

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministre de l'Enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique

كلية العلوم التقنية

Faculté de Technologie

Département : Génie Mécanique

Mémoire de MAGISTER

Filière : Mécanique

Option : Sciences Des Matériaux

Par :

AYACHI Abdelhamid

THEME

Etude tribologique des couches borurées soumises

à des sollicitations de contact de roulement pur

Soutenu publiquement devant le jury composé de :

Mr : BENCHATTI Ahmed

Président

Mr : BENHORMA Hadj Aissa

Examineur

Mr : GUERIBIZ Djelloul

Examineur

Mr : ALLAOUI Omar

Rapporteur

Mr. : RAHMANI Mohamed

Rapporteur

Promotion : 2013

DÉDICACES

Je dédie ce modeste Travail :

À mes parents

À toute ma famille

À mes amis

***À tous ceux qui ont contribué à ma formation, je
vous passe mes remerciements respectueux.***

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu mes encadreurs Monsieur O.Allaoui et Monsieur M.Rahmani pour l'efficacité et la patience avec lesquelles ils ont guidé et suivi mon travail. Ses encouragements et ses suggestions m'ont été d'une aide précieuse.

Je tiens à remercier M.Ben Chatti Ahmed pour le grand honneur qu'il m'a accordé en acceptant de présider le jury.

Mes profondes gratitude vont à M.Benhorma Hadj Aissa pour avoir accepté de juger mon travail.

C'est avec un grand plaisir que je remercie M. J. Gruibize pour son aide qu'il nous a porté et pour avoir accepté de faire partie de jury.

Un grand merci à M. A. Maati et Laboratoire d'Université Ferhat Abass à Stif- LPMM - pour leurs aides techniques.

Je n'oublie pas de remercier tous les enseignants de l'université de Laghouat pour leurs conseils et leurs remarques tout le long de notre préparation de ce modeste travail.

En fin j'exprime ma reconnaissance à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ce modeste travail.

Summary

In this work the phenomenon of surfaces failure under dry rolling contact conditions has been investigated. The experiences were carried on the mild steel boronized and not boronized.

The experimental apparatus have been realized to study the boronized layers in rolling contact conditions is a ball on disk with spin equal to zero.

The experimental results revealed that in an initial stage the damage is in the forme of cracks inside the contact path and under the effect of the cyclic load, these cracks propagate and rejoin themselves to create a spall or these cracks may reach the surface and lead to the final délamination from within the coating microstructure.

The S-N curves for the tow steel (boronized or not boronized) showed a fast evolution of the surface damage in the steel not boronized with regard to the steel boronized.

Résumé

Dans ce travail nous avons étudié le phénomène de fatigue sous contraintes de contact de roulement pur. Les expériences ont porté sur l'acier doux boruré et l'acier doux non boruré.

Un montage expérimentale a été réalisé à cet effet, ce montage est de type : bille sur disque en acier (borurée et non borurée) avec un spin égale à zéro.

Les résultats expérimentaux ont révélé que dans un stade initial la fatigue est sous forme des fissures à l'intérieure de la piste de roulement et sous l'effet de la charge cyclique, ces fissures propagent et rejoignent pour donner une écaille ou ces fissures atteint la surface et produit une délamination dans la couche boruré.

Les courbes S-N pour les deux aciers boruré et non boruré ont dévoilé une évolution rapide de la fatigue des surfaces dans le cas d'acier non boruré par rapport à l'acier boruré.

ملخص

في هذا العمل قمنا بدراسة ظاهرة الإعياء تحت إجهادات تلامس في حالة التدحرج وغياب التزليق بالنسبة للحديد معالج بالبور.

التركيب التجريبي المستعمل لهذا الغرض من النوع (كرية / سطح) مع غياب الانزلاق

أظهرت التجارب في البداية بان الإعياء يكون عبارة عن شقوق في داخل سطح التلامس ومع مرور الزمن تتجمع هذه الشقوق محدثة التقشر او تنتقل هذه الشقوق الى الاعلى محدثة ظاهرة التبطين

كما أظهرت منحنيات S-N, أن الحديد المعالج بالبور يظهر مقاومة أكبر للإعياء مقارنة بالحديد الغير المعالج بالبور.

Sommaire :

Introduction Générale	01
Chapitre 1 : Aperçus générale sur la fatigue des matériaux	
1-1- Introduction	04
1-2-les modes de rupture sous contact roulant	05
1-2-1-Rupture par piqûres	05
1-2-2- Rupture par déformation cumulative	06
1-2-3-Rupture par résistance excessive au roulement	07
1-3- La fatigue de contact de roulement RCF	08
1-4- Les céramiques sous contraintes de contact de roulement	09
1-4-1-Tests RCF sur les céramiques	09
1-4-2-Les modes de la fatigue de contact de roulement dans les céramiques	11
1-4-2-1- L'écaillage	11
1-4-2-2- La délamination	13
1-5 - Conclusion	16
1-6- Références bibliographiques du chapitre 1	17
Chapitre 2 : Calcul des contraintes de contact	
2-1-Introduction	19
2-2-Contact entre deux corps élastiques	20
2-2-1-Contact ponctuel	20
2-2-1-1-Hypothèses	23
2-2-1-2-Solution du problème de contact ponctuel	23
2-2-1-3- Expressions des contraintes de contact	24
2-2-1-4- Calcul des contraintes de contact pour les géométries des deux corps	27
2-2-1-4-1-Détermination des coefficients des contraintes	27
2-2-1-4-Détermination des coefficients de la dimension (a et b)	28
2-2-1-5-Résultats et discussion	29
a)-Contrainte de cisaillement maximal	29
b)-Contrainte de cisaillement octaédrale	29
c)-Contrainte de cisaillement orthogonal	30
2.2.2-Contact linéaire	34
2-3-Conclusion	35
2-4- Application numérique	35
2-5- Références bibliographiques	38
Chapitre 3 : La boruration	
3-1- Introduction	40
3-2- Les moyens pour lutter contre l'usure	40
3-3- Les traitements de surfaces	41
3-3-1- Les dépôts ou les revêtements	42
a)- Les dépôts par vois humide	42
b)- Les dépôts par vois sèche	43
3-3-2- Les traitements par transformation structurale	44
a)- Les traitements mécaniques des surfaces	44

b)- Les traitements thermiques des surfaces	44
3-3-3- Les traitements de diffusion	45
3-4- Le traitements de boruration	47
3-4-1 Introduction	47
3-4-2-Procèdes de boruration	48
3-4-2-1- Boruration en milieux gazeux	48
3-4-2-2- Boruration en milieu liquide	48
a)- Boruration électrochimique dans des sels fondus	49
b)-Boruration thermochimique dans des sels fondus	49
3-4-2-3- Boruration en milieu solide	50
3-4-2-3-1-Techniques des poudres	50
3-4-2-3-2-Techniques des pates	53
3-4-2-3-Autre procèdes de boruration	53
3-4-4-Etude du système binaire Fe-B	54
3-4-5- Les principales caractéristiques des borures de fer	55
3-4-6- Application industrielle de la	55
3-5- Références bibliographiques du chapitre 3	57
Chapitre 4 :Techniques et Procédures expérimentales	
4-1- Introduction	58
4-2-La boruration	58
4-2-1 -Boruration des échantillons	58
4-2-1-1 -Préparation des échantillons avant la boruration	59
4-2-1-2- Traitement de boruration	59
4-2-2-Caractéristiques chimiques et microstructurales des échantillons borurées	61
4-2-2-1-Microscope optique	61
4-2-2-2-Mesure de l'épaisseur des couches borurées	61
4-2-3-Caractérisation mécaniques des échantillons borurées	62
4-2-3-1- Essai de microdureté	62
4-3-Appareillage et procédure expérimentale	62
4-3-1- Appareillage	62
4-3-2- Procédure expérimentale	68
4-4- Références bibliographiques du chapitre 4	69
Chapitre 5 : Résultats et discussions	
5-1- Boruration des échantillons	70
5-2- Microdureté des couches borurées	72
5-3- Essai de fatigue de roulement	73
5-3-1- Discussion des résultats sur la base de l'examen microscopique	74
5-4- Résultats et discussion des tests mécaniques	75
5-5-conclusion	76
5-6- Références bibliographiques du chapitre 5	77
Conclusion générale	78

Liste de figures

<i>figure</i>	<i>Chapitre</i>	<i>Titre de la figure</i>	<i>page</i>
1.1	1	(a) Fissures et piqûres sur un rail de train ; (b) Écaillage sévère sur un palier de butée	6
1.2	1	Tracé de profile d'une piste de contact qui a subit un flux plastique.	7
1.3	1	Formation de fissures en roulement pur et en roulement-glissement	8
1.4	1	Schémas de principe de quelques appareils utilisés aux tests de contact	10
1.5	1	La fatigue par écaillage des billes en céramique fissures (anneau / cône)	11
1.6	1	Papillon et fissure amorcée autour d'une inclusion	12
1.7	1	Schémas illustre le processus de la fatigue de contact de roulement dans les céramiques et les métaux	13
1.8	1	Usure par délamination selon Suh	14
1.9	1	La distribution des contraintes de cisaillement orthogonale et maximale dans le substrat et le revêtement	14
1.10	1	La délamination d'un surface de contact céramique /acier	15
2.1	2	Contact entre deux surfaces courbées ayant différents rayons de courbure	21
2.2	2	Géométrie de contact	22
2.3	2	Schéma représentant les positions des deux corps en contact avant et après l'application de la charge	23
2.4	2	Etat de contrainte issu du contact entre deux corps	30
2.5	2	Variation des contraintes de contact au-dessous de la surface de contact	30
2.6	2	Etat de contrainte pour un élément de volume au-dessous de la surface de contact	31
2.7	2	profondeur Z_0 à la quelle agit la contrainte de cisaillement orthogonale maximale	32
2.8	2	Grandeur de la contrainte de cisaillement orthogonale maximale	32
2.9.a	2	Coefficients utilisée pour le calcul des contraintes de contact	33
2.9.b	2	Coefficients utilisée pour le calcul des contraintes de contact	34
2.10	2	Cas de contact linéaire entre un cylindre et un plan semi-infini	35
2.11	2	Schéma reposit le contact bille sur un acier boruré	36
3.1	3	Principaux traitements de durcissement de surface.	41
3.2	3	Principaux revêtements et dépôts par voie humide.	43
3.3	3	Principaux revêtements et dépôts par voie sèche	43
3.4	3	Principaux procédés de traitements mécaniques et thermique des surfaces.	45

3.5	3	Quelques procédés de traitements thermochimiques des surfaces.	47
3.6	3	Diagramme d'équilibre du système binaire Fe-B	54
4.1	4	La forme et les dimensions de l'échantillon.	58
4.2	4	Disposition des échantillons dans le ciment à l'intérieur du creuset avant introduction dans le four	60
4.3	4	Photo d'échantillon (acier doux) après la boruration.	61
4.4	4	Mesure de l'épaisseur des couches borurées.	62
4.5	4	La géométrie du disque moteur en acier CD42.	64
4.6	4	Photos du disque moteur utilisé dans le test de contact	64
4.7	4	Le système de charge du tribomètre.	66
4.8	4	Schéma représentative du banc d'essai.	67
4.9	4	Photos de l'appareil utilisé dans le test de contact bille/plan.	68
5.1	5	Couches des borurées formées sur l'acier boruré à 900 °C pendant 4heures.	71
5.2	5	Spectres de diffraction des rayons X de l'acier doux borurée	72
5.3	5	Modèle standard pour la fatigue de la surface.	75
5.4	5	Surface de roulement avant le test (Agrandissement 10X).	75
5.5	5	Écaillage sur la piste de roulement produite sur la surface de l'acier borurée soumis a une charge de 100 N, (G: 10X).	76
5.6	5	Endommagement de la surface CrC-NiCr cermet par le phénomène d'écaillage.	76
5.7	5	piste de roulement produit sur la surface de l'acier boruré soumis à une charge de 120 N, (G : 10X).	77
5.8	5	endommagement de la surface CrC-NiCr cermet par le phénomène de la délamination.	78
5.9	5	Les courbes S-N pour l'acier boruré et non boruré sous contact roulant.	79

Liste des tableaux

<i>tableau</i>	<i>chapitre</i>	<i>Titre de tableau</i>	<i>page</i>
2.1	2	Paramètre définissant le contact linéaire	34
2.2	2	les valeurs de semi-mineur axes de l'ellipse de contact (b).	37
2.3	2	les valeurs de la profondeur Z_0 et la contrainte de cisaillement orthogonal ζ_0 .	37
3.1	3	Quelques exemples d'utilisation industrielle des pièces borurées.	56
5.2	5	Représente les valeurs des microduretés obtenues dans les différentes zones de l'acier après boruration.	73

Notations symboliques

Symbole	Désignation
A	Paramètre dépend de la géométrie de deux corps en contact.
B	Paramètre dépend de la géométrie de deux corps en contact.
B / A	Rapport géométrique.
C_{σ}	Coefficient de contrainte de contact maximale.
C_{τ}	Coefficient de contrainte de cisaillement maximale.
C_g	Coefficient de contrainte de cisaillement octaédrale maximale.
C_{Z_s}	Coefficient de profondeur contrainte de cisaillement maximale.
C_b	Coefficient de la dimension de la surface de contact.
$E_{1,2}$	Module d'élasticité de traction ou de compression pour les deux corps.
N	Nombre de cycles.
$W_{1,2}$	Déplacement dû à la compression dans les deux corps en contact.
a	Axe semi-majeur de l'ellipse du contact.
b	Axe semi-mineur de l'ellipse du contact.
K	Le rapport entre l'axe semi-mineur et l'axe semi-majeur de l'ellipse du contact. ($k = b/a = \cos(\theta)$)
Z_s	La profondeur à laquelle se produit la contrainte de cisaillement maximale.
Z_o	La profondeur au –dessous de la surface de contact à laquelle se produit la contrainte orthogonale maximale.
Δ	paramètre prend en compte les constantes élastiques de deux corps en contact.
Φ	paramètre défini comme étant $\Phi = k z / b$.
σ	Contrainte de compression ou de traction.
τ	Contrainte de cisaillement.
σ_{xx}	Contrainte principale suivant l'axe des x
σ_{yy}	Contrainte principale suivant l'axe des y
τ_{max}	Contrainte de cisaillement maximale.
τ_{oct}	Contrainte de cisaillement octaédrale.
τ_o	Contrainte de cisaillement orthogonale.
$\nu_{1,2}$	Coefficients de poisson pour les deux corps en contact.
L	La durée de vie = nombre de cycles (N).

Introduction Générale

Les concepteurs des structures métalliques et des systèmes mécaniques sont confrontés en permanence avec les problèmes de fatigue. Des sollicitations cycliques peuvent parfois être catastrophiques, même si elles respectent largement les niveaux d'un dimensionnement statique.

La fatigue peut se produire de multiples façons (l'écaillage, la délamination et l'usure de contact de roulement,...). Les seules sollicitations mécaniques externes appliquées à la structure engendrent de la fatigue mécanique. Les efforts cycliques appliqués à haute température causent un endommagement de type fatigue fluage. Les petits mouvements relatifs, les vibrations ou bien les battements de deux solides donnent lieu à du fretting fatigue. Les sollicitations répétées dues au contact de roulement entre deux pièces mécaniques engendrent la fatigue de contact de roulement (Rolling Contact Fatigue (RCF)) à laquelle nous allons nous intéresser.

Les avaries qui apparaissent par RCF se caractérisent, à la surface des pièces roulantes, par des fissures, des piqûres et des écaillages.

Les deux axes de lutte contre la fatigue de roulement sont d'une part la limitation des sollicitations dues au contact, et d'autre part l'augmentation des capacités du matériau.

L'augmentation de la capacité du matériau passe par l'augmentation de la micro-limite d'élasticité, mais aussi par l'amélioration des propriétés des surfaces et par la réduction des sollicitations subies grâce à la présence de contraintes résiduelles de traitement thermique ou thermochimique.

En plus du choix du matériau et de son élaboration qui sont des axes importants pour la lutte contre la fatigue de roulement, les traitements de surfaces jouent un rôle essentiel

dans l'amélioration de la tenue en service des pièces mécaniques. Ils contribuent également à l'économie de l'énergie et de la matière, puisqu'ils permettent de concevoir des pièces plus légères et plus résistantes à des phénomènes tels que la corrosion, l'usure, la fatigue,...

Dans notre travail, nous essayons d'étudier l'un des axes de la lutte contre la fatigue des surfaces en céramiques à travers la réalisation de couches céramiques sur un acier ordinaire (borures de fer) et l'étude de la résistance de la surface modifiée à l'usure dans des conditions de fatigue de contact de roulement.

Le présent travail est une contribution aux travaux de recherche liés à la caractérisation des couches borurées réalisées sur les aciers déjà entamés par plusieurs chercheurs au laboratoire de recherche de Génie des Procédés.

Dans ce projet, nous allons réaliser des couches de borures de fer sur la surface d'un acier au carbone par un traitement de boruration dans un ciment solide par la technique des poudres. Les couches de borures de fer obtenues en surface seront soumises à la caractérisation chimique (analyse des phases formées par diffraction des Rayons X), métallurgique (Microscopie Optique) avant d'être testées à l'usure dans les conditions de sollicitations en contact roulant.

Dans cette optique il est nécessaire de préciser les mécanismes de fatigue, et cela en descendant jusqu'à l'échelle microscopique car c'est à ce niveau que peuvent s'expliquer certains mécanismes fondamentaux de durcissement.

Pour compléter notre étude, nous allons présenter une première partie bibliographique où dans la littérature les céramiques sont exposées à trois modes d'endommagements qui sont : l'écaillage, la délamination et l'usure de contact de roulement. Ces modes d'endommagement peuvent conduire à la rupture finale des systèmes. Notre objectif dans cette partie, est de donner un aperçu global sur les modes de rupture les plus rencontrés dans le contact roulant et d'essayer de comprendre d'une manière générale l'importance des céramiques et leurs mécanismes d'endommagement en fatigue de roulement. La première partie est constituée de trois chapitres distincts :

- ❖ Un premier chapitre réservé à l'étude bibliographique sur les travaux réalisés dans la littérature sur la fatigue des matériaux, en particulier, la fatigue en contact de roulement.

- ❖ Un deuxième chapitre où nous allons aborder les problèmes de contact entre deux corps solides élastiques ayant des surfaces courbées mises en contact sous l'effet des charges externes. Et Vu que les modes de défaillance dépendent beaucoup du contact, nous allons essayer de présenter les calculs des contraintes d'une façon détaillée.
- ❖ Un deuxième chapitre où on va exposer les solutions utilisées pour limiter les dégâts qui peuvent être causés par la fatigue de contact de roulement. Dans cette partie, en plus d'une présentation sommaire des traitements de surface utilisés comme solutions dans ce mode de fatigue, nous allons présenter le traitement de boruration, qui est proposé comme solution dans ce travail de recherche, avec un peu de détail.

La première partie bibliographique sera suivie d'un quatrième chapitre, où on va présenter toutes les techniques et les procédures expérimentales qui ont été réalisées durant la réalisation de ce travail. Cette partie comprend les conditions de réalisation des traitements de surface de boruration, la caractérisation chimique et microstructurale des couches de borures réalisées, les conditions opératoires des essais d'usure en contact roulant (charge appliquée, vitesse de rotation,...),...

Le cinquième chapitre va englober la présentation et la discussion des résultats obtenus. On commence tout d'abord par l'identification des couches de borures obtenues sur l'acier traité, estimation de la profondeur de la couche obtenue, détermination de la dureté de la couche réalisée,...

Ensuite, nous allons présenter les résultats obtenus lors des essais d'usure en contact roulant et nous allons les discuter en fonction des conditions des essais d'usure et sur la base des travaux de recherche effectués par d'autres chercheurs (selon la littérature).

Enfin, une conclusion générale est consacrée aux des résultats et aux interprétations avancés dans ce travail.

Chapitre I :
Aperçu général sur la
fatigue des matériaux

1 – 1 – Introduction

Dans la conception mécanique des structures métalliques et des systèmes mécaniques on est toujours confrontés aux problèmes de fatigue où les structures et les systèmes peuvent être endommagés même sous l'application de charges loin inférieures à la limite d'élasticité !

Donc, des sollicitations cycliques mécaniques ou thermiques peuvent parfois être catastrophiques, même si elles respectent largement les niveaux d'un dimensionnement statique.

La fatigue peut se produire de multiples façons. Les seules sollicitations mécaniques externes appliquées à la structure engendrent de la fatigue mécanique :

- ❖ Les efforts cycliques appliqués à haute température causent un endommagement de type **fatigue-fluage**.
- ❖ Les petits mouvements relatifs, les vibrations ou bien les battements de deux solides donnent lieu à du **fretting-fatigue**.
- ❖ Les sollicitations répétées dues au contact de roulement entre deux pièces mécaniques engendrent la fatigue de contact de roulement (Rolling Contact Fatigue (RCF)) à laquelle nous allons nous intéresser.

Les avaries qui apparaissent par RCF se caractérisent, à la surface des pièces roulantes, par des fissures, des piqûres et des écaillages. Cette fatigue est une cause importante de défaillance des systèmes, surtout quand les fissures se propagent en profondeur et conduisent à la rupture des pièces.

Les deux axes de lutte contre la fatigue de roulement sont d'une part la limitation des sollicitations dues au contact, et d'autre part l'augmentation des capacités du matériau. Les facteurs permettant de limiter les sollicitations dues au contact sont la pression d'Hertz et la micro-géométrie des surfaces.

L'augmentation de la capacité du matériau passe par l'augmentation de la micro-limite d'élasticité, mais aussi par l'amélioration des propriétés des surfaces et par la réduction des sollicitations subies grâce à la présence de contraintes résiduelles de traitement thermique ou thermo-chimique.

Le choix du matériau et de son élaboration sont donc des axes importants de la lutte contre la fatigue de roulement.

Selon la littérature, les céramiques sont exposées à trois modes d'endommagements qui sont :

- ❖ L'écaillage,
- ❖ La délamination
- ❖ Et l'usure de contact de roulement.

Ces trois modes d'endommagement suscités peuvent conduire à la rupture finale des systèmes.

Dans ce chapitre, nous allons donner un aperçu global sur les modes de rupture les plus rencontrés dans le contact roulant et nous allons essayer de comprendre d'une manière générale l'importance de présence des céramiques en surface et leurs mécanismes d'endommagement en fatigue de roulement.

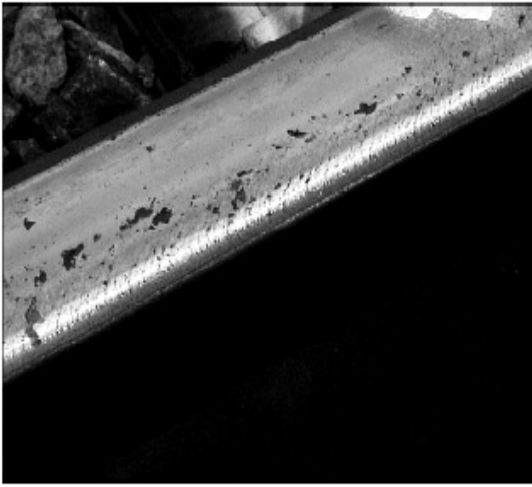
1 – 2 – Les modes de rupture sous contact roulant

1 – 2 – 1 – Rupture par piquûres

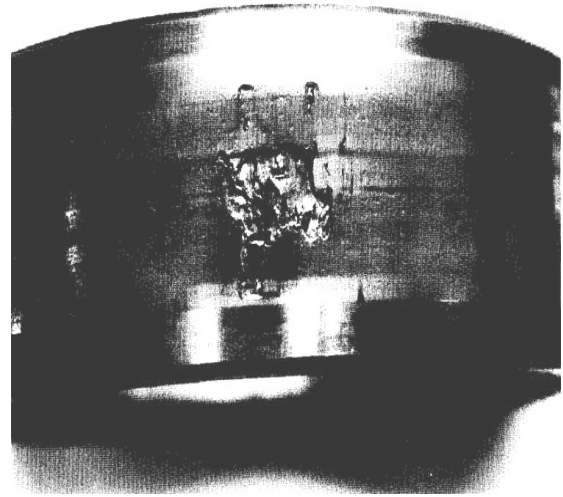
Au début de ce siècle, Stribeck [1] a constaté dans ses expériences une rupture qui se produit par piquûre. Ce même mode de rupture a été remarqué plutôt par Crandell et Marston [2] dans leurs tests sur l'endurance des rouleaux soumis à un roulement répété.

Selon ces auteurs, à la fin de leur durée de vie, les surfaces de contact des éléments roulant éprouvent une rupture qui est caractérisée par un écaillage des fragments du matériau de la surface causant ainsi des trous et des cavités qui affectent fortement le fonctionnement normal des assemblages (figure I.1).

Ce mode représente la fin d'utilisation de tous les roulements à billes et à rouleaux qui fonctionnent dans une gamme normale de charge et de température. Pour cela, ce mode a été pris comme base de calcul de la durée de vie et de l'estimation de la capacité de chargement des éléments roulants [3].



(a)



(b)

Figure 1.1 : Endommagement de surface par contact roulant

a)- Fissures et piqures sur un rail de train [4]

b)- Ecaillage sur un palier de butée [5].

