

# *Dédicace*

*JE dédie ce modeste travail à :*

*Mon très cher père et ma très chère Mère qui sont sans cesse à mes côtés ;*

*Mes très chers frères et mes très chères sœurs qui m'ont toujours soutenu ;*

*Mes grands-parents, mes oncles ;*

*Toute ma famille ;*

*Tous mes amis et mes collègues.*

*S. Brahim*

# Remerciements

*Je remercie Dieu tout puissant pour la volonté, la santé ET la patience qu'il m'a donnée Durant tous ces années d'études.*

*Les travaux effectués dans cette mémoire ont été effectués au sein du Laboratoire des machines-outils au niveau du hall technologique du Département génie des matériaux ET métallurgie ET Département de mécanique - Université d'Annaba.*

*Tiens à exprimer ma gratitude à Monsieur BOULANOVAR Lakhidar, Maître de conférences, pour avoir assuré la direction de cette mémoire Pour SA confiance ET pour SES encouragements.*

*Je remercie tout particulièrement Monsieur Mokas Nacer, Enseignants de département de mécanique, université de Badji Mokhtar Annaba. Pour avoir assuré la Codirection de Cette mémoire*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au Monsieur LAGREDA, Maître de conférences, université d'Annaba, pour l'honneur qu'il m'a fait en présidant le jury de ce mémoire ainsi qu'à :*

*Monsieur MERABTINE.A, Maître de conférences, université de Badji Mokhtar d'Annaba,*

*Monsieur MENAIL.Y, Maître de conférences université de Badji Mokhtar de d'Annaba.*

*Mes remerciements vont également à :*

*Mes collègues, Amis, techniciens ET doctorants du Département de métallurgie pour leur soutien ET leur aide à finaliser Ce travail,*

*Je remercie Pr.boudebane Saïd pour leur aide à interprété les résultats des traitements thermiques.*

*Enseignants, techniciens, Administrateurs ET doctorants du Département de Mécanique, pour leur Soutien moral ET leur accueil chaleureux,*

*Je n'oublie pas, enfin, d'exprimer ma profonde reconnaissance à :*

*Ma très chère Mère mes frères ET mes sœurs que Dieu me les garde.*

*SEDIKI Brahim*



# Sommaire

<b>Introduction :</b> .....	1
<b>Chapitre I :</b> generalites sur le contact dynamique, frottement et l'usure des materiauxmetalliques.....	2
I.1. Frottement.....	3
I.1.1. Définition .....	3
I.1.2. Force et coefficient de frottement .....	3
I.1.3. Comportement du coefficient de frottement .....	5
I.1.3.1. Vitesse de glissement .....	5
I.1.3.2. Chemin de glissement parcouru .....	6
I.1.3.3. Etat de surface .....	7
I.1.3.4. Nature des métaux.....	7
I.1.3.5. Charge normale appliquée.....	7
I.1.3.6. Température ambiante .....	8
I.1.4. Valeurs pratiques du coefficient de frottement.....	8
I.1.5. Modèles de frottement .....	9
I.1.5.1. Frottement de glissement.....	9
I.1.5.1.1. Adhérence .....	10
I.1.5.1.2. Labourage .....	11
I.1.5.2. Matériaux utilisables pour le frottement .....	12
I.2. Définition et mécanisme d'usure .....	13
I.2.1. Définition de l'usure .....	13
I.2.1.1. Usure par adhérence (usure adhésive) .....	13
I.2.1.2. Quantification de l'usure adhésive.....	16
I.2.1.3. Dimensions des particules d'usure ... ..	16
I.2.1.4. Aspects métallurgiques de l'usure adhésive des aciers .....	17
I.2.1.5. Comment lutter l'usure adhésive.....	17

I.2.2.Usure abrasive .....	18
I.2.2.1.Définition de l'usure abrasive .....	18
I.2.2.2. aspect tribologiques de l'usure abrasive.....	18
I.2.2.3. Aspect Métallurgique de l'usure abrasive des aciers .....	21
I.2.3. Usure par oxydation .....	22
I.2.3.1. Introduction .....	22
I.2.3.2. Oxydation du fer .....	23
I.2.3.2.1. L'oxyde ferreux FeO.....	23
I.2.3.2.2. La magnétite Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> .....	23
I.2.3.2.3. L'oxyde ferrique Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	23
I.2.3.3. Mécanismes de l'usure par oxydation .....	23
<b>Chapitre II : matériaux et les changements structurales selon les traitements thermiques.....</b>	<b>24</b>
II.Matériaux .....	25
Introduction .....	25
II.1. Les aciers au carbone .....	25
II.1.1. La microstructure des aciers au carbone .....	25
II.1.1.2.Principaux types des défauts .....	26
II.1.1.2.1Défauts ponctuels (sans dimension).....	26
II.1.1.2.2. Défauts linéaires (à une dimension).....	27
Dislocation coin : .....	27
Dislocation vis :.....	27
II.1.1.2.3.Défauts surfaciques (à deux dimensions).....	27
Joints de grains.....	27
Une macle.....	29

II.1.1.2.4. Défauts volumiques (à trois dimensions).....	29
II.1.1.3. Rôle des dislocations dans les déformations plastiques.....	29
II.1.1.4. Mécanismes mis en jeu lors de la déformation plastique.....	31
II.1.2. instruments de caractérisation des microstructures .....	32
II.2.1 Matériaux utilisés .....	32
II.3. Les traitements thermiques .....	33
II.3.1 Courbe de refroidissement du fer.....	33
II.3.2. LES RECUITS :.....	34
II.3.2.1. Cycle thermique :.....	35
II.3.2.2. Processus de recuit :.....	35
a) Recuit contrôlé avec refroidissement continu :.....	35
b) Recuits à basse température :.....	35
c) Recuits isothermes :.....	35
II.3.2.3. Différents types de recuit :.....	38
Le recuit d'adoucissement :.....	38
Le recuit de normalisation :.....	38
Le recuit de détente :.....	40
Recuit de diffusion :.....	40
II.3.3. La Trempe.....	41
II.3.3.1. Trempabilité.....	41
II.3.3.2. Transformation martensitique.....	42
<b>Chapitre III</b> méthodes expérimentales .....	45
III.1. traitement thermique sur l'acier C 18 .....	46
III.1.1. four électrique avec $T^{\circ} \text{ max} = 1200^{\circ} \text{C}$ .....	46
III.1.2. bac de refroidissement .....	46
III.1.3. extracteur des échantillons « pelle – pince ».....	47
III.1.4. microscope optique .....	47

III.1.5. methodes experimentales des traitements thermiques de l'acier X C18.....	47
III.2. essais de durete .....	48
III.3. étude des forets hélicoïdaux lors de l'usinage de l'acier C18 trempé : .....	49
III.3.1. outil de coupe.....	49
III.3.2. machine-outil .....	49
III.3.3. conditions de coupe.....	50
III.3.4. plan d'experience.....	50
<b>Chapitre IV : resultats et interpretations .....</b>	<b>55</b>
IV .1. observations microscopique .....	56
a)Par le microscope optique de département de mécanique (UBMA) .....	56
b) par le microscope optique d'université lorraine (Metz-France) .....	58
IV.2. traitement graphique des resultats d'usure durant l'operation de perçage .....	59
<b>Conclusion.....</b>	<b>63</b>
<b>Perspectives : .....</b>	<b>63</b>
<b>References Bibliographiques.....</b>	<b>64</b>

## Liste des figures

Figure I.1: Force de frottement.....	3
Figure I.2: Mouvement de glissement [8] .....	3
Figure I.3: Angle de frottement [8] .....	4
Figure I.4: Cône de frottement.....	5
Figure I.5: Influence de la vitesse sur le coefficient de frottement [8] .....	6
Figure I.6: Evolution du frottement avec la distance de glissement [8] .....	7
Figure I.7: Variation du coefficient de frottement $m$ en fonction de la charge normale $N$ [8] .....	8
Figure I.8: Optimisation du frottement [2] .....	11

