extrême des expériences », Université de Mostaganem, 2003.
- [56] G.E.P. Box and K.B Wilson , on the experimental attainment of optimum conditions journal of the royal statistical society .Vol XIII N°1, (1951); p1-45
- [57] Colombier D., Jourdan A. (2001). Régressions trigonométriques et plans d'expériences pour expériences simulées. Revue de Statistique Appliquée, 49 (2), 5-26.
- [58] V. KAFAROV Méthodes cybernétiques et technologie chimique. Edition M112, Moscow 1974.
- [59] J .Kiefer , optimum designs in regression problem II , Ann. Math statist .32 (1961) , p 298 –235.
- [60] tabata,T.,Birnbaum,H.,Direct observations of hydrogen enhanced crack propagation in iron ,Scripta Metallurgica18 (1984) pp.231-236.
- [61] Abraham,D., Altstetter,C.,hydrogen enhanced localisation of plasticity in an austenitic stainless steel.Metallurgical Transactions A26A(1995) pp.2859-2871.
- [62] Hanninen,H, Hakkarainen, T., Fractographic characteristics of a hydrogen –charged AISI 316 type austenitic stanless steel .Metakkurgical Transactions A.,Vol 10A (1997) pp. 1196-1199.
- [63] Engelmann, H., Mummert,K., Schwarz, S., Uhlemann, M., austenitic stainless steel and nickel base alloys –evaluation of susceptibility to hydrogen induced cracking. Corrosion-deformation interactions (CDI '96), EFC Publication N° 21 The institute of Materials London,(1997) pp.238-247.
- [64] Albercht,J., Bernstein, J., Thomson, A., Evidence for dislocation transport of hydrogen in aluminium. Metallurgical Transactions A13 (1982) pp.811-820.[65] Uhlemann, M., Shehata,

M., Mummert, K., influence of hydrogen on material behaviour of high nitrogen austenitic stainless steel. Material Science Forum Vols.318-320(1999) pp. 523-530.

[66] Gojic,M., Kosec, L., The susceptibility to the hydrogen embrittlement of low alloy Cr and CrMo steels, ISIJ International Vol. 37 (1997) N° 4 pp.412-418.

[67] Symons,D., Hydrogen embrittlement of Ni-Cr-Fe alloys..Metallurgical and Materials TransactionsA.Vol,28A,(1997)pp.655-663.

[68] Aminot A.; Chaussepied M Manuel des Analyses Chimiques en Milieu Marin; CNEXO:Brest, France, 1983.

[69] Stratmann M.; Müller J. Corrosion Science 1994, 36, 327.

[70] Jovancicevic V.; Bockris J. O'M. J. Electrochem. Soc. 1986, 133, 1797.

[71] Lewandowski Z.; Walser G. Environmental Engineering; EE div / ASCE: Reno, NV,1991.

[72] Gojkovic S. Lj.; Zecevic S. K.; Drazic D. M. J. Electroanal. Chem. 1995, 399, 127.

[73] MacLendon G.; Hake R. Chemical Rev 1992, 92, 481.

[74] Wroblowa H. S.; Qaderi S. B. J. Electroanal. Chem. 1990, 279, 231.

[75] Zecevic S.; Drazic D. M.; Gojkovic S.Lj. Corrosion Science 1991, 32, 563.

[76] Vago E. R.; Calvo E. J. J. Electroanal. Chem. 1995, 388, 161.

[77] Zecevic S.; Drazic D. M.; Gojkovic S.Lj. Electrochimica Acta 1991, 36, 5.

[78] Bellon-Fontaine M-N.; Bertrand P.; Costa D.; Compère C.; Guezennec J. ; Marcus P.; Pradier C-M.; Rondot B.; Walls M.G. Ecasia, the 12th Forum for Applied Biotechnology: Brugge, Belgique, 1998.

[79] Powell M.S.; Slater N.H.K. Biotech. Bioeng. 1983, 25.

[80] Characklis W.G.; Marshall K.C.; McFeters G.A. "The Microbial Cell", Biofilms; Characklis W.G. and Marshall K.C., Ed.; John Wiley and sons: New York, 1990, pp 131.

[81] Applegate L.E.; Erkenbrecher C.W. Desalination 1987, 65, 331.