1 – 2 – 2 – Rupture par déformation cumulative

A partir de leurs tests sur des rouleaux Crandall, Marston et al (1890) [2] ont constaté un flux de métal aux extrémités des rouleaux. Glaeser et al. [6] ont examiné les modes de rupture de plusieurs roulements à rouleaux testés dans une gamme de température de comprises entre 149 et 316 °C et ils ont conclu que le mode de rupture prédominant est celui de la déformation plastique.

Le terme « déformation cumulative » est utilisé pour désigner la rupture provoquée par le changement dimensionnel des éléments roulants. Cette déformation s'accumule avec le nombre de cycles et donne lieu à un jeu excessif ou à une vibration inacceptable ce qui conduit à la destruction des éléments roulants.

Le flux plastique à petite échelle peut se produire sous une charge normale et à une température opérationnelle données. L'absence de flux plastique n'est pas nécessaire pour éviter l'endommagement du matériau, mais ce dernier doit être limité à une échelle tolérable. Le flux plastique est évalué par la mesure géométrique (à travers un tracé de profile, Figure 1.2) de la surface du contact déformée. Au début, le tracé est une ligne

droite, au cours du temps, la surface de contact forme une dépression centre et le matériau est poussé au dessus de la surface initiale au voisinage des bords de la piste de contact, ce qui représente une caractéristique de flux plastique [3].

Le premier effet du flux plastique est la destruction de la géométrie des éléments roulants, soit par formation d'indentation, si l'élément roulant est stationnaire, soit par changement de géométrie de la piste de contact si l'élément est en roulement.

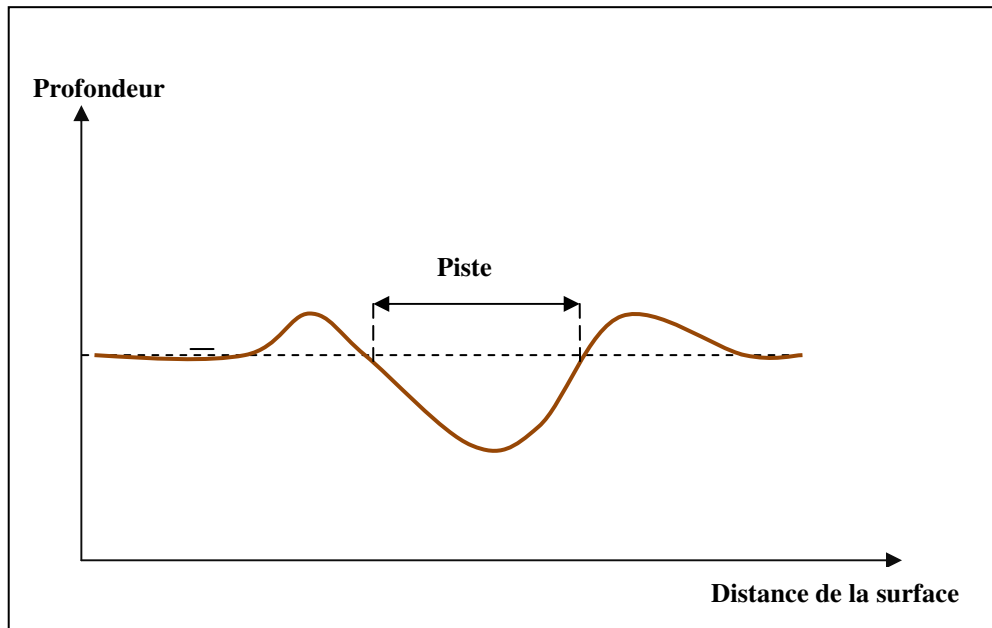


Figure 1.2 : Tracé de profil d'une piste de contact qui a subi un flux plastique [7]

Bien qu'il ne soit pas bien connu, la déformation cumulative représente le mode de rupture prédominant dans le cas d'instabilité thermique.

1 – 2 – 3 – Rupture par résistance excessive au roulement

La résistance au roulement est un problème majeur dans les éléments roulants et sa minimisation est importante pour la plupart des conceptions. Il est considéré comme un phénomène provoqué par le roulement et non pas comme une manifestation due à des causes externes.

L'étude du phénomène de la résistance au roulement a commencé avec les travaux de Coulomb vers 1785. Depuis ce temps plusieurs travaux de recherche sur la nature de ce phénomène ont été réalisés. Tabor [8] dans son travail a résumé les expériences et

l'intéressante controverse entre les travaux de Morin et Dupuit (1840) qui faisaient évoquer la dépendance de frottement de roulement du rayon de la roue.

La résistance minimale de roulement est généralement une caractéristique désirable dans la totalité des éléments roulants dans le cas des roulements à billes comme ceux utilisés dans les systèmes de gyro-guidance, où la résistance aux roulements a une importance considérable.

Il a été constaté que la rupture se produit lorsque la grandeur ou la variation de la résistance au roulement produit un moment de frottement qui entrave le bon fonctionnement de ces instruments.

1 – 3 – La fatigue de contact de roulement RCF

La fatigue superficielle est une détérioration des surfaces subissant un mouvement cyclique de roulement pur ou de roulement-glissement et qui survient au bout d'un temps de fonctionnement plus ou moins important.

Cette détérioration se manifeste par l'apparition de fissures et/ou d'écailles et de piqûres. Quelle qu'en soit la nature de cette détérioration, elle résulte directement des contraintes de cisaillement induites par la géométrie du contact, et qui n'est rien d'autre que l'effet de la pression d'Hertz.

Sous l'effet d'un roulement pur, et en raison de la localisation du point d'Hertz, on observe des fissures parallèles à la surface (contraintes de cisaillement maximales). En présence d'un glissement, on observe des fissures superficielles perpendiculaires à la surface (contraintes de traction maximales) [9].

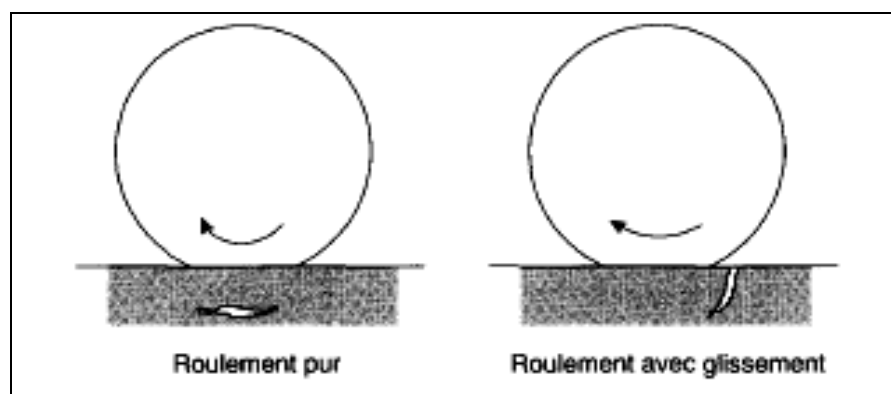


Figure 1.3 : Formation de fissures en roulement pur et en roulement-glissement [9].

Dans le cas d'une combinaison roulement-glissement on observe une combinaison des deux types de fissures. Lorsque l'amorçage est profond on observe un écaillage de la surface alors que dans le cas d'un amorçage superficiel on observe une piqûration [9].

Pour éviter la fatigue superficielle, il faut durcir les surfaces des matériaux par un moyen qui permet d'introduire des contraintes internes de compression dans la région qui va subir la fatigue de contact de roulement.

La trempe superficielle, la cémentation, la nitruration, la carbonituration, et la boruration,... sont des traitements de surface qui permettent d'améliorer les propriétés de surface.

En favorisant la formation de céramiques (carbures, nitrures, borures,...) en surface et en introduisant en même temps des contraintes superficielles de compression, la profondeur traitée doit être supérieure à la profondeur d'Hertz pour que la résistance à la fatigue par contact de roulement.

En plus de la qualité du métal qui doit être prépondérante (absence d'inclusions, de criques,...), d'autres paramètres tels que la rugosité, la géométrie du contact et la lubrification sont des paramètres qu'il faut prendre en considération.

1 – 4 – Les céramiques sous contraintes de contact de roulement

1 – 4 – 1 – Tests RCF sur les céramiques

La dureté élevée, le faible coefficient de dilatation thermique et la capacité à haute température sont également des propriétés privilégiées dans les éléments de contact roulant. Les céramiques ont été trouvées pour avoir une bonne combinaison de propriétés adaptées à ces applications telles que la turbine à gaz et les machines-outils. Cependant, le comportement à la fatigue de contact de roulement (RCF) des céramiques ne sont toujours pas assez bien connus.

Il existe plusieurs techniques de test qui sont employées au niveau international pour étudier les performances des céramiques en contact roulant.

La figure 1.4 présente les principaux schémas et quelques appareils utilisés dans les tests de contact roulant pour les céramiques.

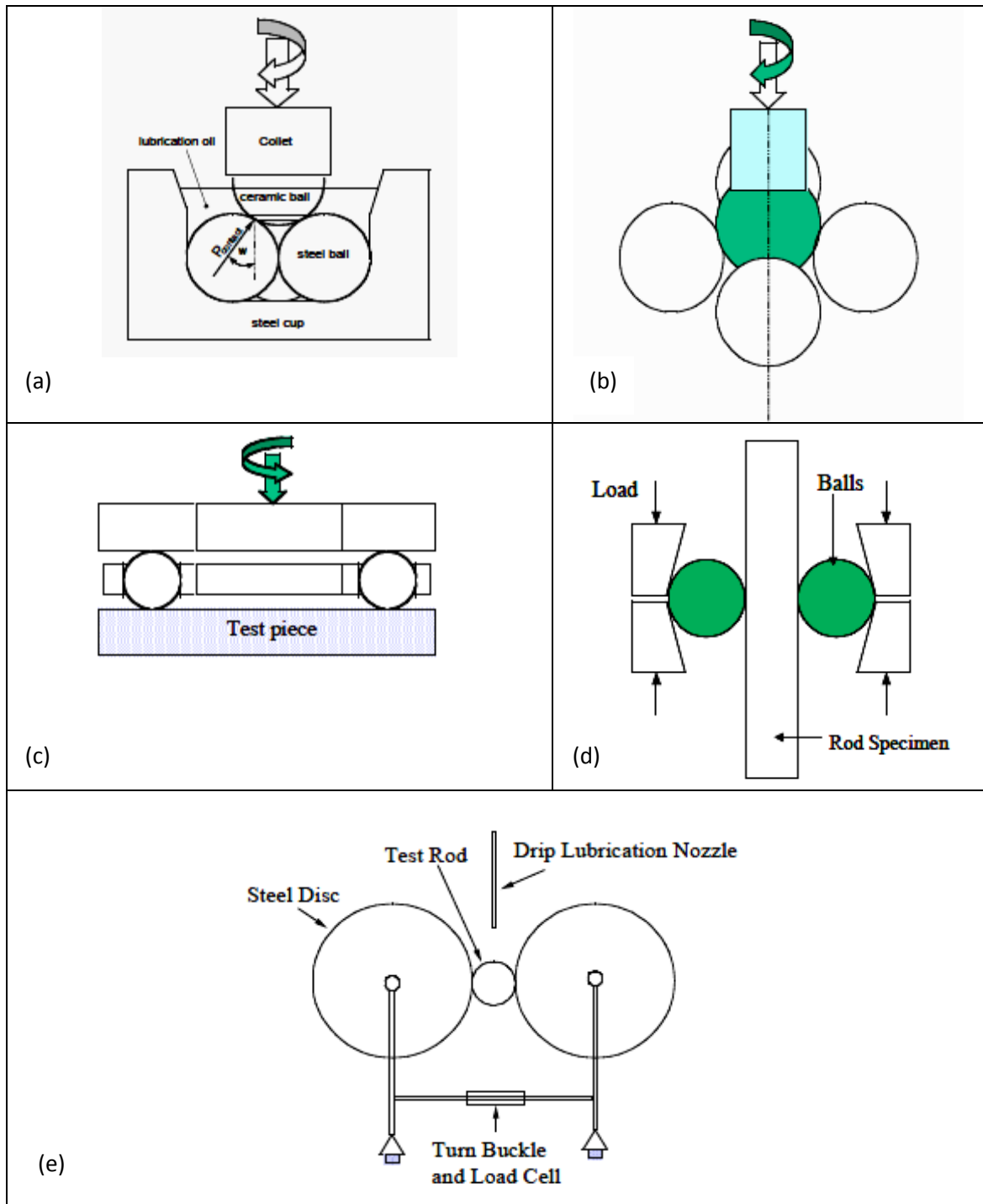


Figure 1.4 : Schémas de principe de quelques appareils utilisés aux tests de contact roulant
a)- Machine a quatre billes ; **b)**- Machine de cinq billes ;
c)- Machine bille sur plan ; **d)**- Machine bille sur barre ;
e)- Machine disque sur barre [10].

1 – 4 – 2 – Les modes de la fatigue de contact de roulement dans les céramiques

Vu que l'objectif de notre travail est d'étudier le comportement des couches de borures réalisées sur un acier au carbone en fatigue de contact roulant, nous allons exposer les processus de la fatigue de contact roulant dans ces matériaux.

Les modes de la fatigue de contact de roulement dans les céramiques se produisent par l'initiation de fissures de fatigue et la propagation de ces fissures. En générale pour les céramiques les modes les plus rencontrés sont :

1. L'écaillage qui est le résultat de l'endommagement par piqures.
2. La délamination.

Ces deux modes sont liés aux caractéristiques de la qualité de surface, la répartition des contraintes et à l'état de lubrification. Les fissures en surface sont considérées comme un facteur principal qui entraîne la fatigue de contact de roulement. Donc, il est très important de comprendre le mécanisme fondamental de fatigue qu'ils causent et leur influence sur l'endommagement.

1 – 4 – 2 – 1 – L'écaillage

Le terme écaillage décrit une forme spécifique de dommages à la surface et il est le mode le plus commun de défaillance dans les tests de fatigue de contact roulant. La figure 1.5 représente un écaillage typique sur une bille en céramique.

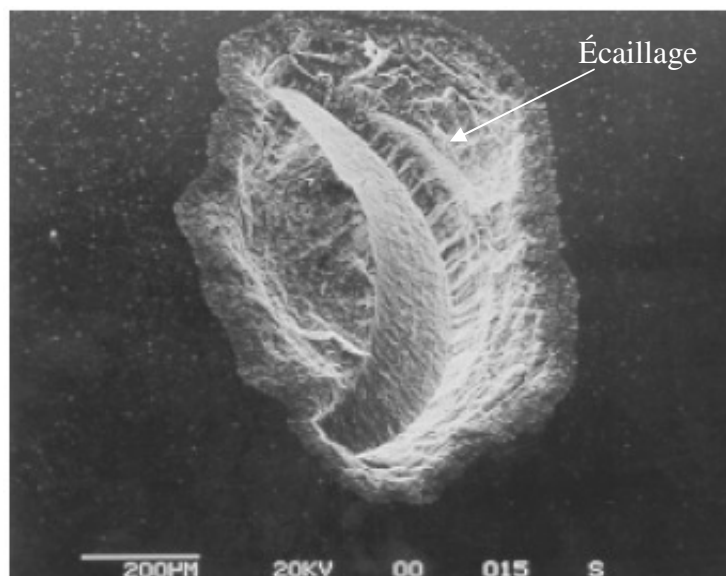


Figure 1.5 : Fatigue par écaillage de billes en céramique [10].

L'écaillage dû à la propagation de fissures initiées autour d'inclusions est la principale cause d'avaries initiées en sous-couche.

Les transformations microstructurales visibles dans la zone d'Hertz, où la contrainte de cisaillement est maximale, sont les premiers symptômes de l'endommagement en fatigue de roulement initié en sous-couche. Elles se produisent en premier lieu au voisinage d'inclusions qui jouent le rôle d'amplificateurs de contraintes. Les papillons de phase blanche (Figure 1.6), orientés à 45° par rapport au roulement, qui se forment dans les aciers martensitiques autour de ces inclusions sont dus au mouvement des dislocations générées par le dépassement local de la micro-limite d'élasticité. La multiplication de ces dislocations au cours des cycles successifs de chargement entraîne la formation de fissures dans les zones transformées lorsque la densité de dislocations atteint une valeur critique [11].

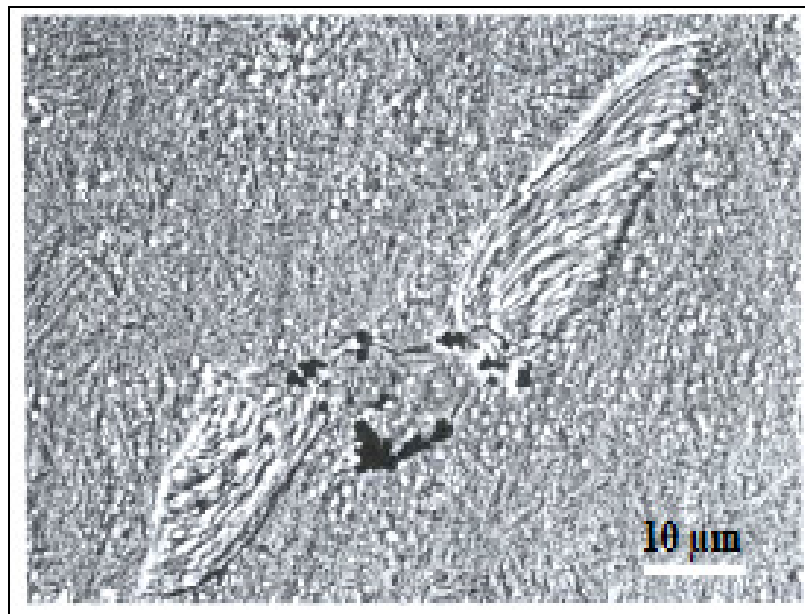


Figure 1.6 : Papillon et fissure amorcée autour d'une inclusion [11].

Si les contraintes de cisaillement sont suffisamment élevées, ces micro-fissures peuvent se propager jusqu'à la surface, et provoquer ainsi un écaillage (comme la montre la figure 1.7). Les fissures de cisaillement dans la céramique sont formées sous la surface et se propagent par la formation de fissures latérales qui se propagent transversalement aux plans des fissures de cisaillement. Cette propagation de la fissure conduit finalement à la fatigue par écaillage.

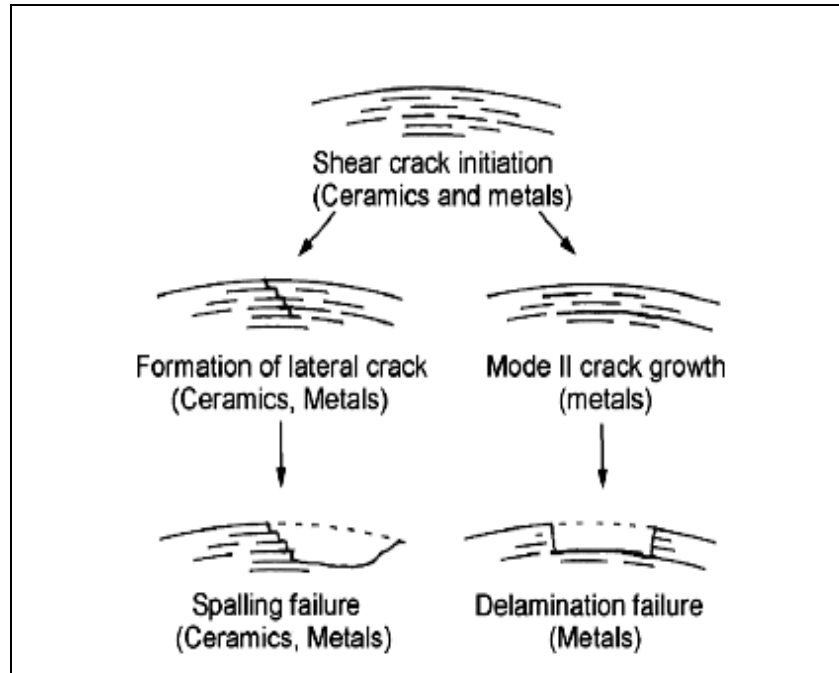


Figure 1.7 : Illustration du processus de la fatigue de contact de roulement dans les céramiques et les métaux [10].

1 – 4 – 2 – 2 – La délamination

Dans les années 70, la théorie de délamination a été initialement proposée par Suh [12]. Par la suite, Suh et al. ont présenté une démarche en mécanique de la rupture pour soutenir la théorie délamination [13 et 14]. Le mécanisme de délamination proposé inclut le processus de sub-surface et la formation de fissures, ainsi que la propagation de fissures proches de la surface de contact.

Dans sa proposition, Suh considère que l'usure n'est pas la conséquence d'un processus adhésion-arrachement. Mais elle correspond à un phénomène de fatigue superficielle. Sous l'effet du labourage par les aspérités de la surface antagoniste, les contraintes induites en sous-couche génèrent des fissures de fatigue après de multiples passages. Les inclusions présentes dans le matériau facilitent le départ de particules.

Les emplacements des fissures sous la surface parallèle à la surface sont contrôlés par les propriétés des matériaux, du coefficient de frottement et de la contrainte de cisaillement.

La figure 1.8 illustre un phénomène d'usure par délamination selon Suh [12].

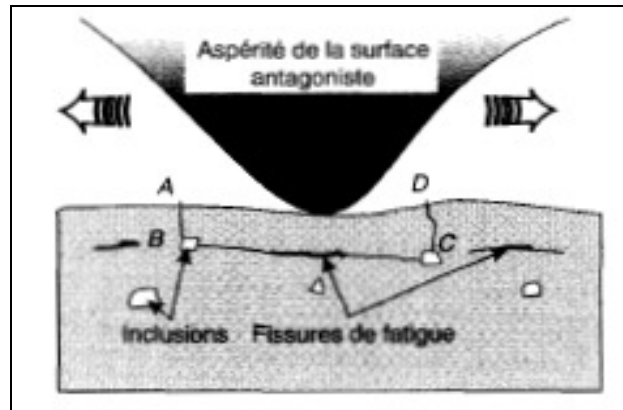


Figure 1.8 : Usure par délamination selon Suh [12].

Pour les revêtements, les microstructures sont caractérisées par l'existence de microfissures, de pores et de particules secondaires, qui agissent comme des concentrations de contraintes des points pendant le chargement de cycle.

En outre, les théories d'endommagement des matériaux sont proposées sur la base d'une hypothèse qui suppose que les matériaux contiennent toujours une multitude de défauts sous la forme de micro-vides.

Le délaminage est donc, le principal mode de défaillance des revêtements, même si les contrainte τ_{xy} et τ_{max} peuvent se situer à l'intérieur du substrat.

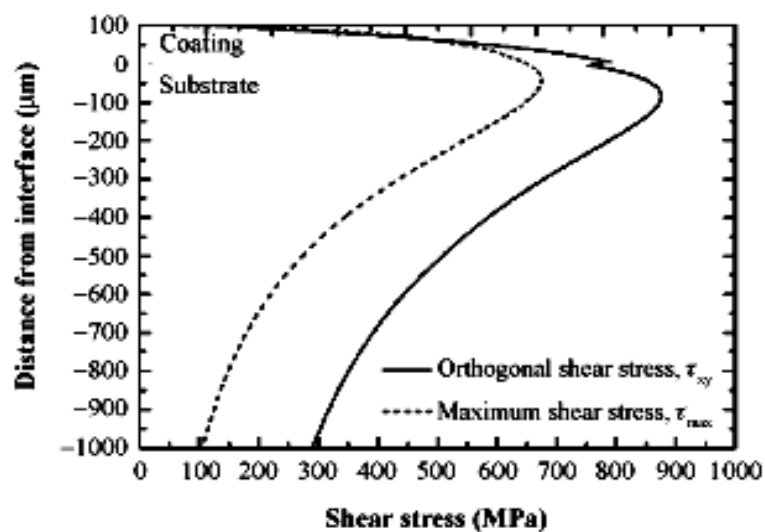


Figure 1.9 : Distribution des contraintes de cisaillement orthogonale et maximale dans le substrat et le revêtement [15].

Les amplitudes des τ_{xy} et τ_{max} à l'interface (Figure 1.9) sont suffisamment élevées pour pouvoir agir en tant que force provenant de la propagation des fissures. Ainsi, pour le délaminage, l'initiation et la propagation des fissures à l'interface peuvent être attribuées à des micro-défauts à l'interface. Les concentrations de contraintes sont provoquées par l'inadéquation entre le revêtement et le substrat à l'interface avec les autres effets de la cisaille. Par conséquent, la mauvaise adhérence entre le revêtement et le substrat est toujours considérée comme un facteur essentiel conduisant à la formation de délaminage.

Le mécanisme de délaminage du revêtement est comparable à celui de l'écaillage où la contrainte de cisaillement joue un rôle important. Selon certains auteurs [15], dans les échantillons de revêtement, la profondeur de délamination est généralement plus grande que celle de l'écaillage.

La contrainte de cisaillement maximale peut ne pas être située à l'interface revêtement / substrat, mais elle se trouve à l'intérieur du revêtement.

