

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté :

Science de l'ingénieur

Département :

Métallurgie et génie des matériaux

Domaine :

METALLURGIE

Filière :

METALLURGIE

Spécialité :

Génie des surfaces métalliques.

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

**TRAITEMENT DE NETRURATION SUR LES ACIERS DE
CONSTRUCTION**

Présenté par : **GACEM ABDELLAH KHALIL**

Encadrant : **RAMDANE .N**

Université : BADJI MOKHTAR ANNABA

Jury de Soutenance :

Mm RAMDANE.N		UBMA	Encadreur
MERAKEB.N	Professeur	UBMA	Jury
Mm.DEKHIL.L	Docteur	UBMA	Jury

Année Universitaire : 2019/2020

DEDICACES

Ce travail est pour satisfaire la plus merveilleuse femme du monde qui m'a toujours poussé et encouragé pour faire de moi une étoile dans le ciel ... ma mère que Dieu nous la garde.

A mes sœurs pour tous ses efforts, pour le bien de moi à qui je souhaite une longue et joyeuse vie.

A mes cousins, A toute la famille

A mes amies proches, à mes camarades de la promotion 2019 /2020 a tous mes enseignants qui m'ont aidé et orienté durant mes années d'études surtout (M. RAMDANE.N) a tout ceux que j'estime, et à tous ceux qui me connaissent.

Remerciements

Nous remercions Dieu qui nous a donné le pouvoir et nous aidé à terminer ce modeste travail.

Pour cette occasion, nous tenons à exprimer nos plus vifs remerciements à tous ceux qui nous ont aidé de loin ou de près à la réalisation et à la mise au point de ce travail et notre formation tout au long du cycle, en particulier Mme. L'encadreur : RAMDANE N. pour ses critiques bienveillantes, ses précieux conseils, sa confiance, sa patience, sa disponibilité et son soutien indéfectible. Nos remerciements vont ensuite à les membres du jury d'avoir accepté de participer à cette soutenance, d'évaluer ce travail et de contribuer à son amélioration. A tous les étudiants et les professeurs du département de génie métallurgie. à ma famille ; A tous nous disons merci !

SOMMAIRE :

Introduction Générale	1
Chapitre I : Aperçu sur les aciers de construction	2
I.1. Introduction	2
I.2. Classification des aciers de construction	2
I.2.1. Aciers de construction d'usage général	2
I.2.2. Aciers de construction ordinaires	3
I.2.3. Aciers de construction de qualité	3
I.2.4. Aciers de construction faiblement alliés	4
I.2.5. Aciers de construction pour cémentation	5
I.2.6. Aciers pour construction soudées	7
I.2.7. Aciers d'amélioration	7
I.3. Eléments alliages des aciers de construction	9
Chapitre II : Traitement thermochimique de nitruration	11
II.1. Introduction	11
II.2. Traitement thermochimique de nitruration	11
II.2.1. Principe générale du traitement de nitruration	12
II.2.2. Couche de combinaison ou couche blanche	14
II.2.2.1. Le nitrure γ' (Fe ₄ N)	14
II.2.2.2. Le nitrure ϵ (Fe ₂₋₃ N)	15
II.2.3. Couche de diffusion	16
II.2.4. Mécanisme de durcissement de la couche de diffusion	16
II.2.5. Traitement thermique préalables	17
II.2.5.1. Trempe et revenu	17

II.2.5.2. Etat recuit	18
II.2.6. Procède de nitruration	18
II.2.6.1. Nitru carburation en Baines de selles	18
II.2.6.2. Nitruration gazeux	20
II.2.6.3. Nitruration ionique	21
II.2.7. Aciers pour nitruration	22
II.2.8. Propriétés des pièce nitru re	23
II.2.8.1. Tenue à chaud	23
II.2.8.2. Comportement en fatigue	24
Chapitre III : La Tribologie	25
III.1. Introduction	25
III.2. Les surface	25
III.3. Le concept de troisième corps	28
III.4. Mécanisme de dégradation de surface	28
III.5. Comportement tribologique des oxydes de fer	29
III.6. Le frottement	30
III.6.1. Définition de frottement	30
III.6.2. Les lois du frottement	31
III.6.3. Les mécanismes du frottement	32
III.6.3.1. La formation et la rupture des jonctions d'adhésion aux lieux de contact	33
III.6.3.2. La déformation elastoplastique des aspérités	33
III.6.3.3. Le déplacement de matière par labourage	34
III.6.4. Contacts non lubrifiés	34
III.6.5. Contacts lubrifiés	35

III.7. Amélioration de la résistances a l'abrasion par traitement de nitruration	35
III.7.1. Influence de la microstructure sur le comportement en frottement	35
III.7.2. Essai point / disque	36
III.7.3. Essai machine à galets amsler	36
III.7.4. Résistance a la corrosion	37
III.7.4.1. Définition	37
III.7.4.2. Suivi de l'évaluation potentielle en fonction du temps	37
III.7.4.3. Cinétique électrochimique	38
III.7.4.3.1. Résistance de polarisation	38
III.7.4.3.2. Droites de TAFEL	39
III.7.5. Comportement de couche nitrurées	42
III.8.Lusure	43
III.8.1. Les 4 principe d'usure	43
III.8.1.1. L'usure par abrasion	43
III.8.1.2. L'usure par adhésion	43
III.8.1.3. L'usure par fatigue	45
III.8.1.4. L'usure par réaction tribochimique	46
III.9. La corrosion	47
III.9.1. Les différents types de corrosion	47
III.9.1.1. Corrosion chimique	47
III.9.1.1.1. Corrosion biochimique	47
III.9.1.1.2. Corrosion électrochimique	47
III.9.1.2. Corrosion uniforme	48
III.9.1.3. Corrosion localise	48
III.9.1.4. Corrosion galvanique	49
III.9.1.5. Corrosion par piqure	50
III.9.1.6. Corrosion érosion	50

III.9.1.7. Corrosion caverneuse	51
III.9.1.8. Corrosion inter granulaire	51
III.9.1.9. Corrosion sélective	51
III.9.1.10. Corrosion sous contrainte	51
III.9.1.11. Corrosion par fatigue	52

Chapitre IV : Travaux de nitruration sur les aciers de construction53

IV.1. Etude de travaux sur la nitruration des aciers de construction53

IV.1.1. Etude N°1.....53

IV.1.1.1 Échantillons de l'étude.....53

IV.1.1.2. Conditions du traitement53

IV.1.1.3. Résultats obtenues54

IV.1.2. Etude N° 258

IV.1.2.1. Échantillons de l'étude.....58

IV.1.2.2 Conditions du traitement de nitruration par PLASMA.....58

IV.1.2.3. Résultats obtenues59

V. CONCLUSION63

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau I.1 : Composition chimique et propriétés mécaniques des aciers de construction mécaniques au carbone et faiblement alliés 5

Tableau I.2 : Propriétés mécaniques des aciers de construction mécaniques pour cémentation.....6

Tableau I.3 : Propriétés mécaniques des aciers d'amélioration9

Tableau III.1 : Synoptique général d'un système tribologique.....22

Tableau III.2 : valeurs typiques du coefficient de frottement32

Tableau IV.1 : Composition chimique de l'acier AISI 102053

Tableau IV.2 : Epaisseurs des couches formées en fonction de température, de temps et de proportions des gaz utilisés55

Tableau IV.3 : Conditions de nitruration par plasma59

LISTES DES FIGURES :

Figure I.1 : Exemples de l'influence des atomes de soluté sur la limite d'élasticité de la ferrite	10
Figure II.1 : Couche nitrurée	12
Figure II.2 : Diagramme d'équilibre Fer-azote	13
Figure II.3 : Diagramme ternaire Fer- Azote- Carbone à 570°C.....	13
Figure II.4 : Relation entre le diagramme d'équilibre Fe-N et la courbe concentration pénétration	14
Figure II.5 : structures cristallographiques du (a) nitrure γ' (Fe_4N), (b) nitrure ϵ (Fe_{2-3}N)	15
Figure II.6 : Evolution des teneurs en azote, carbone et oxygène dans la couche de combinaison après nitrocarburation en bain de sels	15
Figure II.7 : Mécanismes de la nitruration gazeuse (d'après Klumper)	16
Figure II.8 : Schéma de principe d'un four de nitruration ionique	17
Figure II.9 : Évolution de la dureté d'une couche nitrurée après maintien à diverses températures	20
Figure II .10 : Essai en fatigue en flexion rotative Eprouvette en Acier C45 normalisé. Après traitement TENIFER la limite d'endurance s'est trouvée améliorée d'environ 50 %	21
Figure III.1 : Schéma déviation relative par rapport à une surface idéal	23
Figure III.2 : Vue théorique en coupe d'une surface	24
Figure III.3 : Circuit tribologique pour un contact élémentaire	25
Figure III.4 : Nécessité d'une force F pour produire le mouvement	27
Figure III.5 : Évaluation du coefficient d'usure par un essai à crayon sur disque (a), un essai à cylindres croisés (b) ou un essai a mouvement alternatif (c)	28
Figure III.6 : Surface apparente et surface réelle de contact	28
Figure III.7 : Contact à l'état statique	29

Figure III.8 : Phénomènes influençant le coefficient de frottement	29
Figure. III.9 : Usure par glissement	31
Figure. III.10 : Usure par roulement	32
Figure III.11 : Perte de poids aux différents paliers de charge et seuil de grippage associés aux configurations testées	33
Figure III.12 : suivi de potentiel	35
Figure III.13 : Courbes élémentaires anodique et cathodique et courbe globale de polarisation (échelle linéaire)	36
Figure III.14 : Courbe $\log I = f(E)$ et droites de Tafel	37
Figure III.15 : Représentation schématique d'un système de corrosion (échelle semi-log)	38
Figure III.16 : l'usure abrasive	40
Figure III.17 : L'usure par adhésion	41
Figure III.18 : L'usure par fatigue	42
Figure III.19 : L'usure par réaction tribochimique	43
Figure III.20 : corrosion chimique	45
Figure III.21 : corrosion uniforme	45
Figure III.22 : Corrosion Localisée	46
Figure III.23 : corrosion galvanique	46
Figure III.24 : Corrosion par piqure.....	47
Figure III.25 : Représentation schématique du phénomène de corrosion-érosion	47
Figure III .26 : Corrosion intergranulaire	48
Figure III.27 : corrosion sous contrainte	49

Figure IV1 : Schéma montrant le montage du procédé de nitrocarburation par plasma	54
Figure IV.2 : Micrographies de l'acier AISI 1020 nitrocarburé à 570°C pendant 1 heure.....	54
Figure IV.3 : Spectres de diffraction de l'acier AISI 1020 nitrocarburé à 570°C pendant différents temps et pour le mélange 49%N ₂ +49%H ₂ +2%CO ₂	55
Figure IV.4 : Spectres de diffraction de l'acier AISI 1020 nitrocarburé pendant 4h à différentes températures et pour le mélange 49%N ₂ +49%H ₂ +2%CO ₂ ...	56
Figure IV.5 : Spectres de diffraction de l'acier AISI 1020 nitrocarburé à 570°C pendant 4h et pour différents mélanges de gaz.....	56.
Figure IV.6 : Profils de microdureté à différentes conditions et pour le mélange 49%N ₂ +49%H ₂ +2%CO ₂	57
Figure IV.7 : Evolution du coefficient de traitement en fonction des conditions de traitement.....	58
Figure IV.8 : Microstructures des coupes transversales de l'acier 32CrMoV13 nitruré par plasma. (A) 8 h dans le mélange A, (B) 2 h dans le mélange B, (C) 2 h dans le mélange C, (D) 2 h dans le mélange D.....	59
Figure IV.9 : Spectres de diffraction de l'acier 32CrMoV13 nitruré par plasma pendant 8h en fonction des mélanges de gaz utilisés.	60
Figure IV.10 : Profils de microdureté de l'acier 32CrMoV13 nitruré à différents temps de traitement dans le mélange de gaz (80%N ₂ + 20%H ₂)	61
Figure IV.11 : Profils de microdureté de l'acier 32CrMoV13 nitruré pendant 8h, dans différents mélanges de gaz.....	61

INTRODUCTION GENERALE

On donne le nom d'acier de construction aux aciers employés dans la fabrication des éléments de machine, dans la construction des ouvrages d'art et des édifices. Ils doivent posséder en plus des bonnes propriétés mécaniques, de bonnes propriétés technologiques telles que se prêter bien au formage (laminage ; forgeage, emboutissage, etc.), à l'usinage, au soudage...

Ces aciers peuvent être des aciers au carbone et alliés. Le plus souvent, la teneur en carbone ne dépasse pas 0,5 à 0,6%. Ils sont caractérisés par une pénétration de trempe élevée et une faible aptitude aux déformations et aux tapures de trempe.

Les propriétés intéressantes de ces aciers leur font d'excellents matériaux pour les applications de traitement thermo-chimique de nitruration.

L'objectif de notre travail est de réaliser une étude bibliographique sur les aciers de construction et le traitement thermo-chimique de nitruration en plus du comportement à l'usure et à la corrosion des matériaux. Cette partie bibliographique est suivie par la présentation de quelques travaux sur la nitruration des aciers de construction.

CHAPITRE I : APERCU SUR LES ACIERS DE CONSTRUCTION

I. Les aciers de construction :

I.1. introduction :

On donne le nom d'acier de construction aux aciers employés dans la fabrication des éléments de machine, dans la construction des ouvrages d'art et des édifices. Les aciers de construction peuvent être des aciers au carbone et alliés. Le plus souvent, la teneur en carbone de ce groupe d'aciers ne dépasse pas 0,5 à 0,6%.

Ces aciers sont destinés à subir des traitements. Ils peuvent présenter des aptitudes particulières quant à leur mise en œuvre (usinabilité notamment).

Des éléments d'alliage (Cr, Ni, Mo et parfois Si) apportent surtout la trempabilité et, éventuellement, des aptitudes particulières au durcissement. Cette catégorie d'aciers comporte de nombreuses nuances prévues pour des usages spécifiques (boulonnerie, chaînes, ressorts, roulements, soupapes...) ainsi que des variantes destinées à des mises en œuvre particulières (aciers de décolletage, aciers à usinabilité améliorée, aciers prétraités...)

Parmi les classes de ces aciers de construction, on trouve les aciers faiblement alliés, les aciers de cémentation et les aciers d'amélioration. [1]

I.2. Classification des aciers de construction : [2]

I.2.1 Aciers de construction d'usage général (aciers au carbone) :

Les aciers de construction au carbone forment deux classes, celles des aciers courants (ordinaires) et de qualité. D'après les conditions et le degré de désoxydation on distingue trois types de nuances.

- **Les aciers calmés :**

Ils sont obtenus par désoxygénation complète du métal dans le four puis dans une Poche de coulée. Ces aciers contiennent une quantité minimale de protoxyde de fer en assurant ainsi une solidification « calme » du métal dans la lingotière, qui s'accompagne de diminution de volume. A la partie supérieure du lingot solidifié, se forme une retassure et une porosité dues au retrait éliminées par chauffage lors du laminage.

CHAPITRE I : APERCU SUR LES ACIERS DE CONSTRUCTION

- **Les aciers effervescents :**

Ce sont des aciers insuffisamment désoxygénés et qui contiennent une quantité non négligeable de FeO. Le métal est dit effervescent à cause des bulles de gaz CO qui se dégagent suite à la réaction de FeO avec le carbone du métal. Le grand nombre de bulles de gaz, empêche la formation d'une retassure. Les aciers effervescents sont moins coûteux car les rebuts de leur fabrication sont réduits au minimum. Ils possèdent une plasticité élevée et se prêtent bien à l'emboutissage à froid.

- **Les aciers semi-calmés :**

Ce sont des aciers intermédiaires entre les aciers calmés et effervescents et trouvent aujourd'hui un emploi toujours plus large.

I.2.2 Aciers de construction ordinaires (aciers courants) :

Ils sont moins purifiés et contiennent donc plus de soufre, de phosphore et certaines autres inclusions non métalliques. Ils sont employés pour des pièces peu importantes tels que les fers marchands, laminés à chaud (poutres, barres, cornières, tôles,...).

Ils sont très employés aussi dans la fabrication des éléments de machines peu importantes (axes, arbres, pignons, doigts de chenilles, bagues, boulons, écrous), les propriétés mécaniques d'un acier ordinaire peuvent être sensiblement améliorées par un traitement thermique (généralement une trempe à l'eau après chauffage).

Les aciers de construction ordinaires, ayant une composition chimique définie et demandent une bonne tenue à l'usure, (axes, poussoirs, vis sans fin, pignons), subissent généralement une cémentation ou cyanuration.

I.2.3 Aciers de constructions de qualité :

Ces aciers ont une composition chimique plus rigoureuse, des teneurs plus faibles en soufre (< 0,04 %) et en phosphore (< 0,035 %).

Les aciers à faible teneur en carbone, donc à faible résistance, à plasticité élevée et à bonne soudabilité, s'emploient pour des pièces peu sollicitées. L'aptitude de ces aciers à l'estampage est d'autant plus faible que leur teneur en carbone est plus élevée. Les aciers de qualité sont utilisés :

CHAPITRE I : APERCU SUR LES ACIERS DE CONSTRUCTION

- Sans traitement thermique.
- Avec le traitement de normalisation.
- Avec un traitement de cémentation lorsque les pièces demandent de faibles charges et une bonne tenue à l'usure (arbres à came, axes, leviers, etc.).

Les aciers à teneur moyenne en carbone (0,3 à 0,5) %, s'emploient après une normalisation, une amélioration et une trempe superficielle pour des pièces très variées dans la construction mécanique (vilebrequins, bielles, pignons, tiges, etc.).

A l'état normalisé, la résistance de ces aciers est plus grande que celle des aciers à bas carbone, alors que la plasticité est plus basse.

A l'état recuit, ces aciers se prêtent bien à l'usinage. L'acier à 0,45 % C est souvent utilisé pour les roues dentées et les arbres.

Les aciers contenant entre 0,6 et 0,85 % C possèdent une résistance et une limite élastique plus grandes et une tenue à la l'usure plus élevée. Ils s'emploient après trempe et revenu, normalisation et revenu, ainsi qu'après trempe superficielle pour la fabrication des ressorts, tiges, rondelles, cylindres de laminaires, etc.

Les aciers au carbone de qualité, contiennent du manganèse (0,7 à 1) %, ce qui permet d'améliorer la résistance en augmentant la pénétration de trempe et de réduire légèrement la plasticité. [2]

I.2.4 Les aciers de constructions faiblement alliés :

Les aciers à faible teneur en carbone et en éléments d'alliages contiennent une quantité accrue de manganèse et de silicium, ainsi qu'en faibles quantités en chrome, nickel, cuivre et certains autres éléments.

Ces aciers laminés à chaud et livrés assez souvent après normalisation ou normalisation et revenu à haute température doivent posséder une limite d'élasticité élevée. Ils s'emploient pour des constructions soudées, des pipelines de pétrole et de gaz...

CHAPITRE I : APERCU SUR LES ACIERS DE CONSTRUCTION

Tableau I.1 : Composition chimique et propriétés mécaniques des aciers de construction mécaniques au carbone et faiblement alliés [3]

NORME		ANALYSE CHIMIQUE							PROPRIETES MECANQUES min.-max.				COMMENTAIRES
DIN	N°	C %	Si %	Mn %	Cr %	Ni %	Mo %	Reste %	HB	R: MPa	R _{0.2} : MPa	A %	
C22 C20 1020	1.0402	0.17 0.24	0.15 0.35	0.30 0.60					150 210	500 700	300 360	22 20	Bonne soudabilité Bonne résistance aux chocs
C35 XC35 1035	1.0501	0.32 0.39	0.15 0.35	0.50 0.80					180 240	600 780	350 430	19 17	Bonne combinaison de propriétés mécaniques
C45 XC42 1045	1.0503	0.42 0.50	0.15 0.35	0.50 0.80					195 270	650 850	400 490	16 14	Limite de rupture élevée Bonne usinabilité Bonne tenue aux chocs
C60 XC60 1060	1.0601	0.57 0.65	0.15 0.35	0.60 0.90					230 305	750 950	460 580	14 11	Limite de rupture élevée Bonne résistance à l'usure
25CrMo4 25CD4 4130	1.7218	0.22 0.29	0.15 0.40	0.50 0.90	0.90 1.20		0.15 0.30		210 350	700 1100	470 700	15 12	Limite de rupture élevée Bonne résistance au fluage Bonne résistance à la fatigue et à l'usure
34CrMo4 35CD4 4135	1.7220	0.30 0.37	0.15 0.40	0.60 0.90	0.90 1.20		0.15 0.30		230 390	750 1200	510 79	14 11	
42CrMo4 42CD4 4140	1.7225	0.38 0.45	0.15 0.40	0.60 0.90	0.90 1.20		0.15 0.30		250 445	800 1300	570 900	13 10	
50CrV4 50CV4 6150	1.8159	0.47 0.55	0.15 0.40	0.70 1.10	0.90 1.20			V:0.10 0.20	285 395	900 1200	700 800	12 10	Haute limite élastique Bonne résistance à l'usure Bonne tenue jusqu'à 300°C
15CrMoV6 15CDV6	1.7734	0.12 0.18	0.20	0.80 1.10	1.25 1.50		0.80 1.00	V:0.20 0.30	305 410	900 1300	550 850	12 10	Haute résistance mécanique et bonne soudabilité
30NiCr11 30NC11 3435	1.5737	0.27 0.34	0.10 0.40	0.35 0.60	0.60 0.90	2.50 3.00			250 360	800 1150	550 780	12 8	Excellent compromis entre haute résistance mécanique et bonne résilience

1.2.5 Les aciers de constructions pour cémentation :

Pour les pièces soumises à la cémentation, on emploie les aciers à bas carbone entre 0,1 et 0,25 %. Dans ce cas, la cémentation suivie de trempe et revenu à basse température confère aux pièces traitées en extrême surface une dureté entre 58 et 62 HRC, et le cœur avec une dureté entre 20 et 40 HRC.

CHAPITRE I : APERCU SUR LES ACIERS DE CONSTRUCTION

Les aciers de constructions pour cémentation doivent avoir au cœur des propriétés mécaniques au élevées, surtout une très haute limite élastique et ils doivent avoir un grain fin par hérité.

Pour les aciers au chrome – nickel, l’addition simultanée de chrome et de nickel augmente de plus la résistance et la ductilité de la couche cémentée.

Les aciers au chrome – nickel sont peu susceptibles de surchauffe en cémentation prolongée et n’ont pas de tendance à la sursaturation en carbone de la couche superficielle. La stabilité élevée de l’austénite sur-fusionnée dans les domaines perlitique et bainitique assure à ce type d’aciers une pénétration de trempe élevée. [2] L’addition de molybdène et/ou du tungstène aux aciers au chrome nickel accroît de plus la stabilité de l’austénite sur-fusionnée et par conséquent la pénétration de trempe. [2]

Tableau I.2 : Propriétés mécaniques des aciers de construction mécaniques pour cémentation. [2]

Nuance DIN	Rm (daN/mm ²)	Dureté (HB)	Applications technologiques
13 Cr 3	50 à 60	141 à 183	Pièces de construction avec exigences extraordinaires, résistance du cœur très élevée, haute résistance à l’usure: vis sans fin, engrenages..
15 CrNi 6	60 à 75	169 à 211	
18 CrNi 8	60 à 80	183 à 225	
15 CrMo 5	60 à 75	169 à 211	Pièces soumises à des efforts élevés de tous genre : roues dentées, engrenages de boîtes de vitesses, arbres à cames.
20 CrMo 5	75	220	
16 MnCr 5	60 à 70	155 à 200	
20 MnCr 5	60 à 75	169 à 211	
18 NiCrMo 6	115 à 150	210	Axes, engrenages, pignons, leviers de direction.