[82] Stoodley P.; Dodds I.; Boyle J.D.; Lappin-Scott H.M. J. of Appl. Microbiol. Symposium Supplement 1999, 85, 19S.

[83] Lewandowski Z.; Walser G. Environmental Engineering; EE div / ASCE: Reno, NV, 1991.

[84] Characklis W.G. "Microbial Fouling and Microbial Biofouling Control", Biofilms; Characklis W.G. and Marshall K.C., Ed.; John Wiley and Sons: New York, 1990, pp 523.

- [85] Dickinson W.; Lewandowski Z.; Geer R. D. Corrosion 1996, 52, 910.
- [86] Costerton D.E.; Lewandowski Z.; Caldwell D.E.; Korber D.; Lappin-Scott H.M. Annu. Rev. Microbiol. 1995, 45, 711.
- [87] Chandrasekaran P.; Dexter S. C. Corrosion 94; NACE: Houston Texas, 1994, Paper N°276.
- [88] L'Hostis E. Thèse de l'Université de Paris 6: Paris, 1996.
- [89] Christensen B.E.; Characklis W.G. "Physical and Chemical Properties of Biofilms" Biofilms; Characklis W.G. and Marshall K.C., Ed.; John Wiley and sons: New York, 1990, pp 93.
- [89] Fera P. Thèse de l'Université de Bretagne Occidentale; UBO: Brest, 1985.
- [90] Motoda S.; Suzuki Y.; Shinohara T.; Tsujikawa S. Corrosion Science 1990, 31, 515..
- [91] Xu K.; Dexter S. C.; Luther G.W. Corrosion 1998, 54, 814.
- [92] Little B.; Ray R.; Wagner P.; Lewandowski Z.; Lee W. C.; Characklis W. G.; Mansfeld F. Corrosion 90; NACE, 1990, Paper N°150.
- [93] Dickinson W.; Lewandowski Z. Corrosion 95; NACE: Houston, Texas, 1995, Paper N°223.
- [94] Oda T.; Nakamura A.; Shikayama M.; Kawano I.; Ishimatsu A.; Muramatsu T. Biosci. Biotech. Biochem. 1997, 61, 1658.
- [95] Denis M.; Arnaud S.; Malatesta F. FEBS Letters 1989, 247, 475.
- [96] Guezennec J. Matériaux et Techniques 1990, 3.
- [97] Xia F.; Beyenal H.; Lewandowski Z. Wat. res. 1998, 32, 3631.
- [98] Beyenal H.; Tanyolac A.; Lewandowski Z. Wat. Sci. Tech. 1998, 38, 171.
- [99] Siegrist H.; Gujer W. Water Res. 1985, 19, 1369.
- [100] Mattila K.; Carpen L.; Hakkarainen T.; Salkinoja-Salonen M.S. Int. Biodeter. and Biodegrad. 1997, 40, 1.
- [101] Herbert-Guillou D.; Tribollet B.; Festy D.; Kiéné L. Electrochimica Acta, à paraître.
- [102] Ijsseling F.P. General Guidelines for Corrosion Testing of Materials for Marine Applications; EFC, The Insitute of Materials, 1989; Vol. 3, pp 1.