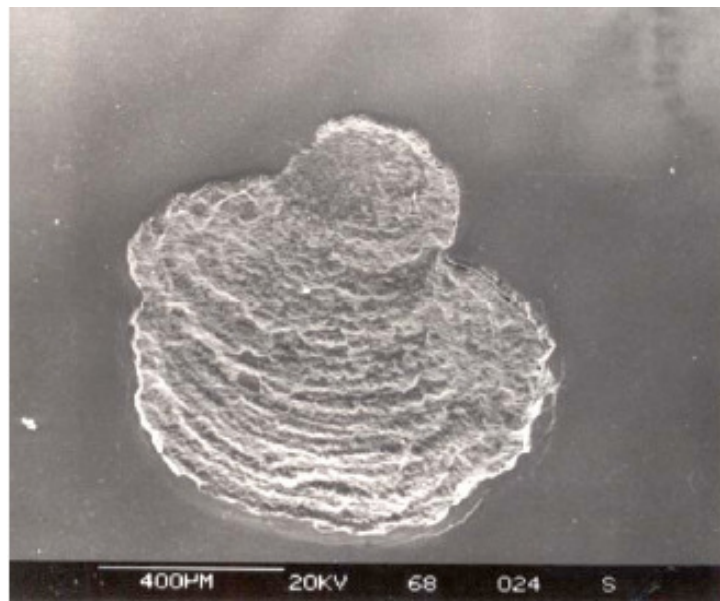


Figure 1.10 : Délamination d'une surface de contact céramique/acier [10].

Bien que la contrainte de cisaillement orthogonale ou la contrainte maximale de cisaillement soient responsables de l'initiation de la fissure et de sa propagation, il n'est pas encore clair comment la propagation des fissures se fasse. Grâce à l'alternance des contraintes, les micro-défauts peuvent être agrandies et des fissures peuvent ainsi se

former et se propager, car la force de liaison et la résistance au cisaillement entre les lamelles adjacentes est relativement faible pour les revêtements. La trace de la propagation de la fissure peut être traduite par la rupture des flocs à la surface inférieure de la zone de décollement.

La propagation de la fissure peut être dans le modèle de cisaillement (modèle II), le modèle de pelage (Modèle I) ou une combinaison des deux modèles I et II. Avec l'augmentation de durée du test, les petites fissures à la même profondeur peut être combinées. Lorsque les fissures combinées atteignent une certaine longueur, les fissures peuvent atteindre la surface.

Finalement, la grande ampleur de l'effort radial sur le bord de la piste d'usure peut conduire au délaminage final au niveau de la microstructure de revêtement.

1 – 5 – Conclusion

Les modes de rupture issus du contact roulant se résument donc en trois formes de ruptures qui sont :

1. La rupture par piqûres,
2. La rupture par accumulation des déformations,
3. Et la rupture par résistance excessive au roulement.

Dans le premier mode, les résultats et les efforts de recherche ont permis d'accumuler une importante quantité d'informations et de données qui permettent une sélection relative des matériaux et des lubrifiants à l'égard de ce mode de rupture.

Dans le cas du mode de rupture par déformation cumulative, les résultats des recherches se sont limités au contact roulant sur quelques matériaux utilisés dans la conception des éléments roulants et seulement quelques indications sur les mécanismes et les modes d'endommagement ont été avancées.

Enfin, pour la rupture par résistance au roulement, qui représente une importance considérable, il a été constaté que la rupture se produit lorsque la grandeur ou la variation de la résistance au roulement produit un moment de frottement qui entrave le bon fonctionnement de ces instruments.

Dans le cas des céramiques, les modes de défaillance et d'endommagement les plus rencontrés sont :

1. L'écaillage qui peut être considéré comme le résultat de l'endommagement par piqûration. L'écaillage dans les céramiques est une forme spécifique de dommages à la surface et il est le mode le plus commun de défaillance dans les tests de fatigue de contact roulant.
2. Et la délamination qui est le mode de défaillance le plus rencontré dans les revêtements céramiques. Il faut signaler que la profondeur de la délamination est souvent plus grande que celle de l'écaillage.

Références bibliographiques du chapitre 1

- [1] I.R. Stribeck, "*ball bearing for various loads*", transaction ,American society of mechanical engineer, vol.29,p.420,(1907).
- [2] C.L. Crandall and A. Marston, "*friction rollers*", transaction, American society of civil engineers ,vol.32,p.99,(1894).
- [3] M.Gueribiz. Djelloul, *Etude de l'endommagement des surfaces des polymères sous contraintes de contact roulant*, 2000.
- [4] P. J. L. Fernandes. Contact Fatigue in Rolling-Element Bearing.Engineering failure Analysis, 4-2, 1997, pages 155 – 160
- [5] P. J. L. Fernandes. *Contact Fatigue in Rolling-Element Bearing*.Engineering failure Analysis, 4-2, 1997, pages 155 – 160
- [5] S. Grassie, P. Nilson, K. Bjurstrom, A. Frick, L ; G. Hansson.*Alleviation of rolling Contact Fatigue on Sweden's Heavy HaulRailway*. Wear, 253, 2002,pages 42 – 53.
- [6] W. A. Glaeser et Al ,"*The development of oscillatory rolling contact bearing for airframe application in the temperature rang 300°F to 600°F* ," Wright air devlopent centre ,"WADCTR 59-145, (1959).
- [7] E. Buckingham ,"*surface fatigue of plastic materials*, transaction, American society of Mechanical engineers, vol.66,p.297,(1944).
- [8] D.Tabor, "Introductory Remarks," *Rolling contact phenomena*, Amesterdam : Elsevier pub. Co, P.I,(1962).

- [9] A. Cornet J.-P. Deville, *Physique et Ingénierie des Surfaces*, 1998
- [10] Andrew A. Wereszczak, W. Wang, Y. Wang, M. Hadfield, W. Kanematsu, T. P. Kirkland, and O. M. Jadaan, *Rolling Contact Fatigue of Ceramics*, 25 August 2006.
- [11] M. Christophe JACQ, *Limite d'endurance et durée de vie en fatigue de roulement du 32CrMoV13 nitruré en présence d'indentations*, 19 décembre 2001.
- [12] Suh NP. *Overview of the délamination théorie of wear*. *Wear* 1977; 44: 1-16.
- [13] Flemming J.W, Suh NP. *Mechanics of crack propagation in delamination wear*. *Wear* 1977; 44: 39-56.
- [14] Suh NP, Saka N. *Fundamentals of tribology*. The MIT press, London, 1980, p. 493-518.
- [15] Xiancheng Zhang, Binshi Xu, Fu-Zhen Xuan, *Fatigue failure mechanisms of plasma-sprayed CrC-NiCr cermet*, 2008

Chapitre II :
Calcul des contraintes de
contact

2 – 1 – Introduction

Les contraintes de contact sont causées par la pression d'un solide sur un autre solide à des superficies limitées appelées surfaces de contact. La plupart des défaillances des pièces (déformation élastique ou plastique excessive, rupture par fatigue) sont souvent associées aux contraintes et aux déformations au sein de la surface de contact. Généralement la conception des pièces qui fonctionnent sous contraintes de contact est faite d'une manière qui prend en considérations l'effet de ces contraintes. Ce type de contraintes de contact est rencontré dans plusieurs systèmes mécaniques. Parmi ces systèmes, nous pouvons citer quelques cas où des contraintes peuvent se développer à la surfaces de contact entre :

1. Les roues de la locomotive et les rails du chemin de fer.
2. Les rouleaux ou les billes et les bagues dans les roulements.
3. Les dents des engrenages.
4. La came et le poussoir dans les moteurs,....

Dans tous les exemples suscités, les corps en contact ne sont pas forcément en contact fixe. En effet, les contraintes de contact sont cycliques et provoquent souvent aux pièces la rupture par fatigue. Dans le cas du rail du chemin de fer par exemple, la rupture commence par une fissure minuscule transversale au-dessous de la surface de contact, et sous l'influence des charges cycliques de la roue, elle progresse vers l'extérieure jusqu'à la rupture entière du rail. Cette rupture est appelée rupture transversale.

La rupture par fatigue dans les roulements et les dents d'engrenages se manifeste par la formation de trous à la surface de contact (piqûres). Ce fait explique amplement pourquoi ces contraintes peuvent limiter la capacité de chargement des éléments roulants [3].

Dans ce chapitre, nous allons aborder le problème de contact entre deux corps solides élastiques ayant des surfaces courbées mises en contact par des charges externes. Vu que les modes de défaillance dépendent beaucoup du contact, nous allons essayer de présenter les résultats obtenus d'une façon détaillée.

2 – 2 – Contact entre deux corps élastiques

Parmi les problèmes d'élasticité, le contact sec entre deux solides élastiques est considéré comme un problème très important, à cause de la formulation mathématique particulière, et à cause de l'intérêt scientifique que présente sa solution.

Plusieurs auteurs ont apporté leur contribution à la formulation du problème de contact sec entre deux solides élastiques (simplement désigné par problème de contact normal). Pour des solides avec des surfaces parfaitement lisse, Hertz [16] a été le premier à formuler et à proposer une solution à ce problème.

Dans ce chapitre, nous essayons de présenter le problème de contact normal. Ensuite, des formulations seront présentées pour la résolution des problèmes liés au contact. Une analyse sera faite dans le cadre de la théorie de l'élasticité linéaire où les solides sont considérés comme parfaitement élastiques isotropes et homogènes. Le problème traité est du type Hertzien selon lequel les dimensions de l'aire de contact sont petites devant les rayons de courbure des surfaces des solides.

2 – 2 – 1 – Contact ponctuel

Deux solides élastiques 1 et 2 sont mis en contact. Sous l'action d'une charge \mathbf{P} (Figure 2.1), les deux solides au voisinage des points en contact sont déformés et il y aura un contact sur une petite aire de la surface de chacun des solides.

Le problème à résoudre est celui de la détermination des dimensions \mathbf{a} et \mathbf{b} de l'aire de contact et des contraintes principales dans les deux corps sur la ligne d'action de la charge \mathbf{P} désignée comme l'axe des \mathbf{Z} .

Dans l'état non déformé, les deux solides sont en contact en un point \mathbf{O} . On peut considérer, avec une approximation, qu'au voisinage de ce point \mathbf{O} , la forme des surfaces est donnée par la relation* :

$$\mathbf{Z} = \mathbf{A} \mathbf{X}^2 + \mathbf{B} \mathbf{Y}^2 \quad (2.1)$$

(* : Voir annexe pour la démonstration de cette équation).

Où \mathbf{X} et \mathbf{Y} représentent les coordonnées relatives aux axes \mathbf{OX} et \mathbf{OY} .

Dans l'état non déformé, les deux solides ont un plan tangent commun au point de contact et la distance Z entre deux points des surfaces de chaque solide mesurée selon la direction de la normale commune est donnée par l'équation (2.1).

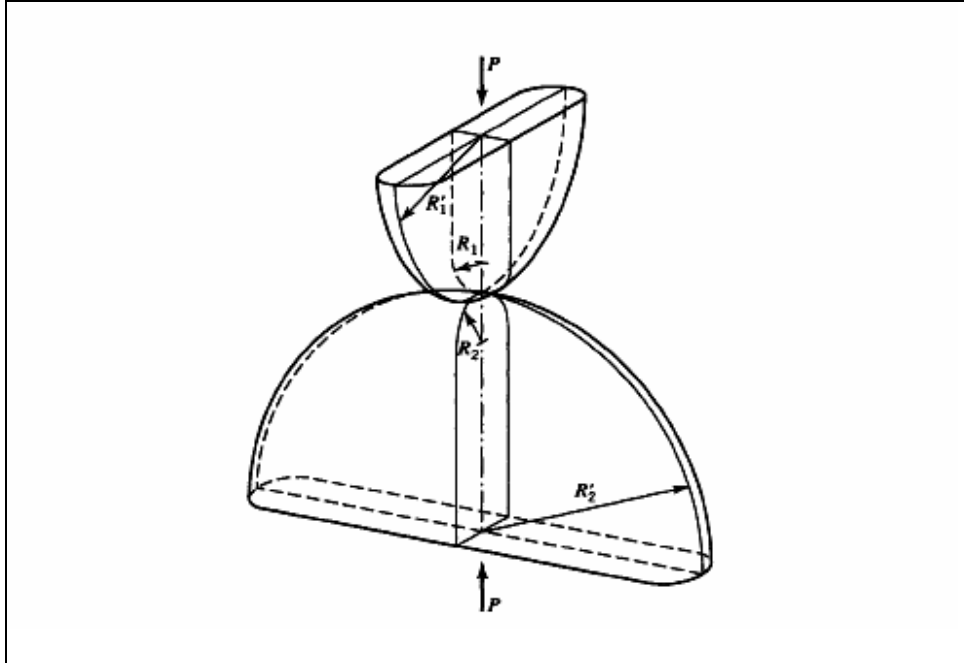


Figure 2.1: Contact entre deux surfaces courbées ayant différents rayons de courbure [17].

L'équation (2.1) donnant la distance Z entre les points correspondants et le plan tangent commun est nécessaire pour déterminer les contraintes et les déformations au voisinage du point initial de contact dans les deux solides.

Nous notons que les points correspondant sont les points qui se trouvent sur les surfaces des deux solides et sur une ligne perpendiculaire au plan tangent commun. Pour une valeur donnée de Z , l'équation (2.1) donne une ellipse. Par conséquent, lorsqu'on applique une charge suivant la direction normale au contact OZ , une surface de contact de forme elliptique est obtenue et est définie suivant OX et OY par les demi-axes (a) et (b) respectivement.

A et B étant des constantes positives [18] qui dépendent des courbures principales de chacune des surfaces en contact et de l'angle α que font les plans normaux principaux (Figure 2.2b).

Soient R_1 et R'_1 les rayons de courbures principales du solide 1 et R_2 , R'_2 ceux du solide 2. Au point de contact, on peut définir [18]:

$$A = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R'_1} + \frac{1}{R'_2} \right) - \frac{1}{4} \sqrt{\left[\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R'_1} \right) + \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R'_2} \right) \right]^2 - 4 \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R'_1} \right) \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R'_2} \right) \sin^2(\alpha)} \quad (2.2a)$$

$$B = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R'_1} + \frac{1}{R'_2} \right) + \frac{1}{4} \sqrt{\left[\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R'_1} \right) + \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R'_2} \right) \right]^2 - 4 \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R'_1} \right) \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R'_2} \right) \sin^2(\alpha)} \quad (2.2b)$$

Les rayons des courbures sont pris positifs si le centre de la courbure est à l'intérieure du solide correspondant, et sont pris négatifs dans le cas contraire.

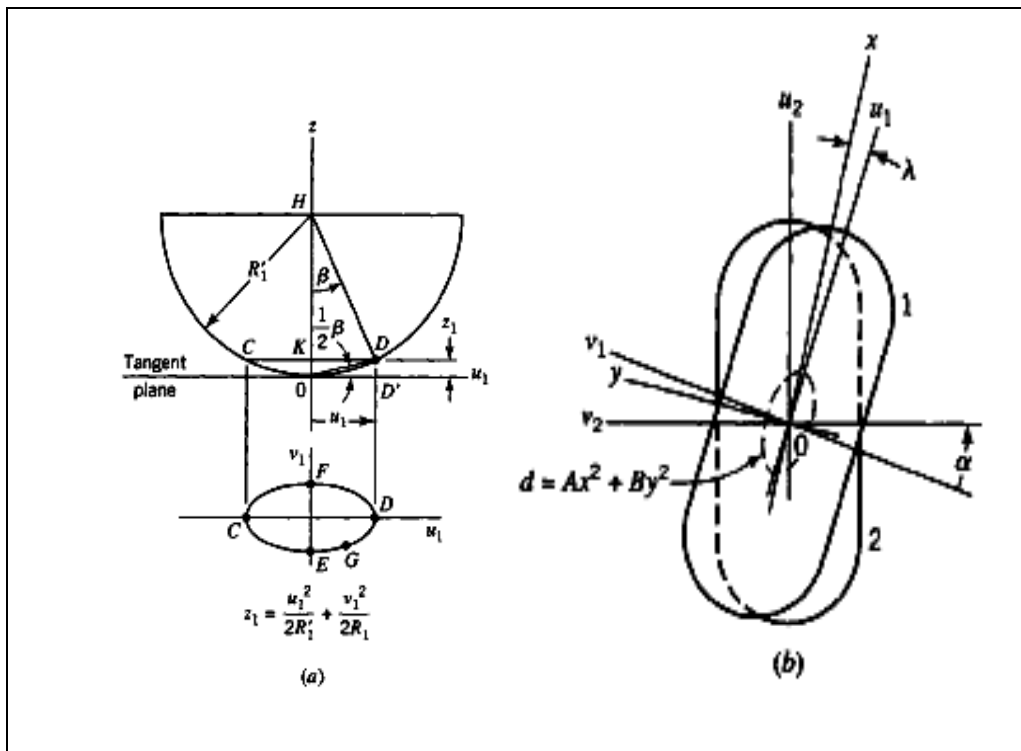


Figure 2.2 : Géométrie de contact [17]

2 – 2 – 1 – 1 – Hypothèses de base pour la solution des contraintes de contact

Pour le contact entre deux solides au repos, la théorie généralisée de Hertz peut être appliquée si :

- 1) Les matériaux sont parfaitement élastiques et toutes les déformations se produisent dans le domaine élastique.
- 2) La force appliquée P est perpendiculaire à la surface de contact, ce qui suppose que la composante due à la force de frottement est nulle, c'est-à-dire que la contrainte tangentielle à la surface de contact est nulle.
- 3) Les surfaces en contact sont parfaitement lisses.
- 4) Les dimensions de l'aire de contact sont petites par rapport aux rayons de courbures qui sont du même ordre de grandeur.

2 – 2 – 1 – 2 – Solution du problème de contact ponctuel

Comme il a été indiqué précédemment, l'équation (2.1) est utilisée pour déterminer le déplacement des points de la surface de contact. La figure (2.3) présente les deux corps en contact en points avant (en continu) et après (en discontinu) l'application de la charge P . Dans le dernier cas, les deux corps sont en contact sur une surface aplatie autour du point initial de contact, et les centres des corps sont déplacés l'un vers l'autre d'une distance équivalente à $\delta = \delta_1 + \delta_2$. Cela signifie que la distance entre les points non affectés par la déformation au point O est diminuée par la valeur δ .

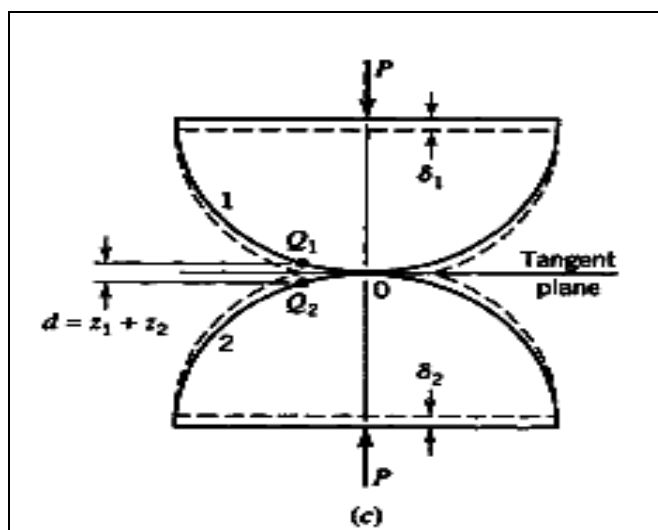


Figure 2.3 : Schéma représentant les positions des deux corps en contact avant et après l'application de la charge [17].

On considère que W_1 est le déplacement dû à la compression locale du point Q_1 et W_2 est le déplacement dû à la compression locale du point Q_2 (Figure 2.3). Nous prenons W_1 et W_2 positifs dans les directions loin des plans tangents, supposée fixes pendant la compression locale.

Donc, la distance entre les deux points Q_1 et Q_2 sera diminuée par $\delta - (W_1 + W_2)$. Finalement, si les points Q_1 et Q_2 viennent à l'intérieure de la surface de contact causée par la compression locale, nous avons:

$$\delta - (W_1 + W_2) = Z_1 + Z_2 = Z \quad (2.3)$$

En remplaçant Z par l'expression (2.1), nous aboutissons à:

$$W_1 + W_2 = \delta - AX^2 + BY^2 \quad (2.4)$$

L'équation (2.4) est obtenue à partir de considérations géométrique seulement. Si nous supposons que la surface de contact est très petite par rapport aux rayons de courbures des deux corps en contact. la solution obtenue pour les corps semi-infinis soumis à des charges d'indentation peut être utilisée pour déterminer $w_1 + w_2$ [18,19].

Dans ces travaux, Hertz a considéré que l'équation (2.4) a la même forme que l'équation potentielle de Newton pour l'attraction entre masses homogènes. Par conséquent, la solution du problème est obtenue en remplaçant les masses par les contraintes de contact dans l'équation potentielle et les constantes sont ensuite déterminées [18]. La solution est donnée en fonction des intégrales elliptiques, et les résultats sont résumés dans les sections suivantes.

2 – 2 – 1 – 3 – Expressions des contraintes de contact

La solution du problème donne la distribution des contraintes de contact à l'intérieure des solides. Les expressions des contraintes principales sont données en fonction de quatre intégrales appelées intégrales elliptiques. Dans ces expressions, et pour faciliter le calcul des intégrales, la profondeur est exprimée par (KZ/b) et nous posons :

$$\cos(\Phi) = (KZ/b)$$

Parmi les quatre intégrales deux sont en fonction de Φ ou (KZ/b) , θ et $K'(a/b)$, ces intégrales sont [17] :

$$F(\Phi, k') = \int_0^{\Phi} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - k'^2 \sin^2(\theta)}} \quad (2.5)$$

$$H(\Phi, k') = \int_0^{\Phi} \sqrt{1 - k'^2 \sin^2(\theta)} d\theta \quad (2.6)$$

$$K(k') = F\left(\frac{\pi}{2}, k'\right) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - k'^2 \sin^2(\theta)}} \quad (2.7)$$

$$E(k') = H\left(\frac{\pi}{2}, k'\right) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k'^2 \sin^2(\theta)} d\theta \quad (2.8)$$

Cette analyse qui implique les suppositions et les limitations indiquées dans cette section permet le calcul des contraintes principales à n'importe quel point sur l'axe Z par les expressions suivantes [17] :

$$\sigma_{xx} = \left[M(\Omega_y + \nu\Omega_y') \right] \frac{b}{\Delta} \quad (2.9a)$$

$$\sigma_{yy} = \left[M(\Omega_y + \nu\Omega_y') \right] \frac{b}{\Delta} \quad (2.9b)$$

$$\sigma_{zz} = \left[\frac{M}{2} \left(\frac{1}{n} + n \right) \right] \frac{b}{\Delta} \quad (2.9c)$$

Où k (Z/b) est la profondeur relative,

a : l'axe semis –majeur de l'ellipse du contact,

b : axe semis-mineur de l'ellipse du contact,

Z : profondeur au-dessous de la surface de contact,

$\Phi = \arccos(k Z/b)$,

$k = b/a = \cos(\theta)$, $k \leq 1$,

$k' = \sqrt{1 - k^2} = \sin(\theta)$,

Dans les quels:

$$M = \frac{2K}{K'^2 E(K')} \quad (2.10a)$$

$$n = \frac{\sqrt{k^2 + k^2 \left(\frac{Z}{b}\right)^2}}{\sqrt{1 + k^2 \left(\frac{Z}{b}\right)^2}} \quad (2.10b)$$

$$\Delta = \frac{1}{A+B} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \quad (2.10c)$$

Et Ω_x , Ω_x' , Ω_y et Ω_y' sont donnés par l'expression [17] :

$$\Omega_x = -\frac{1-n}{n} + \frac{z}{kb} [F(\Phi, k') - H(\Phi, k')] \quad (2.11a)$$

$$\Omega_x' = -\frac{n}{k^2+1} + \frac{z}{kb} \left[\left(\frac{1}{k^2} \right) H(\Phi, k') - F(\Phi, k') \right] \quad (2.11b)$$

$$\Omega_y = -\frac{1}{2n} + \frac{1}{2} + \frac{n}{k^2} + \frac{z}{kb} \left[\left(\frac{1}{k^2} \right) H(\Phi, k') - F(\Phi, k') \right] \quad (2.11c)$$

$$\Omega_y' = -1 + n + \frac{z}{kb} [F(\Phi, k') - H(\Phi, k')] \quad (2.11d)$$

E_1 , E_2 sont les modules d'élasticité de traction ou de compression pour les deux cops en contact, ν_1 , ν_2 sont les coefficients de poissons pour les deux corps en contact.

Nous notons que les contraintes principales dépendent des variables A , B , K , K' , ν_1 , ν_2 , E_1 , E_2 . Les quatre premières variables dépendent seulement de la forme des surfaces au voisinage du point initiale de contact.

Pour déterminer la valeur de k , nous devons résoudre selon [18] l'équation suivante:

$$\frac{B}{A} = \frac{\left(\frac{1}{K^2} \right) E(k') - k(k')}{k(k') - E(K')} \quad (2.12)$$

Les quartes dernières variables dépendent seulement des propriétés des physiques des deux corps en contact.

L'axe semis-mineur b de l'ellipse de contact qui dépend des huit variables précédentes et de la charge de contact F est donné par l'expression suivante :

$$b = \sqrt{\frac{3kE(K')(P\Delta)}{2\pi}} = ka b = \quad (2.13)$$

Notons que dans les expressions (2.9), la valeur de (ν) n'a pas de grande influence sur les valeurs finales des contraintes. Pour cela ces dernières sont calculées pour une valeur de coefficient de poisson égale à 0,25.

2 – 2 – 1 – 4 – Calcul des contraintes de contact pour les géométries des deux corps

Dans l'expression des contraintes de contact (2.9), les termes entre accolades ne dépendent pas des constants élastiques des deux corps en contact et de la charge P . par conséquent, ces expressions peuvent être écrites sous la forme suivant :

$$\sigma_{ij} = C_{ij} \frac{b}{\Delta} \quad (2.14)$$

Où i, j : x, y .