CHAPITRE I : APERCU SUR LES ACIERS DE CONSTRUCTION

I.2.6 Aciers pour constructions soudées :

Comme leur nom l'indique, les aciers pour constructions soudées doivent d'abord avoir une bonne soudabilité. De plus, il est nécessaire qu'ils aient une limite élastique assez élevée et ils ne doivent pas être susceptibles de rupture par fragilité. Ces aciers contiennent en général :

- Une faible teneur en carbone (0,15 à 0,22) % cause des exigences de soudabilité.
- Une teneur relativement élevée en manganèse à cause des exigences de résistance mécanique.
- Eventuellement de faible addition de chrome et de molybdène.

Les aciers pour constructions soudées sont très employés en construction, métalliques soudées et en chaudronnerie, notamment, dans le domaine ferroviaire (wagons, etc.).[2]

I.2.7 Aciers d'amélioration :

On donne ce nom aux aciers de construction utilisés après trempe et revenu à haute température (amélioration). Ces aciers contiennent de 0,3 à 0,5 % de carbone et subissent la trempe à une température comprise entre 820 - 880°C dans l'huile (selon la composition chimique) et le revenu à haute température entre 550 - 650°C.

Les aciers d'amélioration doivent avoir une haute limite d'élasticité apparente et une faible susceptibilité à l'entaille.

Les pièces sollicitées en service par de nombreux cycles de charges alternatives doivent avoir en plus de la limite en fatigue élevée, une marge de ductilité suffisante. D'autre part, les aciers d'amélioration doivent posséder une bonne pénétration de trempe et une faible aptitude à la fragilité de revenu.

- **Aciers alliés au chrome :**

L'addition du chrome de 0,8 à 1,2 % accroît la pénétration de trempe et permet de former un carbure plus dur que la cémentite, ce qui contribue à l'augmentation de la dureté, de la résistance à la rupture et à l'usure, sans accroître la fragilité. Les aciers alliés au chrome peuvent contenir d'autres éléments tels que le bore (0,002 à 0,005) % qui augmente la pénétration de trempe et le vanadium (0,1 à 0,2) % qui renforce les propriétés mécaniques de l'acier.

CHAPITRE I : APERCU SUR LES ACIERS DE CONSTRUCTION

- **Aciers alliés au chrome-manganèse :**

L'addition combinée de chrome (0,9 à 1,2 %) et du manganèse (0,9 à 1,2) % permet d'accroître suffisamment la résistance et la pénétration de trempe. Ces aciers s'emploient pour des pièces de sections variant de 20 à 40 mm. L'addition supplémentaire de titane à l'acier, abaisse son aptitude à la surchauffe.

- **Aciers alliés au chrome-silicium-manganèse :**

Les propriétés mécaniques de ces aciers sont très élevées. La composition chimique moyenne est constituée de :

- 0,2 à 0,3 % C - 0,9 à 1,1 % Cr - 0,8 à 1,1 % Mn - 0,9 à 1,2 % Si.

Les caractéristiques mécaniques des aciers au Cr-Si-Mn après trempe à l'huile (880°C) et revenu (540°C) sont les suivantes :

- R = 1100 N/mm² - Re = 850 N/mm² - A = 10 % - K = 50 J/cm² - Z = 45 %.

- **Aciers alliés au chrome-nickel :**

Ces aciers possèdent une bonne résistance, une bonne ductilité et une grande pénétration de trempe. Ils sont employés pour la fabrication de grosses pièces de formes complexes, sollicitées en service à des chocs et des charges vibratoires.

Le nickel assure la ductilité maximale, et combiné au chrome, ils assurent une pénétration de trempe élevée. Combiné au molybdène, le nickel abaisse sensiblement le seuil de fragilité à froid. [2]

CHAPITRE I : APERCU SUR LES ACIERS DE CONSTRUCTION

Tableau I.3 : Propriétés mécaniques des aciers d'amélioration. [2]

Nuance DIN	R _m (daN/mm ²)	K (J/cm ²)	Applications technologiques
41 Cr 4	80 à 120	5 à 7	Boulonnerie pour matriçage à froid, à chaud. Se prête à la trempe par induction.
50 CrV 4	90 à 130	4 à 5	Essieux et arbres fortement sollicités. Se prête à la trempe par induction.
25 CrMo 4	65 à 105	7 à 10	Pièces d'avions, d'automobiles fortement sollicitées. Vilebrequins, leviers de direction, bielles, arbres.
42 CrMo 4	75 à 130	5 à 8	
30 CrMoV 9	90 à 145	4 à 6	Pièces de grande résistance : engrenages, axes.
24 NiCr 14	75 à 120	8 à 12	Pignons, roues dentées.
35 NiCr 18	110 à 165	4 à 7	Pièces très sollicitées, grande résistance aux chocs.
36 NiCrMo 4	75 à 130	6 à 10	Pièces pour flexion, chocs, torsion alternée : bielles, vilebrequins, arbres de cardans, d'engrenages, fusées d'essieux, leviers.
30 NiCrMo 8	90 à 145	5 à 8	
34 NiCrMo 6	80 à 130	6 à 9	
40 Mn 4	70 à 105	4 à 6	Pièces de faibles sections : boulons, vis, arbres.
37 MnSi 5	70 à 120	3 à 6	Pièces pour haute résistance à l'usure : roues d'engrenages, arbres.

I.3. Eléments d'alliages des aciers de construction :

Les éléments d'alliage principaux des aciers de construction sont le chrome, dont le taux va jusqu'à 1,8%, le nickel de 0,5 à 4,5%, le silicium de 0,5 à 1,2% et le manganèse de 0,8 à 1,8%. Le tungstène, le molybdène, le vanadium et d'autres éléments ne sont pas additionnés à l'état isolé, mais introduits dans l'acier en combinaison avec le chrome. [2]

Les éléments d'alliages augmentent surtout la limite d'élasticité conventionnelle $R_{0.002}$, La striction Z et la résilience K. Il est ainsi parce que les aciers alliés ont une vitesse critique de trempe plus faible et donc une pénétration de trempe plus forte. L'amélioration des caractéristiques mécaniques s'obtiennent également par le fait que

CHAPITRE I : APERCU SUR LES ACIERS DE CONSTRUCTION

de nombreux éléments d'alliages contribuent à l'affinage du grain et au durcissement de la ferrite.

Les éléments d'alliage augmentent la stabilité de la martensite au revenu et ralentissent la coalescence des carbures. C'est la cause d'obtenir la résistance et la dureté requises. Le revenu est appliqué aux aciers alliés à une température plus élevée que celle dans le cas des aciers au carbone. Ceci permet non seulement de supprimer complètement les contraintes de trempe, mais d'obtenir encore une meilleure combinaison de la plasticité et de la ductilité. [1]

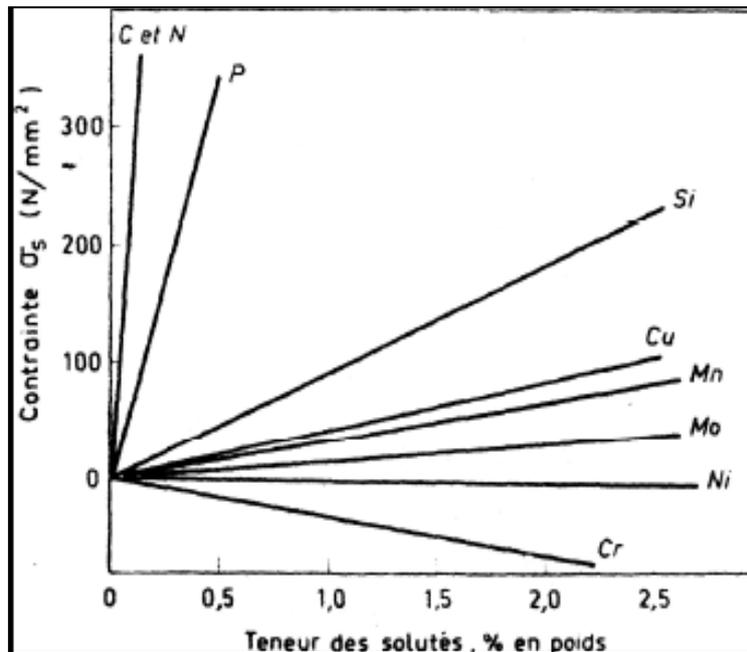


Figure I.1 : Exemples de l'influence des atomes de soluté sur la limite d'élasticité de la ferrite [1].

CHAPITRE 2 : TRAITEMENT THERMOCHIMIQUE DE NITRURATION :

II.1.Introduction :

Les traitements thermochimiques consistent à réaliser un gradient de composition chimique par diffusion le plus souvent d'un métalloïde: C, N, C+N, O. Les traitements les plus connus sont la cémentation, la nitruration et l'oxydation utilisés seuls ou combinés (nitrocarburation, oxynitruration...).

La nitruration est un traitement thermochimique ancien [1], dont l'application industrielle date des années 1950. Elle est surtout utilisée pour améliorer les propriétés mécaniques superficielles des pièces entièrement usinées, en améliorant notamment :

- la résistance à l'usure par augmentation de la dureté superficielle,
- la résistance au grippage par diminution du coefficient de frottement,
- la résistance à la corrosion par modification de la composition chimique superficielle du métal.

L'évolution technologique étant plus exigeante, pour des solutions optimisées en concevant des pièces mécaniques qui sont de plus en plus sollicitées.

La nitruration est un traitement thermochimique qui peut répondre à ces exigences, notamment pour des pièces chargées superficiellement (pistes de roulements, engrenages, cannelures...). Malgré ses qualités évidentes, beaucoup d'industriels la méconnaissent et hésitent à l'utiliser à cause, par exemple, de :

- la durée élevée du traitement pour obtenir des couches profondes,
- la complexité de mise au point des paramètres de traitement,
- la toxicité et le danger des produits employés...

II.2 Traitement thermochimique de nitruration :

Il est bien établi que les couches durcies en surface par les traitements thermochimiques améliorent la tenue en fatigue et la résistance à l'usure et au frottement ainsi que les propriétés de corrosion [2, 3]. Ces couches sont caractérisées par une bonne résistance mécanique et par la présence de contraintes résiduelles de compression, équilibrées par des contraintes de traction d'un niveau très faible dans un cœur moins dur et plus ductile [4, 5].

La nitruration et la nitrocarburation sont les traitements de surface les plus employés pour les pièces en acier ferritique. Ces traitements impliquent une réaction de l'azote et du carbone dans les pièces à des températures de l'ordre de 570°C, en limitant considérablement les distorsions thermiques des grandes pièces comparativement au traitement de cémentation

CHAPITRE 2 : TRAITEMENT THERMOCHIMIQUE DE NITRURATION :

(900°C) qui demeure limité aux pièces de petites dimensions [2, 6]. En pratique les milieux peuvent être gazeux, liquide et plasma.

Le carbone peut être associé à l'azote comme élément réactif et il s'agit alors de nitrocarburation. D'autres éléments peuvent encore intervenir comme le soufre ou l'oxygène agissant sur la cinétique de nitruration et sur la composition des couches [7].

Les nitrurations conduisent dans le cas général à la formation de deux couches distinctes dite de « combinaison » et de « diffusion » qui régissent respectivement les propriétés superficielles (comportement tribologique et résistance à la corrosion) et les caractéristiques mécaniques en sous couche (Figure II-1).

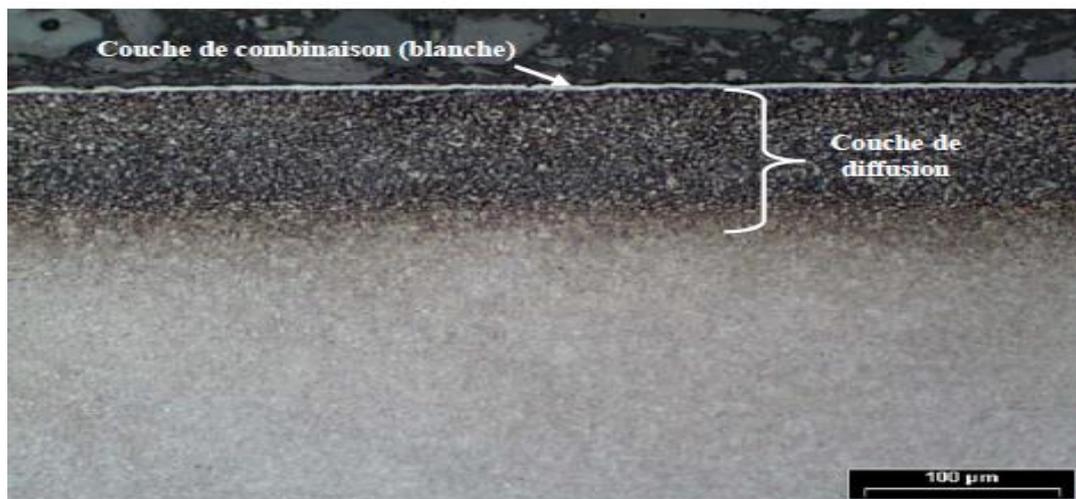


Figure II-1 : Couche nitrurée [11].

II.2.1 Principe général du traitement de nitruration :

Le diagramme d'équilibre Fer-Azote de la figure I.2 montre, aux températures de traitement utilisé entre 450 et 580°C l'existence :

- D'une solution solide α d'azote cubique dans le fer à très faible solubilité en azote.
- Du nitruire γ' de structure cubique à face centrée dans laquelle un atome d'azote occupe le site octaédrique situé au centre de la maille. Ce nitruire est stable dans un domaine de composition qui, à 590°C, s'étend de 19 à 20.2 atomes % d'azote soit 5.5 à 5.75 % en masse. Sa dureté est d'environ 800 HV.
- Du nitruire ϵ de structure hexagonale compacte de type $Fe_{2-3} N$ [34] dont les sites Octaédriques sont occupées par des atomes d'azote variables selon la composition du nitruire. Ce nitruire est stable à partir de 24 atomes % à 570 °C soit, 7.35 % en masse. La limite d'existence du nitruire ϵ correspond à l'apparition du nitruire Fe_2N orthorhombique. Par

CHAPITRE 2 : TRAITEMENT THERMOCHIMIQUE DE NITRURATION :

ailleurs, il se révèle thermiquement instable lorsque sa teneur en azote dépasse 10 % en masse [7].

La figure II.2 : illustre la relation entre la courbe concentration – pénétration de l'azote et le diagramme d'équilibre Fe -N.

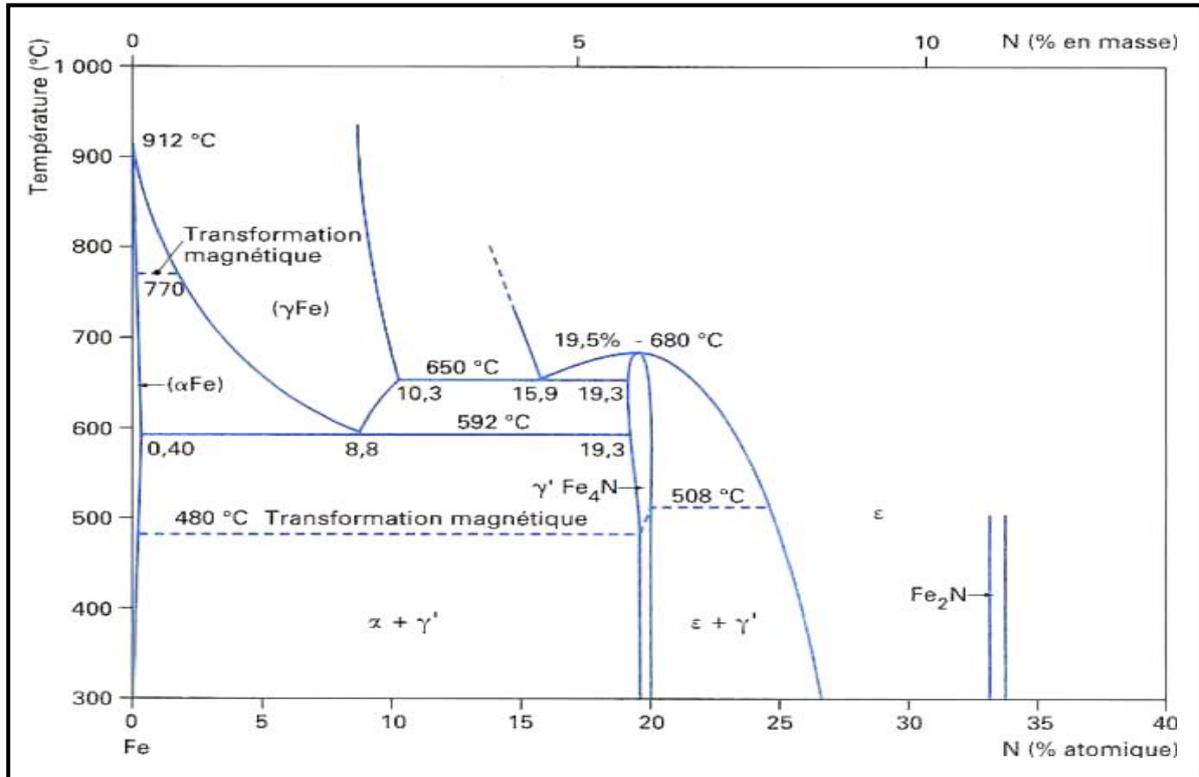


Figure II.2 : Diagramme d'équilibre Fer-azote [11].

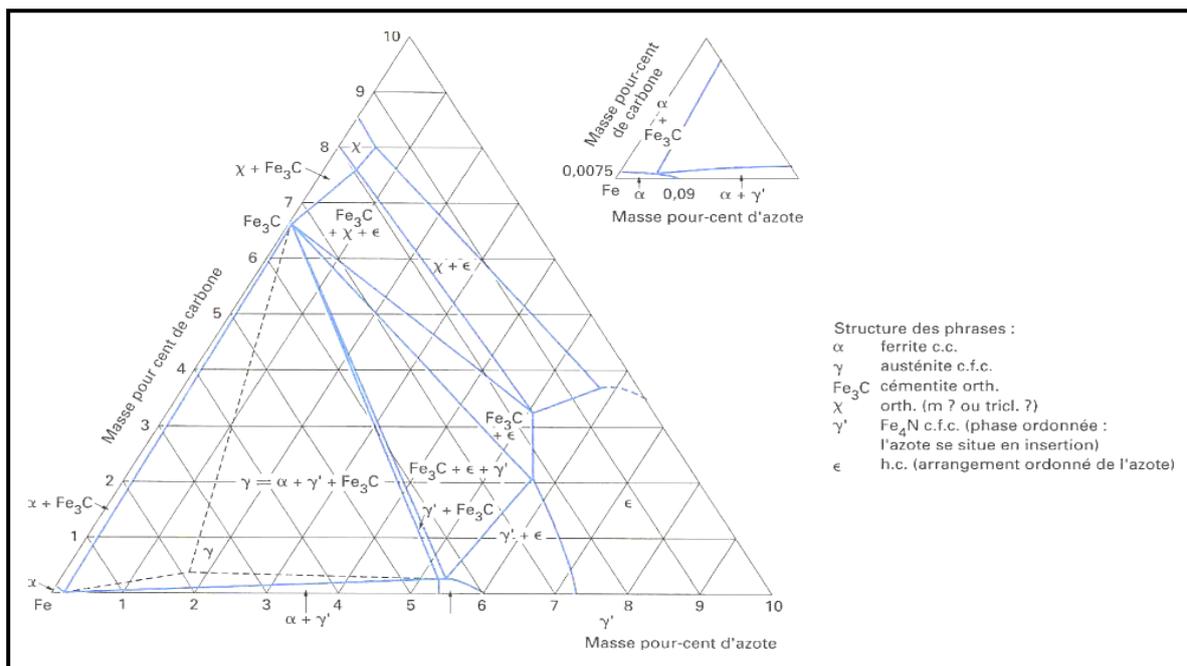


Figure II.3 : Diagramme ternaire Fer- Azote- Carbone à 570°C [11].

CHAPITRE 2 : TRAITEMENT THERMOCHIMIQUE DE NITRURATION :

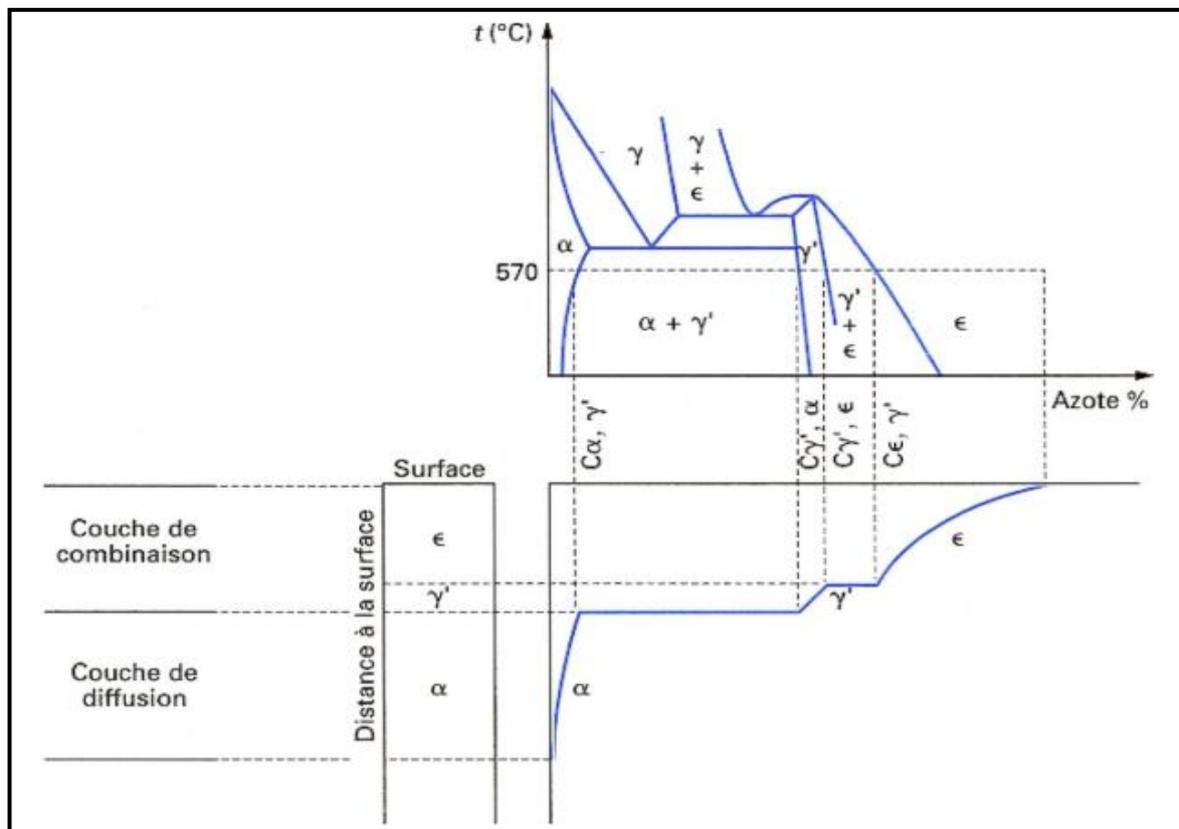


Figure II.4 : Relation entre le diagramme d'équilibre Fe-N et la courbe concentration pénétration [11].