- [103] Baroux B. The first Stainless Steel Congress in Thailand; Thainox Steel Limited: Bangkok, Thaïlande, 1997, pp 219.
- [104] Audouard J.P.; Thierry D.; Féron D.; Compère C.; Scotto V.; Wallen B.; Stigenberg A.; Rogne T. International Congress "Stainless Steels 96": Düsseldorf, Allemagne, 1996.
- [105] Feugas F.; Magnin J. P.; Cornet A.; Rameau J. J. J. Phys. III France 1997, 7, 631.
- [106] Videla H.A. Manual of Biocorrosion; Lewis / CRC: Boca Raton, Florida, 1996.
- [107] Baroux B.; Béranger G.; Lemaitre C. Passivité et Rupture de la Passivité des Aciers Inoxydables; Lacombe P., Baroux B. and Béranger G., Ed.; Les éditions de physique: Les Ulis, France, 1990, pp 161.
- [108] Circuits eau de mer, traitements et matériaux; Editions Technip: Paris, France, 1993.
- [109] Audouard J.P.; Compère C.; Dowling N.J.E.; Féron D.; Festy D.; Mollica A.; Rogne T.; Scotto V.; Taxen K.; Thierry D. International Conference on Microbially Influenced Corrosion: New Orleans, Louisiana, 1995, pp 3/1.
- [110] Mollica A.; Trevis A.; Traverso E.; Ventura G.; Scotto V.; Alabiso G.; Marcenaro G.; Montini V.; De Carolis G.; Dellepiane R. The 6th Int. Congr. Marine Corrosion and Fouling: Athènes, Grèce, 1984; Vol. Marine Corrosion, pp 269.
- [111] Dupont I.; Féron D.; Novel G. Matériaux et Techniques 1997, 11-12, 41.
- [112] Holthe R.; Bardal E.; Gartland P.O. Material Performance 1989, 28, 16.
- [113] Desestret A. Matériaux et Techniques 1986, 7-8, 317.
- [114] Bardal E.; Drugli J. M.; Gartland P. O. Corrosion Science 1993, 35, 257.
- [115] Dexter S.C.; Zhang H-J. Int. Congr. on Microbially Influenced Corrosion; N.J. Dowling, M.W. Mittleman and J.C. Danko, Ed.: Knoxville, Tennessee, 1990, pp 8/1.
- [116] Eashwar M.; Maruthamuthu S.; Sathiyarayanan S.; Balakrishnan K. Corrosion Science 1995, 37, 1169.
- [117] Ringas C.; Robinson F.P.A. Corrosion 1988, 44, 386.
- [118] Maruthamuthu S.; Eashwar M.; Sebastin Raja S.; Balakrishnan K. Biofouling 1993, 7, 257.
- [119] Compère C.; Rondot B.; Walls M.G.; Da Cunha Belo M. Eurocorr'96: Nice, France, 1996, pp 14/1.

[120] Eashwar M.; Maruthamuthu S.; Palanichamy S.; Balakrishan K. Biofouling 1995, 8, 215.

[121] Fontana M.G. Corrosion Engineering; 3rd ed.; McGraw-Hill Book Co: New York, 1986.

[122] Eashwar M.; Maruthamuthu S. Biofouling 1995, 8, 2013.

[123] Eashwar M.; Maruthamuthu S.; Sathyanarayanan S.; Balakrishan K. 12th Int. Corrosion Congress; NACE: Houston, Texas, 1993, pp 3708.

[124] Costa D.; Marcus P.; Bellon-Fontaine M. N.; Rondot B.; Walls M.; Vidal O.; Lejeune P.; Compère C. The 192nd Electrochemical Society Meeting-Passivity and its breakdown: Paris, France, 1997, pp 450.

[ENISO6507-1] tiré du site spécialisé en unités

<http://www.utc.fr/~tthomass/Themes/Unites/>

-RELATIONS :

Relation (1).....(Friction et lubrification , BOWDEN et TABOR - Paris, Dunod, 1956).

Relation (2)..... (Physique 1 Mécanique, Harris Benson (trad.Marc Séguin, Benoît Villeneuve, Bernard Marcheterre et Richard Gagnon, Edition du nouveau Pédagogique, 2009 -4^e 2d, p157).

Relation (3)..... (Marielle Champagne, Option science Physique La mécanique, Édition du Nouveau Pédagogique, 2009, p183).

Relation (4)..... (Marielle Champagne, Option science Physique La mécanique, Édition du Nouveau Pédagogique, 2009, p185).

Relation (5)..... (Physique 1 Mécanique, Harris Benson (trad.Marc Séguin, Benoît Villeneuve, Bernard Marcheterre et Richard Gagnon, Edition du nouveau Pédagogique, 2009- 4^e 2d, p158).

Relation (6)..... (Voie, matériel roulant et exploitation technique des chemins de fer: livre 2. Matériel de transport, Charles Henri François Couche, Dunod, 2009, p159).