Figure I.9: Début de labourage d'une surface tendre par une aspérité dure :( a) enfoncement statique ;(b) premier mouvement par une force tangentielle ;(c) émergence au début de glissement [8].	11
Figure I.10: Labourage et déformation plastique d'une aspérité molle par une couche plus dure (a) dans films d'oxyde ;( b) dans le matériau de base [4]	12
Figure I.11: Empreinte d'usure adhésive sur frotteur sphérique.	13
Figure I.12: Transfert d'une particule (a) soudure d'une aspérité ;(b) arrachage d'une particule [8....]	14
Figure I.13: Transfert métallique adhésif ( $\times 1000$ ) [11].	14
Figure I.14: Formation d'un fragment d'usure par adhérence.	15
Figure I.15: Schéma de principe de l'usure abrasive [15].	18
Figure I.16: Usure abrasive à deux corps [18].	19
Figure I.17: Usure abrasive à trois corps [15]	19
Figure I.18: Effet d'une aspérité (a) outil de coupe ;(b) sillon d'abrasion [8]	20
Figure I.19: Mécanisme de l'abrasion ; (a) par coupe ;(b) par déformation plastique [11].	20
Figure I.20: La résistance à l'usure abrasive $\epsilon$ en fonction de la dureté due par traitement thermique des aciers au carbone [11]	21
Figure I.21: Formation des couches d'oxydes superposées sur la surface du fer à 625 °C après 24 h.	22
Figure II.1: Microstructures des aciers au carbone en fonction de la teneur en carbone.	26
Figure II.2: Représentation des défauts ponctuels.	26
Figure II.3: Représentation schématique de dislocation dans les cristaux.	27
Figure II.4: Représentation schématique de joint de grain.	28
Figure II.5: Représentation microscopique de joint de grain dans deux cas d'acier en fonction de pourcentage de carbone en masse l'un hypereutectoïde et l'autre hypoeutectoïde.	29
Figure II.7: Images obtenues en MEB mode électrons secondaires (la rupture).	31
Figure II.8: Echantillon de l'acier C18, Grossissement: 600x.	32
Figure II.9 Image obtenues en MEB mode électrons secondaires (perlite+ferrite).	33
Figure II.10 Courbe de refroidissement du fer [18]	34
Figure II.11: Diagramme de phases des alliages Fer-Carbone (en concentration massique) [20].	36
Figure II.12: Diagramme de phases des alliages Fer-Carbone avec Différents types de recuit.	37
Figure II.13: Variation de la structure avec le Recuit d'adoucissement.	38
Figure II.14: variation de la structure de l'acier avec Le recuit de normalisation	39
Figure II.15: influence de recuit de diffusion sur la structure des aciers [19]	40
Figure II.16: Origine de la maille quadratique de la martensite [22].	43
Figure III.1. Four électrique (NABERTHERM).	46
Figure III.2. Bac de refroidissement.	46
Figure III.3. Pelle-pince.	47



Figure. III 4 . :Microscope d'atelier.....	47
Figure III . 5. :Dispositif de positionnement Des forets.....	47
Figure III.6 : (a) : Dispositif d'essais de micro dureté piloté par ordinateur avec Acquisition d'images. (b) Empreinte d'un essai .....	48
Figure III.7. Machine-outil.....	49
Figure IV .1. Acier C18 à l'état brut grossissement x10.....	56
Figure IV .2. Acier C18 à l'état brut dans l'eau grossissement x50.....	56
Figure IV .3. Acier C18 à l'état brut. Grossissement x100.....	56
Figure IV .4.Acier C18 à l'état recuit. Grossissement x50.....	57
Figure IV .5. Acier C18 à l'état recuit. Grossissement x100.....	57
Figure IV .6. Acier C18 trempé dans l'eau grossissement x10.....	57
Figure IV .7. Acier C18 trempé dans l'eau grossissement x20.....	58
Figure IV .8. Acier C18 trempé dans l'eau grossissement x50.....	58
Figure IV .9. Acier C18 trempé dans l'eau grossissement x100.....	58
Figure IV.10. Acier C18 avant trempe grossissement x500.....	59
Figure IV.11. Acier C18 après trempe grossissement x500.....	59
Figure IV.12. Evolution de l'usure en fonction du temps pour le régime 1.....	60
Figure IV.13. Evolution de l'usure en fonction du temps pour le régime 2.....	61
Figure IV.14. Evolution de l'usure en fonction du temps pour le régime 3.....	62

## Liste des tableaux

Tableau I.1. : Valeurs des coefficients de frottement de glissement .....	9
Tableau I.2: Valeurs du coefficient d'usure [14].....	16
Tableau II.1: Composition chimique de l'acier utilisé.....	32
Tableau II.2: Influence d'une trempe à l'eau sur les caractéristiques mécaniques d'un acier non allié à 0,20 % de carbone en fonction de la vitesse de trempe.....	41
Tableau II.3: Principales anomalies dues aux traitements thermiques [23] .....	44
Tableau III.1: Les traitements thermiques subis par l'acier C18.....	48
Tableau III.2: résultat des Essais de dureté de l'acier C18(les essais fait au sien de laboratoire de	

caractérisation des matériaux dans le département de génie mécanique).....	49
Tableau III.3. Resultats du suivi de l'usure du foret (D=20mm) en fonction du temps- régime1.....	50
Tableau III.4: Résultats du suivi de l'usure du foret (D=20mm) en fonction du temps-régime2.....	52
Tableau III.5 Résultats du suivi de l'usure du foret (D=10mm) en fonction du temps (régime3).....	53

**Résumé :**

L'objectif de ce mémoire est l'étude de comportement à l'usure de forêts hélicoïdales en acier rapide lors de l'usinage de l'acier C18 trempé. La méthodologie suivie pour la réalisation des expériences est l'étude de l'impact de la variation des paramètres du régime de coupe sur l'usure des forêts. Les résultats obtenus montrent que les forêts en acier rapide ont une bonne résistance à l'usure malgré la dureté relativement élevée du matériau usiné.

**ملخص.**

الهدف من هذه الأطروحة هو دراسة السلوك اتجاه ادوات القطع الحلزونية الشكل مصنوعة من الفولاذ عالي السرعة خلال قطع الفولاذ س18. المنهجية المتبعة لإجراء التجارب هي دراسة تأثير التغيرات في معالم القطع على ادوات القطع الحلزونية المصنوعة من الفولاذ العالي السرعة. النتائج التي تم الحصول عليها تشير إلى أن ادوات القطع الحلزونية ذات الفولاذ عالي السرعة لديها مقاومة جيدة للتآكل، على الرغم من الصلابة العالية نسبياً من المادة التي يجري تصنيعها

**Abstract :**

The objective of this thesis is the study of wear behavior of high-speed steel twist drills when machining hardened steel C18. The methodology for conducting experiments is to study the impact of changes in the parameters of cutting speed on the wear of drills. The results obtained show that the high-speed steel drills have a good resistance to wear, despite the relatively high hardness of the material machined.

## **Introduction :**

L'usure des outils de coupe est un phénomène très complexe .en effet le couple outil-machine travaille dans des conditions très sévères .ces derniers sont accompagnées de très forte pression de frottements intenses et des très hautes températures.

Les conditions de travail, tel que les éléments du régime de coupe, la géométrie de l'outil, le matériau de l'outil et celui de la pièce, le début de lubrification ...etc. ont une influence très considérable sur le comportement à l'usure des outils de coupe.