II.2.2 Couche de combinaison ou couche blanche :

La couche de combinaison doit son nom au fait que l'azote est sous forme de nitrures, donc combiné. Elle est composée essentiellement des nitrures de fer ϵ (Fe_{2-3}N) et γ' (Fe_4N).

II.2.2.1 Le nitrures γ' (Fe_4N) :

Ce nitrures possède une symétrie cubique (Fig. I.5.a.) isomorphe de la pérovskite CaTiO_3 et il n'est stable qu'en dessous de 680 °C. La maille de fer possède quatre atomes de fer en coordonnées $(0, 0, 0)$; $(1/2, 1/2, 0)$; $(1/2, 0, 1/2)$; $(0, 1/2, 1/2)$ et un atome d'azote en position $(1/2, 1/2, 1/2)$. Les atomes de fer forment un réseau Cubique à Faces Centrées (CFC) et l'atome d'azote occupe de façon ordonnée un quart des sites octaédriques du cristal en formant une structure cubique simple. Cette disposition entraîne l'apparition de raies supplémentaires de type (100) et (110) sur les spectres de diffraction X. Ce nitrures est le

CHAPITRE 2 : TRAITEMENT THERMOCHIMIQUE DE NITRURATION :

premier à se former dans la série des nitrures de fer car il précipite dès les basses températures et ne nécessite qu'une teneur locale en azote de l'ordre de 20 % atomique. Son affinité pour le carbone est par ailleurs très faible puisque seulement 0,2 % massique de carbone peut être dissous dans sa structure. De plus, cette phase améliore la résistance à la fissuration [30].

II.2.2.2 Le nitrure ϵ (Fe_{2-3}N) :

Ce nitrure possède une maille élémentaire de symétrie hexagonale (Fig. I.5.b.). Les atomes de fer forment un réseau Hexagonal Compact (HC) déformé par la présence d'éléments interstitiels qui se placent dans les sites octaédriques. Ces sites forment un réseau hexagonal de paramètres a et $c/2$. Cette phase possède un domaine de composition important qui s'étend de 8,25 à 11 % massique en azote. Le remplissage progressif de sites octaédriques génère une structure HC d'atomes d'azote dont le paramètre de maille varie également suivant la fraction d'azote présente dans le réseau. Cette phase, est le plus souvent appelée carbonitrure ϵ tant son affinité pour le carbone est grande; la teneur en carbone dans cette phase peut atteindre jusqu'à 3 % massique.

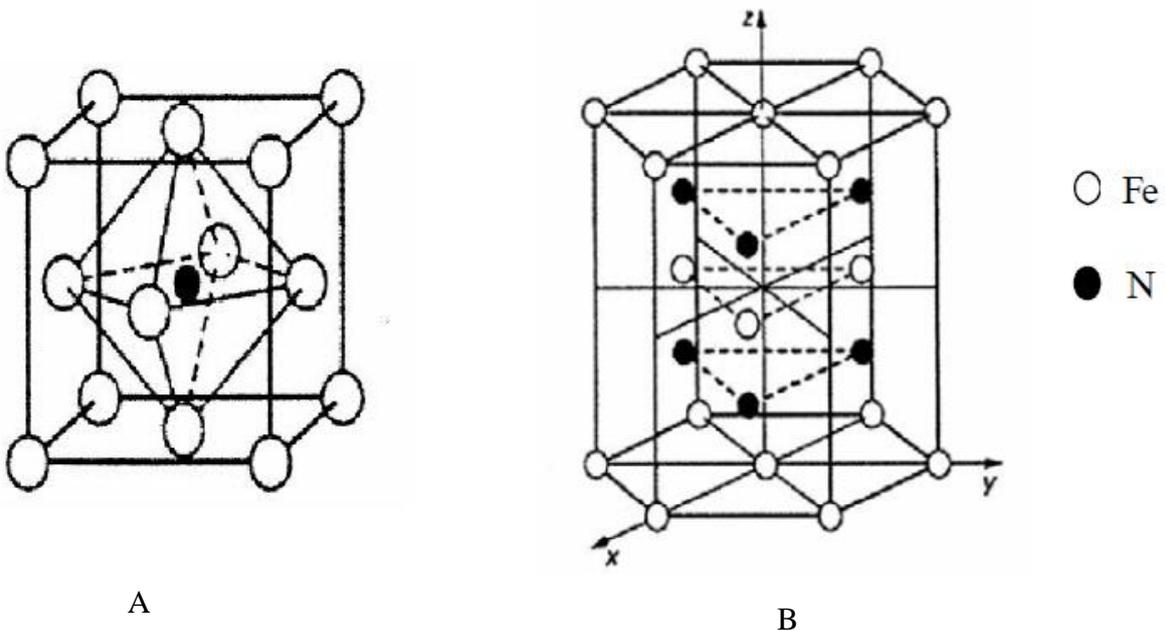


Fig.II.5: structures cristallographiques du (a) nitrure γ' (Fe_4N), (b) nitrure ϵ (Fe_{2-3}N)

CHAPITRE 2 : TRAITEMENT THERMOCHIMIQUE DE NITRURATION :

II.2.3 Couche de diffusion :

Dans le fer pur (ou l'acier non allié), l'azote qui diffuse en solution solide d'insertion conduit à un très faible durcissement selon l'enrichissement en azote. La solution solide est conservée si le métal est refroidi rapidement à partir de la température de nitruration. Si le refroidissement est lent ou si le métal est soumis à un revenu après trempe, des nitrures précipitent, conduisant à une seconde possibilité de durcissement par précipitation. En l'absence d'éléments d'alliage, ce durcissement n'excède pas 500 HV sur une profondeur très faible.

Si le métal contient des éléments d'alliage et si ceux-ci présentent une affinité de combinaison avec l'azote, il se forme des précipités de nitrures finement dispersés dans la zone de diffusion.

Ces précipitations conduisent à un durcissement important avec apparition de contraintes de compression élevées. Les niveaux de dureté obtenus sont généralement compris, suivant les compositions chimiques et, dans une moindre mesure, selon les procédés mis en œuvre, entre 400 et 1 300 HV.

La profondeur de diffusion est définie conventionnellement comme la distance entre la surface, et la couche ayant une dureté correspondant à celle du cœur (mesurée en HV) augmentée de 100 HV.

Le rapport DC/DX doit être pris en compte lors de la mise au point d'un traitement pour une application donnée.

II.2.4 Mécanisme de durcissement de la couche de diffusion :

La nitruration en phase ferritique permet d'avoir deux types de durcissement.

➤ Durcissement par solution solide sursaturée :

Ce mécanisme est lié à la présence d'azote en solution solide dans la ferrite à la température de traitement dans la mesure où le refroidissement en fin de cycle est suffisant pour permettre de maintenir l'azote à l'état de sursaturation.

CHAPITRE 2 : TRAITEMENT THERMOCHIMIQUE DE NITRURATION :

➤ Durcissement par précipitation :

L'azote en se combinant aux éléments d'alliages formes des nitrures et des carbonitrures stables et dispersés dans la couche. R.H.Jack [174] a suggéré il y a une vingtaine d'années, que certains éléments d'alliage tels qu'Al, Cr, V, Mn et Mo, forment des zones de Guinier-Prestin, c'est-à-dire des plaquettes rondes de diamètres avoisinant quelques dizaines de nanomètres. Sur les deux faces de ces plaquettes, les atomes d'azote migrent du fait de leur affinité avec ces éléments en question par rapport au fer.

Le niveau de durcissement est lié au degré de la sursaturation de la matrice alpha et de la nature des précipités. Les nitrures hexagonaux (Cr_2N , AlN ...) précipitent essentiellement sur les joints de grains et participent peu au durcissement, alors que les nitrures cubiques à faces centrées (Fe_4N , Mo_2N , CrN , Mn_4N , VN , TiN ...) précipitent sous forme de particules cohérentes sur les faces du cube et de la ferrite conduisant à une augmentation de volume et à des micro déformations du réseau de la ferrite et provoquant un durcissement important.

II.2.5.Traitements thermiques préalables :

II.2.5.1.Trempe et revenu :

L'état de traitement thermique du matériau sur lequel va être effectuée une nitruration est important, il détermine la qualité du produit final. La plupart des aciers sont utilisés à l'état trempé revenu, et il est nécessaire que le dernier revenu doive être pratiqué à une température supérieure à celle de la nitruration, afin que les caractéristiques du métal de base n'évoluent pas.

- Certains aciers (38 CrMoV 5, X 100 CrMoV 5, X 160 CrMoV 12...) permettent d'obtenir un même niveau de dureté soit en utilisant un durcissement par trempe avec une austénitisation à basse température et un revenu à basse température, soit en réalisant un cycle comprenant une austénitisation à haute température et un revenu également à haute température. Il est donc important pour ces nuances de tenir compte des exigences dues à la nitruration dès le stade du traitement dans la masse pour l'obtention de la dureté à cœur.
- Il faut tenir compte du fait que les temps de nitruration peuvent être longs et, pour assurer une véritable stabilité des propriétés, il faut prendre en considération à la fois le temps et la température de nitruration et prévoir l'importance de l'évolution de la dureté à cœur de la pièce.

CHAPITRE 2 : TRAITEMENT THERMOCHIMIQUE DE NITRURATION :

- L'étude des mécanismes du revenu montre que, au cours des derniers stades, vers les hautes températures de revenu, les éléments d'alliage de l'acier peuvent diffuser ; ils viennent alors participer à la constitution des carbures, et ne sont plus disponibles lors du traitement de nitruration pour participer au durcissement de la couche nitrurée (cas des aciers peu ou moyennement alliés).

II.2.5.2.État recuit :

On nitre essentiellement, à l'état recuit, les aciers peu alliés pour lesquels on ne recherche pas particulièrement de caractéristiques de la couche de diffusion. Néanmoins, il arrive parfois exceptionnellement que des aciers alliés soient nitrurés dans cet état.

À titre d'exemple, un acier du type X160CrMoV12 nitruré pendant 12 h à 540°C à l'état recuit globulaire poussé peut donner des duretés superficielles de 350 à 500 HV, alors que l'on obtient couramment à l'état trempé revenu des duretés supérieures à 1 000 HV. De même, pour des nuances type 42 CrMo 4 à l'état recuit, les duretés des couches obtenues dépassent rarement 400 à 500 HV (pour environ 600 à 700 HV à l'état trempé revenu) [11].

II.2.6. Procédés de nitruration :

II.2.6.1 . Nitrocarburation en bains de sels :

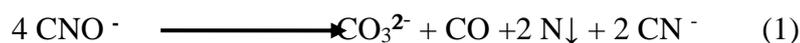
Les bains de sels pour nitrocarburation sont composés principalement de cyanate et carbonate de métaux alcalins et de petite quantité de sulfure.

La composition chimique du bain est maintenue dans les limites suivantes :

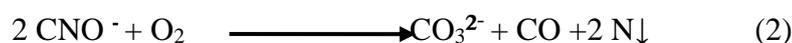
Cyanate : 36 ± 2 % ; carbonate : 19 ± 2 % ; cyanide : environ 0.8 %.

L'élément nitrurant est le cyanate CNO qui se décompose suivant une double réaction de dismutation et d'oxydation.

➤ Réaction de dismutation



➤ Réaction d'oxydation



L'oxygène est apporté à la surface par l'air ambiant et par l'air comprimé introduit dans les bains. Il s'y ajoute une réaction de carburation par le monoxyde de carbone produit.

CHAPITRE 2 : TRAITEMENT THERMOCHIMIQUE DE NITRURATION :



L'azote et le carbone à l'état naissant (atomique et actif) diffusent dans l'acier à travers la surface [15].

L'épuisement du cyanate abouti à la formation de carbonates qu'il faut reconverter en cyanates par régénération à l'aide d'un sel spécial dont la nature exacte constitue le savoir faire des procédés commercialisés sous les marques : SURSLF et TENIFER TF 1.

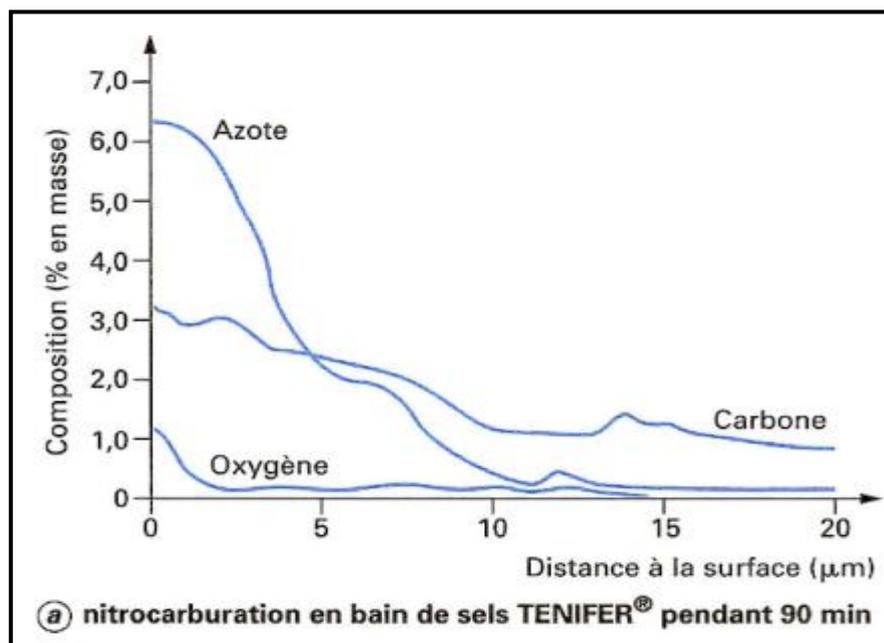
Le principe est d'utiliser un composé du type amine, comme l'urée, qui donnerait la réaction :



Cette réaction doit être contrôlée de façon à limiter les teneurs en vapeur d'eau et en ammoniac dans le bain.

La vapeur d'eau conduit à une augmentation du pouvoir oxydant du bain avec une tendance à former des oxydes avec les sels, entraînant une pollution du bain et une mauvaise qualité des couches (porosité importante) [11].

La nitruration en bain de sel comparativement à celle de la nitruration ionique, provoque à la surface en contact avec des sels la formation de pores, bien que leur présence n'est pas nécessairement un inconvénient car elles favorisent la sustentions du film d'huile en frottement lubrifié et facilitent le rodage, toutefois une proportion trop importante de porosités réduit la résistance à l'usure et rend la couche fragile. Cependant, le principal problème pour cette technique est le traitement des déchets et des effluents, et par conséquent elle entraîne une discontinuité de la couche nitrurée et une dégradation des propriétés de corrosion [7].



CHAPITRE 2 : TRAITEMENT THERMOCHIMIQUE DE NITRURATION :

Figure II.6 : Evolution des teneurs en azote, carbone et oxygène dans la couche de combinaison après nitrocarburation en bain de sels [11].

II.2.6.2. Nitruration gazeuse :

L'élément de base de ce procédé est l'ammoniac qui réagit dans des conditions données de température et d'environnement (pièces, montages, surface...) selon les réactions :

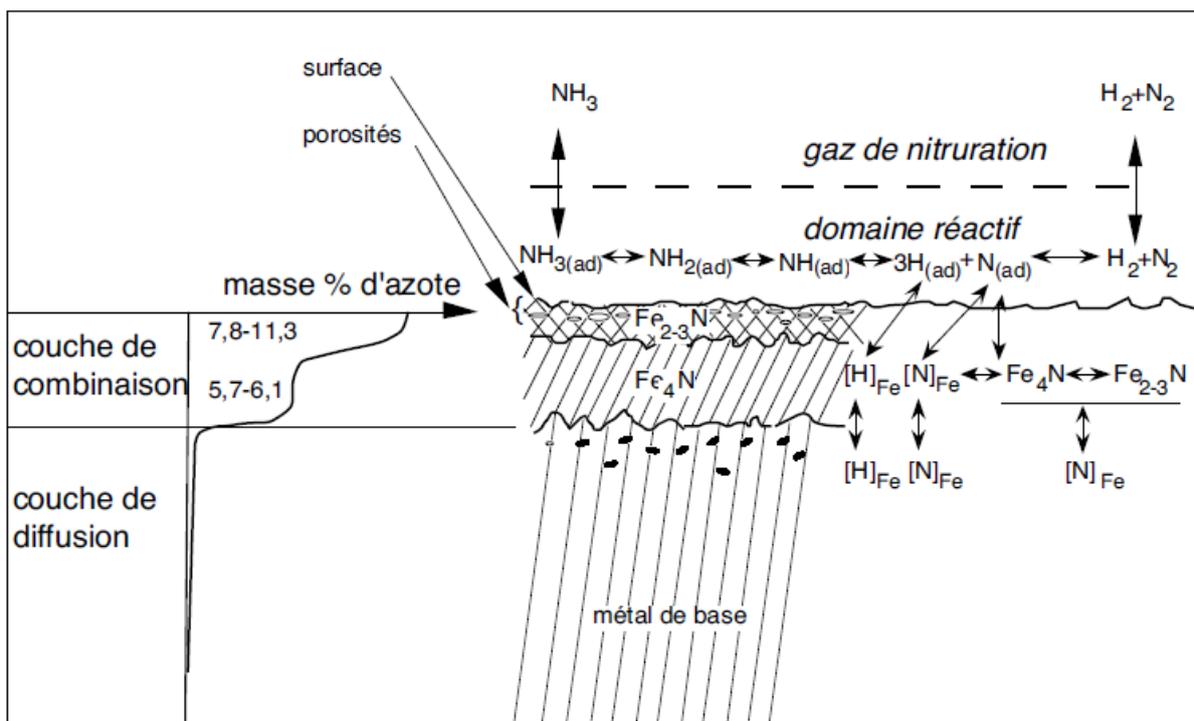


Une partie de l'azote naissant diffuse à la surface de l'acier, tandis qu'une autre partie est désorbée pour reconduire à la formation de la molécule N_2 . La diffusion d'azote dans le matériau dépend de la concentration locale en azote atomique.

La phase α étant très rapidement saturée en azote, les phases γ' ou ε apparaissent par nucléations localisées.

Les phases γ' ou ε croissent tandis que l'azote continue à diffuser dans la structure de l'acier. La croissance γ' ou ε conduit à la formation de la couche de combinaison alors que celle-ci alimente la zone de diffusion [10] :

Couche de combinaison / zone de diffusion



CHAPITRE 2 : TRAITEMENT THERMOCHIMIQUE DE NITRURATION :

Figure II.7: Mécanismes de la nitruration gazeuse (d'après Klumper). [22]

II.2.6.3 Nitruration ionique :

Lorsqu'une différence de potentiel est imposée entre une anode et une cathode dans une atmosphère gazeuse sous faible pression, il se produit des collisions ionisantes électron / molécule et, au-delà d'un certain potentiel, un régime de décharge lumineuse s'établit avec production d'espèces ionisées au voisinage de la cathode (figure II.8).

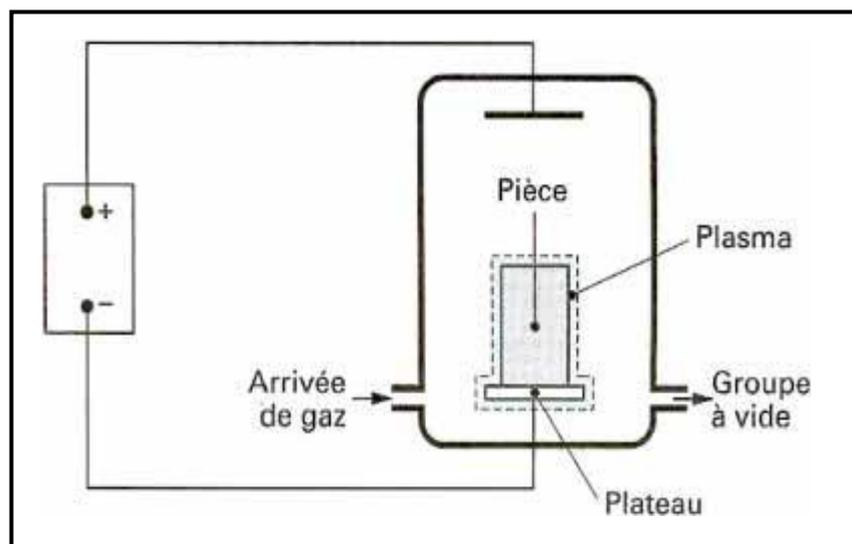


Figure II.8: Schéma de principe d'un four de nitruration ionique [].

Le plasma constitue un milieu actif fortement agité et doté d'une énergie importante. Il a pour effet de [11] :

- créer à la surface des pièces, par circulation du plasma, un effet thermique par dissipation de l'énergie cinétique des ions en énergie thermique lors de leur collision à la surface des pièces.
- décaper par pulvérisation cathodique en arrachant, grâce à l'énergie cinétique des ions, des atomes superficiels du métal.
- générer des espèces réactives vis-à-vis de la surface à traiter.

CHAPITRE 2 : TRAITEMENT THERMOCHIMIQUE DE NITRURATION :

Les ions négatifs formés sont attirés par l'anode tandis que les ions positifs sont attirés par la cathode. C'est le cas des ions azote, qui sont majoritairement positifs et sont attirés par la pièce à traiter. L'interaction entre les ions azotes et la matière conduit alors à un processus d'absorption et, suivant les paramètres de traitement, à la formation de nitrures et à la diffusion d'azote atomique à travers la section de la pièce [11].

Le problème pour cette technique est l'impossibilité de dissocier la création du plasma de l'échantillon. En effet, pour des pièces de formes complexes, il se produit de phénomènes de cathode creuse avec un échauffement local de la pièce. C'est pourquoi de nouveaux systèmes sont actuellement développés dans le but de créer le plasma par des électrodes secondaires[16].

II.2.7 Aciers pour nitruration :

Le traitement de nitruration consiste à introduire de l'azote dans les couches superficielles de l'acier ou de l'alliage par réaction chimique à la surface puis diffusion dans la masse. [17]

Pratiquement, il est envisageable de nitrurer tous les aciers. Le choix d'un acier destiné à être nitruré doit être fait en fonction des caractéristiques recherchées sur la pièce et des conditions de réalisation de celle-ci.

Les critères de choix sont divisés en deux groupes :

- caractéristiques du cœur (résistance, trempabilité, tenue à chaud, soudabilité...),
- caractéristiques de la couche nitrurée, (dureté, fragilité, profondeur ...).

De nombreux types d'aciers donc sont aptes à la nitruration sous réserve que les propriétés à cœur ne risquent pas d'être effectuées par le traitement ; sauf dans le cas d'aciers à dispersoïdes, il s'agit donc d'aciers trempés et revenus à une température supérieure à la température de nitruration.

- Aciers au carbone : XC 18 à XC 55,
- Aciers au manganèse : 20 M5 - 35 M5 - 40 M6,
- Aciers au chrome : 38 C4 - 42 C2,
- Aciers au chrome molybdène : 25 CD4 à 42 CD4, 30 CD12,
- Aciers au chrome -aluminium molybdène : 30 CAD6-12, 40 CAD6-12,
- Aciers au nickel chrome molybdène : 30 CND8, 35 NCD16,
- Aciers à outils : Z 38 CDV5 ; Z 100 CDV5 ; Z 160 CDV12 ; Aciers rapides,
- Aciers à dispersoïdes.

CHAPITRE 2 : TRAITEMENT THERMOCHIMIQUE DE NITRURATION :

- Aciers inoxydables.

Le choix de la nuance à retenir est orienté vers l'optimisation des caractéristiques dans la masse et en surface. Les aciers contenant des éléments tels que le chrome, l'aluminium ou le vanadium, susceptibles de donner, en se combinant avec l'azote, une fine dispersion de nitrures, conviennent particulièrement bien pour la nitruration [17].