Relation (7)..... (III.3.3.Frot.usure.lub.JM.Georges, sciences et techniques de l'ingénieur, Edition EYROLLES, CNRS Editions 2000)

Relation (8)..... (III.3.3.Frot.usure.lub.JM.Georges, sciences et techniques de l'ingénieur, Edition EYROLLES, CNRS Editions 2000)

Relation (9)..... (III.3.3.Frot.usure.lub.JM.Georges, sciences et techniques de l'ingénieur, Edition EYROLLES, CNRS Editions 2000)

Relation (10)..... (III.3.3.Frot.usure.lub.JM.Georges, sciences et techniques de l'ingénieur, Edition EYROLLES, CNRS Editions 2000)

Relation (11)..... (III.3.5.Frot.usure.lub.JM.Georges, sciences et techniques de l'ingénieur, Edition EYROLLES, CNRS Editions 2000)

Relation (13)..... (III.3.5.Frot.usure.lub.JM.Georges, sciences et techniques de l'ingénieur, Edition EYROLLES, CNRS Editions 2000)

- Relation (14)..... (III.3.5.Frot.usure.lub.JM.Georges, sciences et techniques de l'ingénieur, Edition EYROLLES, CNRS Editions 2000)
- Relation (14')..... (III.3.5.Frot.usure.lub.JM.Georges, sciences et techniques de l'ingénieur, Edition EYROLLES, CNRS Editions 2000)
- Relation (15)..... (III.3.5.Frot.usure.lub.JM.Georges, sciences et techniques de l'ingénieur, Edition EYROLLES, CNRS Editions 2000)
- Relation (16)..... (III.3.5.Frot.usure.lub.JM.Georges, sciences et techniques de l'ingénieur, Edition EYROLLES, CNRS Editions 2000)
- Relation (17)..... (III.3.5.Frot.usure.lub.JM.Georges, sciences et techniques de l'ingénieur, Edition EYROLLES, CNRS Editions 2000)
- Relation (18)..... "Interaction of hydrogen with the microstructure of low-carbon steel.", Ramunni V.P., De Paiva Coelho T., De Miranda P.E.V, Materials Science and Engineering A435 (2006): 504-514.
- Relation (19)..... "A quantitative analysis of hydrogen trapping. » Pressouyre G.M., Bernstein I.M, Metallurgical Transactions 9A (1978): 1571-1580.
- Relation (20)..... "A micromechanics approach to the study of hydrogen transport and embrittlement.", Taha A., Sofronis P., Engineering Fracture Mechanics 68 (2001): 803-837.
- Relation (21)..... (Méthodes statistiques de planification extrême des expériences, Notions et applications pour chercheurs expérimentaux, Ahmed HEBBAR (Professeur, Université de Mostaganem 2003).
- Relation (22)..... (Méthodes statistiques de planification extrême des expériences, Notions et applications pour chercheurs expérimentaux, Ahmed HEBBAR (Professeur, Université de Mostaganem 2003).
- Relation (23).....Modèle global de l'usure des échantillons « hydrogénés » (Professeur, Université de Mostaganem 2003).
- Relation (23-1).....Modèle adéquat de l'usure des échantillons « hydrogénés » (Professeur, Université de Mostaganem 2003).
- Relation (24).....Modèle global de l'usure des échantillons « immergés » en eau de mer (Professeur, Université de Mostaganem 2003).
- Relation (24-1).....Modèle adéquat de l'usure des échantillons « immergés » en eau de mer

-ANNEXES :

Table de Fisher-

Pour qu'un coefficient de régression multiple, par exemple, soit significatif, F calculé doit dépasser F lu dans la table pour le risque d'erreur de 5 % (le seul donné ici); deux catégories de degrés de liberté déterminent F :

— v_1 : nombre de degrés de liberté pour la plus faible des deux variances;

— v_2 : nombre de degrés de liberté pour la plus forte des deux variances.