C_{ij} : est le coefficient des contraintes σ_{ij} .

2 – 2 – 1 – 4 – 1 – Détermination des coefficients des contraintes

Les coefficients des contraintes σ_{\max} , τ_{\max} et $\tau_{\text{oct.max}}$ sont déterminée à partir de l'équation (2.14) comme suit:

A) Pour σ_{\max}

La contrainte de contact maximale est déterminée en remplaçant par $Z=0$ dans l'expression de σ_{zz} [voir l'expression (2.9)]

$$\sigma_{\max} = \sigma_{zz} (z = 0) = C \sigma (b/\Delta)$$

Donc on a:

$$C_{\sigma} = \frac{\sigma_{zz}(Z=0)}{\frac{b}{\Delta}} = \frac{M}{2} \left(\frac{1-k^2}{k} \right) \quad (2.15)$$

Avec $M = \frac{2k}{k'^2 \cdot E(k')}$

B) pour τ_{max}

La contraintes de cisaillement est calculée par :

$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_{max} - \sigma_{min})$ à la profondeur Z_s nous avons :

$\tau = \tau_{max} = C_T \left(\frac{b}{\Delta}\right) = \tau_{max} = C_\tau \left(\frac{b}{\Delta}\right)$ donc :

$$C_\tau = \frac{(\sigma_{max} - \sigma_{min})}{2 \cdot \left(\frac{b}{\Delta}\right)} \quad (2.16)$$

C) pour $\tau_{oct.max}$

De même, pour Z_s nous avons:

$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2} = \tau_{oct.max} = C_g \cdot \left(\frac{b}{\Delta}\right)$

$$C_g = \frac{\tau_{oct.max}}{\left(\frac{b}{\Delta}\right)} \quad (2.17)$$

D) pour Z_s

Le coefficient de la profondeur Z_s à la quelle agissent les contraintes τ_{max} et $\tau_{oct.max}$ est calculé par :

$$C_{Z_s} = \frac{Z_s}{b} \quad (2.18)$$

2 – 2 – 1 – 4 – 2 – Détermination des coefficients de la dimension de contact a et b

L'axe semis-mineur b de l'ellipse de contact est déterminé par l'équation suivante :

$$b = Cb \cdot \sqrt[3]{p \cdot \Delta} \quad (2.19)$$

D'autre part nous avons :

$$b = C_b \cdot \sqrt[3]{\frac{3.k.E(k')}{2.\pi}} \cdot (P \cdot \Delta) = k.a$$

$$C_b = \sqrt[3]{\frac{3.k.E(k')}{2.\pi}} \quad (2.20)$$

L'axe semi-majeur a est calculé par :

$$a = \frac{b}{k} \quad (2.21)$$

Où k est déterminée à partir de l'équation (2.10)

2 – 2 – 1 – 5 – Résultats et discussion

Pour une configuration donnée des deux corps en contact, nous avons calculé les valeurs des contraintes de contact le long de l'axe OZ au-dessous de la surface de contact. Dans la figure (2.5), Les valeurs de ces contraintes sont tracées en fonction de la profondeur au-dessous de la surface de contact. Ces courbes indiquent que les valeurs maximales de σ_{xx} , σ_{yy} et σ_{zz} ont lieu à la surface de contact (à $Z=0$) et qu'elles diminuent au fur et à mesure que la profondeur Z croît. De même, nous constatons que la valeur de la contrainte principale σ_{zz} est supérieure aux autres valeurs des contraintes pour tout point au-dessous de la surface du contact [3].

a) Contrainte de cisaillement maximal

La contrainte de cisaillement maximale est calculée par l'expression suivante:

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \quad (2.22)$$

La figure (2.4) montre qu'au-dessous de la surface de contact, les valeurs des contraintes principales σ_{xx} et σ_{yy} décroissent plus rapidement par rapport à celles de σ_{zz} , et par conséquent, la contrainte de cisaillement croît et prend sa valeur maximale à une certaine profondeur Z_s au-dessous de la surface de contact. (Figure 2.4 et 2.5).

b) Contrainte de cisaillement octaédrale

Les valeurs de τ_{oct} sont calculées le long de l'axe OZ au-dessous de la surface de contact par l'expression suivante:

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2} \quad (2.23)$$

Nous remarquons à partir de la figure (2.4) que τ_{oct} prend sa valeur maximale à la même profondeur que celle de τ_{max} .

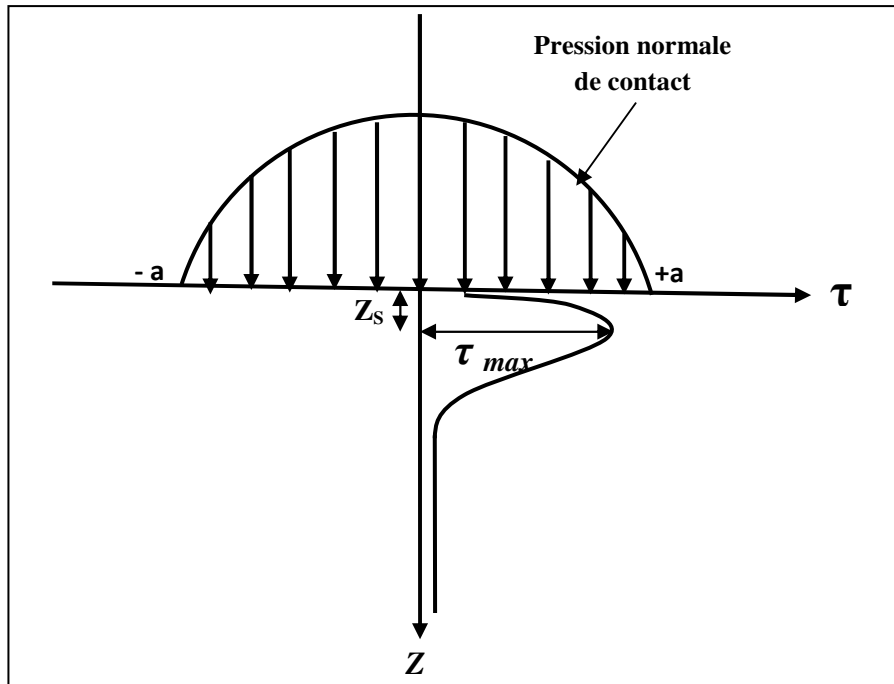


Figure 2.4 : Etat de contrainte issu du contact entre deux corps.

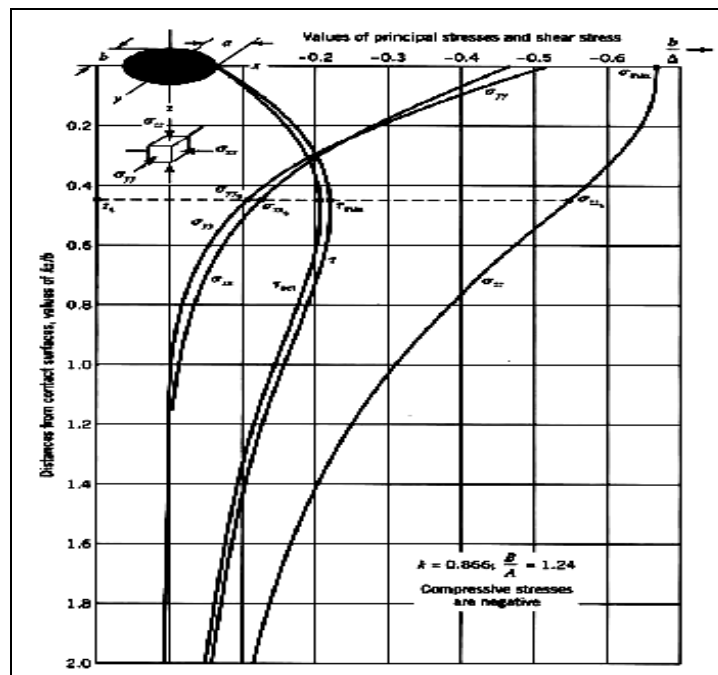


Figure 2.5 : Variation des contraintes de contact au-dessous de la surface de contact [17].

c) Contrainte de cisaillement orthogonal

Les contraintes de cisaillement τ et τ_{oct} qui agissent sur l'axe des Z , sont importantes dans certains critères de fatigue [20-21]. Les autres contraintes de cisaillement qui sont

aussi importantes dans l'étude de la rupture par fatigue des éléments roulants, sont les composantes de la contrainte de cisaillement orthogonale σ_{xz} , σ_{yz} (elles sont dites les contraintes de cisaillement orthogonale car elles agissent sur des plans perpendiculaires au plan de contact, Figure 2.6). Ces composantes sont nulles sur l'axe des Z ou se produit τ_{max} . Si nous supposons que le roulement se fait selon l'axe des X et nous considérons seulement le problème pour lequel l'axe X coïncide avec l'un des axes majeur ou mineur de l'ellipse de contact (Figure 2.6), la contrainte de cisaillement orthogonale est définie comme étant $\sigma_{xz (Max)}$ qui agit sur le plan $(x z)$.

Bien que τ_0 soit toujours inférieure à τ_{max} , elle change de signe lorsque l'élément roulant s'approche ou quitte la région au-dessus d'un point donné. Pour cette raison, l'amplitude de la contrainte de cisaillement orthogonale maximale est 2τ et qui est supérieure à l'amplitude de la contrainte de cisaillement maximale τ_{max} pour la plus part des cas.

Notons que $\sigma_{yz (Max)}$ peut être supérieure à τ_0 , mais du fait que $\sigma_{yz (Max)}$ ne change pas de signe lors de roulement, la valeur de σ_{yz} est égale à $\sigma_{xz (Max)}$ et qui est inférieure à $2 \tau_0$ [5].

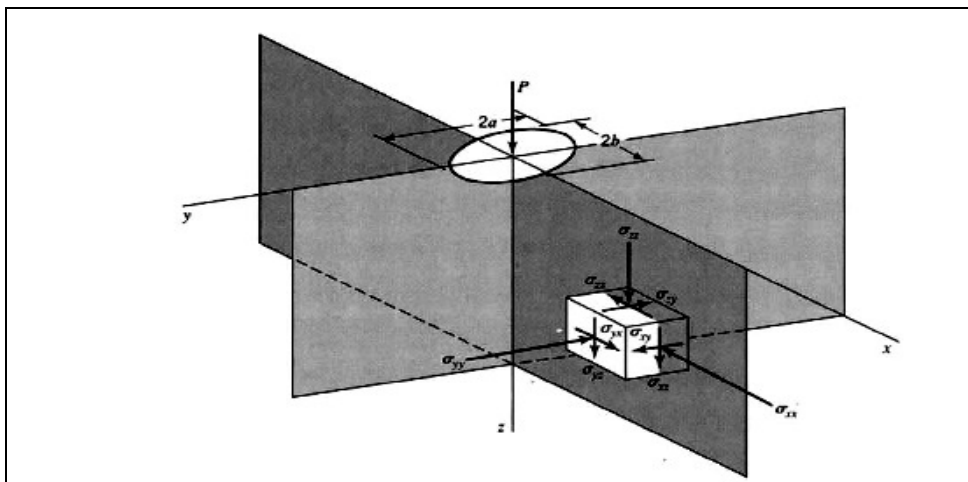


Figure 2.6 : Etat de contrainte pour un élément de volume au-dessous de la surface de contact [17].

L'emplacement Z_0 de τ_0 (profondeur au-dessous de la surface de contact à la qu'elle τ_0 agit), et sa grandeur sont en fonction de a , b et l'orientation de l'ellipse de contact par rapport à la direction du roulement (Figure 2.7 et 2.8).

Notons que pour les valeurs du rapport $e = a/b$ supérieures à 1, le roulement se fait selon le demi-axe b , par contre pour les valeurs de e supérieure à 1, le roulement se fait selon le demi-axe a .

Dans la conception des éléments roulants, lorsque $2\tau_0 > \tau_{max}$, la valeur de la contrainte de cisaillement orthogonale est plus importante à déterminer par rapport à celle de τ_{max} pour deux corps en contact qui ont un coefficient de poisson égale à 0.25 et pour des valeurs de $e < 2.25$. Fessler et Ollerton [22] ont trouvé que $2\tau_0 > \tau_{max}$ lorsque $e < 2.85$ et le coefficient de poisson égale a 0.5.

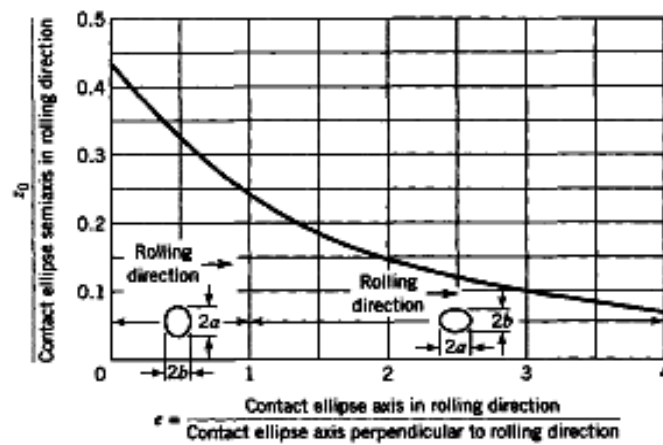


Figure 2.7 : Profondeur Z_0 à la quelle agit la contrainte de cisaillement orthogonale maximale [17].

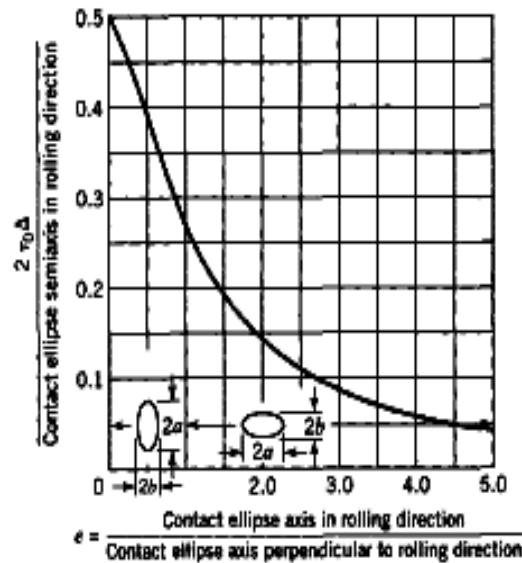


Figure 2.8 : Grandeur de la contrainte de cisaillement orthogonale maximale [17].

Dans la figure (2.9), nous avons tracé les valeurs des coefficients : C_τ , C_g , C_σ , C_{zs} , C_b , k pour des valeurs de B/A allant de 1 jusqu'à 10000. En utilisant ces courbes, les contraintes de contact sont faciles à calculer pour n'importe quelle géométrie des deux corps en contact.

A partir de ces courbes nous constatons que les valeurs des coefficients C_τ , C_g , C_σ , C_{zs} , augmentent avec le rapport B/A jusqu'à ce que leurs valeurs deviennent constantes à partir des valeurs de B/A supérieure. A ce stade les valeurs de ces coefficients sont: 1, 0.78, 0.3, et 0.27 respectivement. D'autre part les coefficients C_b , k diminuent avec l'augmentation du rapport B/A et par conséquent b diminue et a augmente et pour des valeurs assez grandes de B/A , k tend vers zéro et la surface de contact tend avoir une forme rectangulaire longue et étroite (contact linéaire).

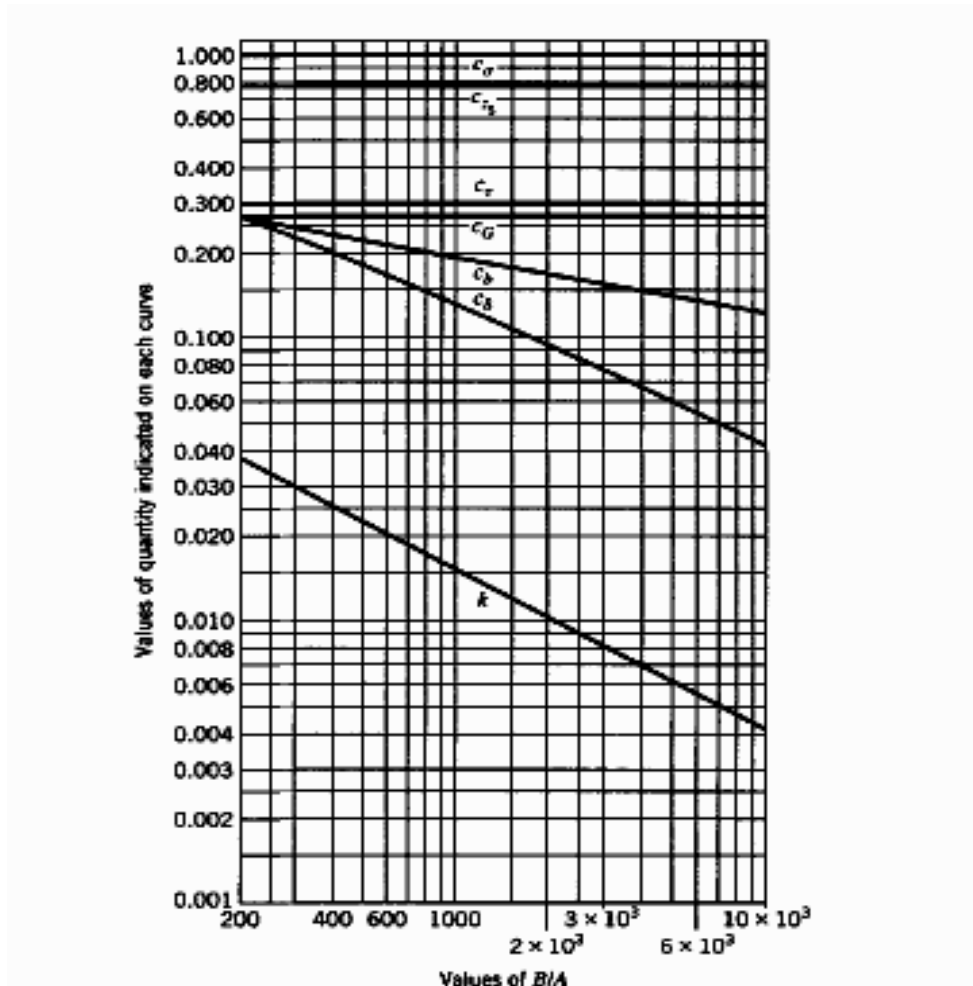


Figure 2.9.a : Coefficients utilisée pour le calcul des contraintes de contact [17].

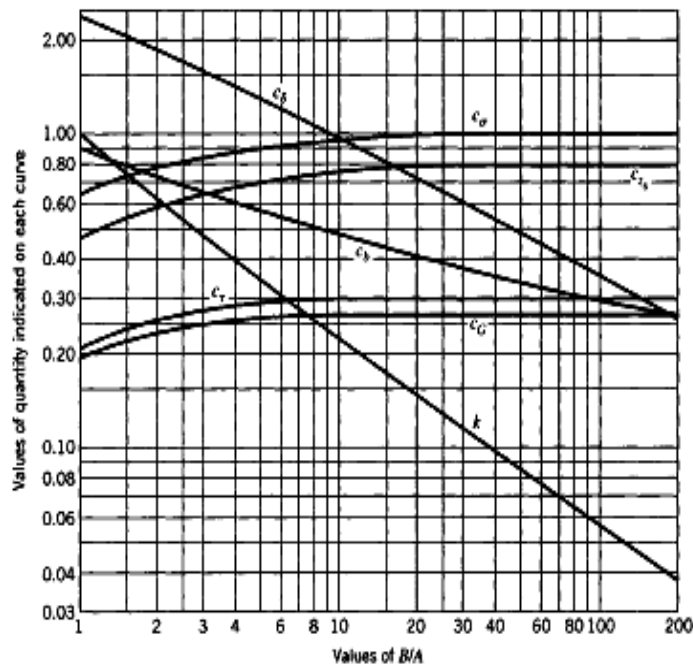


Figure 2.9.b : Coefficients utilisée pour le calcul des contraintes de contact [17].

2 – 2 – Contact linéaire

Dans le cas particulier du contact linéaire de longueur (1), $R'_{x1} = R'_{x2} = \infty$, les paramètres du contact sont définis sur le tableau 2.1

Tableau 2.1 : Paramètres définissant le contact linéaire.

paramètres	expressions
Module d'Young équivalent	$E = \left[\frac{1}{\pi} \left(\frac{1-\nu_1}{E_1} \right) + \left(\frac{1-\nu_2}{E_2} \right) \right]^{-1}$
Rayon de courbure équivalent	$R = \left(\frac{1}{R_{x1}} + \frac{1}{R_{x2}} \right)^{-1}$
Demi-longueur du contact selon (OX)	$b = 2 \left(\frac{PR}{lE} \right)^{\frac{1}{2}}$
Pression maximale	$P_{\max} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{PE}{lR} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{3}{2} \frac{P}{bl}$
Distribution de pression	$P(x) = P_{\max}^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(\frac{x}{b} \right)^2 \right]$

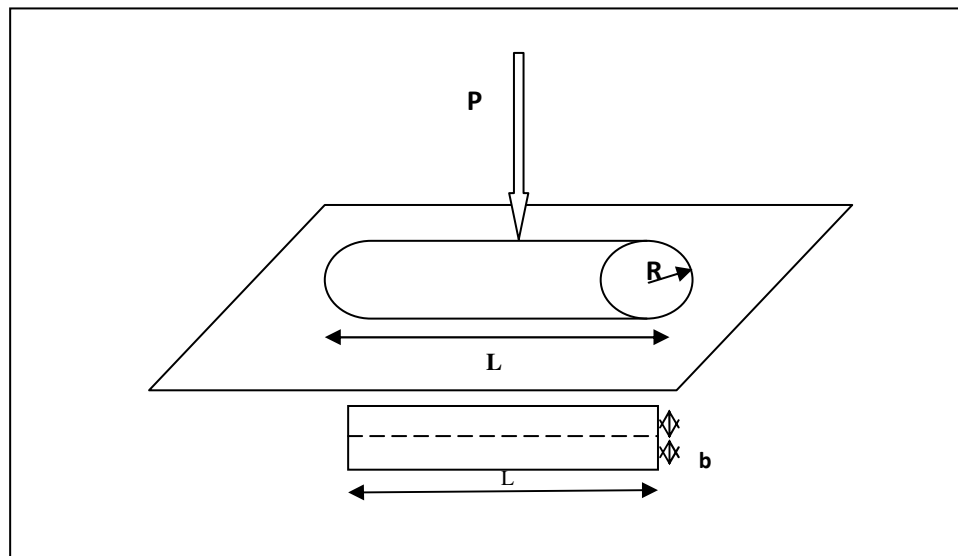


Figure 2.10 : Cas de contact linéaire entre un cylindre et un plan semi-infini.

2 – 3 – Conclusion

Notre objectif dans ce chapitre est l'analyse de l'état des contraintes issues du contact entre deux solides. nous avons présenté une solution détaillée pour le problème de contact entre deux solides élastiques, Les résultats du calcul montrent que les contraintes de cisaillement développées à l'intérieur des corps (juste au-dessous de la surface de contact) sont les contraintes les plus critiques et est les plus responsables de la fissuration par fatigue, et généralement, la conception des pièces qui fonctionnent sous contraintes de contact est faite d'une manière qui prend en considérations l'effet de ces contraintes.

2 – 4 – Application numérique sur les couches borurées sous contact roulant

Les couches borurées se composent en générale de deux phases FeB et Fe₂B ayant les caractéristiques suivantes [23,24], (Allaoui, 1995) :

- ❖ Pour FeB :
 - E= 590 GPa ,
 - $\nu = 0,15$
- ❖ Pour Fe₂B:
 - E= 290 GPa
 - $\nu = 0,18$

Généralement la phase la plus prédominante est la phase Fe_2B .

L'étude des couches borurées soumises à des sollicitations de contact de roulement nécessite la détermination de la contrainte de cisaillement orthogonale τ_0 qui est le responsable de la fatigue de roulement et de la profondeur Z_0 pour chaque charge appliquée.

Le type de contact est représenté sur la figure suivante :

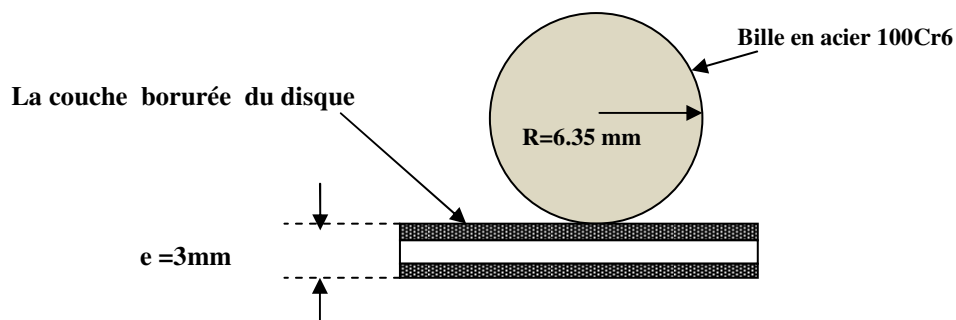


Figure 2.11 : Schéma représentant le contact bille sur un acier boruré.