Dans ce travail, on projette étudier le comportement à l'usure des forets hélicoïdaux en acier rapide (HSS), lors de l'usinage de l'acier C18 traité thermiquement.

---

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE CONTACT  
DYNAMIQUE, FROTTEMENT ET L'USURE DES MATERIAUX

---

## I.1. Frottement

### I.1.1. Définition

Le frottement peut être défini comme la force qui agit entre deux corps à leur surface de contact, de façon à freiner le déplacement de l'une par rapport à l'autre [1].

### I.1.2. Force et coefficient de frottement

Une pièce (2) est appliquée contre une pièce plane (1) par une force  $N$  normale au point de contact (figure II.1). L'expérience montre qu'on peut appliquer à la pièce (2) une force  $T$  parallèle à la surface de contact sans qu'elle se mette en mouvement. Il existe donc une force  $F^-$  appliquée par le corps (1) à la pièce (2) capable de s'opposer à  $T$  et d'empêcher le mouvement.

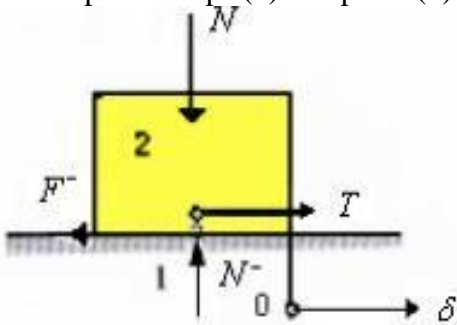


Figure I.1 : Force de frottement.

En observant le déplacement  $d$  du solide (2) à partir de sa position où  $T=0$ , on observe d'abord un très petit mouvement qu'on appelle micro glissement lorsque  $T$  croît (figure II.2). Pour une certaine valeur  $T_0 = F_0$ , la pièce se met en mouvement, en supprimant la force tangentielle  $T$ , la pièce ralentit, puis s'arrête [2].

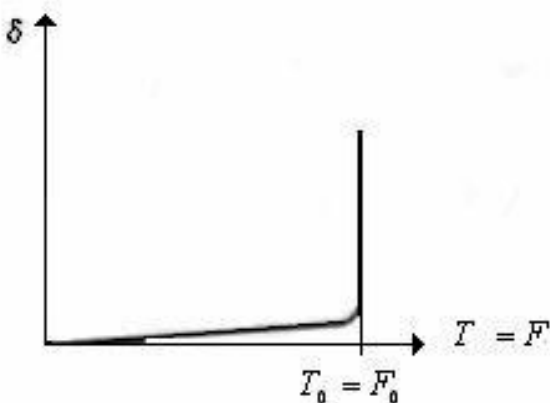


Figure I.2 : Mouvement de glissement [2].

Ces observations montrent qu'il existe un phénomène dans la surface de contact des pièces qui s'oppose à leur glissement relatif, c'est le frottement. On peut en donner la définition suivante : le frottement est un phénomène à la surface d'un corps qui empêche son glissement sur un autre corps (frottement statique) ou qui dissipe de l'énergie mécanique en cas de glissement (frottement dynamique).

Par définition, le coefficient de frottement  $m$  est le rapport de la force tangentielle de frottement, lorsque les pièces glissent, à la force normale qui les applique l'une sur l'autre.

$$\mu = \frac{F}{N}$$

Où  $F=T$  est la force nécessaire à un glissement permanent et  $N$  la charge s'exerçant sur le solide (2) lors du déplacement. La formule II.1 est la loi d'AMONTONS qui est la seule formule actuellement disponible en frottement sec. La figure II.3 Représente la pièce (2) isolée. A l'équilibre statique :

- La réaction normale de la pièce (1) est égale et opposée à l'action de (2),  $N^- = -N$  ;
- La force de frottement est égale et opposée à la force tangentielle exercée sur (2),  $F^- = -T$  ;
- La réaction résultante de la pièce (1) est égale et opposée à la réaction de (2),  $R^- = -R$ .

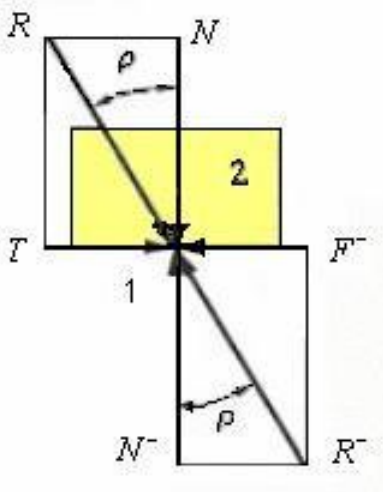


Figure I.3 : Angle de frottement [2].

L'angle de frottement indique l'inclinaison de la résultante par rapport à la normale à la surface, il vaut

$$\rho = \arctan \frac{T}{N} = \arctan \frac{F}{N}$$

$$\rho = \arctan \frac{F}{N}$$

$$\mu = \tan \rho$$

Le coefficient de frottement  $m$  n'est pas une propriété du matériau mais de l'ensemble du système tribologique. C'est-à-dire que, par exemple, un couple graphite-graphite a un coefficient de frottement de 0,1 environ dans une atmosphère normalement humide alors que ce coefficient est supérieur à 0,5 si l'atmosphère ambiante est très sèche.

Nous constatons que, la résultante  $R$  d'après la figure II.4 est toujours inclinée du même angle de frottement  $r$  par rapport à la normale, c'est-à-dire qu'elle se trouve toujours sur un cône d'axe normal au plan et de demi angle au sommet  $r$ , que nous appelons cône de frottement.

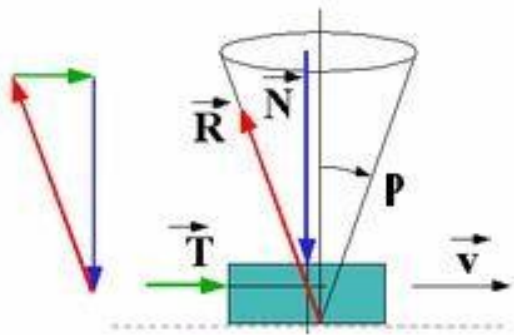


Figure I.4 : Cône de frottement.

### I.1.3. Comportement du coefficient de frottement

Les principaux paramètres qui influencent sur le comportement du coefficient de frottement et par conséquent sa valeur sont :

#### I.1.3.1. Vitesse de glissement

La valeur du coefficient de frottement est généralement différente à l'arrêt que lorsque les corps glissent l'un sur l'autre on distingue :

- Le coefficient de frottement statique (à l'arrêt)  $m_0$ .
- Le coefficient de frottement dynamique (avec glissement)  $m$ .

Dans le cas de métaux secs, le coefficient de frottement dynamique est généralement plus petit qu'à l'arrêt (figure I.1.5, courbe (1)) il atteint rapidement la valeur dynamique lorsque la vitesse dépasse quelques cm/s. A très grande vitesse, plus de 150m/s, le coefficient de frottement des métaux diminue fortement, il peut tomber jusqu'à 0.02, parce que le métal fond dans les zones de contact et forme un film lubrifiant.

Certains matériaux non métalliques présentent au contraire une augmentation du frottement avec la vitesse, courbe (2) de la figure I.1.5.

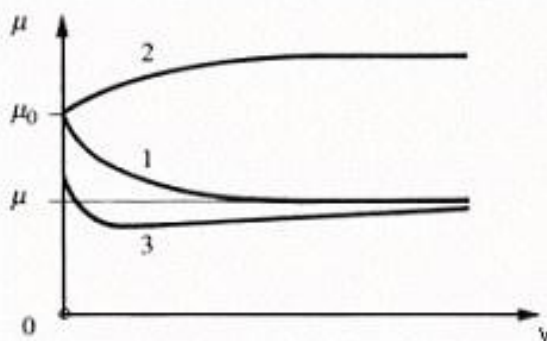


Figure I.5 : Influence de la vitesse sur le coefficient de frottement [2].