II.2.8 Propriétés des pièces nitrurées :

Les traitements de nitruration ou de nitrocarburation apportent, de manière plus ou moins sensible selon les procédés et les matériaux traités, les caractéristiques suivantes :

- dureté superficielle élevée.
- modification chimique par croissance d'une couche de combinaison.
- mise en précontraintes de compression de la surface [18].

La dureté et les contraintes résiduelles sont liées aux conditions de traitement, la composition chimique et la microstructure initiale des pièces. Cette dureté sera aussi fortement influencée par la température de traitement qui conditionne la mise en contrainte et la répartition des précipités produits.

D'après Barrallier [19, 20] l'apparition des contraintes de compression dans la couche de diffusion est due à la précipitation des nitrures d'éléments d'alliage pendant le traitement. Les précipités ainsi formés ayant un volume massique plus faible que celui de la matrice ferritique vont provoquer un gonflement de celle-ci qui va alors induire le champ de contrainte observé.

II.2.8.1 Tenue à chaud :

De par son principe même de durcissement, la nitruration permet d'obtenir des couches qui possèdent une bonne stabilité à chaud jusqu'à des températures qui dépendent, bien sûr, de la nuance d'acier utilisée mais qui sont proches de celles utilisées pour la nitruration (figure II-9).

Cette particularité du traitement de nitruration explique la large utilisation d'outils nitrurés en forge et estampage et, d'une façon générale, en travail à chaud.

CHAPITRE 2 : TRAITEMENT THERMOCHIMIQUE DE NITRURATION :

Dans ce domaine, il semble que la tenue en usure à chaud soit favorisée par une augmentation de l'épaisseur nitrurée.

En ce qui concerne la fatigue thermique, ainsi que cela a été montré dans une étude récente due à R. Lévêque [150], la rugosité avant traitement de nitruration, qui conditionne la formation et le type de microfissures qui apparaissent en fonctionnement sous l'effet des sollicitations de service, est d'une grande importance. Par ailleurs la mise en contraintes des couches semble également d'un grand intérêt et explique l'influence parfois considérable de couches de très faible épaisseur.

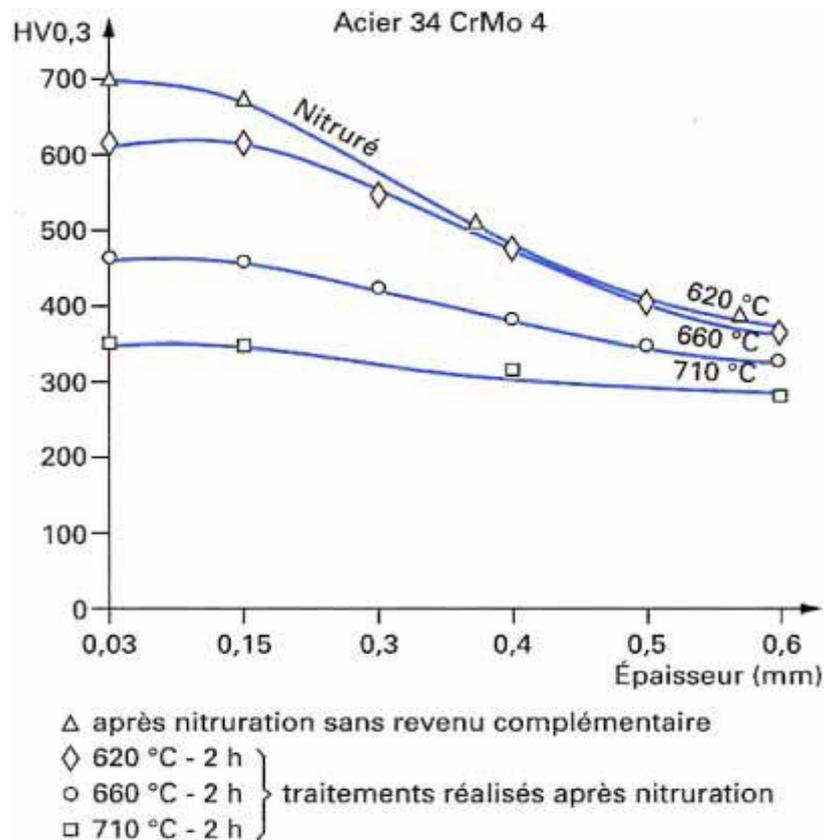


Figure II-9: Évolution de la dureté d'une couche nitrurée après maintien à diverses températures

II.2.8.1. Comportement en fatigue :

La résistance à la fatigue structurale augmente alors avec la profondeur nitrurée en liaison avec le profil de contraintes résiduelles en compression [5,6] qui de plus ne se relaxent pas sous chargement cyclique.

CHAPITRE 2 : TRAITEMENT THERMOCHIMIQUE DE NITRURATION :

On constate que la microstructure influe peu vis-à-vis de ce type de sollicitation alors que la macrostructure (épaisseur de la couche de diffusion et résistance à cœur) a une action notable. Pour les aciers de construction, la limite de fatigue augmente avec l'épaisseur nitrurée jusqu'à un maximum (qui se situe vers 0,2-0,3 mm pour les aciers du type 34 CrMo 4) au-delà duquel on ne constate plus d'amélioration sensible.

De même les caractéristiques de fatigue augmentent avec la résistance à cœur de l'acier (et de la couche de diffusion). Le choix de ce dernier sera par conséquent déterminant vis-à-vis de cette sollicitation.

Il faut noter que l'amélioration des propriétés de fatigue due à la nitruration est particulièrement importante dans le cas de pièces ou d'éprouvettes entaillées [50] [51].

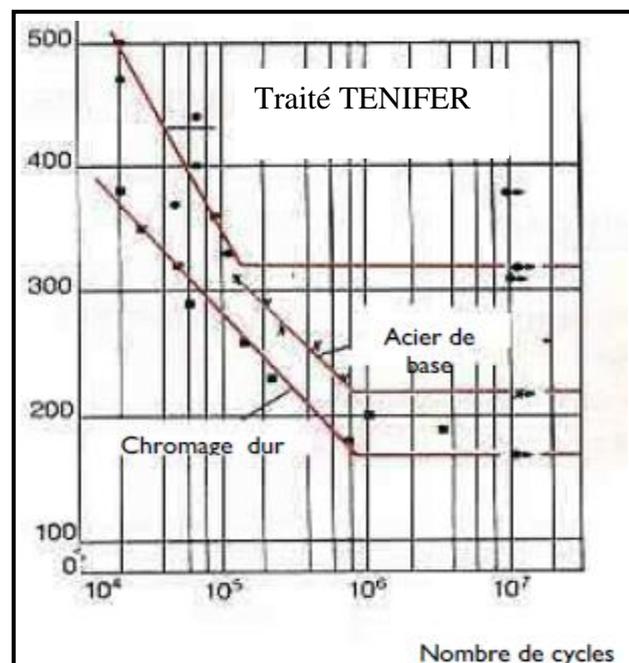


Figure II.11: Essai en fatigue en flexion rotative.

Eprouvette en Acier C45 normalisé. Après traitement Ténifer la limite d'endurance s'est trouvée améliorée d'environ 50 %.

CHAPITRE 3 : LA TRIBOLOGIE

III.1. INTRODUCTION :

Un système tribologique se définit comme un système mécanique, formé de deux matériaux antagonistes en contact, animé de mouvements relatifs. Ces deux solides évoluent dans un milieu ambiant et peuvent être séparés par un film intercalaire appelé troisième corps. Sur le plan tribologique, le troisième corps [17] est un opérateur qui transmet la charge (ou portance) d'un premier corps sur l'autre et accommode en s'écoulant (débit) d'une façon dissipative (frottement) l'essentiel de la différence de vitesse entre deux corps. Les troisièmes corps séparent partiellement ou entièrement les premiers corps. Ils sont introduits dans le contact ou bien par entraînement cinématique (lubrifiants solides ou liquides) ou par formation in situ (particules détachées)

L'interface d'un tel système devient alors le siège de phénomènes dissipatifs d'énergies, regroupées sous le terme générique de frottement (Tableau III.1).

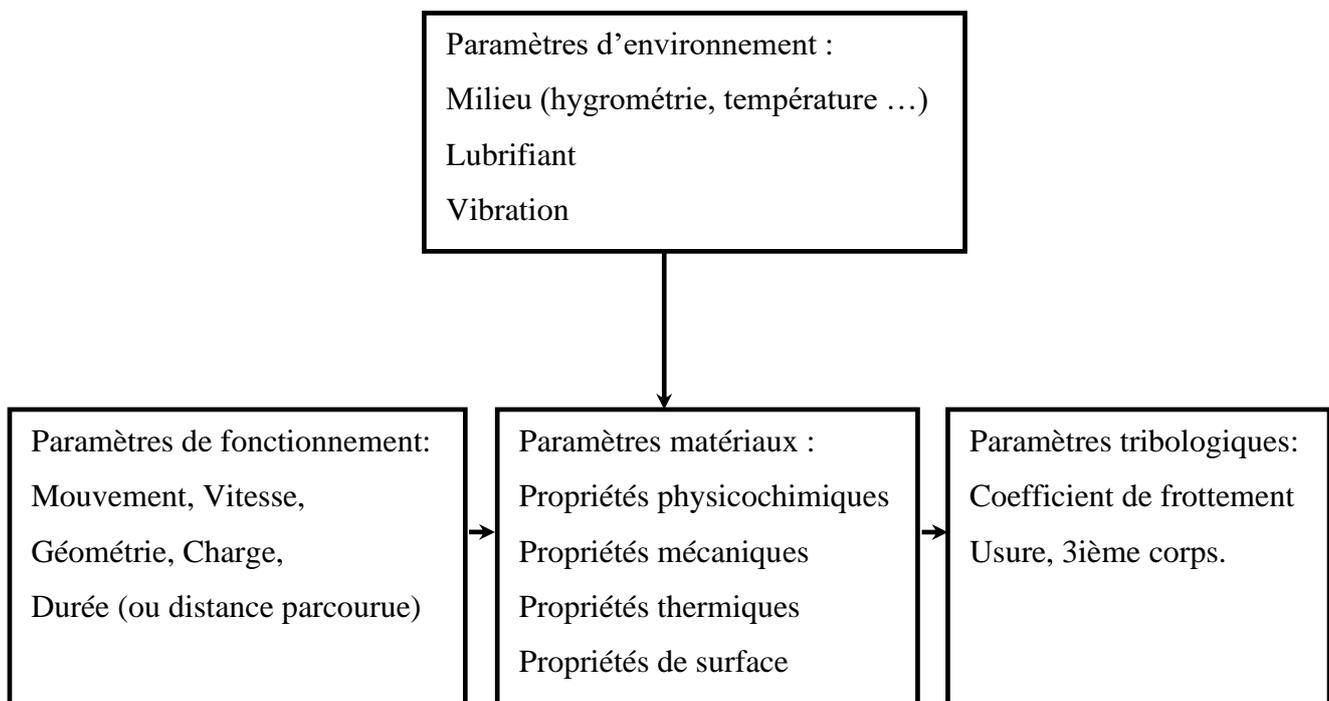


Tableau III.1 : Synoptique général d'un système tribologique.

III.2. Les surface :

Par définition, la surface d'un corps est le lieu des points séparant ce corps du milieu environnant. Elle correspond donc à une discontinuité dans l'aménagement périodique des atomes de celui-ci.

CHAPITRE 3 : LA TRIBOLOGIE

En surface, le nombre de plus proches voisins est différent de ce qu'il est en volume. On parle aussi d'interface solide-gaz, solide-liquide, solide-solide.

La notion d'état de surface comprend :

- l'état physico-chimique (nature, structure, texture des couches superficielles)
- l'état géométrique (ensemble des écarts géométriques de la surface réelle par rapport à la surface géométrique idéal).

Les surfaces présentent des défauts géométriques de différents ordres :

- ordres macroscopiques liés à des écarts de grande amplitude dus généralement aux défauts géométriques de la machine génératrice (écart de forme du 1er et 2nd ordre),
- ordres microscopiques liés à des écarts de faibles amplitudes dus à l'outil de coupe, aux grains abrasifs, aux particules de sablage ou grenailage, aux vibrations de la machine ou encore aux piqûres de corrosion (rugosité, écarts de forme de 3^{ème} et 4^{ème} ordre).

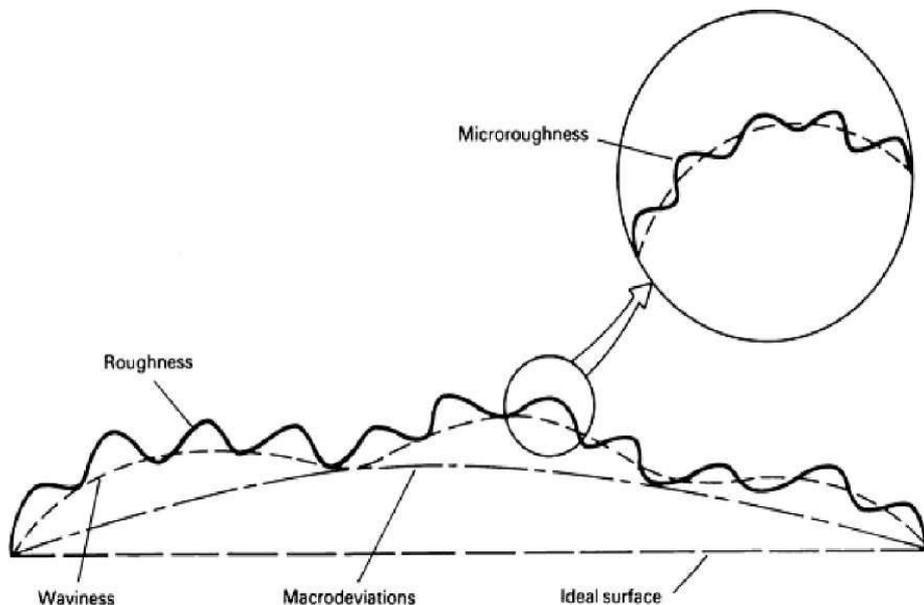


Figure III.1 : Schéma déviation relative par rapport à une surface idéal [13]

En réalité, le terme surface représente une couche d'épaisseur comprise entre 10^{-2} et 10^{-6} mm. La composition chimique et les propriétés mécaniques de cette zone peuvent être très différentes de celles du cœur du matériau. La surface peut être recouverte de films contaminant (gaz adsorbés, produits organiques), d'oxydes et dans le cas de métaux, peut être écrouie. La présence de ces écrans va modifier le comportement tribologiques des corps en contact (Figure III.2).

CHAPITRE 3 : LA TRIBOLOGIE

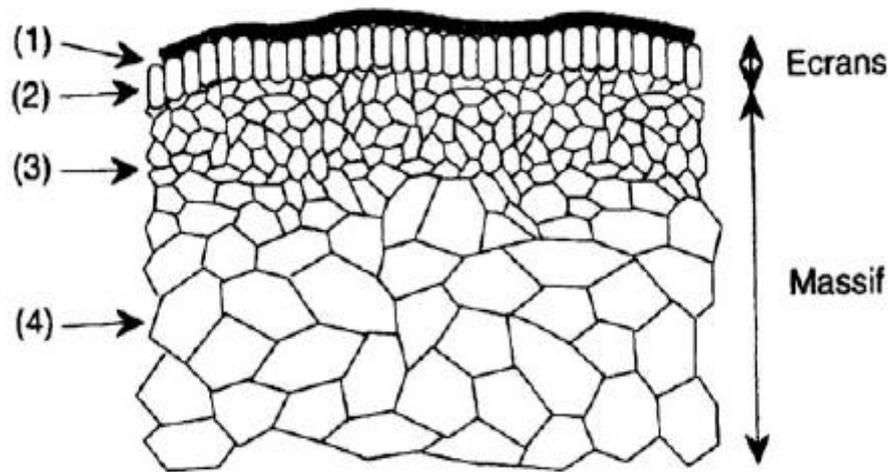


Figure III.2 : Vue théorique en coupe d'une surface. [4]

La surface est donc l'endroit le plus perturbé d'une pièce. La zone est un film de contamination (0,3 à 3 nm) constitués de couches absorbées. La zone est un film d'oxydes (1 à 10 μm). La zone est une zone mécaniquement perturbée (1 à 50 μm) de structure écrouie ou structure de couche de diffusion. La zone partant de 100 μm est le matériau massif.

Lorsque l'usure est limitée à l'enlèvement des films de surface, elle est appelée « usure douce ». Ces écrans détruits peuvent être reconstitués par réaction avec l'environnement. Lorsque l'usure s'étend au massif, elle est appelée usure « destructrice » ou « sévère ».

Les surfaces de contact de deux corps frottant peuvent ne pas jouer des rôles symétriques.

Le contact peut être selon les géométries des corps :

- ponctuel (sphère/sphère, sphère /plan,...)
- linéaire (cylindre/plan)
- surfacique (rotule dans sphère)
- conformel (cylindre/cylindre) ou contraformel (cylindre dans cylindre creux).

Le contact statique entre deux solides ne s'effectue donc pas sur la surface apparente commune aux deux solides, mais sur un ensemble de zones discrètes (aussi appelées aspérités) dont la somme des aires donne la surface réelle de contact. Dans le cas d'un frottement de glissement, les zones de contact sont sans cesse renouvelées.

CHAPITRE 3 : LA TRIBOLOGIE

Le rapport aire réelle sur aire apparente peut varier de façon significative : il est alors plus facile de raisonner en terme de force appliquée plutôt que de pression.

La surface réelle de contact est sensible à la charge appliquée. De nombreuses études se sont intéressées à la variation de l'aire réelle de contact en fonction du mode de déformation des aspérités : élastiques pour le modèle d'Archard (années 50), élasto-plastiques pour le modèle de Greenwood-Williamson (années 60) [12].

III.3. Le concept de troisième corps :

Rappelons que le mouvement peut détruire les surfaces et que les débris commencent leur vie dans le contact. Si les débris sont piégés dans le contact, le contact à deux corps devient un contact à trois corps.

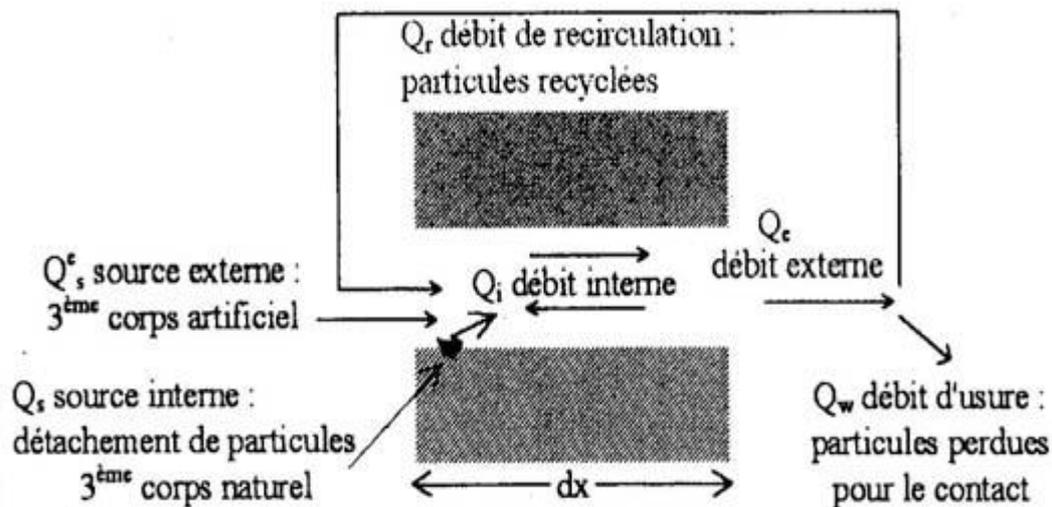


Figure III.3 : Circuit tribologique pour un contact élémentaire [13]

III.4. Mécanismes de dégradation des surfaces :

L'usure est un ensemble complexe de phénomènes, amenant une émission de débris avec perte de masse, de côtes, de forme, et s'accompagnant de transformations physiques et chimiques des surfaces.

Elle ne varie généralement pas de manière progressive en fonction de paramètres comme la vitesse, la température ou le temps. Si certaines formes d'usure sont relativement régulières, d'autres au contraire connaissent des sauts très brutaux, dans des rapports pouvant aller parfois de 1 à 100 000 ou plus, lorsque certaines valeurs critiques sont franchies.

CHAPITRE 3 : LA TRIBOLOGIE

L'usure est généralement combattue à cause de ses effets négatifs, mais elle présente aussi des aspects favorables. L'affûtage d'un outil, la finition d'une surface par rectification, l'écriture de la craie sur le tableau ou du crayon sur le papier sont des exemples d'usures abrasives utiles.

Il arrive que l'on provoque sciemment certaines formes d'usure pour lutter contre d'autres formes qui seraient beaucoup plus dévastatrices. Quand il est bien conduit, le rodage d'un mécanisme, c'est-à-dire la phase de fonctionnement où les pièces « apprennent à vivre ensemble », provoque des usures qui se révéleront « protectrices » lors des phases suivantes.

La plupart du temps, l'usure globale d'un mécanisme est due à plusieurs processus qui agissent simultanément, plus rarement à un processus bien défini et identifiable. L'effet de ces actions simultanées est souvent plus important que la somme des effets que l'on produirait en faisant agir séparément les divers processus, on parle parfois de « sur additivité ».

Dans les premiers instants du frottement, ce sont les écrans superficiels qui subissent l'ensemble des mécanismes inhérents au frottement (effets thermiques, mécaniques ou chimiques). Ensuite, ces mécanismes se relaient ou s'interpénètrent en fonction des multiples conditions présentes.

En général, une pièce subit tout au long de sa vie 3 étapes d'usure :

- Rodage : usure rapide avec une vitesse d'usure régulièrement décroissante.
- Marche normale : durée de vie (usure faible et constante).
- Vieillesse et mort : vitesse d'usure croissante.

III.5 Comportement tribologique des oxydes de fer :

En tribologie, les oxydes ont généralement un rôle ambigu pouvant être tour à tour abrasifs et donc source d'endommagements ou lubrifiants et protecteurs vis-à-vis de l'usure. Ces propriétés tribologiques sont corrélées à leurs propriétés microstructurales et mécaniques. Ainsi, le coefficient de frottement généré entre des couches d'oxydes est généralement dépendant de la nature, de l'épaisseur, de l'adhérence ou de la dureté de ces oxydes.

CHAPITRE 3 : LA TRIBOLOGIE

III.6 Le frottement :

III.6.1 Définition :

Le frottement correspond à la résistance au mouvement relatif d'un corps sur un autre [14].

Pour déplacer un solide sur une surface plane (Figure II.4), une force supérieure ou égale à la force de frottement qui agit parallèlement à la surface et dans le sens opposé du mouvement est nécessaire . Le coefficient de frottement. Noté μ , est le facteur de proportionnalité entre la force de frottement et la charge normale W d'où : $\mu = f/W$ (II-1)

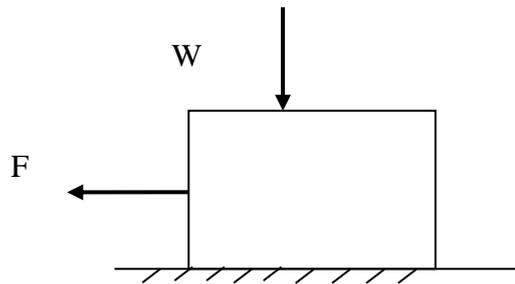


Figure III.4 : Nécessité d'une force F pour produire le mouvement.