Avec :

- la bille : ($R_1 = R_1' = 6.35$ mm, $E_1 = 200$ GPa, $\nu = 0.29$) ;
- le disque boruré : ($R_1 = R_1' = \infty$, $E_1 = 290$ GPa, $\nu = 0.18$) ;

Les calculs des paramètres : B, A, et Δ .

D'après les équations (2.2.a), (2.2.b) et (2.10.c) :

on trouve que : $B/A = 1$ et $\Delta = 50.29$ mm³/N

A partir des courbes (2.7), (2.8) et (2.9) illustrées au dessus :

$$C_b = 0.92 ; \quad \frac{Z_0}{b} = 2,245 \quad ; \quad \frac{2\Delta\tau_0}{b} = 2,27$$

Pour les charges suivants : $p = 8, 16, 40, 56, 80, 100, 120$ (N),

la détermination de la valeur de b se fait par la relation suivante :

$$b = C_b \sqrt[3]{p \cdot \Delta}$$

Les valeurs des semi axes mineurs de l'ellipse de contact b obtenus à partir de la formule précédente, en fonction de la charge appliquée, sont rassemblées dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Les valeurs des semi axes mineur de l'ellipse de contact b .

La charge (N)	b (mm)
8	0.067
16	0.0856
40	0.116
56	0.13
80	0.146
100	0.158
120	0.167

Comme : $\frac{Z_0}{b} = 2,245$ et $\frac{2\Delta\tau_0}{b} = 2,27$

Donc les valeurs de la contrainte de cisaillement orthogonale τ_0 et sa profondeur Z_0 sont données dans le tableau suivant :

Tableau 2.3 : Valeurs de la contrainte de cisaillement orthogonal ζ_0 et de sa profondeur Z_0 .

La charge (N)	τ_0 (Mpa)	Z_0 (mm)
8	180	0.016
16	230	0.021
40	311	0.028
56	349	0.032
80	391	0.036
100	424	0.0387
120	507	0.041

Puisque l'épaisseur de la couche borurée est généralement comprise entre 100 et 150 μm , et la profondeur de la contrainte de cisaillement orthogonale est toujours inférieure à cette valeur donc on peut supposer que notre composite (substrat+couche) est comme une couche borurée ayant les caractéristiques suivantes :

- ❖ $E = 290 \text{ GPa}$;
- ❖ $\nu = 0.18$

Référence Bibliographique du chapitre 2

- [01] Gueribiz Djelloul, « Etude de l'endommagement des surfaces des polymères sous contraintes de contact roulant », Mémoire de Magister, Université de Laghouat, 2000.
- [02] HERTZ, H. Uber die Berührung fester elastische Körper und über die Härte. (On the contact of rigid elastic solids and on hardness). *Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerbeunterrichts*. Leipzig, Nov. 1882. (For English trans. see *Misc. papers by H. Hertz*, Jones and Schott, Macmillan, London. 1896).
- [03] Arthur P. Boresi, . Richard J. Schmidt, *Advanced Méchanics of Materials*, 1924, Sixth Edition, 2003.
- [04] S. Timoshenko, J. Goodier, " *theory of elasticity* ,3rd MC Graw ,New York, (1970).
- [05] H.R.Thomas, V. A. Horesh, " *stress due to the pressure one elastic solid on another*, bulletin 212, engineering experiment station, university Illinois, Urbana, June 15,(1930).
- [06] G. J. Moyer, Jodean Morrow, " *Surface failure of bearing other roller elements*," Bulletin Engineering experiment station university of Illinois ,Urbana, (1946).
- [07] T.Mitsudo, " *An investigation of pitting and shelling failure in rolling contact* ,"ph D Thesis ,department of theoretical applied mechanics university of Illinois, Urbana, pp. Tab 1, (1965).

- [08] S. Grassie, P. Nilson, K. Bjurstrom, A. Frick, L ; G. Hansson. *Alleviation of rolling Contact Fatigue on Sweden's Heavy Haul Railway*. Wear, 253, 2002, pages 42 – 53.
- [09] H.Fessler ,E. Ollerton, “ *Contact stresses in toroids under radial loads* ,”British journal of applied physic ,vol .8,No .10,pp.387,(OC 1957).
- [10] Ludovic AVRIL, thèse de doctorat, *Elaboration de revêtements sur acier inoxydable, simulation de la fusion par irradiation laser, caractérisation structurale, mécanique et tribologique*, 2003.
- [11] D. C. Cooper, B. SC, F. R. I. C, *la classification périodique des éléments chimiques* (DUNOD, Paris 1967).

*Chapitre 3 :étude
bibliographique sur
les traitements De surface et
la boruration*

3 – 1 – Introduction

Les deux axes de lutte contre la fatigue de roulement sont d'une part la limitation des sollicitations dues au contact, et d'autre part l'augmentation des capacités du matériau à supporter les conditions de sollicitations.

Les facteurs permettant de limiter les sollicitations dues au contact sont la pression d'Hertz et la micro-géométrie des surfaces. L'augmentation de la capacité du matériau passe par l'augmentation de la micro-limite d'élasticité, et par l'amélioration de la propreté inclusionnaire et par la réduction des sollicitations subies grâce à la présence de contraintes résiduelles de traitement thermique ou thermochimique. Aussi, le choix du matériau et de son élaboration sont des axes importants de la lutte contre la fatigue de roulement.

Dans le paragraphe suivant nous allons exposer et décrire brièvement les principaux traitements de surface appliqués aux différents matériaux pour l'amélioration de leurs résistances à la fatigue d'une manière générale, et la fatigue en contact de roulement en particulier. Vers la fin de ce chapitre, nous allons présenter avec un peu plus de détail, le traitement de boruration qui a été proposé comme solution pour résoudre les problèmes de la fatigue en contact roulant.

3 – 2 – Les moyens pour lutter contre l'usure

La lutte contre l'usure par fatigue de contact roulant nécessite la bonne connaissance des conditions d'usure pour pouvoir choisir entre, par exemple, un matériau fragile dans et un matériau ductile en fonction du type de contact et en fonction des sollicitations et leurs importance.

La meilleure solution pour résoudre les problèmes d'usure, est d'avoir une surface qui est à la fois très dure et résiste bien à l'action abrasive des particules d'usure, et tenace pour résister aux frottements de roulement.

Le moyen le plus efficace pour réaliser de telles propriétés aux surfaces est l'application d'un traitement superficiel qui peut conférer à la surface le durcissement et la ténacité nécessaires pour résister à l'usure.

Dans le paragraphe suivant nous allons exposer et décrire brièvement les principaux traitements de surface appliqués aux différents matériaux pour l'amélioration de leurs résistances à l'usure.

3 – 3 – Les traitements de surface

Un traitement de surface est une opération mécanique, chimique, électrochimique ou physique qui a pour conséquence de modifier l'aspect ou la fonction de la surface des matériaux afin de l'adapter à des conditions d'utilisation données et d'obtenir une protection contre l'usure et la corrosion. Les traitements de surface jouent un rôle éminent dans le domaine de la tribologie.

En fonction du procédé responsable du durcissement de la surface traitée, on peut distinguer trois grandes familles de traitement de surface qui sont schématisées dans les figures suivantes :

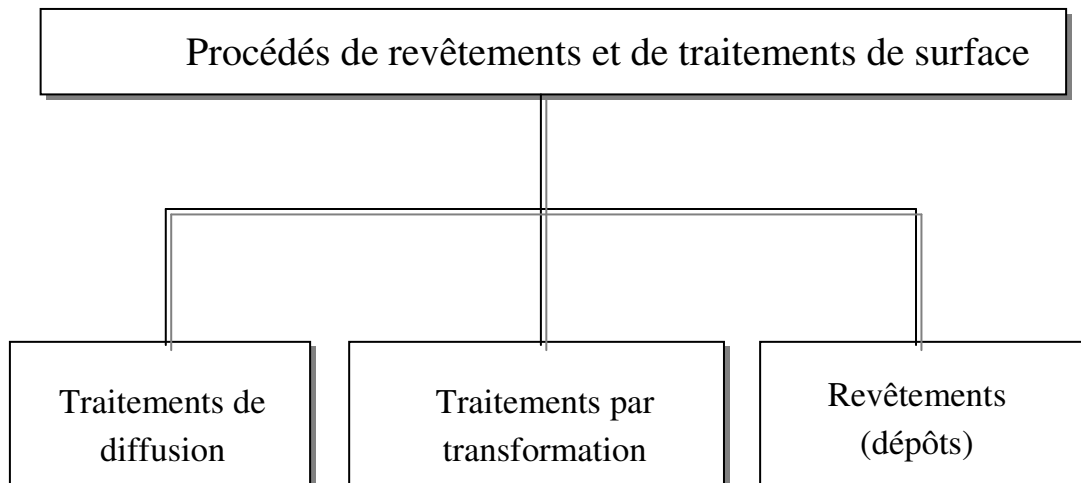


Figure 3.1 : Principaux traitements de durcissement de surface.

3 – 3 – 1 – Les dépôts ou les revêtements

Le nom de ce procédé provient du fait que les matériaux résistants à l'usure sont déposés uniquement à la surface et qu'il n'y a ni réaction avec le substrat, ni diffusion à travers la surface.

Le dépôt réalisé sur les surfaces peut être, un métal, une céramique ou un polymère et il peut être appliqué pour toutes les surfaces. Toutefois, il faut signaler que ce type de traitement représente un inconvénient avec la présence d'une interface de séparation entre le matériau de base et le dépôt réalisé.

Pour assurer une bonne adhérence entre la couche déposée et le substrat, les surfaces à traiter doivent subir des traitements spécifiques (décapage, nettoyage, sablage,.....).

En fonction des moyens utilisés pour réaliser les dépôts, ces procédés peuvent être divisés en deux grandes catégories :

- Les dépôts par voie humide.
- Les dépôts par voie sèche.

a – Les dépôts par voie humide

Le dépôt d'un revêtement donné sur une surface donnée dans un milieu liquide peut se faire avec ou sans électrolyse.

Les dépôts sans électrolyse se font sur la base d'un principe qui suppose l'instauration d'une différence de potentiel (**d.d.p.**) entre les ions du métal à déposer dans une solution aqueuse et la pièce plongée dans la solution. Donc, pour qu'un métal donné se dépose sur une surface, il faut que la **d.d.p.** de la surface soit inférieur à la **d.d.p.** des ions en solution, ce qui limite l'application de ce procédé à une catégorie très limitée.

L'application d'une **d.d.p.** externe peut activer le processus pour pouvoir déposer n'importe quel métal et augmenter le rendement du dépôt.

Les principaux procédés appartenant à la catégorie revêtements et dépôts par voie humide sont présentés dans la figure 3.2.

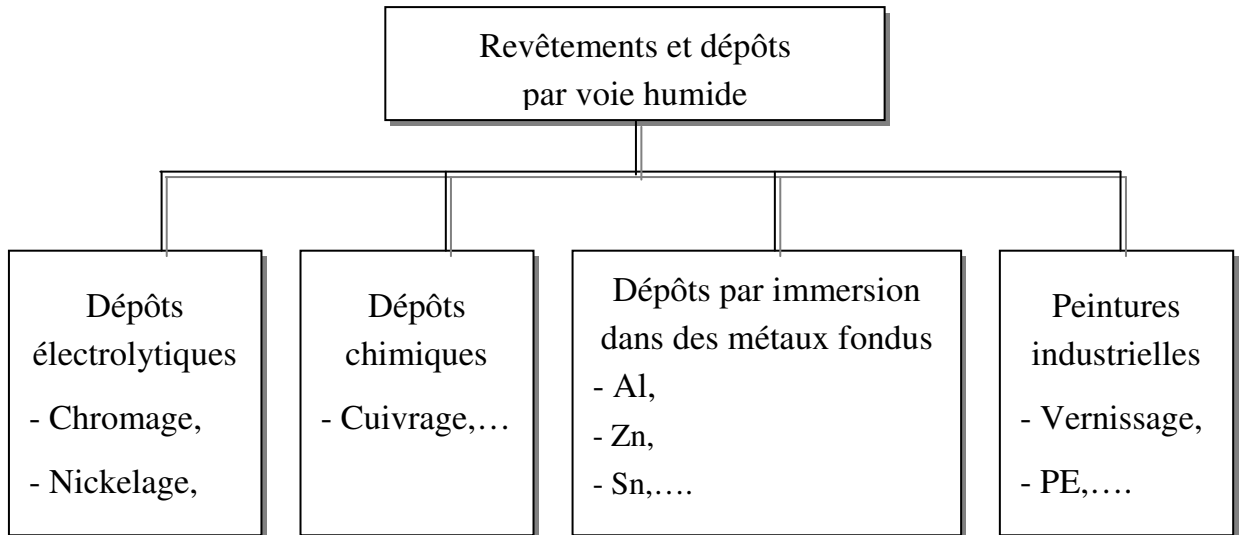


Figure 3.2 : Principaux Revêtements et dépôts par voie humide.

b – Les dépôts par voie sèche

Contrairement aux revêtements réalisés par voie humide, les revêtements réalisés par voie sèche s'effectuent en l'absence de milieu liquide. Cette catégorie regroupe des techniques basées sur des principes très simples tels que le rechargement par soudure, et des techniques basées sur des principes technologiques très avancés tels que la projection thermique par torche plasma, P.V.D., C.V.D.,.....

La figure 3.3 montre les principaux procédés appartenant à la catégorie revêtements et dépôts par voie sèche.

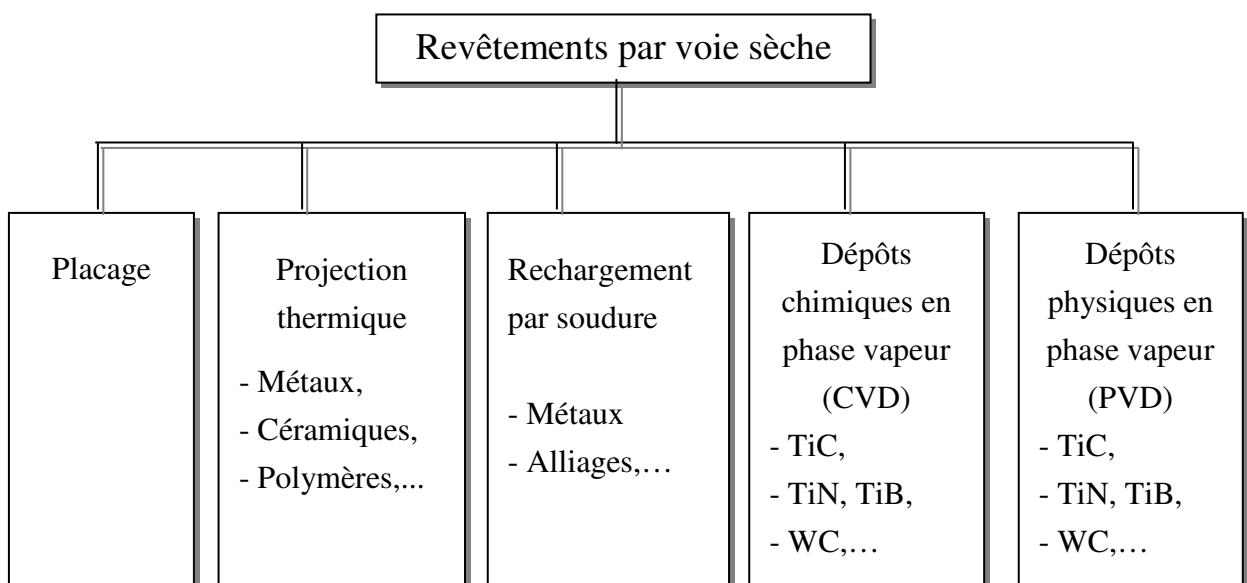


Figure 3.3 : Principaux Revêtements et dépôts par voie sèche.

3 – 3 – 2 – Les traitements par transformation structurale

Le principe de ces procédés consiste à porter des modifications structurales aux surfaces exposées à l'usure. Ces modifications de la structure sont obtenues, soit par déformation plastique et introduction de contraintes internes en surface, soit par des traitements thermiques qui n'affectent pas la composition chimique du matériau, mais qui change complètement la structure et la distribution des phases et des contraintes dans les couches superficielles.

a – Les traitements mécaniques des surfaces

Dans ces procédés, des déformations plastiques sont appliquées aux surfaces des pièces pour introduire des contraintes résiduelles compressives bénéfiques. Ces déformations plastiques conduisent à la suppression des fissures à la surface et à l'augmentation de la résistance à la fatigue des pièces fonctionnant sous les charges cycliques.

La déformation plastique est obtenue par différentes techniques, et en fonction de ces techniques, on peut rencontrer plusieurs procédés qui ont des appellations ayant une relation directe avec la technique utilisée. Parmi ces procédés on peut citer, l'écaillage, le grenailage, le galetage, le martelage,....

a – Les traitements thermiques des surfaces

Le principe de durcissement structural par traitements thermiques consiste à chauffer superficiellement les pièces à traiter à une température d'austénitisation et d'effectuer un refroidissement très rapide pour obtenir une structure martensitique à la surface.

Pour ce faire, il est indispensable d'avoir des moyens qui permettent d'assurer un chauffage rapide à un temps très court pour éviter que la température de la surface atteigne l'intérieur de la pièce par conduction, et un refroidissement rapide avant que la surface ne refroidisse.

Le chauffage rapide de la surface est assuré, dans la plupart des cas, par une source d'énergie qui peut atteindre des températures très élevées (~ 3500 ° C), ce qui permet de réaliser la transformation d'austénitisation à la surface en un temps très réduit. Parmi les sources d'énergie les plus utilisées, on peut citer :

- ❑ L'énergie calorifique obtenue suite à une réaction de combustion chimique (chalumeau : combustion = oxygène-acétylène).
- ❑ L'énergie inductive obtenue par l'application de champs magnétiques très intenses à la surface traitée.
- ❑ L'énergie obtenue par un faisceau laser.
- ❑ L'énergie cinétique d'un faisceau d'électrons.

Les principaux procédés utilisés dans les traitements de surfaces par transformations structurales sont présentés dans la figure 3.4.

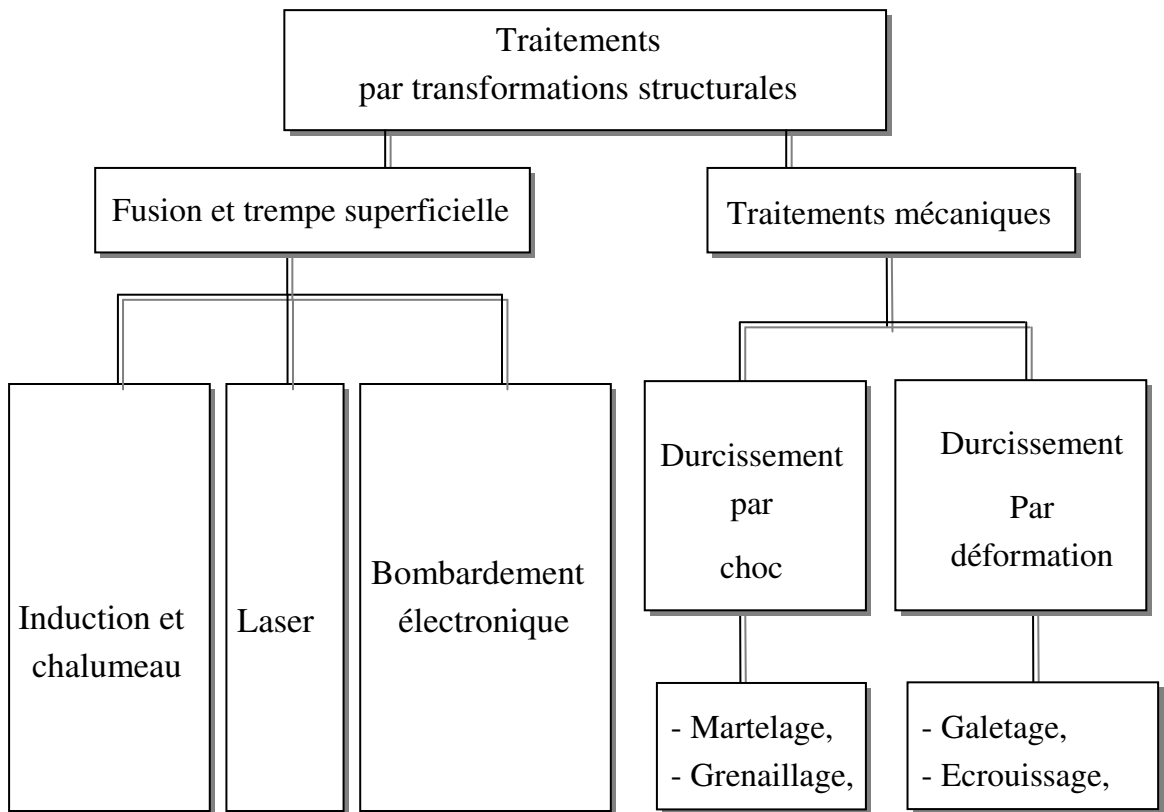


Figure 3.4 : Principaux procédés de traitements mécaniques et thermiques des surfaces.

3 – 3 – 3 – Les traitements de diffusion

Ces traitements sont aussi connus sous le nom de traitements thermochimique. Le principe de ces traitements consiste à introduire un ou plusieurs éléments à la surface traitée pour changer la composition chimique et les propriétés de cette surface.

L'élément ajouté à la surface diffuse à l'intérieur du substrat pour former une solution solide d'insertion (dans le cas des éléments de faible diamètre atomique) ou de substitution (pour les atomes de grand diamètre) dans la structure, ou encore pour former des combinaisons chimiques ou des phases intermétalliques avec le matériau de base.

Le processus de diffusion se déroule, en général, à des températures relativement élevées suite à un apport externe d'atomes vers la surface traitée. Le milieu porteur d'atomes peut être solide, liquide ou gazeux.

Les traitements thermochimiques permettent de modifier les caractéristiques mécaniques (dureté, coefficient de frottement, limite de fatigue,...) de surface des matériaux traités.

Les éléments diffusants à travers la surface sont soit :

- Des métalloïde (le carbone « C », le bore « B », l'azote « N », le soufre « S »,...) qui conduisent à la formation de composés chimiques (carbures, nitrides, borures, sulfures,...) connus par leurs excellentes propriétés de résistance à l'usure.
- Soit des métaux (le chrome « Cr », l'aluminium « Al », le niobium « Nb », le titane « Ti »,...) qui conduisent à la formation de phases intermétalliques et/ou des composés chimiques complexes ayant une bonne résistance aux phénomènes d'usure.

La figure 3.5 rassemble quelques procédés de traitement thermochimiques pour la modification des propriétés de surface.

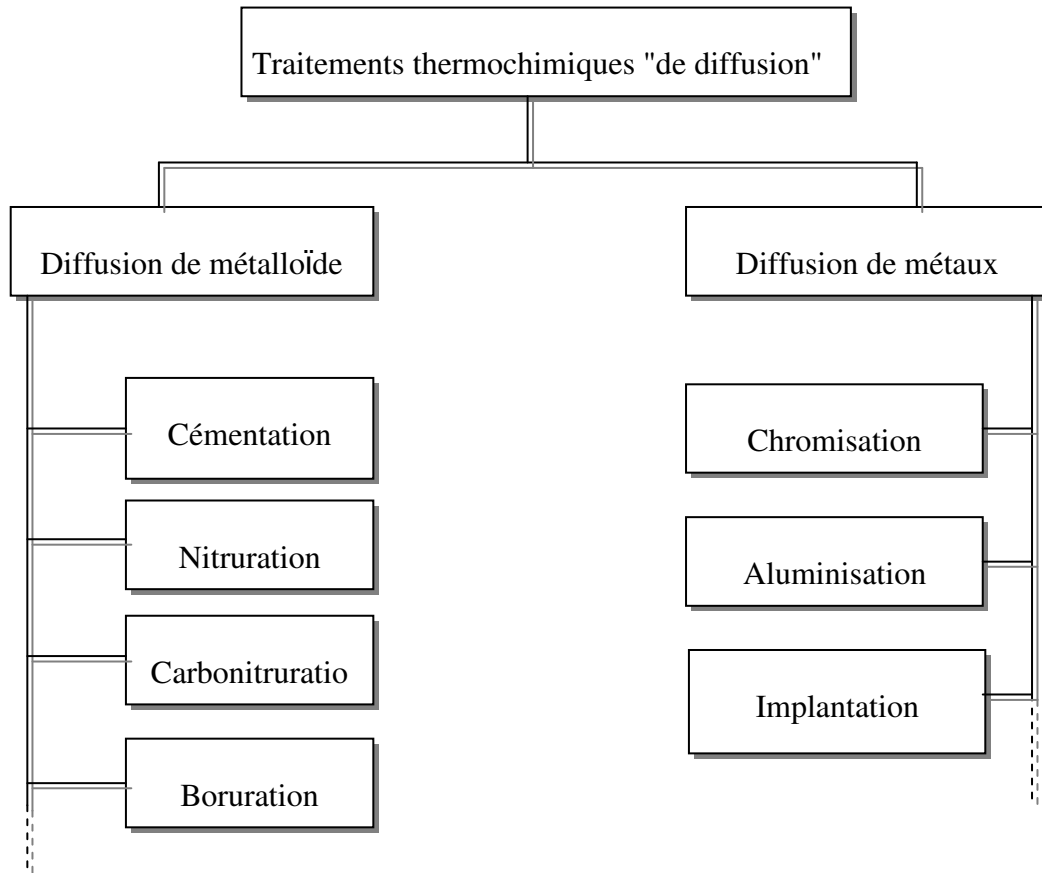


Figure 3.5 : Quelques procédés de traitements thermo-chimiques des surfaces.