La différence entre le coefficient de frottement dynamique et le frottement statique est plus marquée avec les polymères qu'avec les métaux.

Si les surfaces sont abondamment lubrifiées en régime de frottement mixte, courbe(3) de la même figure, le coefficient de frottement statique est plus bas qu'en régime sec et diminue



relativement moins avec le glissement, puis il augmente lentement du fait du cisaillement du liquide ou de la graisse.

On est habituellement intéressé par le frottement à des petites valeurs de vitesse 0,5m/s pour éviter l'échauffement et l'usure.

### I.1.3.2. Chemin de glissement parcouru

La figure II.6 représente l'allure de l'évolution du coefficient de frottement dynamique de surfaces techniques sèches avec le chemin de glissement, SUH distingue six stades :

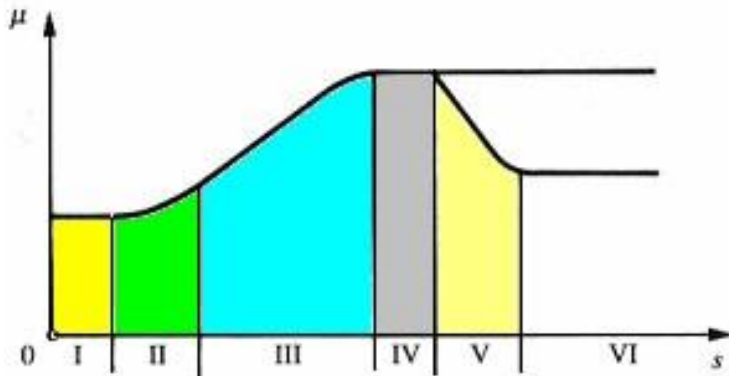


Figure I.6 : Evolution du frottement avec la distance de glissement [2].

I : Les surfaces sont initialement propres, le frottement résulte principalement de phénomènes de labourage et de déformation.

II : Le frottement commence à croître lentement à cause de petits arrachages de matière.

Avec des surfaces lubrifiées, le stade I persiste longtemps et le stade II peut faire défaut.

III : Le coefficient de frottement croît parce que les débris d'usure entre les surfaces s'incrudent dans l'une ou l'autre des surfaces en provoquant un intense labourage.

IV : Le coefficient de frottement se stabilise lorsque le nombre de nouveaux débris d'usure est égal au nombre de débris qui quittent la surface.

V : On observe parfois qu'un matériau dur se polit lorsqu'il frotte contre une surface tendre. Le coefficient de frottement diminue parce que le labourage est moins intense.

VI : Si les deux surfaces se polissent et que les débris d'usure sont enlevés ou assez profondément incrustés dans la surface tendre pour ne pas rayer la surface dure, le coefficient de frottement prend une valeur constante de fin de rodage.

Ces stades dépendent des matériaux, des conditions expérimentales, de la contamination des surfaces et des conditions ambiantes.

### I.1.3.3. Etat de surface

Le coefficient de frottement est relativement grand lorsque les surfaces sont très rugueuses.

### I.1.3.4. Nature des métaux

Le frottement diminue lorsqu'un des matériaux du couple tribologique est tendre, car l'effort de labourage est faible. C'est pourquoi on revêt les surfaces d'une fine couche d'un matériau tendre ou d'un film d'oxyde.

### I.1.3.5. Charge normale appliquée

La figure II.7 donne un exemple de la variation du coefficient de frottement  $m$  en fonction de la charge normale appliquée  $N$  pour du cuivre glissant sur du cuivre dans l'air et sans lubrification pour un essai pion-disque.

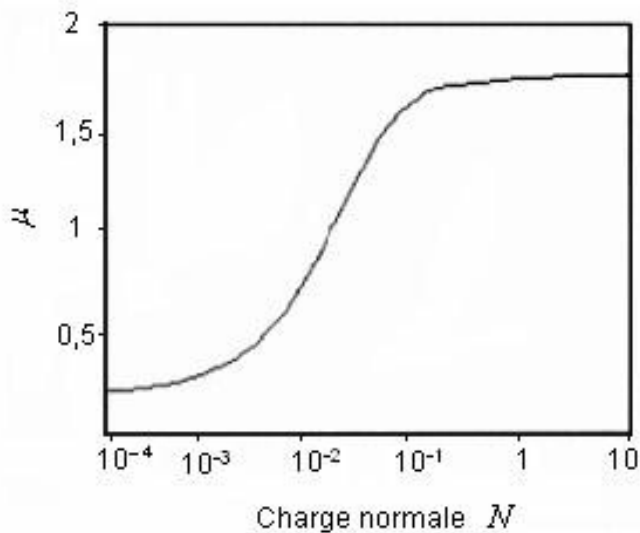


Figure I.7 : Variation du coefficient de frottement  $m$  en fonction de la charge normale  $N$  [2].

Avec l'augmentation de la charge appliquée, le film d'oxyde (1 à 10 nm) qui joue un rôle critique dans le contact glissant est progressivement détruit, entraînant une augmentation progressive du coefficient de frottement qui se stabilise à une valeur correspondant au contact métal-métal.

### I.1.3.6. Température ambiante

Le coefficient de frottement des métaux diminue souvent légèrement lorsque la température des pièces s'élève ; puis, au-delà de 500 °C à 800 °C, il augmente fortement. Ce comportement peut s'expliquer par le fait que la dureté du métal tombe rapidement, les points de contact tendent vers une plastification étendue.

Le coefficient de frottement des céramiques croît fortement (400 à 600 °C), puis diminue au-delà.

## I.1.4. Valeurs pratiques du coefficient de frottement

L'étude théorique des mécanismes du frottement sec et mixte ne permet pas de prédire avec exactitude la valeur réelle du coefficient de frottement dans les couples cinématiques et dans les assemblages. Mais la compréhension du phénomène est précieuse pour choisir correctement les matériaux et savoir comment agir pour obtenir les caractéristiques de frottement souhaitées. Le coefficient de frottement d'un métal glissant sur un autre sans lubrification dans l'air varie de  $m=0,5$

à  $m=1,5$ . A l'exception de l'or ( $m=2$ ), les autres métaux s'oxydent dans l'air en formant un film d'oxyde de l'ordre de 1 à 10 nm d'épaisseur. Ce film d'oxyde favorise un coefficient de frottement faible, pour de faibles pressions.

Le tableau I.1. suivant donne des valeurs des coefficients de frottement de glissement pour quelques combinaisons de matériaux [2].

Matériau 1	Matériau 2	Statique	Dynamique
Acier doux	Acier doux	0.75	0.57
Acier doux	Fonte	0.75	0.23
Acier doux	Aluminium	0.60	0.47
Acier doux	Bronze	0.50	0.45
Acier durci	Acier durci	0.78	0.42
Acier durci	Régule	0.70	0.35
Fonte	Fonte	1.1	0.15
Aluminium	Aluminium	1.1	1.4
Téflon	Téflon	0.10	0.05
Téflon	Acier	0.05	0.05

Tableau I.1. : Valeurs des coefficients de frottement de glissement.

Si les deux corps sont des solides, la force de frottement est appelée frottement solide qui peut être du type glissement, roulement et glissement pivotement. Si l'un des deux corps est un fluide, la force est un frottement fluide.

Le frottement entre deux corps solides peut se faire sans lubrifiant (frottement sec), ou avec un lubrifiant gazeux, liquide ou solide, s'interposant entre les surfaces en contact.