Le coefficient de frottement dépend [8] :

- De facteurs mécaniques : force normale, vitesse de déplacement ;
- De facteurs chimiques : humidité, oxydants ;
- Des propriétés des matériaux : dureté, plasticité, énergie de surface.

Il correspond en fait à la somme de trois contributions soient les phénomènes d'adhésion, les déformations élastique et plastique des aspérités, et le déplacement de matière par labourage. Mais les scientifiques n'ont pas encore réussi à quantifier chacun des mécanismes.

Trois types d'essais sont généralement utilisés pour évaluer le coefficient d'usure (Figure II.5)

- L'essai à crayon sur disque,
- L'essai à cylindres croisés,
- L'essai a mouvement alternatif,

Il est d'usage de distinguer le coefficient de frottement statique qui correspond au frottement des deux surfaces au repos, du coefficient dynamique où les deux surfaces sont en mouvement relatif. En général, il est souhaitable que le coefficient de frottement soit le plus faible possible mais des applications particulières, comme par exemple le contact des semelles de chaussures sur le sol, nécessitent une valeur élevée.

CHAPITRE 3 : LA TRIBOLOGIE

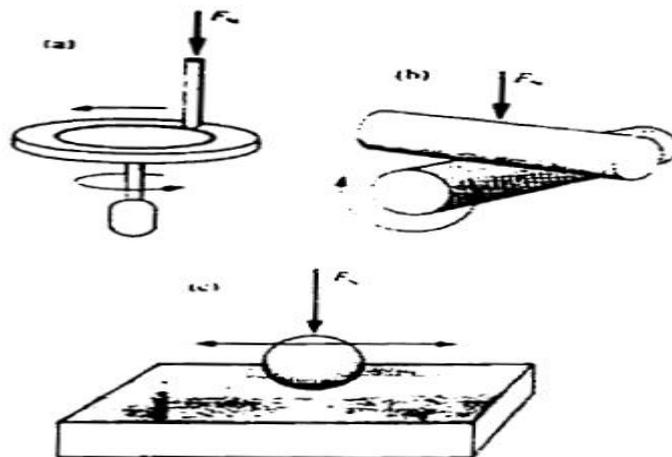


Figure III.5 : Évaluation du coefficient d'usure par un essai à crayon sur disque (a), un essai à cylindres croisés (b) ou un essai à mouvement alternatif (c)

III.6.2 Lois :

Les observations de Léonard de Vinci, et celles deux cents ans plus tard de G. Amontons, les conduisirent à la formulation de deux lois empiriques :

La force de frottement est proportionnelle à la charge normale W ce qui se traduit par l'équation (III.1) :

La force de frottement est indépendante de la surface de contact apparente.

La surface d'un solide possède toujours une certaine rugosité aussi, comme l'indique la (Figure III.6), seules les aspérités vont assurer le contact. [16]

À état statique (Figure III.6). La vraie surface de contact A_r est égale à la somme de toutes les surfaces de contact entre les aspérités, soit [13] :

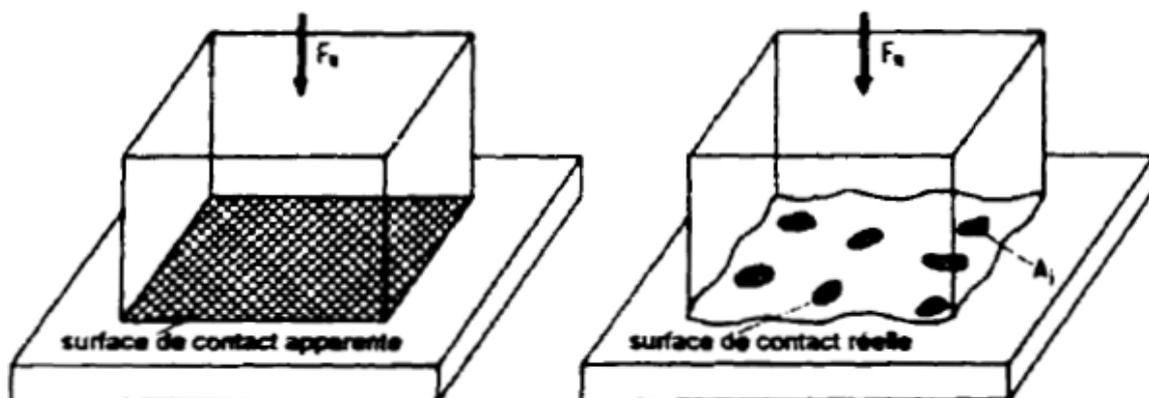


Figure III.6 : Surface apparente et surface réelle de contact.

CHAPITRE 3 : LA TRIBOLOGIE

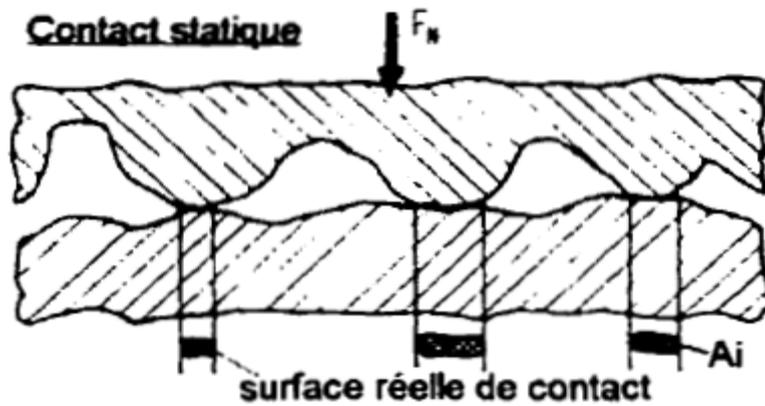


Figure III.7 : Contact à l'état statique.

La force de frottement est indépendante de la vitesse de glissement. Mais elle est souvent moins bien vérifiée

III.6.3 Mécanismes :

Nous avons vu précédemment que le coefficient de frottement dépendait de trois phénomènes physiques distincts qui provoquent des pertes d'énergie (Figure II.8) :

- La formation et la rupture des jonctions d'adhésion aux lieux de contact.
- La déformation élasto-plastique des aspérités,
- Le déplacement de matière par labourage.

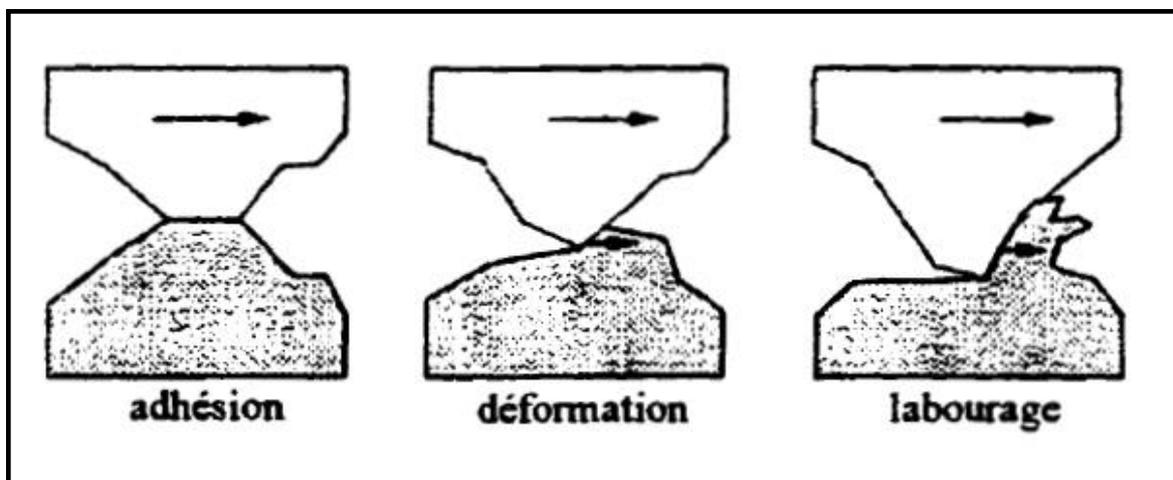


Figure III- 8 Phénomènes influençant le coefficient de frottement.

CHAPITRE 3 : LA TRIBOLOGIE

La microstructure prend ici un aspect prépondérant ; la configuration ε offre les meilleures caractéristiques, alors que les couches de diffusion seules et les configurations γ' donnent des résultats nettement inférieurs. Dans le cas de couches biphasées $\gamma' + \varepsilon$, les propriétés de frottement sont intermédiaires et dépendent essentiellement de la proportion des phases en présence (elles s'améliorent avec la quantité de ε) et de la constitution de la couche : mélange intime des deux phases ou stratifications avec couche ε extérieure (cas le plus favorable). Il faut noter que certains auteurs signalent pour des applications particulières une supériorité de la couche γ' sur la couche ε , notamment en hydraulique où l'on recherche l'absence totale d'usure en fonctionnement ; il s'agit malgré tout de cas exceptionnels.

Le rôle des porosités est également très controversé : pour certains, elles constituent, dans le cas des frottements lubrifiés, une réserve de lubrifiant qui est favorable aux propriétés de frottement ; alors que d'autres auteurs ont constaté qu'elles disparaissaient rapidement dès les premiers contacts [4].

III.6.3.1 La formation et la rupture des jonctions d'adhésion aux lieux de contact :

Lorsque les deux surfaces sont en mouvement relatif, les jonctions des aspérités se font et se défont de façon continue et ont une résistance au cisaillement T telle que :

$$T = F/Ar \quad (\text{II.2})$$

Le coefficient de frottement peut alors s'exprimer par

$$\mu = T/H \quad (\text{II.3})$$

La valeur de r correspond alors au moins dur des deux matériaux et H représente sa dureté.

Notons que ce rapport f_i et par conséquent p varie peu d'un métal à l'autre.

Avec cette approche, des travaux ont montré que les valeurs expérimentales de p sont souvent très supérieures à la valeur théorique car le milieu dans lequel évoluent les solides n'a pas été pris en compte. Or, les phénomènes d'adsorption ou d'oxydation ne peuvent pas être négligés et vont influencer le coefficient de frottement. [16]

III.6.3.2 La déformation élasto-plastique des aspérités :

Contrairement aux prédictions théoriques, le coefficient de frottement est lié à la rugosité initiale des surfaces pendant un certain temps appelé période de rodage. Ceci s'explique par les déformations élastique et plastique des aspérités dans le sens du mouvement qui résultent du mouvement relatif des deux surfaces rugueuses.

CHAPITRE 3 : LA TRIBOLOGIE

III.6.3.3 Le déplacement de matière par labourage :

Lorsqu'une des surfaces en mouvement est plus dure que l'autre, les aspérités du matériau dur peuvent pénétrer et labourer la surface plus molle en formant des rainures. E. Rabinowicz [8]

III.6.4 Contacts non lubrifiés :

Pour faire glisser un solide sur une surface plane, il faut appliquer une force égale ou supérieure à la force de frottement F qui agit parallèlement à la surface dans le sens opposé au mouvement, (figure III- 9).

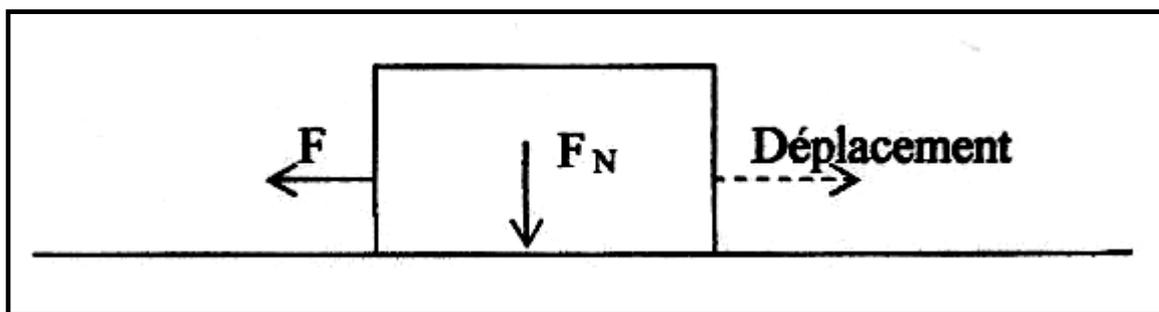


Figure. III- 9 : Usure par glissement.

Son intensité est proportionnelle à la force normale F_N , appelée aussi charge, qui agit perpendiculairement à la surface de contact. Le facteur de proportionnalité f porte le nom de coefficient de frottement.

$$F = f \cdot F_N \quad (\text{II.4})$$

Le coefficient de frottement est une propriété du système, formant le contact, sa valeur dépend entre autres de :

- Facteurs mécaniques : force normale, vitesse de déplacement, viscosité du lubrifiant.
- Facteurs chimiques : humidité, oxydants, additifs.
- Propriétés des matériaux : dureté, plasticité, énergie de surface.

Dans les systèmes à mouvement, on cherche le plus souvent à minimiser les frottements, pour cela, on utilise normalement des lubrifiants. Ces derniers permettent de réduire le coefficient de frottement jusqu'à des valeurs inférieures à 0,1. De nombreuses situations requièrent, cependant, un coefficient de frottement élevé, par exemple le contact entre un pneu de voiture et le sol. Dans ce cas, l'usure doit rester faible, malgré un coefficient de frottement élevé. Le (tableau II-2) ci-dessous indique quelques valeurs typiques du coefficient de frottement suivant les matériaux en contact et la nature du milieu.

CHAPITRE 3 : LA TRIBOLOGIE

Contact	Milieu	F (dynamique)
Métal – métal	Vide	0,1
	Air	0,2 à 1
	Huile lubrifiante	0,02 à 0,1

Tableau III-2 : valeurs typiques du coefficient de frottement.

III.6.5 Contacts lubrifiés ;

La présence d'un film de lubrifiant réduit considérablement le coefficient de frottement, dont la valeur se situe alors typiquement entre 0,2 et 0,1. Il existe trois régimes de lubrification :

- Hydrodynamique.
- Mixte.
- Limite.

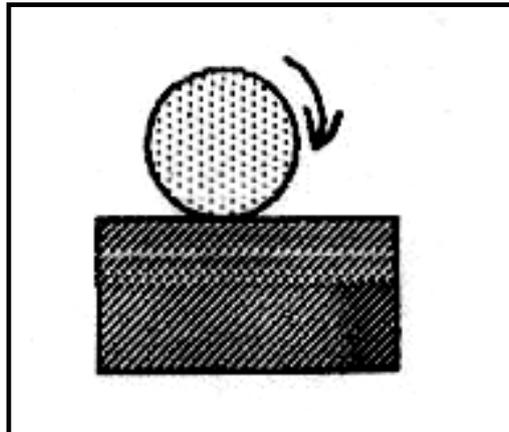


Figure. III- 10 : Usure par roulement.

III.7 Amélioration de la résistance à l'abrasion par traitement thermochimique de nitruration :

III.7.1 - Influence de la microstructure sur le comportement en frottement :

L'influence de la nature de la couche de combinaison (ϵ , γ' , $\epsilon + \gamma'$) a été étudiée au moyen des essais de frottements suivants :

CHAPITRE 3 : LA TRIBOLOGIE

III.7.2 - Essai pion / disque :

Un pion en C35E nitruré frotte à sec sur un disque en acier 100Cr6 sous une charge de 10 N, à une vitesse de glissement de 0.1 m/s. Les configurations testées sont ϵ dense (D) + ϵ poreux (P), ϵ dense + Fe_3O_4 , ϵ poreux + Fe_3O_4 , $\epsilon + \gamma'$, $\epsilon + \gamma' + Fe_3O_4$, couche de diffusion seule. Dans ces conditions d'essai, la nitruration modifie peu le coefficient de frottement, quelle que soit la configuration testée.

L'usure du pion peut être divisée par un facteur 4 à 5, dans le cas où l'on forme une couche de combinaison (ϵ , $\epsilon + \gamma'$) en surface. La couche de diffusion seule a peu d'influence sur l'usure, avec l'acier utilisé (faible augmentation de dureté après nitruration avec les nuances utilisées C35E et C10E).

La couche d'oxyde s'écaille dès le début de l'essai et a peu d'influence sur le comportement en frottement.

III.7.3 - Essai machine à galets Amsler :

Dans ces conditions d'essai, les couches de combinaison du type ϵ obtenues par nitrocarburation, sulfonitrocarburation présentent des charges de grippage les plus élevées, en comparaison ϵ avec les couches γ' ou couche de diffusion seule (figure III.11) [12].

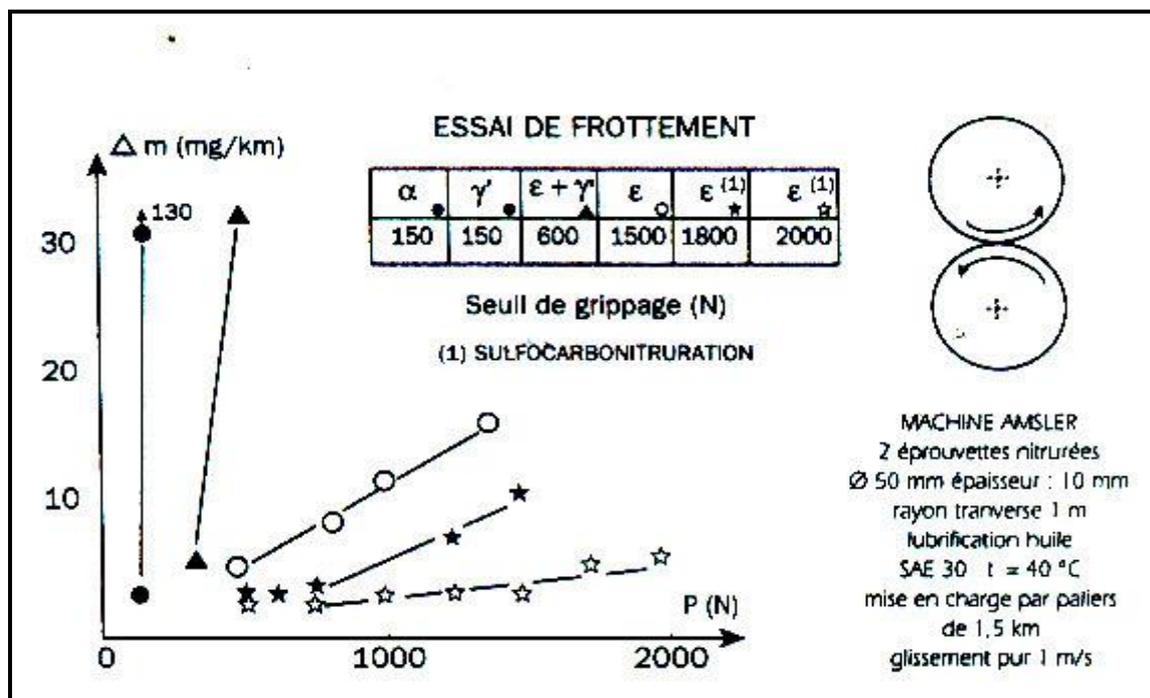


Figure III.11 : Perte de poids aux différents paliers de charge et seuil de grippage associés aux configurations testées [16].

CHAPITRE 3 : LA TRIBOLOGIE

III.7.4 Résistance à la corrosion :

III.7.4.1 Définition :

Selon le point de vue de l'ingénieur constructeur, la corrosion est une dégradation du matériau ou de ses propriétés, entraînée par une interaction physicochimique sous forme d'une réaction inter faciale irréversible du matériau avec son environnement.

La corrosion peut également être définie comme étant un processus de dégradation ou de détérioration des propriétés d'usage que peut subir un métal ou un alliage, sous l'effet des actions chimiques, électrochimiques ou biologiques. En générale, on a affaire au retour du métal à son état original de minerai. [8]

III.7.4.2 Suivi de l'évolution potentiel en fonction du temps :

Suivi de l'évolution potentiel en fonction du temps est une information parfois utile pour appréhender le comportement d'un matériau au contact d'un milieu corrosif humide. Les réactions physicochimiques, présentes à la surface du métal, modifient l'interface solide-solution, ce que traduit l'évolution (millivoltmètre interfacé et micro-ordinateur). Ou tout simplement par enregistrement sur une table traçante, reliée à la sortie enregistreuse du millivoltmètre électronique.

Plusieurs types de courbes se rencontrent habituellement :

- a) Le potentiel est constant, l'interface ne se modifie pas au cours du temps ;
- b) Le potentiel ne fait que décroître, le matériau devient de moins en moins noble, par exemple attaque continue du métal ;
- c) Le potentiel croit : le matériau se passive, il s'anoblit. Ceci peut être dû à la formation présence des produits de corrosion formés en surface ;
- d) la passivation peut être précédée d'une étape de corrosion marquée ;
- e) l'interface métal-milieu, stable pendant un certain temps, peut se modifier brutalement

CHAPITRE 3 : LA TRIBOLOGIE

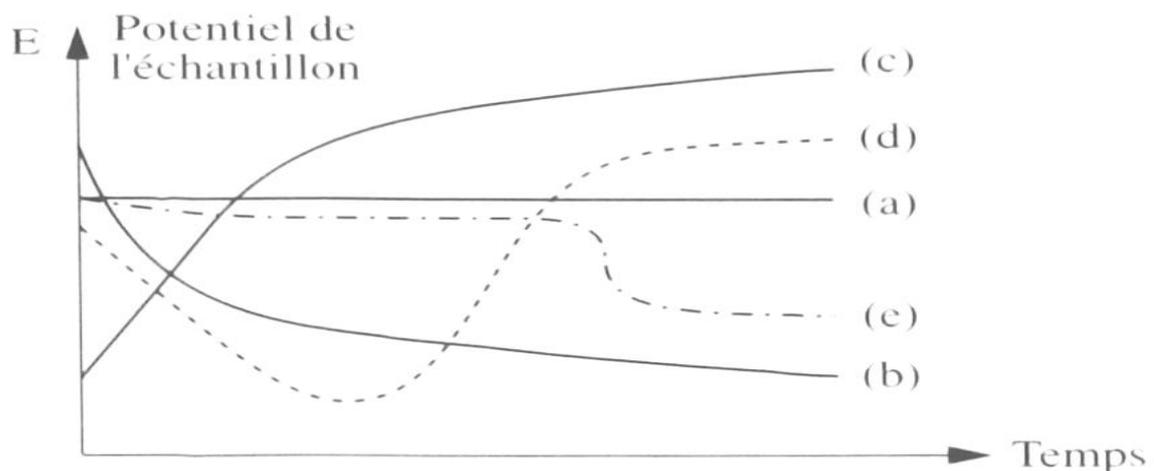


Figure III-12 : suivi de potentiel. [8]

III.7.4.3 Cinétique électrochimique :

Il est important de rappeler les notions élémentaires de calcul des vitesses de corrosion et les conditions pour lesquelles il est légitime d'appliquer la méthode de Stern et Geary. La corrosion est toujours à minima la conséquence d'un échange électronique à l'interface métal/solution entre deux couples redox.

Mais, comme les réactions de corrosion sont irréversibles et se développent loin des conditions d'équilibre des réactions redox des couples qu'elles mettent en jeu, il est alors nécessaire d'utiliser la thermodynamique des phénomènes irréversibles pour exprimer les vitesses de corrosion.