3 – 4 – Le traitement de boruration

3 – 4 – 1 – Introduction

La boruration est un traitement thermo-chimique de surface qui est connu depuis 1895 d'après les travaux de Moisson, et a connu son application industrielle vers les années 70 dans plusieurs pays [01]. Le procédé de boruration consiste à placer les pièces à traiter dans un milieu très riche en bore, puis à les mettre dans des fours à haute température.

Ce traitement qui peut être appliqué à une large gamme de matériaux (alliages ferreux, alliages non ferreux à base de Nickel, de Titane, de Cobalt,... et les cermets) [02] a attiré

l'intention de beaucoup de chercheurs à cause des bonnes propriétés mécaniques et chimiques apportées aux matériaux traités.

En effet, la boruration confère aux aciers une dureté superficielle élevée qui se maintient à haute température, une bonne tenue à l'usure adhésive et abrasive, et une résistance accrue à l'attaque par les acides et métaux fondus.

Le bore est apporté à la surface des pièces traitées par une réaction chimique ou électrochimique entre le milieu contenant du bore et la surface de la pièce traitée. Le milieu de contenant du bore peut être gazeux, liquide ou solide.

3 – 4 – 2 – Procédés de boruration

Le bore qui diffuse à travers la surface des matériaux traités peut être apporté par une réaction chimique ou électrochimique entre un milieu contenant du bore et le matériau. Ce milieu peut être gazeux, liquide ou solide (poudre ou pâte).

Ces différentes voies de boruration ont fait l'objet de plusieurs recherches, et chacune de ces voies présente des avantages et des inconvénients. Dans ce paragraphe, nous présenterons les principales méthodes utilisées pour la boruration.

3 – 4 – 2 – 1 – Boruration en milieu gazeux

La boruration en milieu gazeux s'effectue par la décomposition ou la dissociation thermique des composés volatils de bore. Les composés les plus utilisés dans ce procédés sont le diborane (B_2H_6), les halogénures de bore (BF_3 , BCl_3 , BBr_3 ,...) et les composés organiques du bore ($(CH_3)_3B$, $(C_2H_5)_3B$,...).

En général, les couches borurées produites sont uniformes et ont un très bon état de surface, ce qui rend l'opération de nettoyage des pièces traitées inutile.

Malgré les avantages que présente la boruration en milieux gazeux, ce procédé n'a pas connu un grand succès à l'échelle industrielle à cause des problèmes sus-cités.

3 – 4 – 2 – 2 – Boruration en milieu liquide

La libération de bore naissant à la surface de la pièce traitée nécessite la réduction chimique du composé porteur de bore. Cette réduction peut s'effectuer soit par voie électrochimique sous une tension appliquée soit par voie chimique par l'addition d'un agent réducteur au bain de boruration.

Les sels utilisés dans les traitements de boruration avec ou sans électrolyse ont été abondamment décrits par plusieurs chercheurs [03-05].

a - Boruration électrochimique dans des sels fondus

Les électrolytes les plus utilisés dans ce procédé sont généralement à base de tétra borate de sodium (connu sous le nom borax : $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) ou de tétra fluoroborate de potassium (KBF_4).

Du borax pur ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) et du tétra fluoroborate de potassium pur (KBF_4) ont été utilisés avec succès. Toutefois, des fluorures et des chlorures alcalins sont généralement ajoutés aux composés de base, dans le but d'améliorer les propriétés physico-chimiques des bains de boruration (température du liquidus, viscosité, conductivité électrique,...).

La composition chimique du bain de boruration est choisie en fonction de la température d'utilisation :

- Les électrolytes à base de KBF_4 sont utilisés pour des températures comprises entre 600 et 850°C
- Les électrolytes à base de $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ sont utilisés pour des températures variant de 800 à 1050°C.

Dans tous les cas recensés, la boruration électrolytique a donné lieu à des couches borurées biphasées [06].

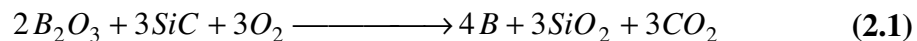
b - Boruration thermochimique dans des sels fondus

Le mécanisme de boruration dans des sels fondus présuppose la formation d'une cellule galvanique où le substrat joue le rôle de cathode et les fines particules de l'agent réducteur en suspension dans le bain jouent le rôle de microanodes.

Selon ce mécanisme, étudié en détail Lyakhovich par [07], la boruration n'a lieu que si et seulement si le potentiel de la surface de la pièce traitée est supérieur à celui de l'agent réducteur.

Sur la base de la théorie suscitée, plusieurs métaux et substances chimiques peuvent jouer le rôle de l'agent réducteur qui permet d'obtenir le bore atomique nécessaire dans tous les traitements de boruration. Les agents réducteurs les plus utilisés sont :

- **L'aluminium** : La grande affinité de l'aluminium pour l'oxygène rend cet élément apte à réduire le bore qui est présent sous forme d'anhydride borique (B_2O_3) qui se forme après la dissociation thermique du borax. Il faut signaler que tous les bains constitués du borax et d'aluminium sont caractérisés par une viscosité très élevée, ce qui gêne d'une façon très remarquable le processus de boruration jusqu'à le bloquer dans certains cas.
- **le carbure de bore**: Le carbure de bore est l'agent réducteur le plus utilisé dans les traitements de boruration dans des sels fondus à base de borax. La proportion de carbure de bore dans le borax ne doit pas dépasser 40% par masse afin d'éviter que le bain ne devienne pâteux et n'entraîne une boruration non uniforme de la surface traitée.
- **le carbure de silicium**: Le carbure de silicium (SiC) est utilisé lorsqu'on désire produire une couche borurée monophasée (Fe_2B). La réaction de l'anhydride borique résultant de la dissociation thermique montre clairement que la présence d'oxygène en quantité suffisante est nécessaire à la libération de bore atomique (équation 2.1).



La proportion du carbure de silicium dans le bain de boruration est aussi limitée à 35% par masse afin de maintenir sa viscosité à un niveau acceptable.

- **Autres agents réducteurs** : Des agents réducteurs autres que ceux cités dans le paragraphe précédent (le silicium, le calcium-silicium, le ferro-silicium, le ferromanganèse, le carbure de calcium et la poudre de bore) ont également été utilisés par plusieurs chercheurs.

3 – 4 – 2 – 3 – Boruration en milieu solide

3 – 4 – 2 – 3 – 1 – Technique des poudres

En raison de la simplicité et de la propreté des pièces qu'elle produit, la boruration dans des poudres est la technique la plus utilisée actuellement dans la plupart des pays

industrialisés. Cette technique consiste à emballer les pièces à traiter dans des caisses en acier remplies de poudre de boruration, puis à chauffer ces caisses dans des fours à mouffles. Les poudres de boruration ayant généralement une mauvaise conductibilité thermique, des temps relativement importants doivent être impartis à l'homogénéisation de la température.

D'une manière générale, le ciment utilisé dans ce procédé est constitué de trois principaux composants :

- **La source de bore « le donneur »** : la source de bore est composante la plus importante du ciment de boruration. Elle doit être très riche en bore, qui après sa libération va diffuser dans la couche superficielle. Les produits utilisés comme **constituant donneur** doivent se présenter, le plus souvent, sous forme de poudres très fines pour assurer une surface de contact très importante.
- **L'activant** : c'est un composé, le plus souvent halogéné qui, après décomposition à haute température et/ou réaction avec la source de bore, assure le transport de l'élément diffusant sous forme d'halogénure volatil.
- **Le diluant** : c'est un composé inerte chimiquement, ajouté au ciment de boruration pour éviter le frittage de ce dernier. Les composés les plus utilisés comme diluant sont l'alumine Al_2O_3 et le carbure de silicium SiC qui sont caractérisés par une température de fusion très élevée. La proportion du diluant dans le ciment doit être toujours supérieure à 50 %.

En plus de ces trois constituants, dans certains cas, d'autres constituants complémentaires sont ajoutés au ciment.

- **Le modérateur** : composé lorsqu'il est allié à la source de bore, permet de contrôler l'activité du bore dans le ciment.
- **Le réducteur** : composé ajouté en très faible quantité pour éviter l'oxydation des principaux constituants au cours de la formation de la couche de diffusion.

Parmi les poudres de boruration les plus utilisées, nous allons présenter quelques poudres classées en fonction de la source de bore :

a) - Les poudres à base de bore

Le bore cristallin ayant une faible activité de surface, les poudres de bore utilisées sont généralement à base de bore amorphe [08]. Cependant, le coût relativement élevé du bore amorphe, et la condition de n'utiliser le bore amorphe que dans des fours sous vide ou sous une atmosphère inerte d'hydrogène ont entraîné une réduction progressive de sa proportion dans les poudres de boruration de ce type.

L'utilisation du chlorure d'ammonium (NH_4Cl) comme activateur avec du bore amorphe [33 % B (amorphe) + 65 % Al_2O_3 + 2 % NH_4Cl] a conduit à une couche borurée de 186 μm pour un traitement de 8 heures à 900 °C.

b) - Les poudres à base de ferrobore

La boruration dans des poudres à base de ferrobore a connu plus de succès que celle dans des poudres à base de bore amorphe, à cause du coût très favorable. Les couches borurées obtenues dans ces poudres ont souvent une forme dégénérée qui peut affecter leurs propriétés. Cette morphologie particulière a été attribuée à l'action du silicium présent en tant qu'impureté dans le ferrobore (> 1%).

De bons résultats peuvent toutefois être obtenus en contrôlant le degré de pureté du ferrobore ou en y ajoutant de l'alumine (Al_2O_3) et du fluorure de baryum (BaF_2). La poudre la plus connue et la plus efficace à base de ferrobore est constituée de : 66 % Ferrobore + 32 % Al_2O_3 + 2 % BaF_2

c) - Les poudres à base de carbure de bore

Tout en étant suffisamment riche en bore pour servir de source de bore, le carbure de bore présente l'avantage d'être moins cher que le bore amorphe. Les recherches de base de l'institut allemand Hareteri Technische Mitteilung complétées par les travaux de développement industriel accompli par la société Electroschmelzwerk Kempten [09] ont abouti à la mise au point de poudres et de granulés à base de carbure de bore qui ont fait leurs preuves en tant qu'agents de boruration. Ces produits, qui contiennent également un activateur et un diluant, sont commercialisés sous le nom d'Ekabor (exemple : Ekabor 2 est constitué de 5 % B_4C , 5 % KBF_4 et 90 % SiC).

Les procédés de boruration utilisant des poudres à base de carbure de bore n'ont cessé de se développer, et il est possible actuellement de faire le choix de la nature et de la qualité de la couche borurée (biphasée ou monophasée) voulue en jouant sur la composition chimique de la poudre de boruration.

Beaucoup d'études sur l'influence de divers activateurs (des chlorures : de sodium, de potassium et d'ammonium, le trioxyde de bore et le borax) ont montré que tous ces activateurs conduisent à des résultats assez satisfaisants.

3 – 4 – 2 – 3 – 2 – Technique des pâtes

Cette technique est surtout utilisée pour la boruration partielle et pour la boruration de grosses pièces qui sont difficiles à traiter par la technique des poudres. Les pièces à borurer sont couvertes de pâte de boruration puis chauffées par induction ou par effet Joule ou enfournées dans des fours conventionnels.

Dans le cas d'une boruration partielle, les zones à ne pas borurer sont protégées par des dépôts électrolytiques de cuivre ou d'autres produits qui empêchent la diffusion du bore et inhibent la corrosion à haute température.

Les pâtes de boruration se composent de deux constituants :

1. Un constituant solide contenant une source riche en bore (carbure de bore, ferrobore, bore amorphe), un activateur (cryolite ou fluoroborates) et un diluant inerte (alumine ou carbure de silicium).
2. Un liant liquide de nature organique (méthyle cellulose ou nitrocellulose dissoute dans l'acétate de butyle).

3 – 4 – 2 – 3 – Autres procédés de boruration

D'autres procédés de boruration différents de ceux déjà décrits précédemment sont également utilisés pour réaliser des couches borurées sur des aciers ou d'autres substrats. Parmi ces procédés on peut citer :

- ❑ Boruration par déposition physique en phase vapeur (P.V.D.)
- ❑ Boruration par déposition chimique en phase vapeur (C.V.D.)
- ❑ Projection de borures par torche plasma
- ❑ Boruration par bombardement ionique.

3 – 4 – 4 – Etude du système binaire Fe-B

Pour une bonne compréhension des composés qui peuvent se produire lors d'un traitement de boruration, nous allons étudier le diagramme d'équilibre Fer-Bore. La figure 3.6 [10,11] présente le diagramme d'équilibre du système binaire Fe-B.

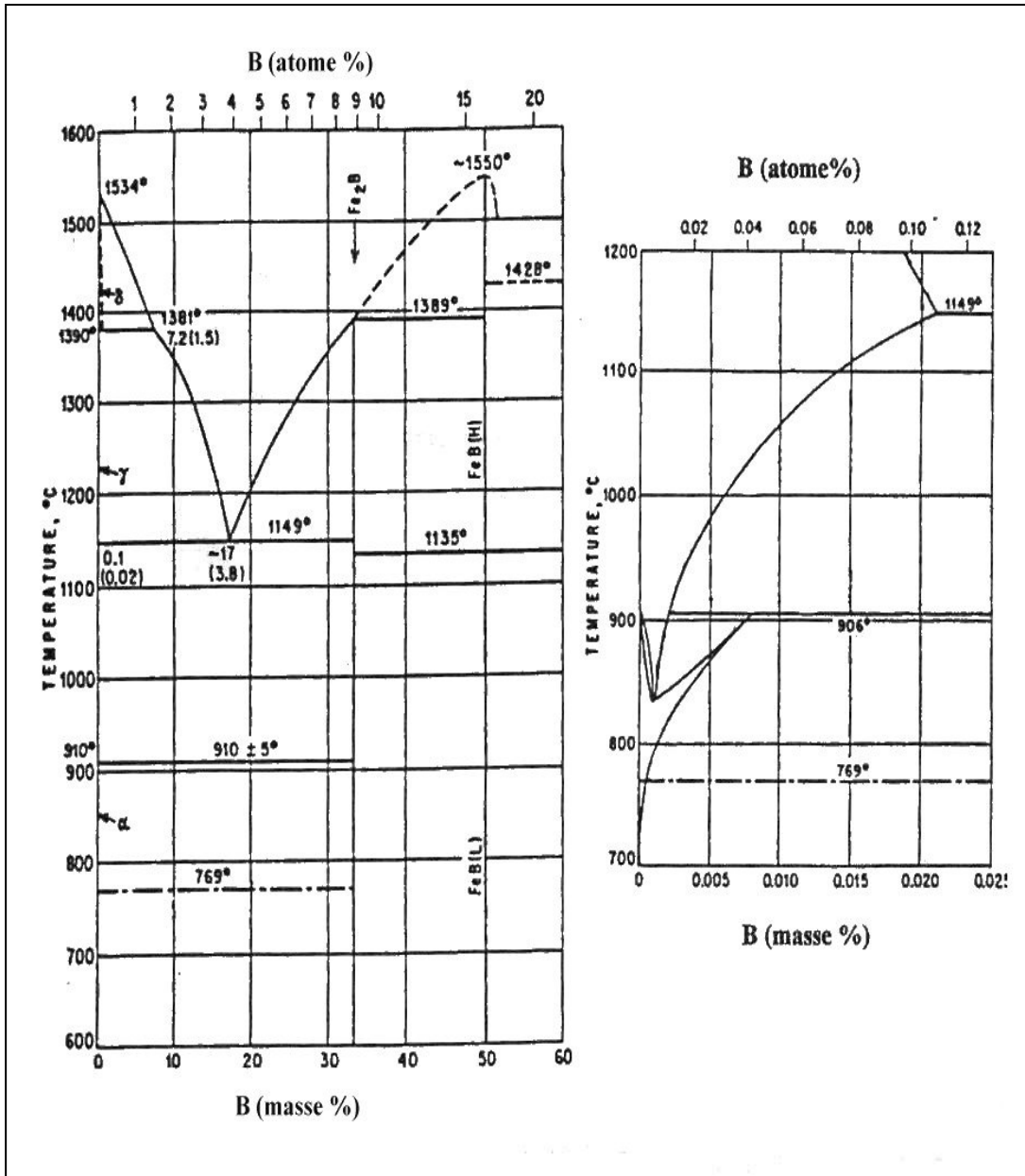


Figure 3.6: Diagramme d'équilibre du système binaire Fe-B [10,11]

D'après la figure 3.6, on peut constater qu'au delà des limites de solubilité du bore dans le fer, le bore et le fer forment ensemble les borures Fe_2B et FeB :

Le borure Fe_2B : C'est un composé chimique formé entre le fer et le bore pour une concentration atomique en bore de 33,33 %. Ce même borure Fe_2B forme avec le fer un eutectique à 1149 °C .

Le borure FeB : Ce composé chimique correspond à une concentration atomique en bore de 50 %. Ce deuxième borure FeB n'est stable que sur une gamme de composition chimique extrêmement étroite (Figure 3.1).

3 – 4 – 5 – Les principales caractéristiques des borures de fer

Les couches borurées sont connues pour leurs propriétés mécaniques et chimiques particulières :

- La dureté des couches borurées est de l'ordre de 1800 HV pour Fe₂B et 2100 HV pour FeB et elle se maintient même à des températures très élevées.
- Les propriétés tribologiques des couches borurées sont très bonne. La boruration est utilisée pour l'amélioration de la tenue à l'usure abrasive et est considérée comme un traitement concurrent aux autres revêtements utilisés pour leurs applications tribologiques tels que TiC, TiN,....
- Les couches borurées présentent une grande résistance au phénomène d'endommagement du type usure adhésive. Le coefficient de frottement, dans les conditions de frottement mixte est $\mu = 0,1 - 0,15$ pour frottement sur acier ou sur alumine [12].
- Dans le domaine nucléaire, ces couches présentent un intérêt important lié aux propriétés neutroniques du bore. Donc ces couches peuvent être utilisées comme absorbant sous forme massive [12].
- Les couches borurées ont, d'une manière générale, une stabilité chimique très remarquable ce qui les laisse très envisageables dans les différents milieux agressifs. Dans beaucoup de travaux, les couches borurées ont montés une bonne résistance à l'attaque par la plupart des acides et des bases (HCl, H₂SO₄, H₃PO₄, NaOH, KOH,...).
- A cause de la grande différence entre les coefficients de dilatation des couches borurées et de l'acier, lors du refroidissement après boruration, il apparaît des contraintes internes très intenses qui peuvent conduire à des fissures à la surface borurée.
- La rugosité des couches borurées est de l'ordre de 2 à 4 μm pour les surfaces polies et de 4 à 6 μm pour les surfaces rectifiées.

3 – 4 – 6 – Applications industrielles de la boruration

Généralement, la boruration est utilisée chaque fois que l'on doit faire face à des problèmes sévères d'usure, particulièrement d'usure abrasive, ou à des problèmes de corrosion dans des milieux acides ou basiques ou dans des métaux fondus.

Le tableau 3.1 présente quelques exemples d'utilisation des pièces borurées dans l'industrie.

Tableau 3.1 : Quelques exemples d'utilisation industrielle des pièces borurées [13].

Branche de l'industrie	Applications
<u>Construction mécanique</u>	Mandrins, tambours, disques de freins, lamelles d'embrayage Buses à vapeur surchauffée Glissières, douilles de guidage, plaques-filières, plaques d'appui Pignons coniques, bagues de paliers Pistons de pompe Poulies conductrices Poinçons d'emboutissage, outils d'estampage, canons de perçage Matrices pour travaux à chaud et à froid Moules Rouleaux marqueurs, rouleaux transporteurs Herses, socs de charrue
<u>Industrie automobile</u>	Engrenages, culbuteurs, soupapes pignons
<u>Industrie du bâtiment</u>	Eléments de transport et d'utilisation du béton Moule à briques de construction
<u>Industrie chimique</u>	Corps, moteurs et chemises de pompes Bacs destinés à contenir de la cryolite, du zinc ou de l'aluminium fondus Conduites d'alimentation en zinc fondu Moules ou filières à céramique
<u>Industries textile et plastique</u>	Buses, plaques de buses, guide-fils, tubes Molettes de coupe, vis de boudineuses, cylindres

Références Bibliographiques du Chapitre 3

- [01] Bazille P., « **La Boruration** », Revue de Mécanique, Matériaux et Electricité, Volume 336, 1977, pp. 26-32.
- [02] Chatterjee-Fischer R., « **Technologie des couches borurées à multiples composants à propriétés spéciales** », Traitement Thermique, Volume 169, 1982, pp. 41-47.
- [03] Nogtev N. N., Ragozin Yu. N., “**Electrolytic boriding in boric anhydride**”, Metal Science and Heat Treatment of metals, 1962, pp. 523.
- [04] Lyakhovich L.S., Kosachevskii L.N., Voroshnin L. G., Turov Yu. V., Krukovich M. G., Vasil'ev L. A., “**Low-Temperature boriding**”, Metal Science and Heat Treatment, Volume 16, 1974, pp. 158-159.
- [05] Ornig H., Schaaber O., “**Observation of surface boriding of steel**”, Harterei-Technische Mittellungen, Volume 17, (3), pp. 131-140.
- [06] Allaoui Omar, « **Boruration sans électrolyse des aciers dans des sels fondus et caractérisation des couches borurées obtenues** », Mémoire de Magister, 1995, ENP d'Alger.
- [07] Lyakhovich L.S., Kosachevskii L.N., Dolmanov F.V., Krukovich M.G., “**Liquid process of chemical heat treatment without electrolysis**”, Metal Science and Heat Treatment, Volume 14, 1972, pp. 156-157.
- [08] Matuschka A. G. V., “**Boronizing**”, Hayden and Son Inc., Philadelphia, 1980, ISBN 85501 640X.
- [09] Fichtl W., Trausner N., Graf Von Matuschka A., “**Boronizing with Ekabor**”, 1988, Documentation E.S.K.
- [10] Busby P. E., Warga M. E., Wells C., “**Diffusion and solubility of boron in iron and steel**”, Journal of Metals, 1953, 1463-1468.
- [11] McBride C. C., Spretnak J. W., Rudolph S., “**A study of the Fe-Fe₂B system**”, Transactions of the ASM, Volume 46, 1987, pp. 499-524.
- [12] Sinha A. K., **Boriding**, “Surface hardening of steel”, Metals Handbook, Vol. 5, 10th edition, 1990, Surface Cleaning, Finishing and coating, pp. 437-447.
- [13] Bazille P., **La Boruration**, Les traitements thermiques superficiels de diffusion, influence sur les propriétés mécaniques, 12 et 13 Juin 1975, Journées de Printemps du GAMI, Lyon, France.

Chapitre 4 :
Technique expérimentale

4 – 1 – Introduction

Puisque les endommagements de la majorité des composants sont originaires de la surface ou la zone sous-jacente à la surface, l'ingénierie de surface pourrait jouer un rôle important pour fournir la modification de surface. Et puisque les traitements de surface (la cémentation, la nitruration, la boruration,...) sont souvent utilisés pour modifier les propriétés surface, nous allons exposer dans ce chapitre le traitement de surface de boruration qui a été appliqué aux échantillons avant de les tester dans les conditions de sollicitations en contact roulant.

Ce chapitre va comprendre aussi tout les moyens et les procédures expérimentaux qui ont été suivi durant de ce travail. Cela englobe les matériaux utilisés, les conditions des traitements de surface, les moyens utilisés pour caractériser les couches obtenues en surface, les conditions opératoires des essais d'usure,...

4 – 2 – La boruration

4 – 2 – 1 – Boruration des échantillons

L'objectif principal des traitements de surface est d'améliorer les propriétés mécaniques des surfaces actives des pièces travaillant dans des conditions très sévères. Donc, généralement souhaitable de choisir un matériau bon marché (le plus souvent des aciers au carbone) pour minimiser le coût.

Le contact est réalisée entre une bille en acier de haute qualité fabriquées 100 Cr6 de 12.7 mm de diamètre et un disque en acier doux de 37 mm de diamètre et 3 mm d'épaisseur ces disques sont découpés à partir des tôles commerciale

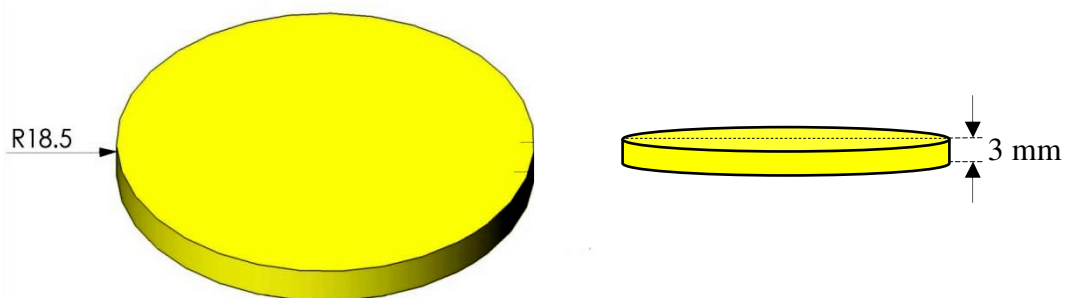


Figure 4.1 : La forme et les dimensions de l'échantillon.