## **I.1.5. Modèles de frottement**

### **I.1.5.1. Frottement de glissement**

Le frottement de glissement est le frottement qui se produit lorsqu'on déplace, sans la faire rouler, la surface d'un corps solide sur la surface d'un autre corps solide. C'est le type de frottement le plus fréquent : un piston glissant dans un cylindre, un arbre tournant à sec dans un palier et un traîneau glissant sur le sol produisent un frottement de glissement. On distingue plusieurs phénomènes susceptibles de s'opposer au glissement tel que :

#### **I.1.5.1.1. Adhérence**

L'adhérence a été longtemps employée par l'Ecole Anglaise pour expliquer les phénomènes de frottement. On trouve parmi les chercheurs, Desaguliers (1924), Tomlinson (1929), Hardy (1936) et plus récemment Bowden et Tabor (1950).

On observe que deux matériaux dont les surfaces sont absolument pures adhèrent l'un à l'autre dans le vide, il faut une certaine force de traction pour les séparer. Il existe des liaisons appelées jonctions. L'adhérence des métaux s'explique par la présence d'électrons libres à leur surface qui forment des filiations cristallines (jonctions cohésives) ou qui maintiennent les surfaces par des forces électrostatiques (fonctions adhésives) [2].

L'adhérence est favorisée par le contact qui existe entre les métaux lorsque les aspérités sont écrasées plastiquement. En séparant un métal dur pressé contre un métal mou, on constate que des particules de ce dernier sont arrachées et adhèrent à la surface du premier. Donc il y a transfert du métal mou sur le métal dur. On observe que l'adhérence est réduite avec l'augmentation de la dureté ou de la rugosité des corps en contact [2].

L'adhérence ne se manifeste habituellement pas, il n'est pas forcément d'exercer une force de traction afin de séparer deux solides qui ont été pressés modérément l'un contre l'autre parce que :

- Les jonctions en état de déformation élastique se séparent naturellement lorsque la charge normale diminue, seulement les jonctions plastiques peuvent rester liées.
- Les surfaces sont toujours polluées par des oxydes, de la vapeur d'eau adsorbée, par des résidus d'outil et d'huile de coupe. Cette contamination empêche l'adhérence.

La force d'adhérence correspond à la force nécessaire à la séparation des corps. Elle dépend notamment de la nature de la liaison, de la vitesse de séparation, de la géométrie du contact et des propriétés rhéologiques de l'interface.

On calcule la valeur de la force nécessaire pour provoquer le glissement des aspérités pressées contre une surface.

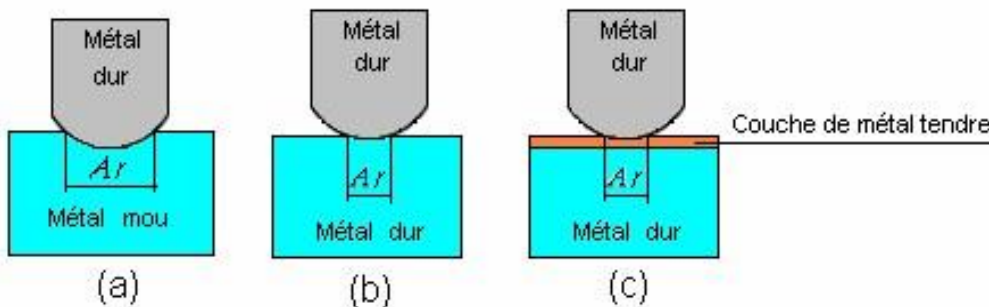


Figure I. 8 : Optimisation du frottement [2].

Pour minimiser l'aire de contact, on utilise les métaux durs, comme les aciers trempés (figure I.8b).

Pour minimiser le cisaillement, on recouvre le contact d'un film mince réalisé avec un métal tendre comme le plomb ou l'argent (figure I.8c).

### I.1.5.1.2. Labourage

Une aspérité dure chargée par une force normale s'enfonce dans une surface tendre (figure I.1.9 a). L'application d'une force tangentielle repousse la matière tendre de sorte que l'aspérité ne porte que sur le flan opposé à la force (figure I.1.9 b). Au début du glissement, la matière de la base est repoussée et forme devant l'aspérité le bourrelet frontal (figure I.1.9 c), l'aspérité remonte au-dessus de sa position initiale.

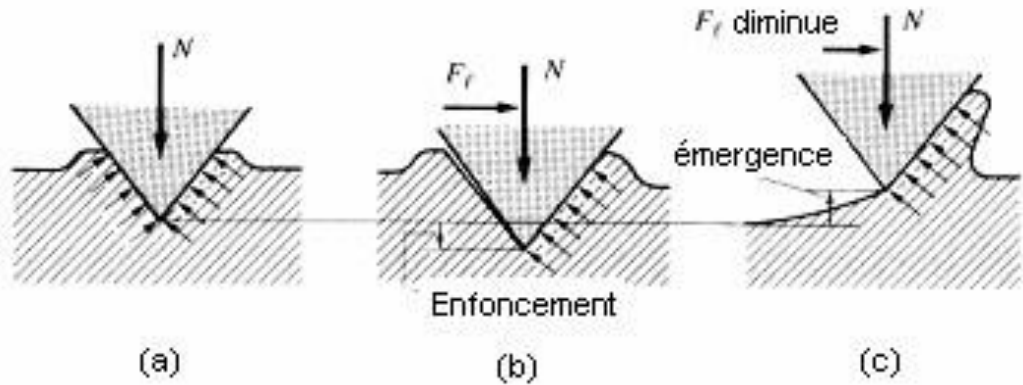


Figure I. 9 : Début de labourage d'une surface tendre par une aspérité dure :(a) enfoncement statique ;(b) premier mouvement par une force tangentielle ;(c) émergence au début de glissement [2].

Les aspérités qui sont en contact se déforment, les autres se rapprochent et quelques-unes peuvent s'enchâsser. Lorsque le mouvement relatif débute, les aspérités enchâssées sont alors en interférence et doivent se déformer plastiquement pour que le mouvement se poursuive. Cet effet est à l'origine de la composante de déformation plastique  $F_{fd}$  de la force totale de frottement de glissement  $F_{fg}$  comme l'indique la figure I.1.10.

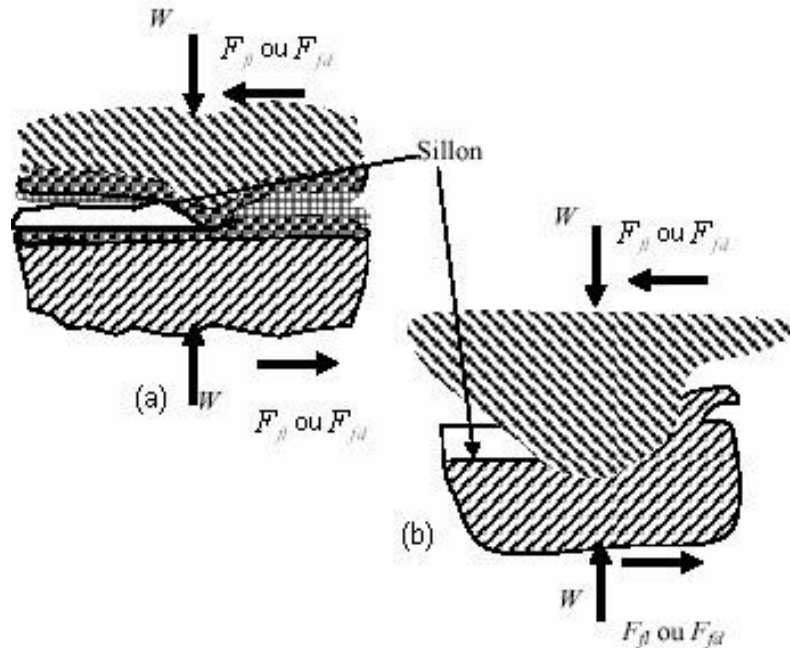


Figure I.10 : Labourage et déformation plastique d'une aspérité molle par une couche plus dure (a) dans les films d'oxyde ;(b) dans le matériau de base [3].