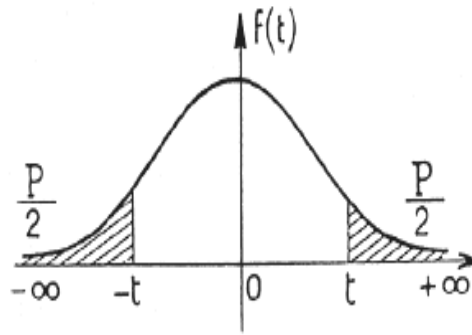
Pour $\alpha = 0,05$:

$v_1 \rightarrow$ $v_2 \downarrow$	1	2	3	4	5	6	8	12	24	∞
1	161,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234,0	238,9	243,9	249,0	254,3
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,37	19,41	19,45	19,50
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,84	8,74	8,64	8,53
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,04	5,91	5,77	5,63
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,82	4,68	4,53	4,36
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,15	4,00	3,84	3,67
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,73	3,57	3,41	3,23
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,44	3,28	3,12	2,93
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,23	3,07	2,90	2,71
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,07	2,91	2,74	2,54
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	2,95	2,79	2,61	2,40
12	4,75	3,88	3,49	3,26	3,11	3,00	2,85	2,69	2,50	2,30
13	4,67	3,80	3,41	3,18	3,02	2,92	2,77	2,60	2,42	2,21
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,70	2,53	2,35	2,13
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,64	2,48	2,29	2,07
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,59	2,42	2,24	2,01
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,55	2,38	2,19	1,96
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,51	2,34	2,15	1,92
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,48	2,31	2,11	1,88
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,45	2,28	2,08	1,84
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,42	2,25	2,05	1,81
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,40	2,23	2,03	1,78
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,38	2,20	2,00	1,76
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,36	2,18	1,98	1,73
25	4,24	3,38	2,99	2,76	2,60	2,49	2,34	2,16	1,96	1,71
26	4,22	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,32	2,15	1,95	1,69
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,30	2,13	1,93	1,67
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,44	2,29	2,12	1,91	1,65
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,54	2,43	2,28	2,10	1,90	1,64
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,27	2,09	1,89	1,62
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,18	2,00	1,79	1,51
60	4,00	3,15	2,76	2,52	2,37	2,25	2,10	1,92	1,70	1,39
120	3,92	3,07	2,68	2,45	2,29	2,17	2,01	1,83	1,61	1,25
∞	3,84	2,99	2,60	2,37	2,21	2,09	1,94	1,75	1,52	1,00

Exemple de lecture

Pour $v_1 = 5$, $v_2 = 20$, F calculé doit être supérieur à 2,71 pour que le coefficient de régression soit jugé significatif, avec un risque d'erreur de 5 %.

Table du test de Student :



$\frac{P}{v}$	0,90	0,80	0,70	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	0,001
1	0,158	0,325	0,510	0,727	1,000	1,376	1,963	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657	636,619
2	0,142	0,289	0,445	0,617	0,816	1,061	1,386	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	31,598
3	0,137	0,277	0,424	0,584	0,765	0,978	1,250	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	12,929
4	0,134	0,271	0,414	0,569	0,741	0,941	1,190	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	8,610
5	0,132	0,267	0,408	0,559	0,727	0,920	1,156	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	6,869
6	0,131	0,265	0,404	0,553	0,718	0,906	1,134	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,959
7	0,130	0,263	0,402	0,549	0,711	0,896	1,119	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	5,408
8	0,130	0,262	0,399	0,546	0,706	0,889	1,108	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	5,041
9	0,129	0,261	0,398	0,543	0,703	0,883	1,100	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,781
10	0,129	0,260	0,397	0,542	0,700	0,879	1,093	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,587
11	0,129	0,260	0,396	0,540	0,697	0,876	1,088	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,437
12	0,128	0,259	0,395	0,539	0,695	0,873	1,083	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	4,318
13	0,128	0,259	0,394	0,538	0,694	0,870	1,079	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	4,221
14	0,128	0,258	0,393	0,537	0,692	0,868	1,076	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	4,140
15	0,128	0,258	0,393	0,536	0,691	0,866	1,074	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	4,073
16	0,128	0,258	0,392	0,535	0,690	0,865	1,071	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	4,015
17	0,128	0,257	0,392	0,534	0,689	0,863	1,069	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,965
18	0,127	0,257	0,392	0,534	0,688	0,862	1,067	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,922
19	0,127	0,257	0,391	0,533	0,688	0,861	1,066	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,883
20	0,127	0,257	0,391	0,533	0,687	0,860	1,064	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,850
21	0,127	0,257	0,391	0,532	0,686	0,859	1,063	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,819
22	0,127	0,256	0,390	0,532	0,686	0,858	1,061	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,792
23	0,127	0,256	0,390	0,532	0,685	0,858	1,060	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,767
24	0,127	0,256	0,390	0,531	0,685	0,857	1,059	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,745
25	0,127	0,256	0,390	0,531	0,684	0,856	1,058	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,725
26	0,127	0,256	0,390	0,531	0,684	0,856	1,058	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,707
27	0,127	0,256	0,389	0,531	0,684	0,855	1,057	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,690
28	0,127	0,256	0,389	0,530	0,683	0,855	1,056	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,674
29	0,127	0,256	0,389	0,530	0,683	0,854	1,055	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,659
30	0,127	0,256	0,389	0,530	0,683	0,854	1,055	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,646
40	0,126	0,255	0,388	0,529	0,681	0,851	1,050	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	3,551
80	0,126	0,254	0,387	0,527	0,679	0,848	1,046	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,460
120	0,126	0,254	0,386	0,526	0,677	0,845	1,041	1,289	1,658	1,980	2,358	2,617	3,373
∞	0,126	0,253	0,385	0,524	0,674	0,842	1,036	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	3,291