4 – 2 – 1 – 1 – Préparation des échantillons avant boruration

Juste avant boruration, tous les échantillons à traiter subissent un polissage avec du papier abrasif en carbure de silicium jusqu'à une granulométrie 1000. Cette préparation de surface avant boruration est utilisée pour éliminer toute contamination de surface et permet d'obtenir une boruration homogène à travers toute la surface de l'échantillon.

4 – 2 – 1 – 2 – Traitement de boruration

La poudre de boruration utilisée pour le traitement des échantillons de ce travail est une poudre constituée essentiellement de fluoroborate sodium (NaBF_4), de carbure de bore (B_4C) et de carbure de silicium (SiC).

Les trois constituants du ciment de boruration sont pris dans le mélange avec les proportions suivantes :

- ❖ B_4C : 5 %.
- ❖ NaBF_4 : 5 %.
- ❖ SiC : 90 %.

La caisse dans laquelle la boruration des échantillons est effectuée est constituée d'un creuset cylindrique en acier inoxydable avec une capacité de 300ml. Les échantillons sont placés dans le creuset de façon à permettre un contact intime entre ces derniers et la poudre de boruration.

Le creuset est bien fermé avec un couvercle en acier inox adapté à cette opération pour éliminer tout échappement des gaz du creuset pendant les traitements de boruration. Une couche assez épaisse d'argile ou de plâtre est ajoutée sur le couvercle pour assurer une bonne étanchéité.

Avant l'introduction des échantillons dans le four, le creuset est chauffé sur une plaque chauffante pour sécher la couche d'argile.

Les échantillons à borurer doivent être placés dans le creuset d'une façon qu'ils soient entièrement entourés d'une couche assez épaisse du ciment de boruration. Cette disposition est adoptée pour assurer suffisamment d'élément diffusant autour de tous les échantillons, ce qui va nous permettre d'obtenir une couche de boruration homogène ayant une épaisseur régulière à travers toutes les surfaces des échantillons traités (Figure 4.2).

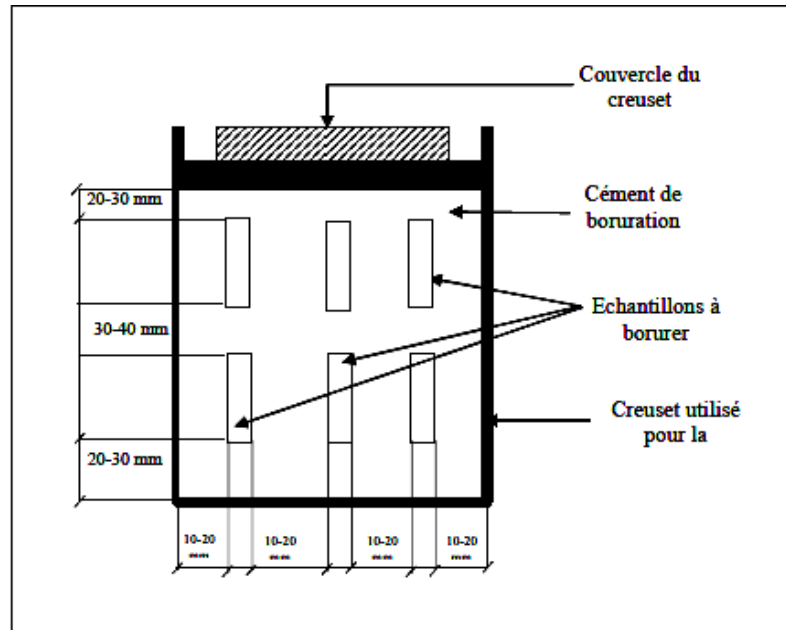


Figure 4.2 : Disposition des échantillons dans le ciment à l'intérieur du creuset avant introduction dans le four.

La température minimale de boruration prise dans ce travail est 800 °C, et ce pour être parfaitement assuré que la diffusion des atomes de bore dans l'acier s'effectue dans la phase γ et non dans le domaine α .

La température maximale de boruration a été limitée à 1050 °C afin de demeurer toujours en dessous de la température eutectique Fe-Fe₂B qui se trouve à 1149 °C d'après le diagramme d'équilibre Fe-B (Figure 3.1).

Pour l'étude de la fatigue, des échantillons en acier XC ont été borurés pour une durée de 5 heures à une température de 900 °C. Ce traitement permet généralement d'obtenir une couche borurée ayant une épaisseur de l'ordre de 150 μm . Une telle épaisseur est très suffisante pour réaliser les essais de fatigue pour de longues durées.

Après boruration, les échantillons sont laissés se refroidir à l'air calme, tout en conservant le creuset fermé. Après refroidissement les échantillons sont tirés du creuset et nettoyés. Il faut signaler que le nettoyage des échantillons n'a présenté aucune difficulté.



Figure 4.3 : Photo d'échantillon (acier doux) après la boruration.

4 – 2 – 2 – Caractérisation chimique et microstructurale des échantillons borurés

4 – 2 – 2 – 1 – Microscope Optique

Après boruration, les échantillons sont tronçonnés dans les deux sens (transversal et longitudinal), de telle sorte que les sections exposées permettent de contrôler l'épaisseur de la couche borurée formée dans toutes les directions. Un enrobage à chaud avec une résine assez dure est utilisé pour faciliter la préparation métallographique. Les échantillons enrobés sont en suite polis avec du papier en carbure de silicium jusqu'à la granulométrie 1200, puis polis sur un tissu en velours avec la pâte diamantée jusqu'à une granulométrie de 1 μm . A l'aide d'un microscope optique, les borures FeB et Fe₂B peuvent être identifiés et distingués l'un de l'autre, FeB à une coloration légèrement plus foncée que Fe₂B.

L'utilisation du Nital à 4% comme réactif d'attaque permet une nette distinction entre la couche borurée et le substrat.

Toutes les observations métallographiques effectuées dans ce travail ont été faites à l'aide d'un microscope optique équipé d'un dispositif permettant la prise de photos.

4 – 2 – 2 – 2 – Mesure de l'épaisseur des couches borurées

La forme aciculaire des couches borurées formées sur les aciers traités a rendu difficile l'estimation exacte de la mesure de leur épaisseur. Pour dépasser ce problème, on applique la méthode proposée par Kunst [01], Cette méthode consiste à mesurer sur un microscope optique ou à balayage les longueurs des deux aiguilles les plus profondes et celles des deux aiguilles les moins profondes et de prendre la longueur moyenne de ces quatre aiguilles comme une valeur moyenne de l'épaisseur de la couche borurée à cet

endroit (Figure 4.4). L'opération est effectuée dans endroits différents, et la valeur moyenne des mesures est considérée comme épaisseur de la couche borurée de L'échantillon.

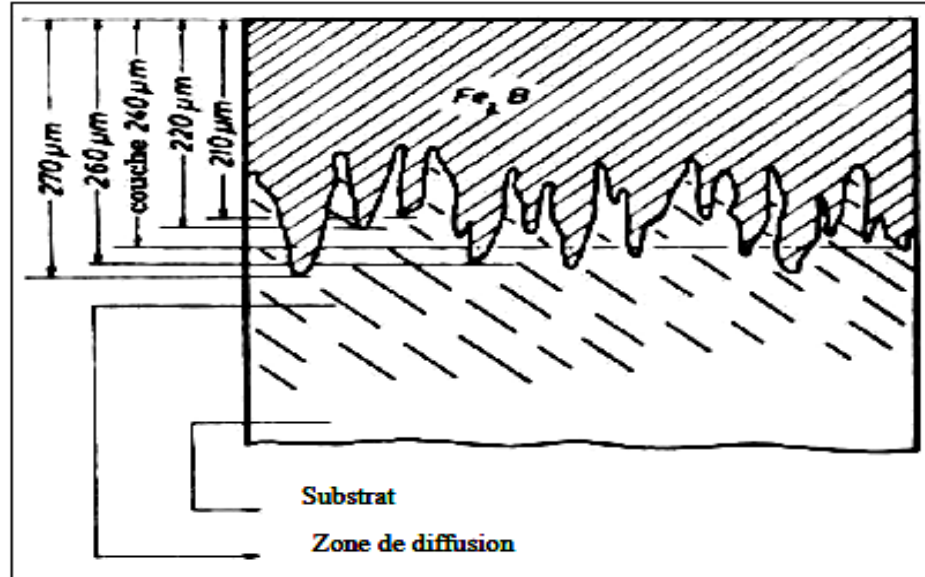


Figure 4.4 : Mesure de l'épaisseur des couches borurées.

4 – 2 – 3 – Caractérisation mécanique des échantillons borurées

4 – 2 – 3 – 1 – Essais de microdureté

La grande fragilité des couches borurées impose l'emploi de faibles charges dans la mesure de la microdureté de ces couches sans les détruire. Les microduretés Vickers mesurées dans ce travail ont été effectuées en utilisant des charges comprises entre 10 et 50 g pour les couches borurées et les zones qui leur sont sous-jacentes et une charge de 1 kg pour le substrat.

Le microduromètre utilisé est du type VH2 de la marque Mutotoyu qui permet de lire directement la valeur de microdureté sur un écran LCD. La charge maximale appliquée peut atteindre jusqu'à 2000 g.

4 – 3 – Appareillage et procédure expérimentale

4 – 3 – 1 – Appareillage

On a vu dans l'étude bibliographique qu'il existe différentes catégories de bancs d'essais pour étudier le phénomène de la fatigue de contact. On peut citer :

- disque / disque : (bi-disques) ou bien multi-disques
- bille / bille : multi-billes
- bille / cylindre
- bille / disque

Notre choix s'est orienté vers le contact bille sur disque. Une caractéristique importante de notre banc d'essais, est la possibilité d'avoir éliminée le glissement.

Pour cette raison on a conçu un disque moteur en acier : 42CD4 illustré dans la (Figure 4.5) avec une forme géométrique dont son but est d'éliminer le spin de billes W_z (roulement pure) dans l'équation de mouvement suivant :

$$W_z = W_o (R + r \cos \theta_o) \cdot \left[\tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_o}{2}\right) \right] - W_i (R - r \cos \theta_i) \cdot \left[\tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_i}{2}\right) \right] \quad (4.1)$$

notre disque moteur est avec un choix d'angles $(\theta_i, \theta_o) = (0^\circ, 88^\circ, 85^\circ)$

- W_o : la vitesse angulaire du point o.
- W_i : la vitesse angulaire de la point i .
- R : $D/2$ = rayon de l'orbite de la bille.
- r : $d/2$ = le rayon de la bille : 6.35mm.
- θ_i : l'angle intérieure de la cône.
- θ_o : l'angle extérieure de la cône.

Afin d'améliorer la durée de vie de cette pièce nous avons ajoutée une gorge profond selon l'équation de Lundberg et Palmegren :

$$L = A \cdot [1/\tau_o]^{c/e} \cdot [1/v_o]^{1/e} \cdot [Z_o]^{h/e} \quad (4.2)$$

Avec : $A = 1$; $e = 1.11$; $c/e = 9.3$; $h = 2.33$

Et

- τ_o : la contrainte de cisaillement orthogonale maximale.
- V_o : le volume de la matière soumise a la contrainte τ_o .
- Z_o : la profondeur de la contrainte τ_o .

Pour des conditions idéales le facteur A a été pris égal à l'unité. En réalité ce facteur dépend de beaucoup paramètres tels que les traitements thermo-chimiques, de la nature du matériau, de l'état de surface, de la lubrification, et de la géométrie des éléments en contact.

Puisque nous avons utilisée des charges peut atteint de 15 Kg on' applique sur ce disque moteur un traitement de boruration dans les mêmes conditions que les échantillons.

Remarque : après la boruration le volume de la pièce augment de 10% qui doivent pris en compte avant la fabrication de la pièce.

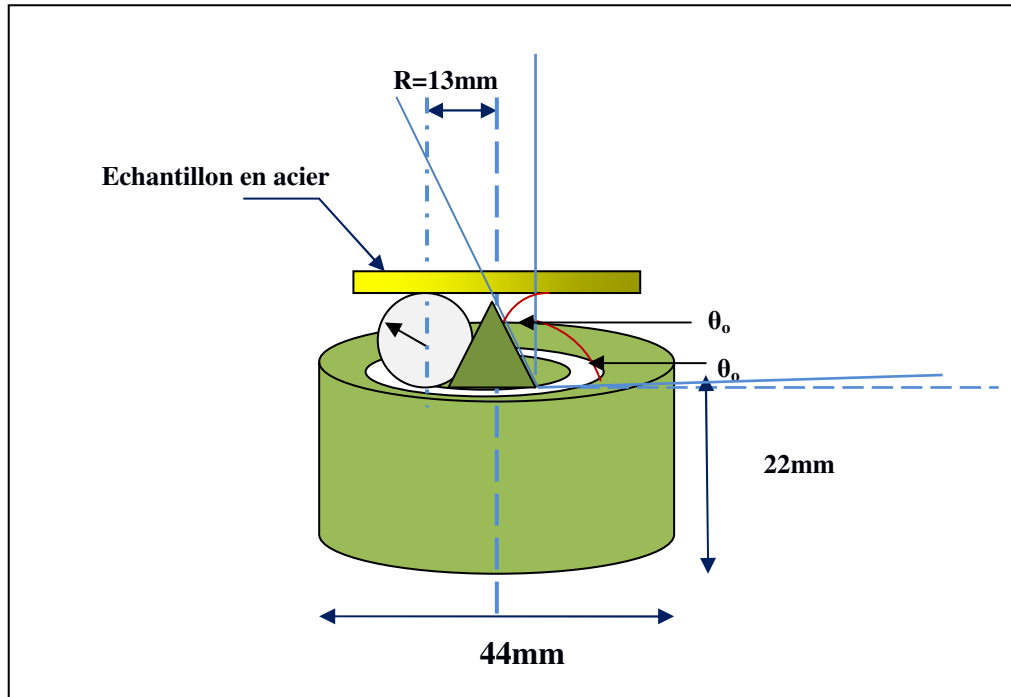


Figure 4.5 : La géométrie du disque moteur en acier CD42.



Figure 4.6 : Photos du disque moteur utilisé dans le test de contact bille/plan.

Dans la pièce les billes logés en acier (100Cr6) sont libres de rouler à la surface du disque (échantillon) et tourner à une vitesse atteinte de 2400 tr/min par un pivot accordée d'un moteur (clutch DOL12L) de vitesse : 1450 tr/min, et de puissance : 400 w.

L'échantillon à tester se maintient par un porte échantillon placé à 45 cm du point de l'application de la charge. La charge de contact est appliquée par un levier avec des contre poids.

L'appareil peut être mis en arrêt pour l'inspection de la surface de contact soit après un nombre de révolutions donné, soit par à un certain niveau de vibration produit par l'endommagement de la piste de contact, le contact entre les billes et l'échantillon à tester est de nature transitoire. Une révolution de chaque bille produit un seul chargement et un seul déchargement et comme il y a cinq billes, chaque point sur la piste du contact est chargé et déchargé cinq fois pour une révolution complète des billes. Sachant que lorsque chaque bille fait un tour complet l'axe moteur aura fait deux tours complets

La durée de test est enregistrée grâce à un chronomètre et le nombre de révolutions est déterminé par un simple calcul.

$$N = V * n * t \quad (4.3)$$

- V : la vitesse de rotation (tours /s) ici est égale à 40 (tr/s)

- n : le nombre des billes ici est égal à 5 (billes)

- t : la durée de l'essai (s)

Dans la littérature nous trouvons que les charges qui sont utilisées à ces conditions de tests se sont des charges variées à des petites charges comme 4 N, 8 N, jusqu'aux grandes charges comme 80 N, 120 N

L'échantillon à tester est placé dans l'appareil du test et soumis à ces différentes charges. Les charges appliquées utilisés dans ce travail sont : [4, 8, 16] N (charges à peu près petites pour les aciers), [24, 40, 56] N (charges moyennes) et [80, 100, 120] N (charges fortes). Et le calcul de l'effort de ces charges sur une seule bille est la suite :

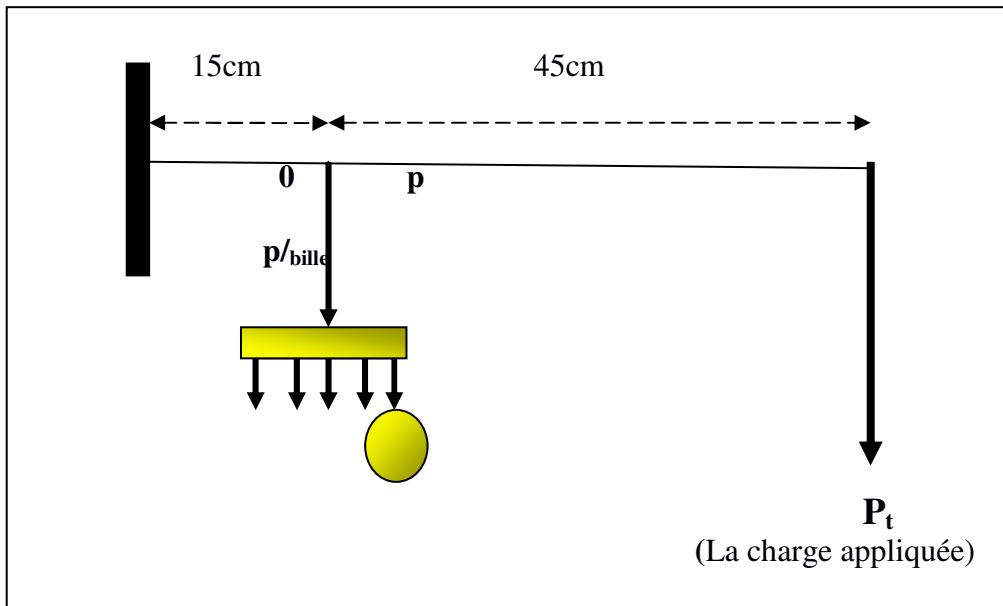


Figure 4.7 : Le système de charge du tribomètre.

$$\sum M_{/0} = 0$$

$$\sum M_{/0} = P \cdot 60 - P_t \cdot 15 = 0 \implies P_t = 4 P$$

Et puisque on a cinq billes donc :

$$p_{/bille} = 4 P / 5$$

P_t (Kg)	0.5	1	2	3	5	7	10	12.5	15
p/bille (N)	4	8	16	24	40	56	80	100	120

Le reste des paramètres a été maintenu constant durant ces essais pour pouvoir comparer les résultats.

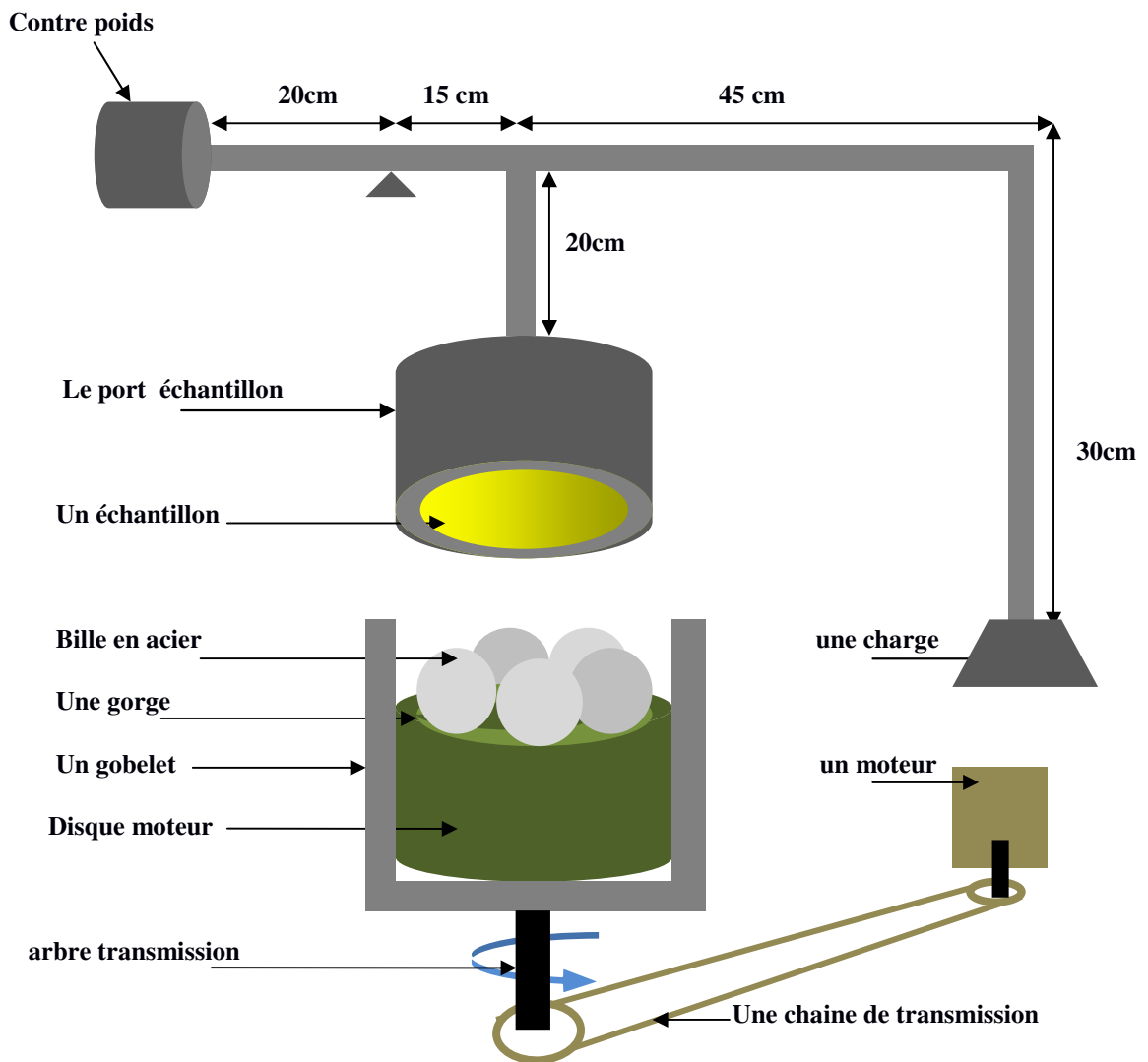


Figure 4.8 : Schéma représentative du banc d'essai.

Les essais ont été effectués dans les conditions suivantes :

- L'atmosphère ambiante avec lubrification minérale.
- Humidité relative autour de 50 %.
- Température moyenne = 25-28 °C.
- Avec une lubrification d'huile minérale.

Le dispositif sur lequel on a effectué les essais d'usure en contact roulant est présenté dans la figure 4.9.



Figure 4.9 : Photos de l'appareil utilisé dans le test de contact bille/plan.

4 – 3 – 1 – Procédure expérimentale

Les matériaux testés sont :

- L'acier doux
- L'acier doux borurée

La procédure est la suivante :

1-Tous les éléments en métal sont bien nettoyés afin de s'assurer qu'il n'y a pas l'usure abrasive.

2-l'échantillon à tester est placé dans le porte échantillon.

3-le disque moteur est mis en place.

4- les cinq billes sont portées dans le disque moteur.

5- la charge de contact est appliquée.

6- le moteur entraînant le pivot est mis en marche et sa vitesse de rotation atteint 2400 tr/min.

Le test peut être interrompu à des intervalles réguliers pour l'inspection de la piste du contact produite sur la surface de l'échantillon et qui dépend de la charge de contact.

Cette inspection est nécessaire afin de détecter les premiers signes d'endommagement de la surface.

Pour une charge donnée et lorsque l'endommagement est visible à l'œil nu (macroscopique), nous considérons que le test est accompli. Après cette étape, on passe à l'examen microscopique.

Références Bibliographique du Chapitre 04

- [01] Kunst H., Schaaber O., "Observations on surface boronization of steel",
Harterei-Technische Mittellungen, Volume 22, 1967, pp. 275-292.

Chapitre 5 :
Résultats & discussions

5 – 1 – Boruration des échantillons

Les traitements de boruration effectués sur les échantillons étudiés (en acier de tôle coupé sous forme de disques plats (Figure 4.1)) avec la poudre de boruration utilisée dans ce travail est qui est constituée de :

- ❖ 90 % SiC ;
- ❖ 5 % B₄C;
- ❖ et 5 % NaBF₄

Ont tous permis d'obtenir des couches borurées sur la surface des aciers traités.

L'utilisation de la microscopie optique, nous a permis d'identifier que la couche borurée formée en surface est constituée des deux borures (Fe₂B + FeB) :

- ❖ **Le borure FeB** : est un composé chimique qui correspond à une concentration atomique en bore de 50 % et il n'est stable que sur une gamme de composition chimique extrêmement étroite. Ce borure est obtenu sur la surface externe des échantillons borurés et avec des proportions généralement très faibles, surtout pour les températures relativement élevées et les durées de maintien prolongées.
- ❖ **Le borure Fe₂B** : qui est un composé chimique formé entre le fer et le bore pour une concentration atomique en bore de 33,33 %. Ce borure se forme à l'intérieur de la surface vers l'interface couche - substrat sous le borure FeB lorsqu'il existe, et il forme avec le fer un eutectique à 1149°C. Dans le cas des couches borurées biphasées, la proportion du borure Fe₂B représente la majeure partie de la couche formée sur les aciers traités.

La proportion du borure FeB dans les couches borurées produites dans ce travail est faible et elle ne se trouve que dans les parties supérieures de la surface formée.

Sur la micrographie de la Figure 5.1, réalisée à l'aide du microscope optique, on peut distinguer facilement la couche borurée formée du reste du substrat par la différence de coloration et de contraste des différentes phases.