### I.1.5.2. Matériaux utilisables pour le frottement

Le choix d'un matériau de frottement est un problème d'optimisation entre des qualités souvent contradictoires.

- Propriétés mécaniques : dureté, limite d'élasticité, résistance à la compression, au fluage, à la fatigue, résilience, aptitude au vieillissement et amortissement des vibrations et des chocs.
- Propriétés physico-chimiques : masse volumique, température limite d'utilisation, coefficient de dilatation, conductivité thermique, conductivité électrique, résistance à l'oxydation et à la corrosion et aptitude aux traitements.

- Facilité du rodage, résistance à l'abrasion, à l'adhésion et aux propriétés anti-usure grippage, à la corrosion de contact, à l'érosion, à la cavitation et à la corrosion par les lubrifiants.
  - Propriétés techniques : facilité de mise en œuvre, conformabilité, absorption de particules abrasives, auto-réparation par comblement des rayures, dureté minimale de l'antagoniste,
- Comportement en cas de lubrification déficiente ou d'incident ;
- Comportement face à l'augmentation du jeu, facilité de réparation ou d'échange, aptitude au soudage sur un support,
  - Propriétés d'environnement : caractéristiques du milieu, moyens et possibilités lubrification, problèmes de pollution ou contamination ;
  - Propriétés « socio-économiques » : coût de revient, disponibilité sous des formes diverses, facilité d'approvisionnement, dépendance des fournisseurs, évolution prévisible des techniques.

## I.2. Définition et mécanismes d'usure

### I.2.1. Définition de l'usure

L'usure est la perte de matériaux sur la surface de contact entre deux solides en mouvement relatif. Elle est généralement dommageable, mais peut aussi être bénéfique, par exemple lors du rodage, l'affûtage de l'outil, la finition d'une surface par rectification.

L'usure d'un mécanisme ne ressort pas uniquement du rôle joué par le lubrifiant, mais relève aussi de nombreux autres facteurs tels que la technologie de l'ensemble et de chaque pièce prise séparément, de leur métallurgie et en particulier des traitements de surface, de leurs tolérances de fabrication des conditions d'utilisation, d'environnement climatique telles que la température ambiante, l'humidité de l'air, la corrosivité (air marin, SO<sub>2</sub>) ou l'abrasivité de l'atmosphère (poussière).

On classe les modèles d'usure selon les principaux mécanismes qui les génèrent : l'adhérence, l'abrasion, l'érosion et la fatigue.

#### I.2.1.1. Usure par adhérence (usure adhésive)

L'usure adhésive est le modèle le plus fondamental, elle est due au cisaillement par frottement des microsoudures ou jonctions qui se forment entre deux aspérités en contact direct métal-métal, elle est accompagnée d'un échauffement au moins local des surfaces métalliques, qui, à l'observation visuelle, se traduit par l'aspect des empreintes d'usure, sur éprouvettes de frottement sphériques (figure I.2.14) [3].

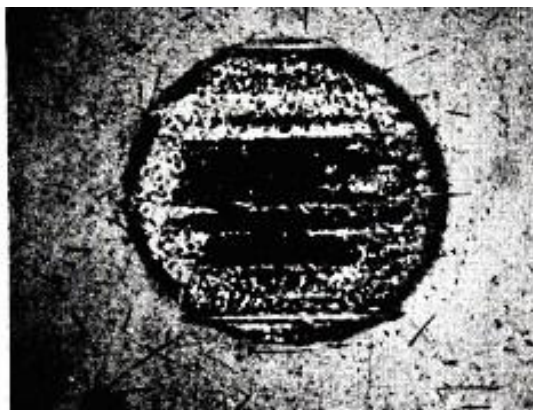


Figure I.11 : Empreinte d'usure adhésive sur frotteur sphérique.

Le glissement n'est possible que par :

- Cisaillement du corps le plus tendre lorsque la soudure est résistante (figure I.1.12a) ; des particules du corps le plus tendre (1) sont transférées sur le corps le plus dur (2) (figure I.1.15b), la substance du corps (1) finit par frotter sur elle-même.
- Cisaillement des microsoudures lorsqu'elles sont moins résistantes que les corps, il n'y a pas de matière arrachée.

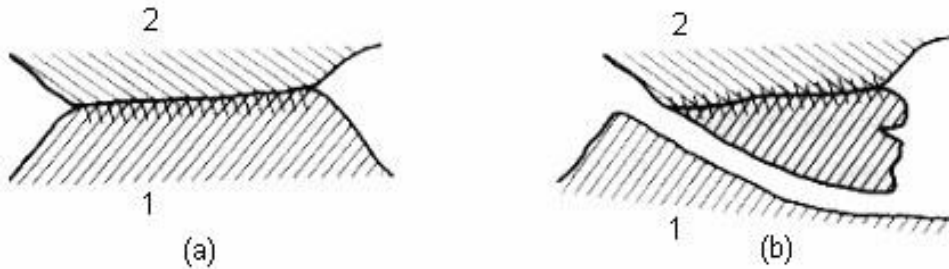


Figure I.12 : Transfert d'une particule (a) soudure d'une aspérité ;(b) arrachage d'une particule [2].

La figure I.2.13 est un exemple de transfert métallique adhésif : une coupe métallographique, pratiquée dans la première gorge d'un segment de moteur Diesel, représente un fragment d'alliage léger de piston (métal le plus tendre) transféré, après cisaillement d'une jonction adhésive, sur la surface dure du flan intérieur du segment en fonte à graphite lamellaire.

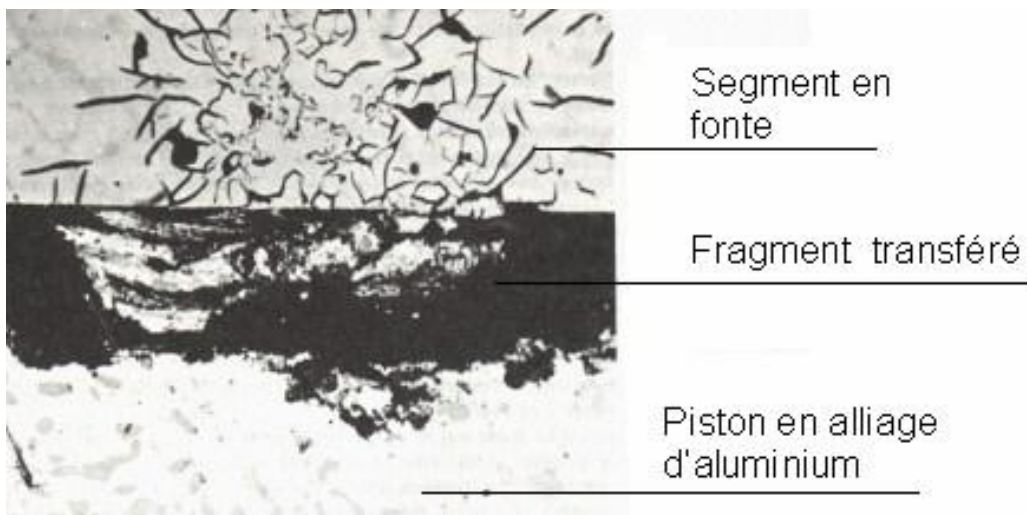


Figure I.13 : Transfert métallique adhésif ( $\times 1000$ ) [5].