Contrôle pratique de dispersions par table de Cochran :

Level of significance $\alpha = 0.05$

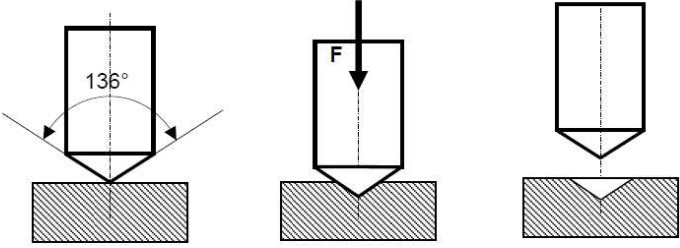
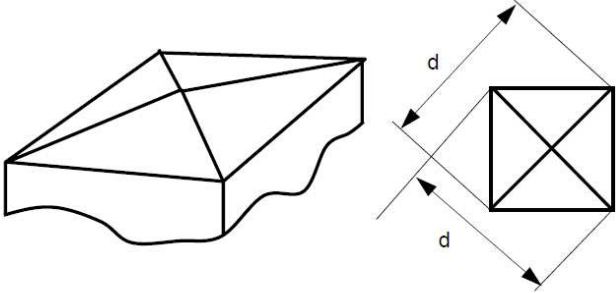
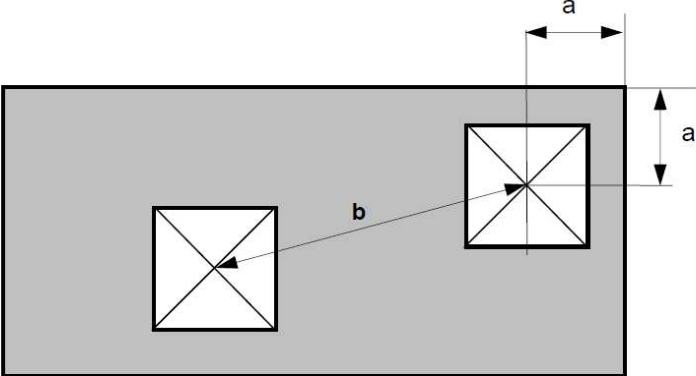
k	V_x													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	16	36	144	∞
2	0.9985	0.9750	0.9392	0.9057	0.8772	0.8534	0.8332	0.8159	0.8010	0.7880	0.7341	0.6602	0.5813	0.5000
3	0.9869	0.8709	0.7977	0.7457	0.7071	0.6771	0.6530	0.6333	0.6167	0.6025	0.5468	0.4748	0.4031	0.3333
4	0.9065	0.7879	0.6841	0.6287	0.5895	0.5598	0.5365	0.5175	0.5017	0.4884	0.4368	0.3720	0.3093	0.2500
5	0.8412	0.6838	0.5981	0.5441	0.5065	0.4783	0.4564	0.4387	0.4241	0.4118	0.3645	0.3066	0.2513	0.2000
6	0.7808	0.6161	0.5321	0.4803	0.4447	0.4184	0.3980	0.3817	0.3682	0.3568	0.3135	0.2612	0.2119	0.1667
7	0.7271	0.5612	0.4800	0.4307	0.3974	0.3728	0.3535	0.3384	0.3259	0.3154	0.2758	0.2278	0.1833	0.1429
8	0.6798	0.5157	0.4377	0.3910	0.3595	0.3362	0.3185	0.3043	0.2928	0.2829	0.2462	0.2022	0.1616	0.1250
9	0.6385	0.4775	0.4027	0.3584	0.3288	0.3067	0.2901	0.2788	0.2659	0.2568	0.2228	0.1820	0.1446	0.1111
10	0.6020	0.4450	0.3733	0.3311	0.3029	0.2823	0.2668	0.2541	0.2439	0.2353	0.2032	0.1655	0.1308	0.1000
12	0.5410	0.3924	0.3264	0.2880	0.2624	0.2439	0.2299	0.2187	0.2098	0.2020	0.1737	0.1403	0.1100	0.0833
15	0.4709	0.3348	0.2758	0.2419	0.2195	0.2034	0.1911	0.1815	0.1736	0.1671	0.1429	0.1144	0.0889	0.0667
20	0.3894	0.2705	0.2205	0.1921	0.1735	0.1602	0.1501	0.1422	0.1357	0.1303	0.1108	0.0879	0.0675	0.0500
24	0.3434	0.2354	0.1907	0.1656	0.1493	0.1374	0.1288	0.1216	0.1160	0.1113	0.0942	0.0743	0.0567	0.0417
30	0.2929	0.1980	0.1593	0.1377	0.1237	0.1137	0.1061	0.1002	0.0958	0.0921	0.0771	0.0604	0.0457	0.0333
40	0.2370	0.1578	0.1259	0.1082	0.0988	0.0887	0.0827	0.0780	0.0745	0.0713	0.0595	0.0462	0.0347	0.0250
60	0.1737	0.1131	0.0895	0.0765	0.0682	0.0623	0.0583	0.0552	0.0520	0.0497	0.0411	0.0316	0.0234	0.0167
120	0.0998	0.0632	0.0495	0.0419	0.0371	0.0337	0.0312	0.0292	0.0279	0.0266	0.0218	0.0165	0.0120	0.0083
∞	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Kanji, Gopal K. 100 Statistical Tests. London : SAGE Publication Ltd., 1993.