La couche borurée obtenue a une forme aciculaire (dentelée) avec une orientation perpendiculaire à la surface des échantillons traités. Cette forme aciculaire est caractéristique aux couches de borures réalisées sur les aciers au carbone [01-02].

L'estimation de l'épaisseur moyenne de la couche de borure formée sur la surface par la méthode proposée par Kunst [03], et qui à mesurer sur un microscope optique ou à balayage les longueurs des deux aiguilles les plus profondes et celles des deux aiguilles les moins profondes et de prendre la longueur moyenne de ces quatre aiguilles comme une valeur moyenne de l'épaisseur de la couche borurée à cet endroit.

La valeur moyenne de l'épaisseur de la couche de borures obtenue sur l'acier au carbone utilisé dans ce travail est comprise entre 100 et 150 μm .

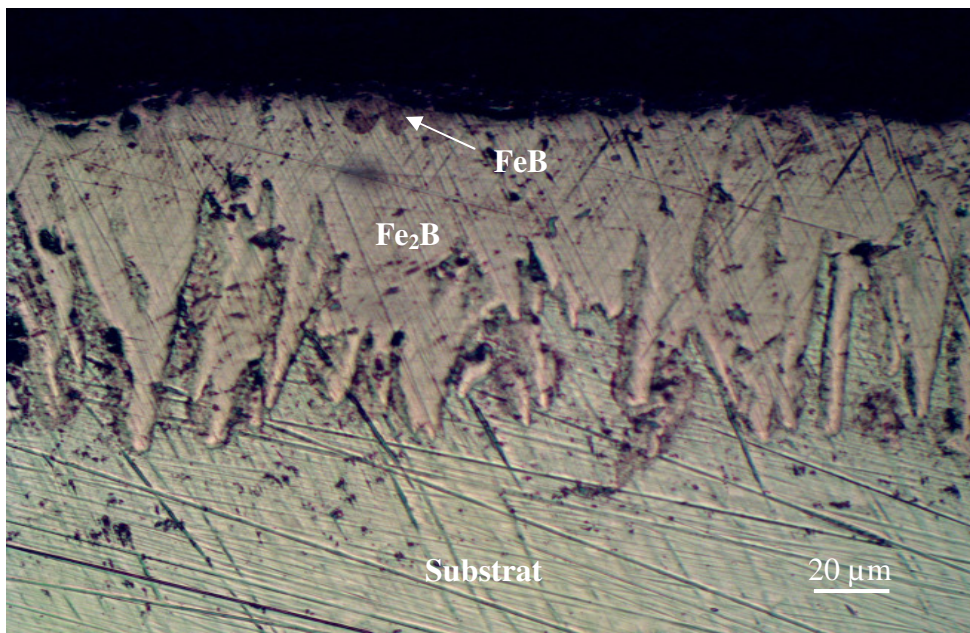


Figure 5.1 : Couche des borures formés sur l'acier boruré à 900 °C pendant 4 heures.

Pour la confirmation de la nature des borures formés en surface des échantillons traités, nous avons complété notre étude par la réalisation de diffraction des rayons X sur la surface traitée.

L'analyse des diffractogrammes des Rayons X « DRX » obtenus à partir des échantillons borurés a montré et a confirmé la présence des deux phases Fe_2B et FeB , avec une prédominance de la phase Fe_2B .

Un exemple des diffractogrammes obtenus sur les échantillons borurés est présenté dans la figure 5.2.

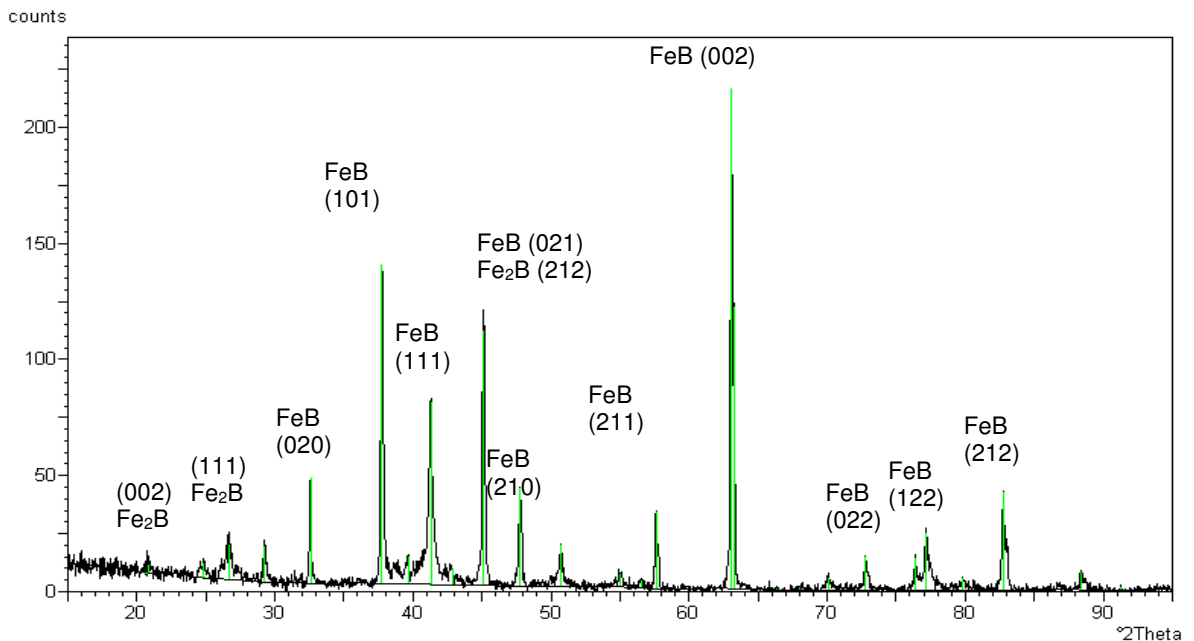


Figure 5.2 : Spectres de diffraction des rayons X de l'acier doux boruré.

Sur la figure 5.2, on constate clairement que les pics représentatifs des différents plans cristallographiques des deux phases Fe_2B et FeB sont présents dans la couche de borures formée après boruration.

5 – 2 – Microduretés des couches borurées

Vu que le traitement de boruration conduit à des zones différentes à partir de la surface vers le cours de l'acier traité. Les microduretés mesurées sur les échantillons borurés varient énormément avec l'emplacement où la microdureté a été mesurée, ce qui nous a conduit à diviser l'échantillon en quatre différentes zones (le borure FeB , le borure Fe_2B , la zone sous-jacente au borure Fe_2B et enfin le substrat).

Les mesures de microdureté ont été effectuées dans les différentes zones des échantillons borurés (la couche borurée, la zone sous-jacente à la couche borurée et le substrat).

Les mesures de microdureté des phases ont été prises dans la section transversale des échantillons.

Les microduretés obtenues pour les différentes zones des échantillons borurés sont données dans le tableau 5.1.

Tableau 5.1. : Valeurs de microdureté obtenue dans les différentes zones de l'acier après boruration.

Zone	Valeur de la microdureté (HV)
La surface de l'échantillon (FeB)	2120
Le borure Fe ₂ B	1572
La zone sous-jacente à Fe ₂ B	520
Le substrat	181

5 – 3 – Essais de la fatigue de roulement

L'objectif de cette étude est la compréhension du phénomène de détérioration de la surface des couches borurées réalisées sur l'acier, lorsqu'elles sont soumises aux conditions de contact roulant.

Les tests expérimentaux effectués dans des conditions définies préalablement nous ont fourni deux types de résultats :

1. Le premier type des résultats sont sous forme des micrographies obtenues pendant et après l'exécution des tests à l'aide d'un microscope optique. Les micrographies obtenues fournissent des informations au sujet du phénomène de l'endommagement.

2. Le second type concerne le nombre de cycles de chargement à la fatigue pour une contrainte de contact donnée (la durée de vie).

5 – 3 – 1 – Discussion des résultats sur la base de l'examen microscopique

Dans le cas de contact roulant, il est généralement admissible que le point de départ de l'endommagement se trouve au-dessous de la surface parce que la contrainte de cisaillement maximale se produit au-dessous de la surface de contact (voir chapitre 2). Par conséquent, cet endroit représente l'emplacement éventuel pour l'initiation des fissures par fatigue.

Les concentrations des contraintes en dessous de la surface de contact sont souvent aux endroits de faiblesses du matériau ou des inclusions, et qui sont souvent l'origine de l'endommagement. Mais seulement ceux qui se trouvent dans la région de la contrainte de cisaillement maximale sont les plus responsables de la fissuration.

Une zone de faiblesse (inclusion) dans la région de la contrainte de cisaillement maximale peut amorcer des fissures par fatigue. Les fissures ainsi formées sont parallèles à la surface de contact, et avec le mouvement répétitif de la charge roulante sur cette surface, ces fissures se propagent et peuvent émerger à la surface (Figure 5.3).

Ce fait peut se produire dans plusieurs régions à l'intérieur du matériau, et par conséquent un volume de matériau sera entouré par ces fissures. A un stade avancé, une particule de la surface sera perdue par écaillage.

Vu que, la couche de borures formée en surface de l'acier a une forme aciculaire dentelée au niveau de l'interface couche/substrat, la possibilité d'avoir une décohésion entre l'acier et la couche formée.

Pour une bonne compréhension des phénomènes liés à la formation et à la propagation des fissures dans le cas d'un contact roulant, nous allons essayer de schématiser les étapes correspondantes à la formation et à la propagation des fissures lors de la fatigue par un contact roulant.

La figure 5.3 schématise les étapes correspondantes à la formation et à la propagation des fissures lors de la fatigue par un contact de roulement.

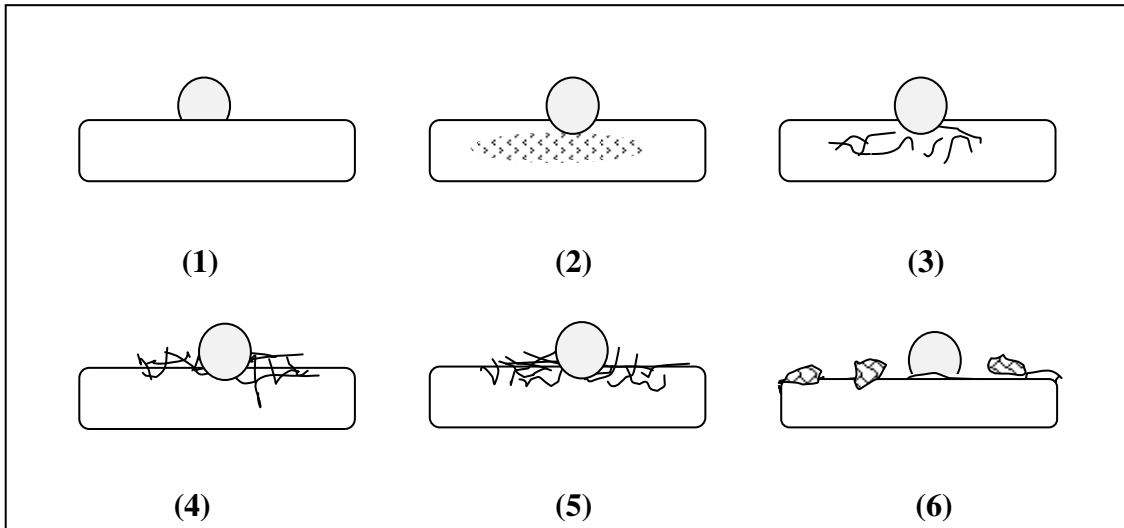


Figure 5.3 : Modèle standard pour la fatigue de la surface.

Etape (1) : surface soumise à une charge cyclique.

Etape (2) : nucléation des fissures au-dessous de la surface.

Etape (3) : agrandissement des fissures.

Etape (4) : coalescence des fissures.

Etape (5) : intersection des fissures avec la surface.

Etape (6) : formation des particules (écaillés).

L'observation en microscope optique des traces et des empreintes laissées sur la surface des échantillons testés ont montré l'apparition de certains écaillages.

Les figures 5.4 et 5.5 représentent des agrandissements réalisés sur la piste de roulement de l'acier boruré après un faible nombre de cycles (pas d'endommagement) et après un grand nombre de cycles (surface endommagée) respectivement.

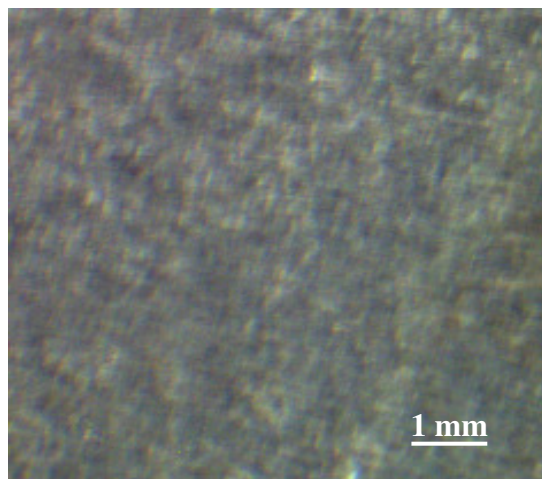


Figure 5.4 : Piste de roulement avant endommagement (G : 10X).

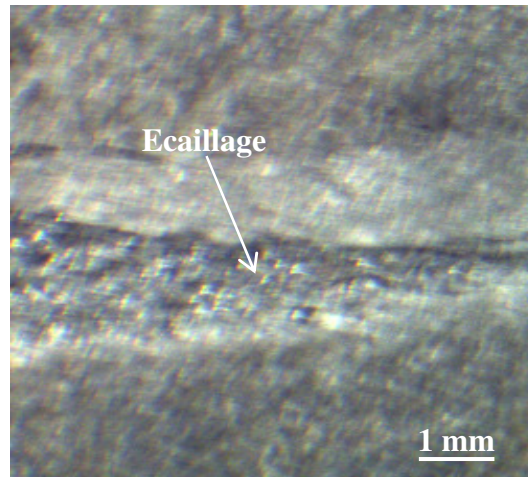


Figure 5.5 : Piste de roulement après endommagement (G : 10X).
Ecaillage obtenu sur la piste de roulement de la surface de l'acier borurée soumis à une charge de 100 N.

L'écaillage obtenu sur la surface de l'échantillon testé est similaire à celui obtenu par Zhang et al. [04] qui ont trouvé qu'un revêtement CrC-NiCr déposé sur des cermets par projection thermique se détériore par écaillage lorsqu'il est soumis sous sollicitations de contact de roulement.

Les agrandissements produits de la piste de roulement dans le cas d'acier borurée montrent clairement qu'avant le test la piste n'est pas endommagée (figure IV.8). après les tests et à un stade avancé cet endommagement est sous forme des écailles (figure 5.6), Cette observation microscopique est identique à celle trouvée pour le revêtement de cermet soumis à les mêmes conditions de contact roulant.

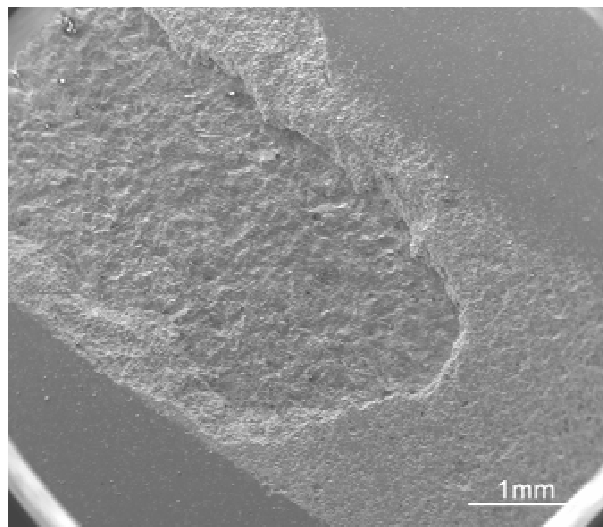


Figure 5.6 : Endommagement de la surface CrC-NiCr cermet par le phénomène d'écaillage [15].

Parmi les mécanismes de fatigue trouvés dans la littérature, il y'a le phénomène de la délamination.

Ce mécanisme de fatigue est lié à deux paramètres :

- 1- la profondeur des contraintes exercées
- 2- l'épaisseur de la couche traitée

Si la profondeur de la contrainte de cisaillement orthogonale est localisée dans le substrat on parle cependant de la délamination interfaciale

Si la profondeur de la contrainte de cisaillement orthogonale est localisée dans la couche borurée donc la délamination est dans la couche

Avec le phénomène de l'écaillage on peut constater un réseau des fissures surfaciques observé par le microscope optique sur la surface de l'acier boruré soumis à une charge de 120 N comme illustrée dans la figure

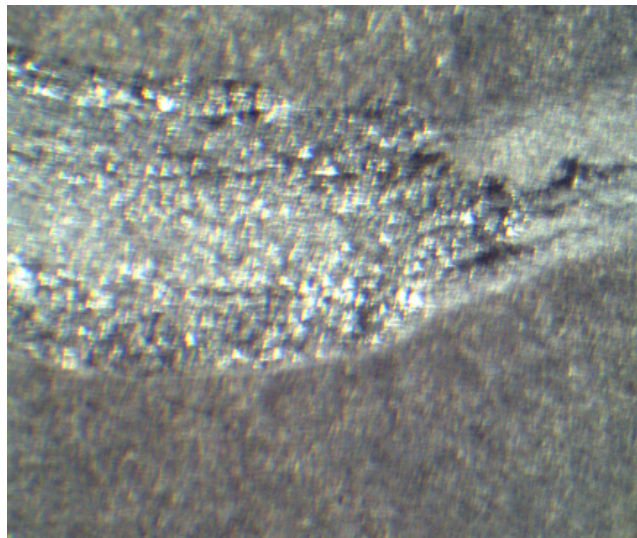


Figure VI.11 : piste de roulement produit sur la surface de l'acier boruré soumis à une charge de 120 N, (agrandissement : 10X).

Si on compare notre observation microscopique à celles de la littérature on trouve de grandes similarités.

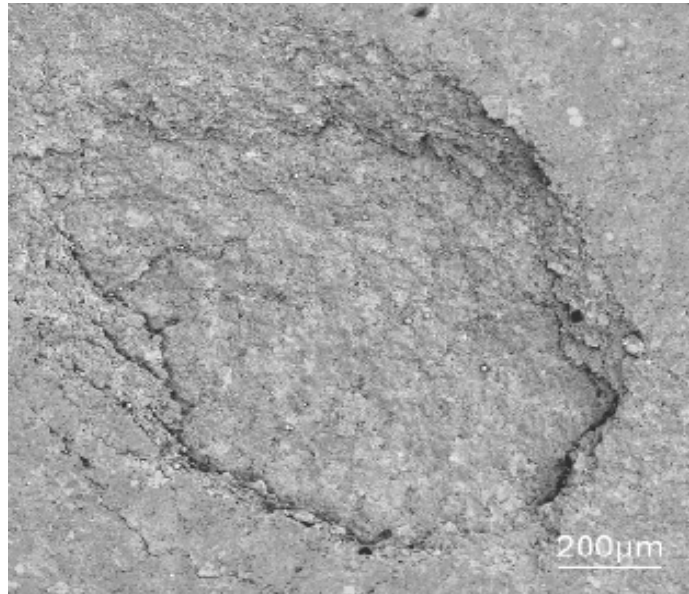


Figure VI.12 : endommagement de la surface CrC-NiCr cermet par le phénomène de la délamination [15].

D'après les calculs effectués dans le chapitre II, on a trouvé que la profondeur de la contrainte de cisaillement orthogonale entre 20 μm et 40 μm est localisée dans la couche borurée 100 μm et 150 μm donc la délamination est dans la couche

Ce mécanisme est similaire à l'écaillage et La contrainte de cisaillement joue un rôle important dans le démarrage de la délamination.

VI.3.2 Résultats et discussion des tests mécaniques

En générale les courbes de Wöhler nous donnent une idée sur l'évolution du phénomène de rupture de la surface. On peut distinguer trois domaines principaux:

- Le domaine oligocyclique :varie de 10^4 à 10^5
 - Le domaine d'endurance limitée :Dans ce domaine la plus part des structures sont utilisés compris entre 10^5 et 10^7 .
 - Le domaine d'endurance illimitée: la zone de sécurité à la quelle une variation de pente au delà de 10^7

Les résultats des tests de la résistance à la fatigue pour les deux acier boruré et non borurée sont présentés sous forme de courbes S-N ou S représente la contrainte de

contact appliquée et N représente le nombre des cycles à la rupture .

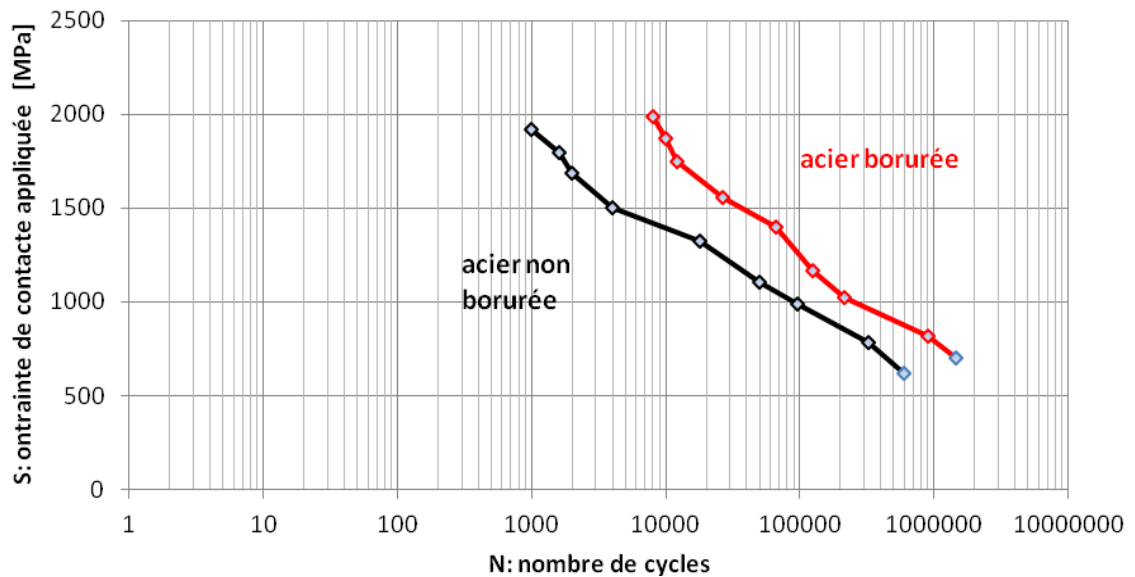


Figure VI.13: Les courbes S-N pour l'acier boruré et non boruré sous contact roulant.

Les résultats obtenus dans les deux cas montrent que la courbes S-N pour l'acier boruré est décalé vers le haut et vers la droite :

Vers le haut : par exemple pour 50000 cycle son a une contrainte de contact égale à : 1100 MPa pour l'acier non boruré et 1450 MPa pour l'acier boruré

Vers la droite : pour une contrainte de contact 1000 MPa correspond à un nombre de cycles égale à 100000 cycles pour l'acier non boruré et à 200000 cycles pour l'acier boruré.

Ce décalage de la courbe pour l'acier boruré par rapport à l'acier non boruré est une preuve que le traitement de la boruration augmente la durée de vie des aciers sous contact roulant.

Conclusion

Le but principal de cette partie de notre travail est la compréhension du mécanisme de rupture des couches borurées lorsqu'elles sont soumises aux conditions de contact roulant.

Les observations tirées de cette étude sont :

- Les mécanismes principaux de la fatigue des couches borurées au contact roulant sont :

1- l'écaillage

2- la délamination

Le mode de fatigue est associé à la microstructure de la couche et la profondeur des contraintes de cisaillement orthogonale qui est le responsable de la fatigue de contact roulant

- Les courbes S-N obtenus montrent que la boruration augmente la durée de vie des aciers doux.

A la fin, nous déduisons que la boruration possède une potentialité d'utilisation dans les applications du contact roulant.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'objectif de cette étude était la détermination du mode de fatigue prédominant des couches borurées soumis aux contraintes de contact roulant, ainsi que la compréhension et la détermination des mécanismes qui régissent le phénomène de fatigue.

Les essais de contact roulant ont été effectués sur deux genre d'acier –boruré et –non boruré, ces essais nous ont permis d'obtenir des résultats concernant la résistance mécanique présentés sous forme de courbes S-N ainsi que des résultats sous forme de micrographies prises à l'aide d'un microscope optique durant et après l'exécution des tests .

A partir de ces résultats nous avons pu tirer les conclusions suivantes

- 1- Les micrographies ont révélé un endommagement par écaillage et délamination dans la couche (Délamination within the coating) , dans la couche borurée. dans un stade initial cet endommagement est sous forme de micro écailles à l'intérieure de la piste de roulement,. Sous l'effet de la charge cyclique ces micro écailles devient des écailles et les fissures dans la couche propagent et atteint la surface et produit la délamination .
- 2- Les courbes S-N pour les deux aciers boruré et non boruré ont dévoilé une évolution rapide de l'endommagement des surfaces dans le cas d'acier non boruré par rapport à l'acier boruré

Par ce modeste travail nous estimons avoir contribué à la compréhension du phénomène de fatigue de surface de ces couches borurées et nous pouvons affirmer que les couches borurées peuvent être utilisés sans risque dans les applications du contact roulant.