Green et Tabor ont montré que, les jonctions sont formées par microsoudures locales dus à une élévation de la température instantanée. Bowden a estimé que cette élévation de température peut atteindre des valeurs au-dessus de  $1000^{\circ}\text{C}$  et ne dure que quelques dizaines de millièmes de seconde. Ces températures sont limitées dans une couche superficielle très mince, alors que la masse du métal est tout à fait froide. La déformation plastique est contrôlée par la dureté du matériau, ainsi si le rapport des duretés entre les deux matériaux



Est  $r$  alors le taux d'usure varie inversement avec  $r^2$ . On note de plus qu'une augmentation notable du rapport  $r$  n'implique pas un taux d'usure nul du matériau dur. On peut résumer les étapes qui conduisent à la formation d'un fragment d'usure par adhérence dans le suivant :

- Déformation plastique de l'aspérité et pénétration des films de surface (figure I.1.14 a) ;
- Formation du joint d'adhérence entre les matériaux de base débarrassés de leur oxyde (figure I.1.14 b) ;
- Bris de l'aspérité dans le matériau de base et formation d'un fragment d'usure (figure I.1.14 c).

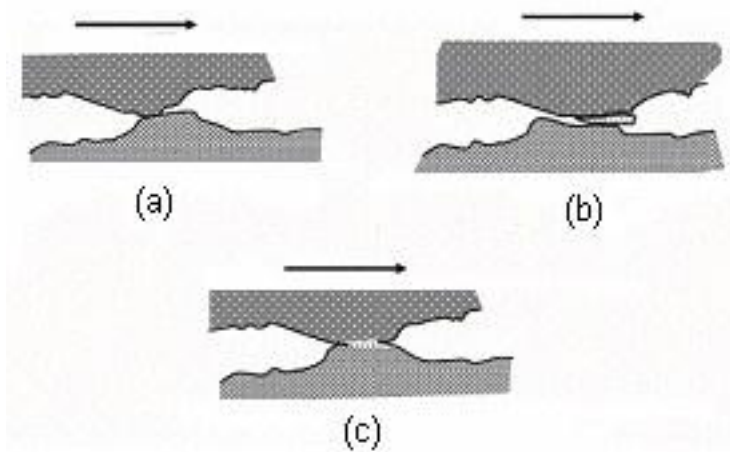


Figure I. 14 : Formation d'un fragment d'usure par adhérence.

Si les films d'oxyde protègent suffisamment les métaux pendant le frottement, il ne produit qu'un collage entre les films d'oxyde, le cisaillement s'effectue dans ces films, le métal n'est pas touché, les particules détachées du contact sont de très petites dimensions ( $100\text{\AA}$ ), sont constituées d'oxydes métalliques. L'usure est minimale, c'est l'usure adhésive

En régime douce et dite aussi usure normale ou modérée.

Si les films d'oxyde ne peuvent plus protéger les métaux par suite :

- . De crêtes trop importantes qui sont brisées et mettent le métal à nu.
- . De dureté relative trop forte d'un film par rapport au métal sous-jacent.
- . De vitesses ou de charges élevées qui arrachent le manteau protecteur.

Les débris sont des fragments métalliques de dimensions relativement importantes, ils subissent toute une série de transformations (oxydation, écrouissage...), et avant de quitter l'interface, ils sont en moyenne cinquante fois plus gros que les particules initiales. Dans ce cas, l'usure s'appelle l'usure adhésive en régime sévère.

## II.2.2. Quantification de l'usure adhésive

Le premier travail sur l'usure daté du 19<sup>ème</sup> siècle. Il concernait la perte de poids de pièces de monnaie anglaises. Certains auteurs ont cherché à relier le taux d'usure adhésive aux différents paramètres qui interviennent dans le frottement. C'est ainsi que J. F. Archard (1953), émettant le premier, l'idée d'une certaine probabilité pour qu'une particule d'usure puisse se former à partir de la jonction entre deux aspérités.

Le coefficient d'usure varie lui-même avec les autres paramètres tribologiques comme l'environnement, la nature des corps frottant, la vitesse de glissement, la charge normale. A titre de référence, on peut considérer les valeurs indicatives de coefficient d'usure du tableau I.1.2.



	Usure adhésive	Usure abrasive	Usure corrosive	Usure par fissuration
10 <sup>-2</sup>		Abrasion sévère	Corrosion sévère	
10 <sup>-3</sup>	Galling			
10 <sup>-4</sup>	Usure modérée	Polissage		Fracture fragile
10 <sup>-5</sup>				
10 <sup>-6</sup>	Brunissage			
10 <sup>-7</sup>				
10 <sup>-8</sup>				Fatigue de surface

Tableau I.2 : Valeurs du coefficient d'usure [8].

D'après la loi d'Archard précédente on peut tirer le suivant :

- Le taux d'usure est généralement proportionnel à la charge normale  $N$  ;
- Le taux d'usure est généralement proportionnel à la distance de glissement  $L$  ;
- Le taux d'usure est généralement inversement proportionnel à la dureté de la surface  $H$ .

### I.2.1.3. Dimensions des particules d'usure

Le diamètre moyen des particules arrachées après adhésion a été également calculé : considérons une particule sphérique, pour que cette particule se détache sous forme de fragment d'usure, il faut que l'énergie élastique cumulée fournie au fragment soit supérieure à l'énergie d'adhésion du fragment sur sa base [5]. En particulier, la dimension des particules d'usure est indépendante de facteurs tels que : la charge, la vitesse, la distance de glissement, la géométrie du contact, etc.

L'influence de l'environnement des surfaces frottant (type d'atmosphère, présence de lubrifiant) a un effet très sensible sur les dimensions des particules d'usure adhésive en modifiant l'énergie d'adhésion des matériaux.

### I.2.1.4. Aspects métallurgiques de l'usure adhésive des aciers

Les aciers au carbone, à l'état recuit, sont moins sujets à l'usure adhésive que les aciers austénitiques ou la ferrite, en effet, la structure perlitique des aciers limite l'adhésion, la soudure aura lieu seulement dans la phase ferrite ou dans la phase austénite.

C'est pour cela, l'augmentation de la teneur en carbone qui a pour effet de réduire la ferrite et d'augmenter la dureté est utile.

Généralement, les structures : perlitique, martensitique et bainitique des aciers, très fines et polyphasées se comporte mieux que les structures ferritique et austénitique monophasées et constituées de gros grains.

Une forte dureté et la présence de carbures métalliques dans l'acier augmentent la résistance à l'usure. Pour les aciers à outils, la résistance à l'usure dépend plus de la qualité des carbures précipités durant la trempe.

Les éléments d'additions tels que le Chrome  $C_r$ , le Vanadium  $V_a$ , le tungstène  $W$  le molybdène  $Mo$ ...etc., Contribuent à améliorer la résistance à l'usure des aciers par leurs effets sur l'affinage du grain et sur le durcissement structural de la matrice.

L'austénite résiduelle, produite par des fortes températures de trempe, a un effet néfaste [5].

### I.2.1.5. Comment lutter l'usure adhésive

Vu le grand nombre de paramètres qui influencent sur le frottement et l'usure, il est difficile de formuler des règles très précises. L'empirisme joue un grand rôle dans ce domaine.

. Au niveau de la conception technologique et géométrique des surfaces de contact, il est possible de prévenir l'usure adhésive en diminuant les échauffements inter faciaux dus au frottement par :

- La limitation de la distribution des pressions de contact et/ou des vitesses de glissement ( $PV$ ).
- L'assurance d'un refroidissement convenable des surfaces.