III.7.4.3.1 Résistance de polarisation

Dans le cas d'une surtension η relativement faible, il est admissible de remplacer les exponentielles de la relation (3) par leurs développements limités au premier ordre. On obtient

$$\text{alors :} \quad I = I_0 \left[\left(1 + \alpha \frac{z.F}{RT} \eta \right) - \left(1 - (1 - \alpha) \frac{z.F}{RT} \eta \right) \right] \quad (4)$$

$$I = I_0 \frac{zF}{RT} \eta \quad (5)$$

On a donc une relation linéaire entre le courant et le potentiel et, par analogie avec la loi d'Ohm, on définit la résistance de polarisation R_p par :

$$R_p = \frac{RT}{I_0 z F} \quad (6)$$

CHAPITRE 3 : LA TRIBOLOGIE

III.7.4.3.2 Droites de Tafel :

Pour une surtension η suffisamment élevée, l'une ou l'autre des réactions anodique et cathodique de la relation (3) devient rapidement négligeable. Ceci est illustré sur la figure II.12 où l'on a représenté l'évolution des densités de courant anodique I_a et cathodique I_c (appelées courbes élémentaires de polarisation) ainsi que la courbe globale de polarisation en fonction du potentiel E .

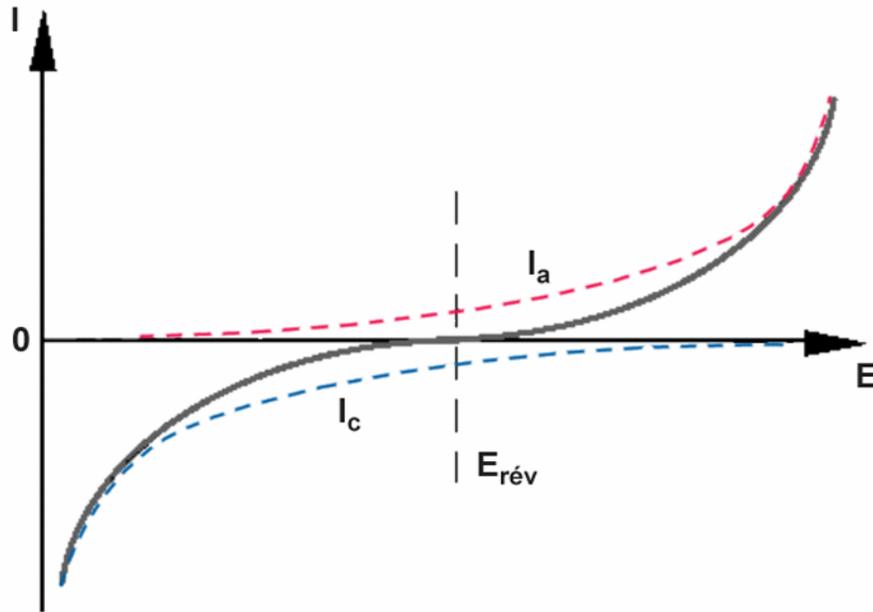


Figure III.13 : Courbes élémentaires anodique et cathodique et courbe globale de polarisation (échelle linéaire).

Dans le cas d'une surtension η_a anodique, on aura donc :

$$I = I_0 \exp\left(\frac{\alpha z F}{RT} \eta_a\right) \quad (7)$$

Et pour une surtension η_c cathodique :

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{(1-\alpha) z F}{RT} \eta_c\right) \quad (8)$$

Les relations (11) et (12) sont les **droites de Tafel** anodique et cathodique qui décrivent les limites anodique et cathodique de l'équation générale de Butler-Volmer (3). La représentation $\log I_0$ en fonction du potentiel appliqué E est couramment utilisée pour la détermination des paramètres cinétiques I_0 , β_a et β_c .

CHAPITRE 3 : LA TRIBOLOGIE

L'intersection des droites de Tafel (11) et (12) qui correspond à $|I_a| = |I_c| = |I_0|$ et à des surtensions $a \eta$ et $c \eta$ nulles ($E = E_{rev}$) permet en effet, sur une représentation de ce type, une détermination graphique de la valeur de la densité de courant d'échange à l'équilibre. Le type de diagramme ainsi obtenu est schématisé à la figure III.13. Les domaines de potentiel pour lesquels la courbe rejoint les droites de Tafel sont les domaines de Tafel anodique et cathodique.

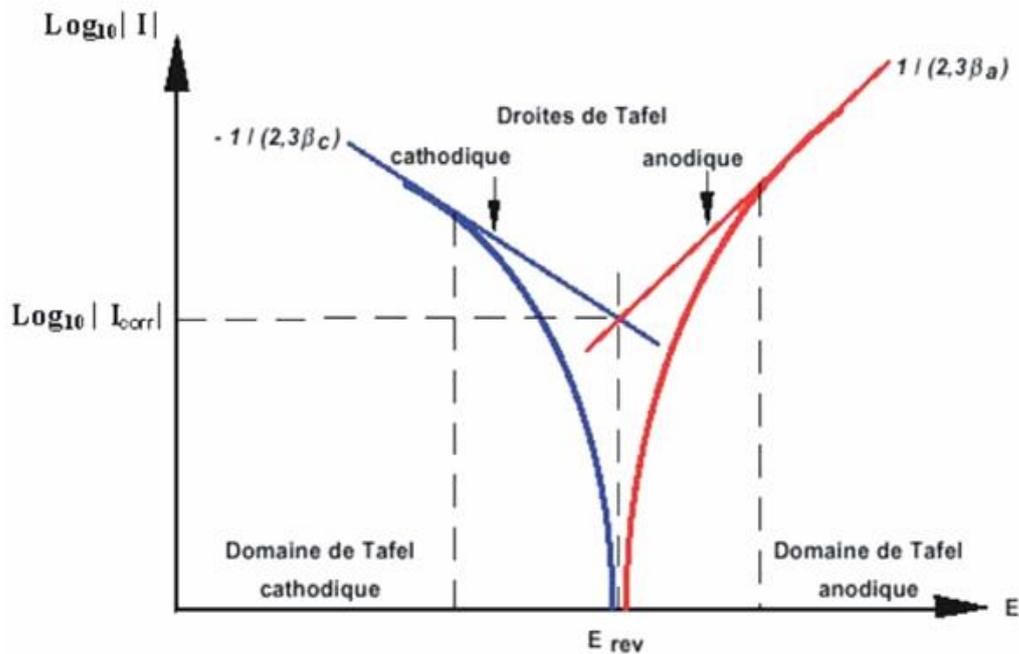


Figure III.14 : Courbe $\log |I| = f(E)$ et droites de Tafel.

Un système de corrosion est en fait constitué en général par deux réactions électrochimiques couplées correspondant l'une à l'oxydation du métal ($M \rightarrow M^{n+} + ne^-$) et l'autre la réduction de l'oxydant présent dans la solution (par exemple: $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$) comme illustré sur la figure III.14.

CHAPITRE 3 : LA TRIBOLOGIE

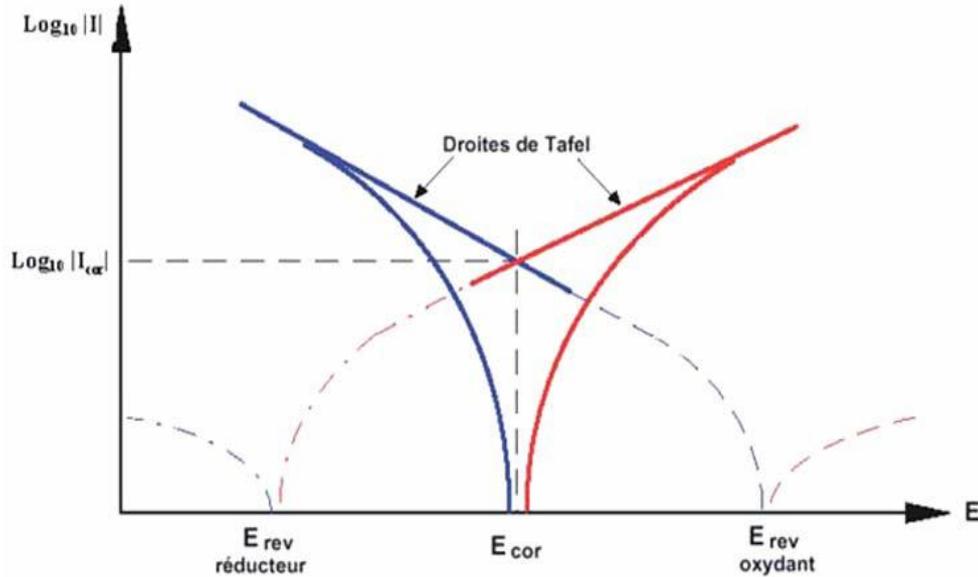


Figure III.15 : Représentation schématique d'un système de corrosion (échelle semi-log).

Au lieu des expressions "courant d'échange à l'équilibre I_0 " et "du potentiel réversible d'électrode E_{rev} ", on utilisera dans ce cas "densité de courant de corrosion I_{corr} " et "potentiel de corrosion E_{corr} " qui sera tel, qu'en l'absence de courant extérieur, on aura égalité des valeurs absolues des densités de courants anodique de dissolution et cathodique de réduction. La courbe obtenue porte le nom de courbe de polarisation. Cette courbe (en traits pleins sur la figure II.14) résulte de la somme de la courbe anodique du réducteur et de la courbe cathodique de l'oxydant. L'une ou l'autre de ces réactions devient rapidement négligeable lorsque l'on s'éloigne du potentiel E_{corr} , et la courbe rejoint le domaine de Tafel correspondant.

On donc :

$$I = I_{\text{Corr}} \left[\exp\left(\frac{\alpha z \cdot F}{RT} (E - E_{\text{Corr}})\right) - \exp\left(-\frac{(1 - \alpha) \cdot n \cdot F}{RT} (E - E_{\text{Corr}})\right) \right] \quad (9)$$

La résistance de polarisation, R_p s'exprime par :

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I} \Big|_{E_{\text{CORR}}}$$

La relation de Stern et Geary permet alors de lier R_p à la vitesse de corrosion :

$$I_{\text{corr}} = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{2.3 (\beta_a + \beta_c)} \frac{\Delta I}{\Delta E} \Big|_{E_{\text{CORR}}} = \frac{B}{R_p} \quad (10)$$

CHAPITRE 3 : LA TRIBOLOGIE

$\left. \frac{\Delta I}{\Delta E} \right|_{E_{\text{CORR}}}$ Représente la pente de la courbe $I=f(E)$ au potentiel de corrosion.

La représentation de la figure III.14 et la relation (10) sont à la base des techniques électrochimiques de détermination expérimentale des vitesses de corrosion.

III.7.5 Comportement des couches nitrurées :

L'influence de la microstructure des couches nitrurées avec ou sans traitement de post – oxydation a fait l'objet de nombreuses études: Mongis (J), Peyre (J.P), Duchateau(D), Michel (H), Leroy (C) et Konkoly (T) en 1993 ; Biestek (M), Czelusniak (A), Iwanow (J), Korwin (M), Liliental (W) et Tacikowski (J) en 1993 ; Torchane (L), Bilger (P), Dulcy (J) et Michel (H) en 1994 d'où les points suivants [44, 45, 46] :

- la constitution de la couche de combinaison est d'une importance capitale : nature des nitrures, épaisseur, répartition des phases ;
- les couches de combinaison ϵ sont favorables, une certaine porosité est également favorable, cela d'autant plus qu'un traitement de post- oxydation ou d'imprégnation est réalisé.

Par des essais de polarisation effectués à des échantillons exposés à une solution de NaCl de 3.5 % poids, A. Basu, J. Dutta Majumdar, J. Alphonse, S. Mukherji, I. Manna (2008) [47] ont étudié le mécanisme et la cinétique de la dissolution anodique des couches nitrurées sous plasma pendant 3h à différentes températures. Ils ont observé l'augmentation des potentiels de corrosion avec l'augmentation de la température de nitruration, tandis que la densité du courant de corrosion (I_{corr}) diminue. La résistance à la polarisation (R_p) augmente, ce qui signifie que la nitruration peut augmenter la résistance à la corrosion.

D'après cette étude, les phénomènes d'amélioration du comportement électrochimique peuvent être attribués à la présence d'une couche dense de nitrure en surface ($\epsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$ et $\gamma'\text{-Fe}_4\text{N}$). La formation de plus de nitrure aide à couvrir la surface de l'attaque de corrosion et pour cette raison qu'avec l'augmentation du temps ou de la température de nitruration la résistance à la corrosion s'améliore.

CHAPITRE 3 : LA TRIBOLOGIE

III.8.Lusure :

III.8.1.Les 4 principaux modes d'usure :

- **L'usure par abrasion** : elle se caractérise par la présence dans le contact d'un état de Surface rugueux ou par pénétration dans le matériau le plus tendre de particules dures provenant des débris d'usure du contact ou lié à la pollution du milieu. Ce mécanisme de dégradation qui fait intervenir dans les premiers instants uniquement les corps antagonistes, devient rapidement une usure à trois corps. Cette forme d'usure se manifeste par des polissages, des griffures, des micro-labourages, des arrachements de particules. Le micro-labourage (ou micro-usinage) se manifeste par des rayures à la surface du matériau le plus tendre sans arrachement de matière mais provoquant sur les bords du sillon une déformation plastique. Le plus souvent pour lutter contre l'usure abrasive, on cherche à durcir les matériaux (au moins leur surface).[21]

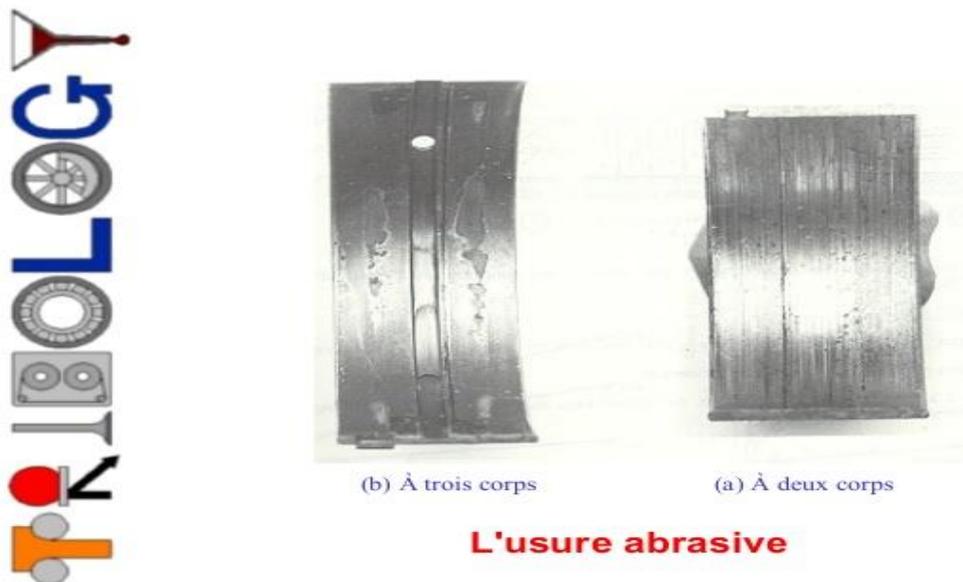


Figure : III.16 : l'usure abrasive

- **L'usure par transfert ou adhésion** : elle se caractérise par un transfert de débris d'un Des deux antagonistes vers l'autre soit par un mécanisme d'origine purement mécanique, soit suite à une réaction physico-chimique. Pour le transfert mécanique, plusieurs hypothèses ont été développées. Les micro-aspérités présentes dans le contact peuvent conduire à la diminution des zones en contact et générer aux jonctions des énergies très élevées qui peuvent favoriser les réactions physicochimiques (micro-soudage des aspérités en contact).[21]

CHAPITRE 3 : LA TRIBOLOGIE

Lors du frottement, il existe entre les matériaux antagonistes une multitude de micro-contacts qui supportent l'ensemble de la charge normale. En effet, dans ces régions, une constriction des lignes de forces engendre des concentrations de contraintes et l'augmentation de la température (températures flashes). L'évolution de ces aspérités dépend des conditions de sollicitations et de l'environnement.

Un équilibre est atteint dès que l'adhérence des films de transfert est supérieure à la force de frottement. Sinon, les contraintes de cisaillement générées provoquent la rupture à l'interface surface/film transféré et forme des débris.

Ces derniers peuvent être progressivement évacués du contact en laissant une surface très réactive siège d'un nouveau processus de dégradation. Si les débris restent piégés dans le contact, les aires réelles de contact s'accroissent et assurent un rôle de portance (effet de séparation des antagonistes, les débris supportent les pressions, l'usure et le coefficient de frottement sont moindres).[21]

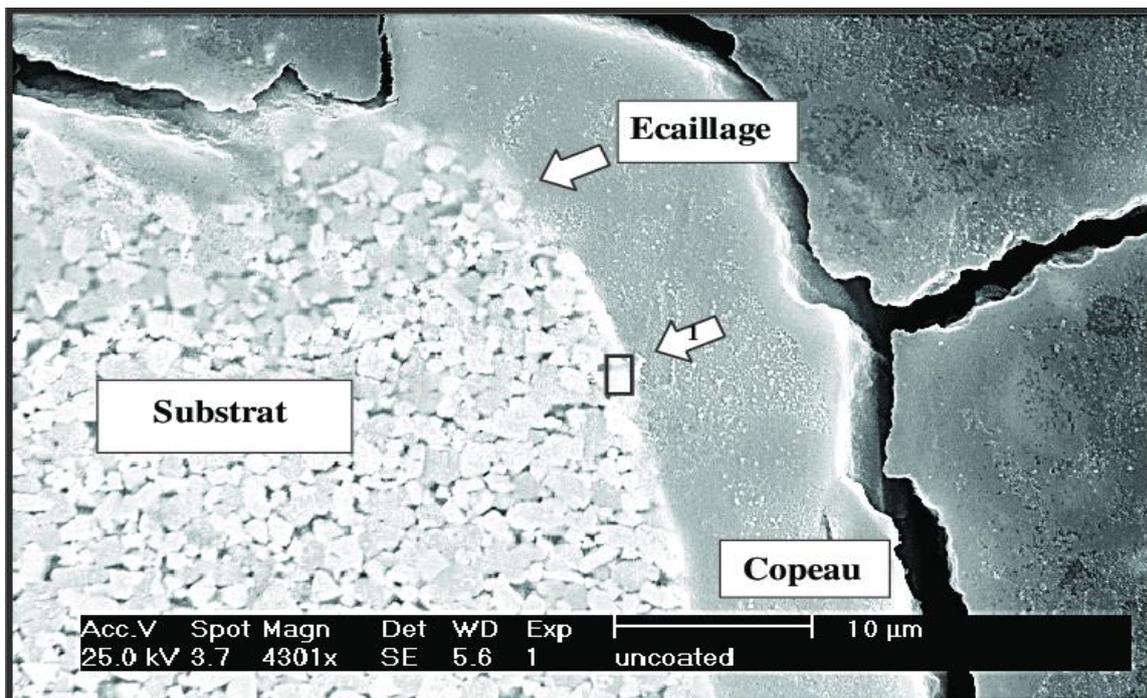


Figure III.17 : L'usure par adhésion.

CHAPITRE 3 : LA TRIBOLOGIE

L'usure par fatigue : elle est liée à l'action d'un mouvement cyclique et à la capacité des matériaux à absorber les énergies de déformation et les contraintes thermiques générées par frottement. L'usure par fatigue se manifeste par des fissures, des écailles et des changements de structure métallurgique. Les comportements face à ce mécanisme d'usure dépendent de la nature du matériau. Dans le cas de matériaux ductiles (matériaux métalliques ou polymères), la rupture par fissuration (ou mécanisme de délaminage) a lieu en sous-couche, parallèle à la surface de frottement, dans les zones où les contraintes de cisaillement sont maximales.

Dans un premier temps, il y a augmentation de la densité de dislocations en surface provoquant un écrouissage superficiel.

Dans un deuxième temps, l'énergie de frottement transmise à la surface de ce matériau a pour effet de redistribuer cette densité de dislocations en un réseau plus stable par glissement ou montée de dislocations. Il existe alors un déséquilibre entre les contraintes internes. En surface, suite à une densité plus élevée de dislocations, des contraintes de compression sont générées alors qu'en sous-couche, la densité de dislocations étant moindre, des cavités se forment, favorisant la fissuration.[21]



Figure : III.18 : L'usure par fatigue. [21]

CHAPITRE 3 : LA TRIBOLOGIE

L'usure par réactions tribochimiques : c'est un système à trois composantes, où interviennent la réactivité chimique entre les surfaces, la réactivité chimique avec le milieu environnant et la réactivité physico-chimique avec les débris. Ce type de dégradation résulte d'une seule ou de plusieurs réactions chimiques sous l'effet d'agent corrosif (environnement, lubrifiant) et des contraintes mécaniques pendant le frottement. Suivant l'état structural superficiel, il se crée des oxydes réactionnels dépendant de l'environnement.

Suite au frottement entre les surfaces, la rupture des aspérités qui s'oxydent, forme des débris en général très stables et très durs. Ces derniers jouent alors un rôle abrasif et viennent dégrader les surfaces antagonistes et donc entretenir l'usure. Par contre, il est possible de rencontrer une configuration moins agressive par la formation de films d'oxydes adhérents à la surface d'un des antagonistes et suffisamment résistants au cisaillement pour jouer un rôle protecteur.[21]

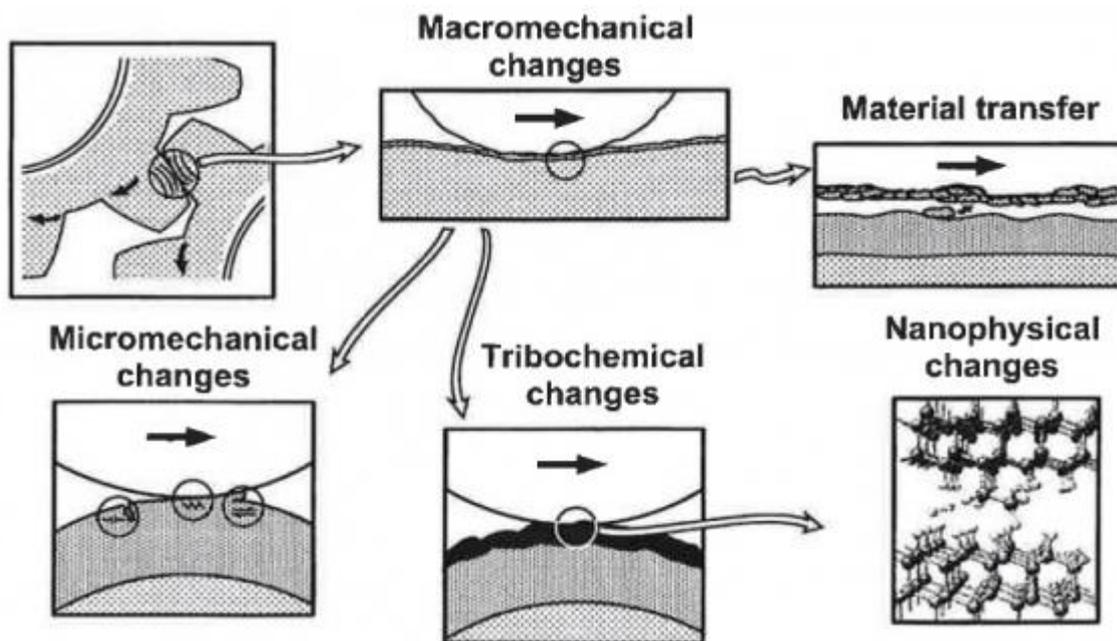


Figure : III.19 : L'usure par réaction tribochimique.