Fiche technique sur l'essai Vickers

Rappels sur les principales caractéristiques de l'essai de dureté Vickers.

Poinçon : pyramide base carrée angle au sommet 136°

Caractéristiques de l'essai	Remarques relatives à la mesure de dureté sur le baladeur de synchroniseur															
	<p>A l'origine l'essai Vickers a été élaboré avec les unités suivantes:</p> <table border="1" data-bbox="983 584 1347 741"> <tr> <td>Effort:</td> <td>kgF</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Surface:</td> <td>mm²</td> <td></td> </tr> <tr> <td>soit :</td> <td>600 Hv =</td> <td>5886 N/mm²</td> </tr> <tr> <td>Avec g :</td> <td>9.81m/s²</td> <td></td> </tr> <tr> <td>1/g :</td> <td>0.102</td> <td></td> </tr> </table>	Effort:	kgF		Surface:	mm ²		soit :	600 Hv =	5886 N/mm²	Avec g :	9.81m/s ²		1/g :	0.102	
Effort:	kgF															
Surface:	mm ²															
soit :	600 Hv =	5886 N/mm²														
Avec g :	9.81m/s ²															
1/g :	0.102															
	<p>L'entreprise a décidé de prendre une mesure de dureté tous les 0.1 mm en partant du bord de la gorge.</p> <p>Compte tenu des dimensions de l'empreinte, des conditions sur l'espacement des empreintes doivent être respectées.</p>															
	<p>Spécifications de la norme sur les positions relatives des empreintes de mesure :</p> <p>$a > 2,5d$ $b > 2,5d$</p> <p>a = distance centre de l'empreinte et le bord de la pièce b = distance entre les centres des empreintes</p> <p>d=diagonale de l'empreinte Pour les aciers: $a = b = 2.5d$</p>															

[EN ISO 6507-1 : Essai de dureté Vickers]