CHAPITRE 3 : LA TRIBOLOGIE

III.9. LA CORROSION :

III.9.1 : LES DIFFERENTES TYPES DE CORROSION :

Selon la nature de l'environnement et son comportement qui autour le métal, on peut déterminer le type de corrosion :

III.9.1.1. Corrosion chimique (sèche) :

La corrosion chimique est l'attaque directe du métal par son environnement. Ce type de corrosion se développe dans une solution non électrolyte ou sur action des gazeux. Lorsque le réactif est gazeux ou cette corrosion se produit à haute température, elle est alors appelée : Corrosion sèche ou corrosion à haute température [22].

III.9.1.1.1. Corrosion biochimique (bactérienne) :

La corrosion bactérienne est due à la présence de colonies importantes de bactéries dites anaérobies qui se développent dans les eaux contenant des sulfates.

La lutte contre cette forme de corrosion est à l'heure actuelle essentiellement d'ordre biologique, elle est réalisée par injection de produits bactéricides dans les milieux corrosifs [22]

III.9.1.1.2. Corrosion électrochimique (humide) :

Si le réactif est liquide, il est en général, accompagné d'une corrosion électrochimique produite essentiellement par l'oxydation d'un métal sous forme d'ions ou d'oxydes et réduite l'agent corrosif existant dans la solution électrolyte. Par ailleurs, elle se produit par des transferts électroniques entre un métal et une solution électrolytique à son contact (circulation d'un courant électrique) [23]. Pour une corrosion électrochimique on a :

Morphologie de la corrosion : [26]

En tenant compte de la forme et des sites de l'attaque, les principaux types de corrosion sont regroupés en deux grandes familles : la corrosion généralisée et la corrosion localisée.

CHAPITRE 3 : LA TRIBOLOGIE



Figure : III.20 : corrosion chimique.

III.9.1.2 : Corrosion uniforme ou généralisée :

On parle de la corrosion uniforme lorsque toute la surface du métal en contact avec la solution est attaquée de la même façon, elle se traduit par une dissolution uniforme de la surface métallique en contact avec l'agent agressif. Cette forme de corrosion du matériau se développe dans les milieux acides ou alcalins.



Figure III.21 : corrosion uniforme . [23]

III.9.1.3 : Corrosion localisée : Ce phénomène survient au contraire lorsque le matériau est mis en présence d'un environnement présentant vis à vis de lui un comportement sélectif. Cette sélectivité peut avoir des origines multiples tant au niveau du matériau (alliage hétéro phase, présence d'inclusions, protection de surface localement défectueuse, matériau

CHAPITRE 3 : LA TRIBOLOGIE

bimétallique...) qu'au niveau de l'environnement (variation locale de composition, de pH ou de température)

Cette forme de corrosion s'effectue dans quelque point de surface d'un matériau, les chercheurs ont subdivisé ce type de corrosion sous plusieurs types :



Figure III.22 : Corrosion Localisée

III.9.1.4 Corrosion galvanique :

C'est une des formes les plus courantes de corrosion en milieu aqueux, est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux matériaux dans laquelle une des électrodes (l'anode) se consomme au bénéfice de l'autre (la cathode) qui reste intacte

Elle se produit quand les métaux protégés par un film d'oxyde mince comme l'aluminium et ses alliages et les aciers inoxydables sont mis en contact avec un milieu aqueux (pour un pH voisin de la neutralité) contenant les halogénures, notamment le chlorure

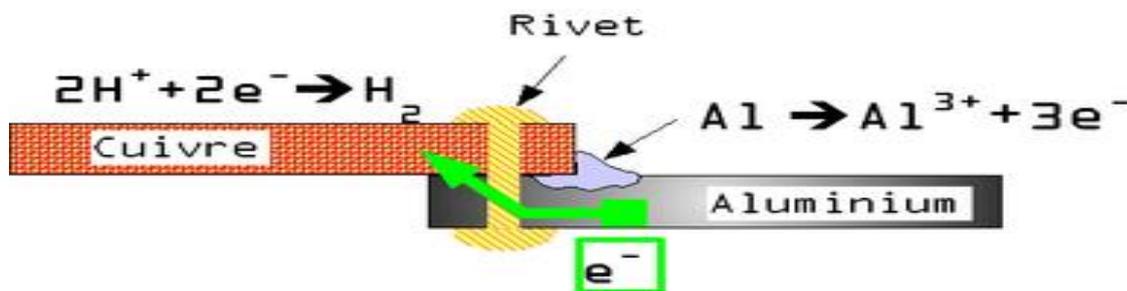


Figure III.23 : corrosion galvanique

CHAPITRE 3 : LA TRIBOLOGIE

III.9.1.5 Corrosion par piqure :

Elle se produit quand les métaux protégés par un film d'oxyde mince comme l'aluminium et ses alliages et les aciers inoxydables sont mis en contact avec un milieu aqueux (pour un pH voisin de la neutralité) contenant les halogénures, notamment le chlorure (Fig. III.24).



Figure III.24 : Corrosion par piqure.

III.9.1.6 Corrosion érosion :

La corrosion par érosion affecte de nombreux matériaux (aluminium, acier...), elle est due à l'action conjointe d'une réaction électrochimique et d'un enlèvement mécanique de la matière, elle est souvent favorisée par l'écoulement rapide d'un fluide (Fig. III.25).

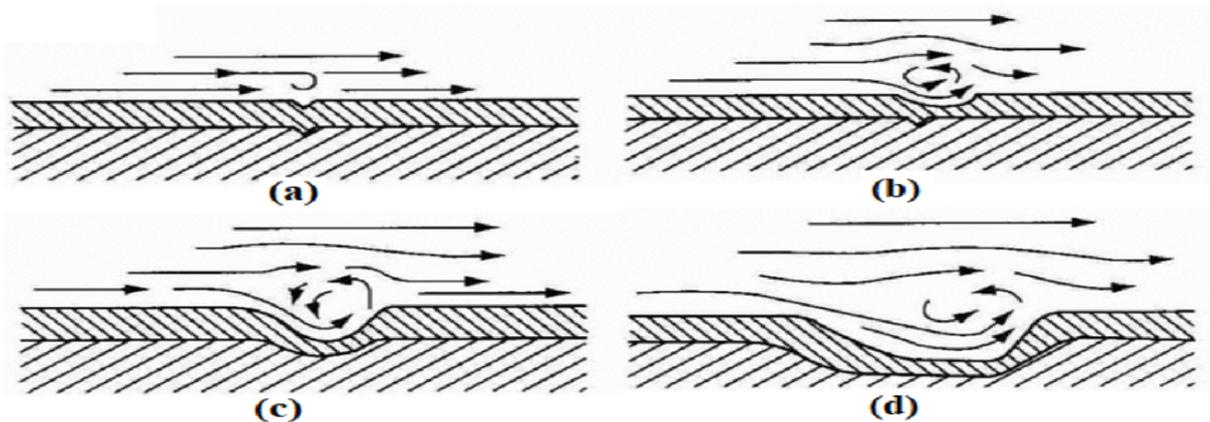


Figure III.25 : Représentation schématique du phénomène de corrosion-érosion

CHAPITRE 3 : LA TRIBOLOGIE

III.9.1.7 Corrosion Caverneuse :

Cette forme d'attaque est généralement associée à la présence de petits volumes de solution stagnante dans des interstices, sous des dépôts et des joints, ou dans des cavernes ou crevasses, par exemple sous les écrous et têtes de rivets.

III.9.1.8 Corrosion intergranulaire :

Cette forme de corrosion se manifeste par une attaque localisée aux joints de grains du matériau. L'hétérogénéité au niveau du joint de grain et l'existence d'un milieu corrosif jouant le rôle d'électrolyte représentent deux conditions pour développer cette forme de corrosion

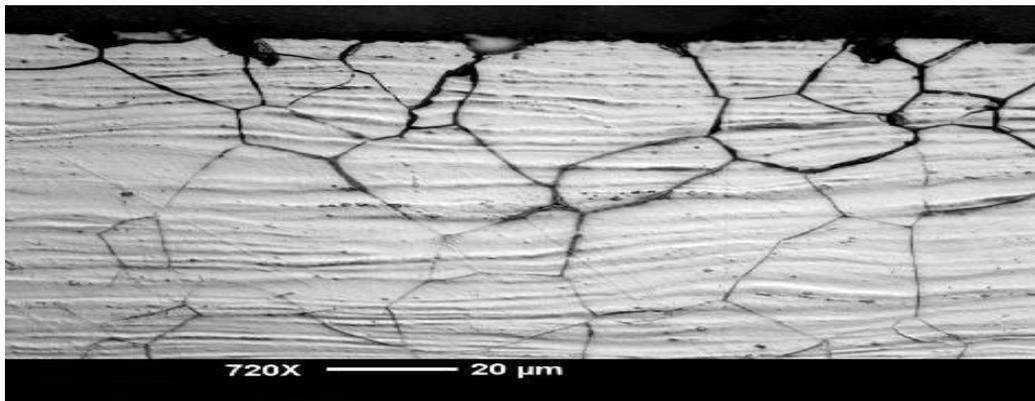


Figure III .26 : Corrosion intergranulaire .

II .9 .1.9 . Corrosion sélective :

Comme son nom l'indique, ce mode de corrosion se traduit par la dissolution sélective de l'un des éléments de l'alliage si celui-ci est homogène, ou de l'une des phases si l'alliage est polyphasé.

III.9 .1.10 Corrosion sous contrainte (CSC) :

Ce type de corrosion se définit comme un processus de développement de fissures, pouvant aller jusqu'à la rupture complète de la pièce sous l'action combinée d'une tension mécanique et d'un milieu corrosif

CHAPITRE 3 : LA TRIBOLOGIE



Figure III.27 : corrosion sous contrainte.

III.9.1.11 Corrosion fatigue :

La corrosion-fatigue se distingue de la CSC par le fait que les contraintes appliquées ne sont plus statiques, mais cycliques (efforts périodiques alternés). [20]

Chapitre IV : Travaux sur la nitruration des aciers de construction

IV.1. Etude de travaux sur la nitruration des aciers de construction : [26, 27]

IV.1.1 Etude 1 : réalisé par A. C, elik, M. Karakan, A. Alsaran, I. Efeoglu. « The investigation of structural, mechanical and tribological properties of plasma nitrocarburized AISI 1020 steel ». Surface & Coatings Technology 200 (2005) 1926 – 1932

- **IV.1.1.1 Échantillons de l'étude :**

La nuance d'acier de l'étude est AISI 1020. La composition de cette nuance est présentée dans le Tableau IV.1 :

Element	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	S	Cu	P
wt.%	0.18	0.54	0.27	0.08	0.05	0.010	0.031	0.051	0.026	0.019

Tableau IV.1 : Composition chimique de l'acier AISI 1020

- **IV.1.1.2. Conditions du traitement**

Après normalisation à 920 °C pendant 25 min, les échantillons sont bien préparés par polissage et nettoyés par l'alcool. Par la suite, Ils ont subi un traitement de nitrocarburation par plasma aux températures : 592°C pour des temps de maintien de 1, 2, 4, 8 et 12h et à 640°C pendant 4 h, dans un mélange de gaz formé de N₂+H₂+CO₂ pour différentes proportions. La pression est maintenue à 5x10² Pa et la différence de potentiel est de 500 V. La figure IV1 montre le schéma de ce procédé.

Chapitre IV : Travaux sur la nitruration des aciers de construction

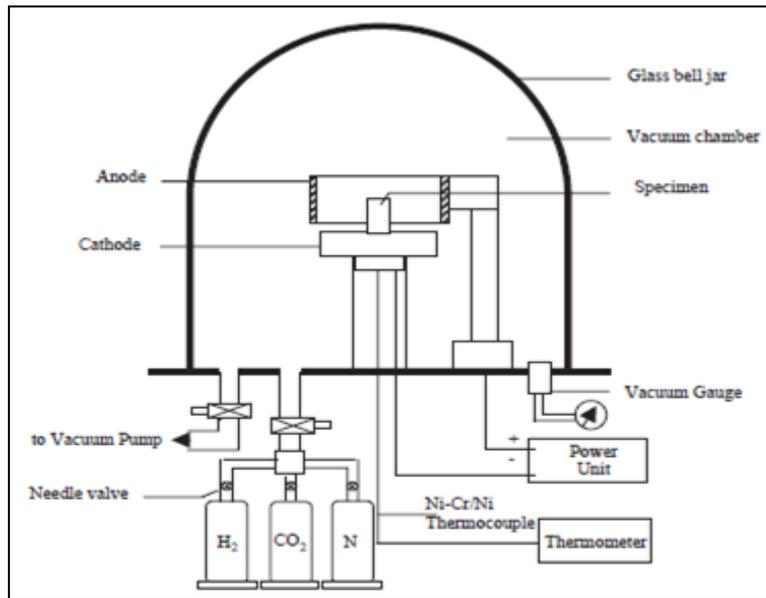


Figure IV.1 : Schéma montrant le montage du procédé de nitrocarburation par plasma.

• IV.1.1.3. Résultats obtenus :

Le traitement de nitrocarburation a permis la formation d'une couche biphasée dite de combinaison et une couche de diffusion située entre cette couche et la matrice.

La microstructure après nitrocarburation à 570°C pendant 1 heure est présentée par la figure IV.2.

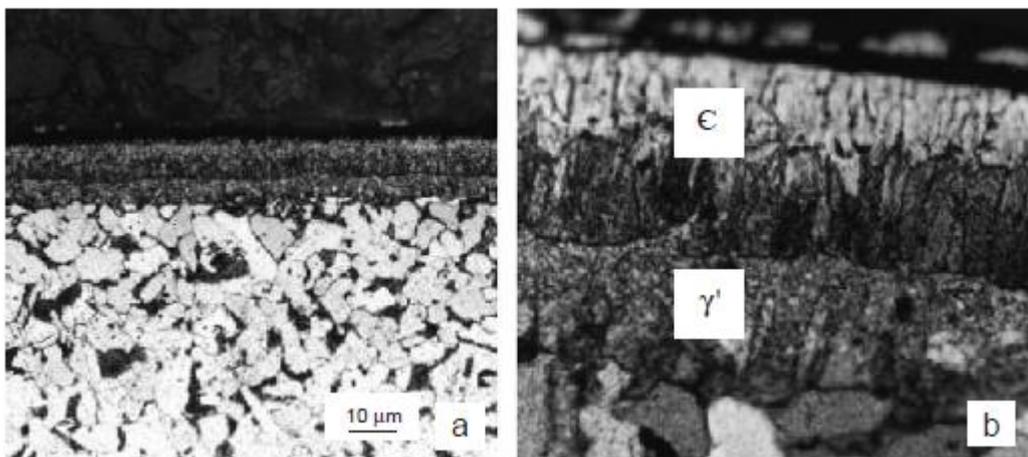


Figure IV.2 : Micrographies de l'acier AISI 1020 nitrocarburé à 570°C pendant 1 heure.

La métallographie optique montre la présence en extrême surface d'une couche de combinaison de nitrures de fer ϵ - Fe₂-3N ou Fe₂-3(C, N) et γ' - Fe₄N ou Fe₄(C, N),

Chapitre IV : Travaux sur la nitruration des aciers de construction

suivi d'une couche de diffusion. Ces résultats sont confirmés par la diffraction des RX. Les épaisseurs et les duretés superficielles des différentes couches sont regroupées dans le tableau IV.2.

Process parameters			Experimental results		
Temperature (°C)	Time (h)	Gas mixture	Surface hardness (HV _{0.05})	Compound layer (μm)	Diffusion layer (μm)
500	4	A	250–290	12–14	120–140
	1	A	300–340	15–17	80–100
	2	A	320–360	16–18	110–130
	4	A	370–410	17–20	130–150
570	4	B	340–380	17–18	130–150
	4	C	380–420	13–15	160–180
	8	A	360–400	17–19	150–170
	12	A	350–390	16–18	160–180
640	4	A	360–400	18–20	190–210

A: 49%N₂+49%H₂+2%CO₂; B: 75%N₂+23%H₂+2%CO₂; C: 23%N₂+75%H₂+2%CO₂.

Tableau IV.2 : Epaisseurs des couches formées en fonction de température, de temps et de proportions des gaz utilisés.

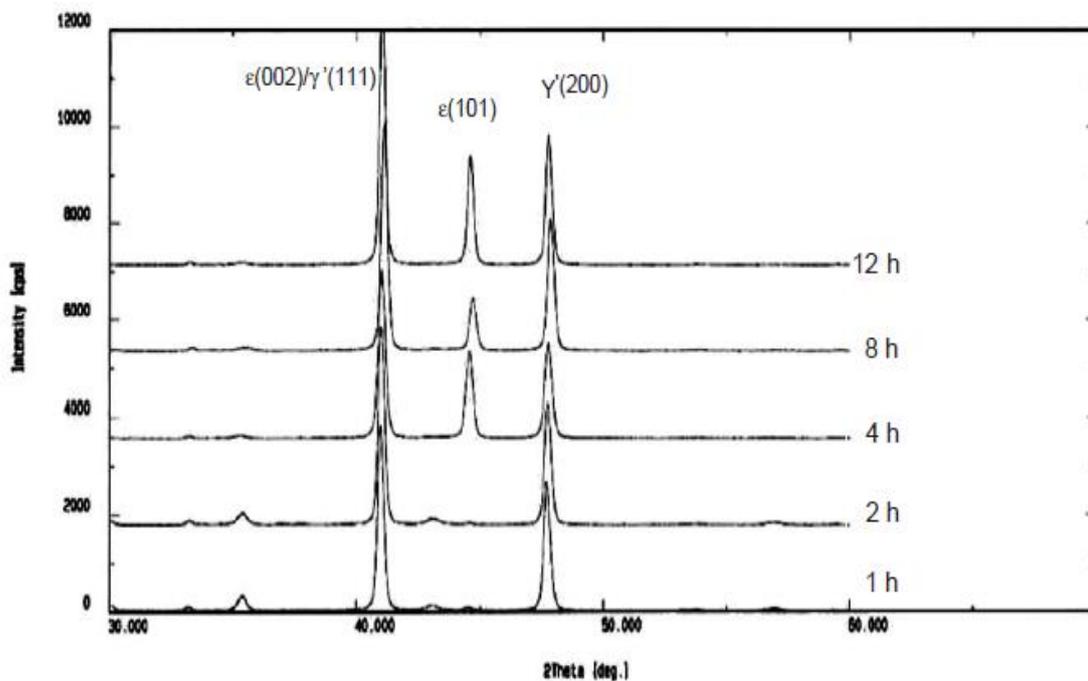


Figure IV.3 : Spectres de diffraction de l'acier AISI 1020 nitrocarburé à 570°C pendant différents temps et pour le mélange 49%N₂+49%H₂+2%CO₂

Chapitre IV : Travaux sur la nitruration des aciers de construction

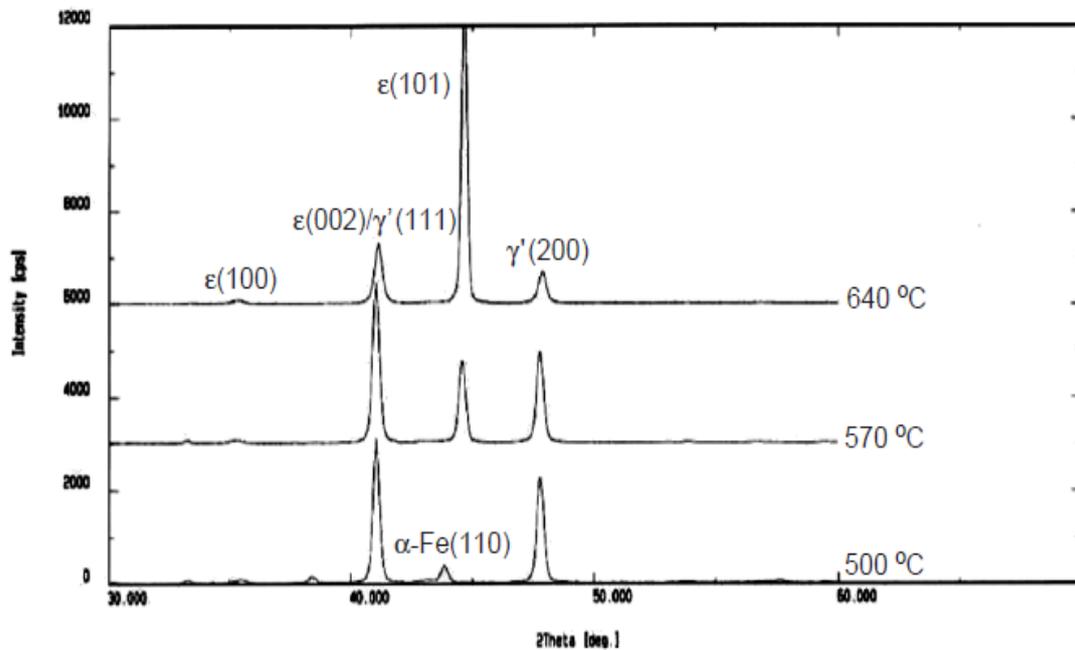


Figure IV.4 : Spectres de diffraction de l'acier AISI 1020 nitrocarburé pendant 4h à différentes températures et pour le mélange 49%N₂+49%H₂+2%CO₂

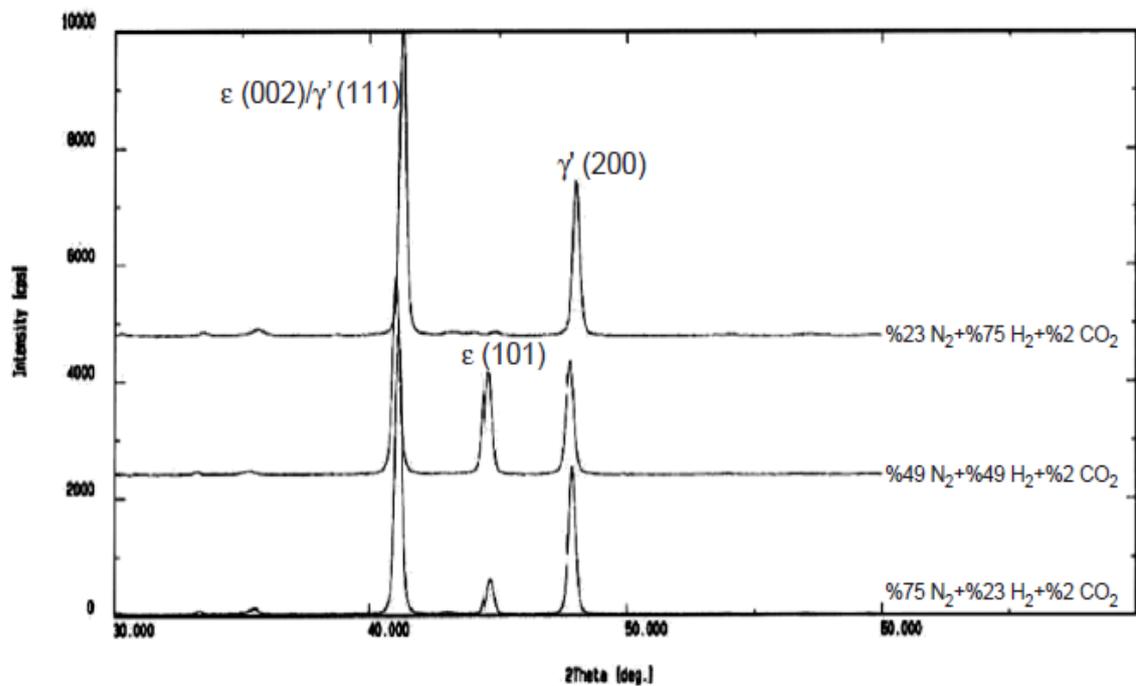


Figure IV.5 : Spectres de diffraction de l'acier AISI 1020 nitrocarburé à 570°C pendant 4h et pour différents mélanges de gaz.

Chapitre IV : Travaux sur la nitruration des aciers de construction

Les profils de microdureté montrent que l'évolution de la dureté depuis la surface est fonction de différentes conditions de traitement. Elle augmente avec l'augmentation de la température et du temps de traitement pour le même mélange gazeux.

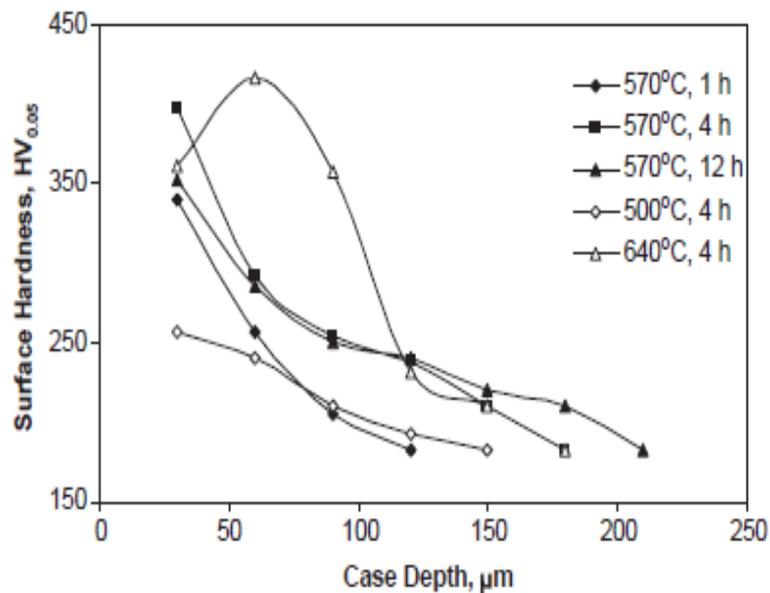


Figure IV.6 : Profils de microdureté à différentes conditions et pour le mélange $49\%N_2+49\%H_2+2\%CO_2$

Le test de frottement est réalisé sur un tribomètre en utilisant une bille en tungstène, sous une charge de 10N et par une vitesse 4.7 m/min pour un parcours de 140 m montre que le meilleur comportement correspond au traitement de 640°C/ 4h où le coefficient de frottement est plus faible.

Chapitre IV : Travaux sur la nitruration des aciers de construction

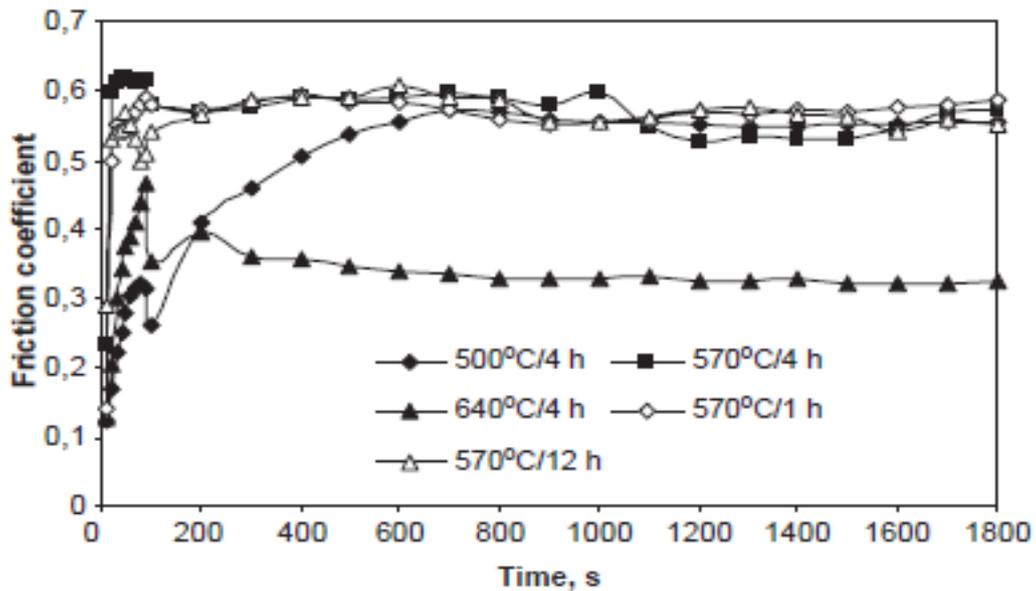


Figure IV.7 : Evolution du coefficient de traitement en fonction des conditions de traitement.

IV.1.2. Etude 2 :

Réalisé par CHALA, C. SAIED, Z. BOUMERZOU, L. CHEKOUR et M.S. AIDA. « FORMATION OF LAYERS BY PLASMA NITRIDING IMPOSED TO 32crmov13 LOW ALLOY STEEL ». Courrier du Savoir N°05, Juin 2004, pp.63-68.

• IV.1.2.1. Échantillons de l'étude :

L'acier étudié est le 32CrMoV13 de composition C 0.3, Si 0.31, Mn 0.5, Cr 3.25, Mo 0.44, Ni 0.11, V 0.1.

• IV.1.2.2 Conditions du traitement de nitruration par plasma :

Les échantillons sont nitrurés à 500°C dans les conditions du tableau IV.3.

Chapitre IV : Travaux sur la nitruration des aciers de construction

	Gas mixture	Time of nitriding (hours)
A	20% N ₂ + 80% H ₂	2, 4, 6, 8
B	20% N ₂ + 75% H ₂ + 5% CH ₄	2, 4, 6, 8
C	75% N ₂ + 20% H ₂ + 5% CH ₄	2, 4, 6, 8
D	80% N ₂ + 20% H ₂	8

Tableau IV.3 : Conditions de nitruration par plasma.

• IV.1.2.3. Résultats obtenues :

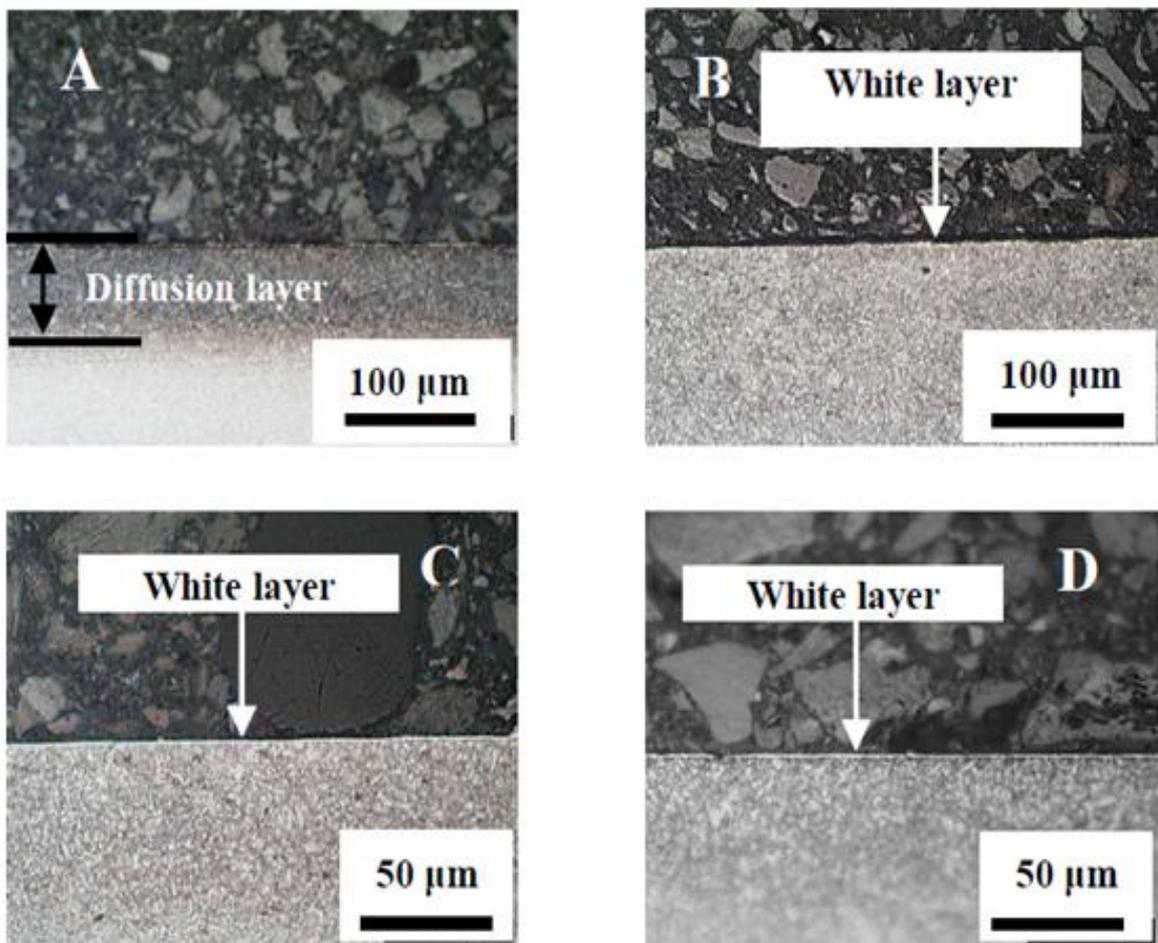


Figure IV.8 : Microstructures des coupes transversales de l'acier 32CrMoV13 nitruré par plasma. (A) 8 h dans le mélange A, (B) 2 h dans le mélange B, (C) 2 h dans le mélange C, (D) 2 h dans le mélange D.

Chapitre IV : Travaux sur la nitruration des aciers de construction

Les observations métallographiques des couches nitrurées révèlent la présence d'une couche blanche dense, de faible épaisseur (2 - 20 μ m) suivi d'une couche de diffusion, pour les mélanges de gaz B, C et D et pendant les différents temps de maintiens, alors que l'utilisation du mélange A ne permet la formation de cette couche qu'après un temps supérieur à 2h. La diffraction des RX confirme la présence de la couche blanche de combinaison formée des nitrures de fer ϵ -Fe₂₋₃N et γ' -Fe₄N.

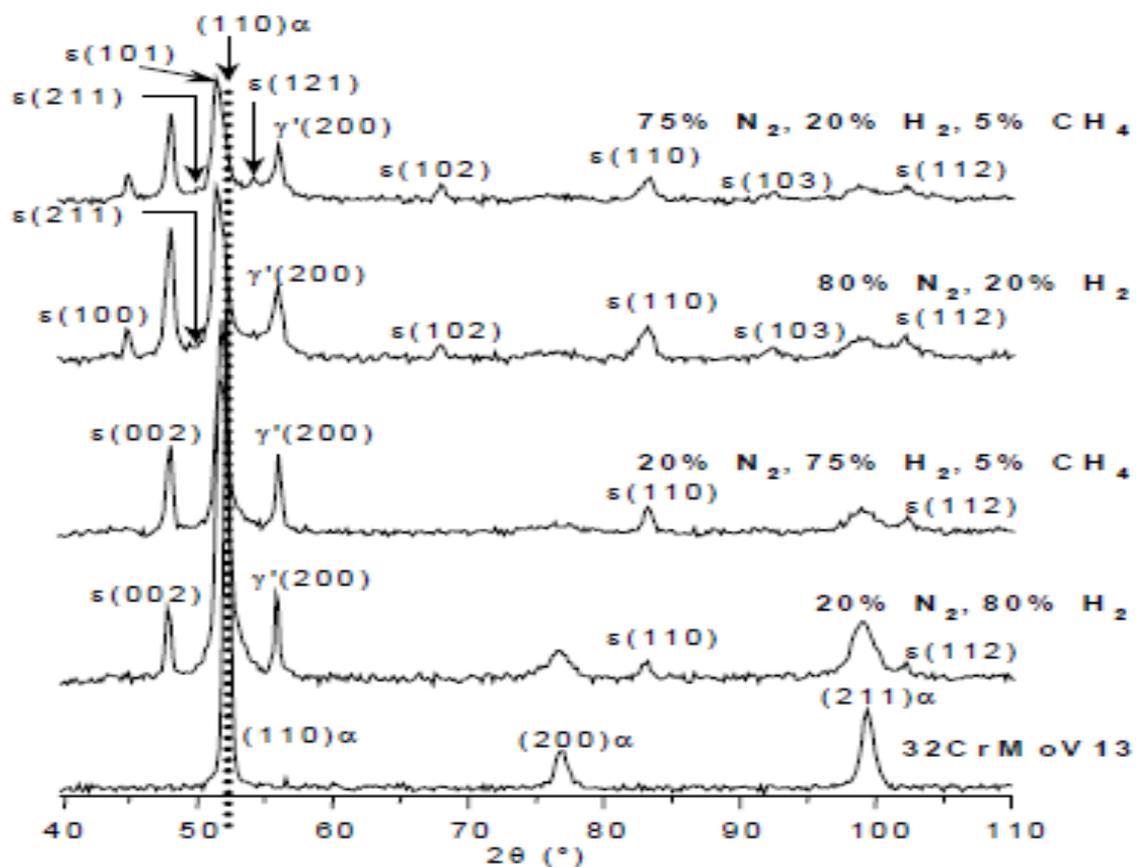


Figure IV.9 : Spectres de diffraction de l'acier 32CrMoV13 nitruré par plasma pendant 8h en fonction des mélanges de gaz utilisés.

Les profils de microduretés effectués sur l'acier étudié, nitruré dans les différentes conditions de temps et de mélanges gazeux sont présentés par les figures IV.10 et 11.

Chapitre IV : Travaux sur la nitruration des aciers de construction

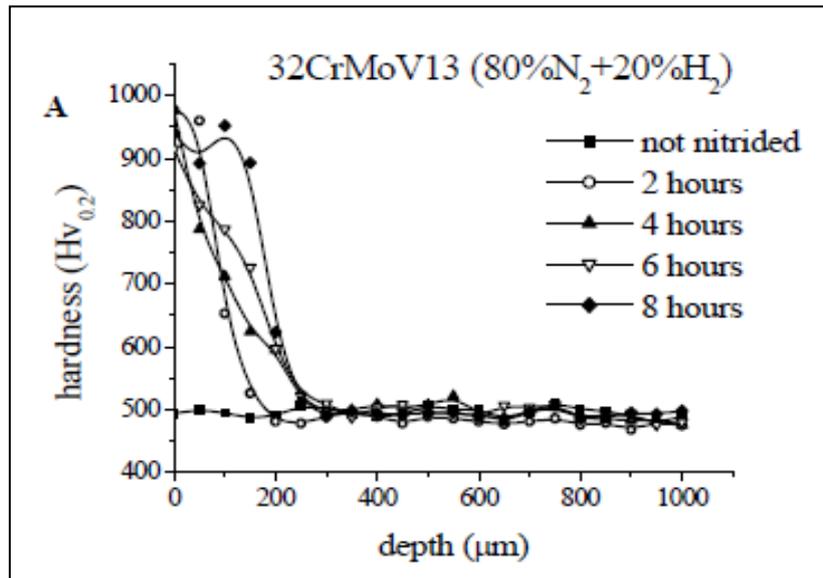


Figure IV.10 : Profils de microdureté de l'acier 32CrMoV13 nitruré à différents temps de traitement dans le mélange de gaz (80%N₂ + 20%H₂).

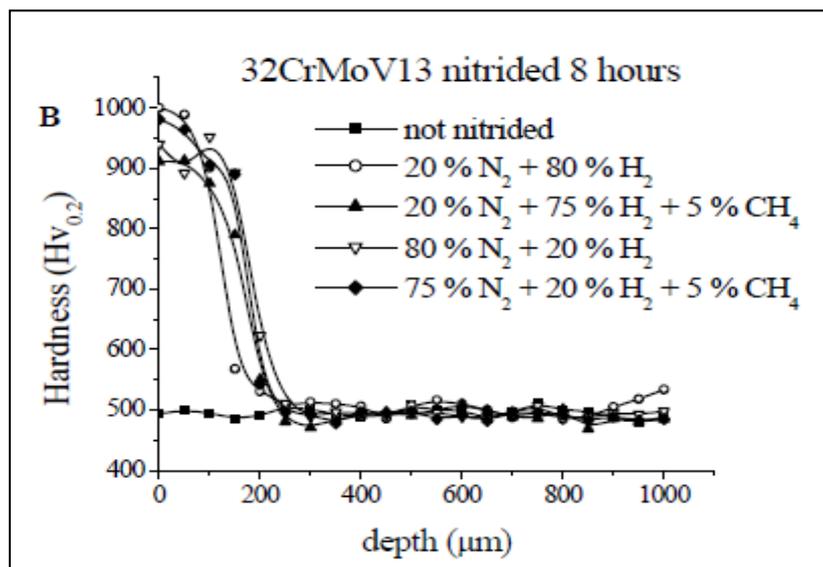


Figure IV.11 : Profils de microdureté de l'acier 32CrMoV13 nitruré pendant 8h, dans différents mélanges de gaz.

L'utilisation du mélange de gaz A, a permis l'obtention d'une dureté superficielle de (850 HV) et par l'utilisation des mélanges B, C et D, elle est de 900 – 1000 HV.

L'augmentation du pourcentage d'azote de 20 à 80% ou bien l'introduction du gaz méthane dans le mélange gazeux assure l'obtention de hautes valeurs de dureté en

Chapitre IV : Travaux sur la nitruration des aciers de construction

surface. En utilisant le mélange A, l'épaisseur de la couche nitrurée est de l'ordre 100 μm , et en utilisant un mélange formé de N_2 et 5% CH_4 , elle est de 200 μm .

CONCLUSION

- Les aciers de construction présentent de bonnes propriétés mécaniques à l'état traité. Ils sont caractérisés par une bonne trempabilité à l'huile et une bonne résistance aux surcharges. Ils sont utilisés pour la fabrication des pièces mécaniques exigeant une bonne ténacité : boulons, axes, tiges de piston, et des pièces de moyennes à fortes sections : arbres, essieux, crémaillères, vilebrequins, bielles, engrenages...
- Les propriétés intéressantes de ces aciers leur font d'excellents matériaux pour les applications de traitement thermo-chimique de nitruration.
- La nitruration et la nitrocarburation par plasma des aciers de construction peuvent être effectuées à basse température, dans différents mélanges de gaz. Dans le cas de nitruration un mélange de gaz N_2 et H_2 à différentes proportions sont utilisés. L'augmentation du pourcentage d'azote ou bien l'introduction du gaz méthane dans le mélange gazeux assure l'obtention de hautes valeurs de dureté en surface. Pour la nitrocarburation ferritique des mélanges gazeux, formés de N_2 , H_2 et CO_2 à différentes proportions sont utilisés.
- Ces traitements peuvent former en surface des couches de combinaisons dites couches blanches denses de faibles épaisseurs, et ne présentant pas de porosités en extrême surface, de nitrure de fer ϵ - $Fe_{2-3}N$ et γ' - Fe_4N suivi de couches de diffusions. Ces configurations dépendent de la composition chimique de l'acier de construction et des conditions de traitement utilisé.
- L'évolution de la dureté depuis la surface est fonction des conditions de traitement. Elle augmente avec l'augmentation de la température et du temps de traitement en utilisant le même mélange gazeux.
- Les traitements de nitruration et nitrocarburation par plasma des aciers de construction confèrent aux pièces traitées un meilleur état de surface et de bonnes propriétés mécaniques et tribologiques.

LES REFERENCES BIBLIOGRAPHIE :

- [1] MICHEL COLOMBIE. « Matériaux Métalliques ». Edition DUNOD (2000).
- [2] Siad BENZAADA. Traitements thermiques, classification et désignation des aciers et fontes.
- [3] Fiche Technique Fonte de précision. Fonderie HEGI SA, CH 3414 Oberburg, E-mail : fonte@hegi.ch
- [4] R. Leveque. Traitements superficiels. M1135 (1993).
- [5] C.Leroux. « Les procédés de nitruration appliqué aux outillages de forges à chaud ». CETIM (1995).
- [6] D. Ghiglione, C. Louroux, C. Tournier. « Pratique des traitements thermochimiques de nitruration, nitrocarburation et dérivés ». Technique de l'ingénieur M1227 (2002).
- [7] Gérard Béranger et Henri Mazille. « Phénomènes de corrosion ». Corrosion des métaux et alliages – Mécanismes et phénomènes. Hermès Science publications (2002).
- [8] Jean Marie Georges. « Frottement et usure, Aspect macroscopique ». Frottement, Usure et Lubrification. Eyrolles et CNRS Editions (2000).
- [9] L. Barralier. « Etude de la modélisation des contraintes résiduelles dans les couches nitrurées ». E.N.S.A.M. D.E.A mécanique et matériaux (1989) .
- [10] D. Girondin et JY. Moraux. L'acier CrMoV13 nitruré profond pour application aéronautique.
- [11] L. Barralier, J. Banallis et L. Castex. « Caractéristiques mécaniques des couches nitrurées. Cas des pièces en aciers ». Revue traitement thermique 276 (1994) 49.
- [12] GERALD ZAMBELLI & LEO VINCENT : « Matériaux Et Contacts », Une approche tribologique.

- [13] H E F groupe, Guide d'emploi des traitements de surface appliqués aux problèmes de frottement, édition tec et doc, 2000, P 08.
- [14] JEAN-MARIE GEORGES : «Frottement, usure et lubrification », La tribologie ou sciences des surfaces ; Edition Eyrolles.
- [15] M. Cartier, P. Kapsa. « Usure des contacts mécaniques ». Technique de l'ingénieur BM. 5067 (2002).
- [16] A. Constant, G. Henry, J. C. Charbonnier. « Principes de Base des Traitements Thermiques Thermomécaniques et Thermo-chimiques des Aciers ».PYC Edition (1992).
- [17] F. Leconte. « Influence de la nature de la couche de combinaison sur le comportement tribologique des pièces nitrurées ». Journée d'études de tribologie (1996) 245.
- [18] J. Banalis, G. Meader. Précis de métallurgie, Elaboration, Structure et Propriétés. Edition Nathau (1997).
- [19] Mongis (J), Peyre (J.P), Duchateau (D), Michel (H), Leroy (C) et Konkoly (T). « Tenue à la corrosion des couches nitrurées parachevées par oxydation». Journée ATTT (1993).
- [20] Corrosion des métaux et alliages, GERARD BERANGER. Henri Mazielle – LAVOISIER, 2002.
- [21] OLIVIER BARRAU étude du frottement et de l'usure d'acier à outils de travail à chaud.
- [22] SILINI MARWA mémoire fin d'étude effet de dureté sur le comportement en frottement et l'usure.
- [23] SAIGAA NARIMEN Mémoire fin d'étude : étude physicochimique de l'inhibition de la corrosion d'un acier au carbone.
- [24] SAIGAA NARIMEN Mémoire fin d'étude : étude physicochimique de l'inhibition de la corrosion d'un acier au carbone.

[25] E. M .Sherif, R.M.Erasmus, J.D.Comins. Journal of Colloid and Interface. 306, 96, 2007.

[26] Y. Abboud, A. Abourriche, T. Saffaj, M. Berradaa, M. Charrouf, A. Bennamara, H. Hannache, Desalination. 237, 175, 2009.

[27] A.Chala, C.Saied, Z .Boumerzoug, L.Chekour, M.S.Aida ...Formation des couches par nitruration plasma impose à l'acier 32CrMoV13 / Laboratoire des matériaux semi-conducteur (université Beskra).

[28] A.Celik , M.Karakan , A.Alsaran , I.Efeoglu Department of mechanical Ataturk university TURKEY (2005).