. Au niveau du choix des matériaux des surfaces en frottement sec ou limite, il y a intérêt à utiliser des couples de matériaux possédant de faibles interactions, donc une énergie d'adhésion  $W_{ab}$  faible c'est-à-dire des matériaux ne donnant pas lieu à des soudures en phase solide comme : bronze-acier, chrome-fonte, matériaux plastiques-métaux. On évite le contact de métaux identiques car ils tendent à se souder ; un métal capable de céder des électrons se lie plus fortement au fer qu'un métal passif ou inerte. C'est pourquoi l'aluminium ; plus électropositif que le Chrome, risque fortement de gripper avec l'acier. Le plomb, l'étain, le cuivre et l'argent sont chimiquement peu actifs, on les utilise dans les coussinets [5]. Les matériaux à structure cristalline hexagonale présentent une adhérence petite que les matériaux à structures cubiques.

Les surfaces métalliques exposées à l'air se recouvrent rapidement d'un film d'oxyde environ 5nm d'épaisseur qui contamine assez la surface pour éviter l'adhésion [2].

En frottement mixte, les surfaces lubrifiées n'adhèrent pratiquement pas. L'usure se produit surtout par abrasion, l'interposition d'un film d'huile suffisamment résistant pour prévenir les contacts métal-métal.

Il y a également intérêt à utiliser des matériaux durs afin de diminuer le taux d'usure. Ce qui explique l'utilisation des aciers trempés, cimentés, nitrurés et carbonitrurés.

### I.2.2. Usure abrasive

#### I.2.2.1. Définition de l'usure abrasive

Dans le glossaire de l'organisation de coopération et de développement économique l'usure abrasive est définie comme étant l'usure par déplacement de matière, produite par des particules dures ou des protubérances dures [6]. Donc l'usure abrasive est le résultat du frottement de glissement par labourage ou par déformation plastique. L'usure peut se faire à deux corps, directement à partir des solides en contact ou bien à trois corps comme l'indique le schéma (figure I.2.1).

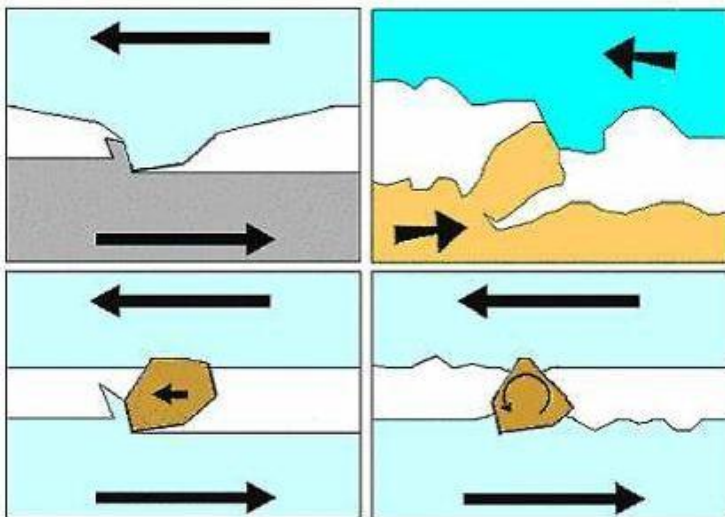


Figure I. 15 : Schéma de principe de l'usure abrasive [9].

Il faut noter que l'usure abrasive existe toujours quel que soit le système mécanique. En effet, les débris d'usure générés par les autres modes (adhésions ou fatigue) sont généralement plus durs que les surfaces en contact et par suite participent à l'abrasion, ainsi que les grains abrasifs constitués de poussières ou de sable de fonderie.

### I.2.2.2. Aspects tribologiques de l'usure abrasive

Il convient de distinguer deux processus d'abrasion des surfaces de frottement :

- Usure abrasive se fait par les aspérités ou protubérances d'une des surfaces sur l'autre plus tendre, appelée "abrasion à deux corps" (figure I.1.19) Les sillons sont formés parallèlement à la direction de déplacement des aspérités abrasives.

En général, un matériau mou et malléable conduit à une usure uniforme tandis que pour un matériau plus dur, l'usure est plus localisée dans la région inter lamellaire ou les couches d'oxydes forment des points faibles et entraînent le décollement des lamelles [8].

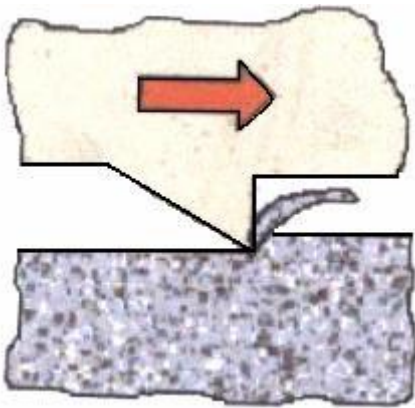


Figure I.16 : Usure abrasive à deux corps [12].

- Usure abrasive dite "à trois corps" provoquée par des particules dures (figure I.1.20) soit véhiculées entre les deux surfaces en contact, soit enchâssées dans l'un d'elles, généralement la plus tendre. L'accumulation de débris d'usure entre les corps finit par constituer une couche intermédiaire, le troisième corps. Selon Johnson [13], le cisaillement de la couche intermédiaire est la principale source de frottement. Le rodage, le polissage à la pâte ou à la poudre sont des genres d'usure abrasive à trois corps.

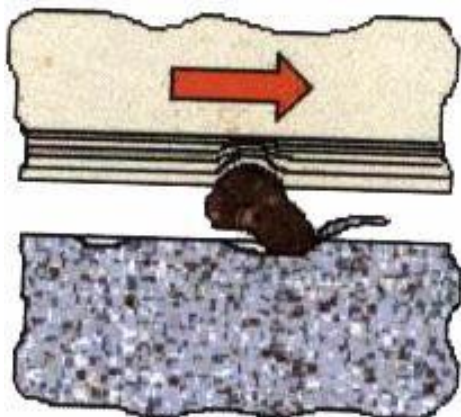


Figure I.17 : Usure abrasive à trois corps [9].

D'après TABOR, la dureté des particules est en moyenne de 20% supérieure à celle de la surface initiale [5].

La figure I.1.21a montre l'effet produit par une aspérité dure ou le grain abrasif peut être assimilé à un outil de coupe élémentaire, il provoque sur la surface sur lequel il frotte une rayure (sillon d'abrasion) comme l'indique la figure I.1.18b.

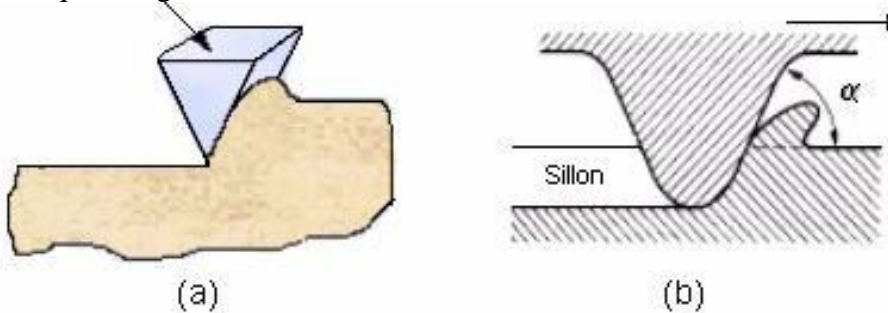


Figure I.18 : Effet d'une aspérité (a) outil de coupe ;(b) sillon d'abrasion [2].

La quantité du métal du sillon abrasif éliminé de la surface sous forme de particules d'usure par rapport à celle affectée par la déformation plastique est relativement faible, environ 10% à 20% en moyenne. Cette quantité enlevée dépend de nombreux paramètres et plus particulièrement par :

- La dureté relative de la surface abrasée et de l'abrasif. Lorsque la dureté de la surface rayée approche celle de l'abrasif, celui-ci s'émousse, diminuant son aptitude à la coupe. - La forme de la partie active de l'abrasif, si elle présente des angles vifs, convenablement orientés par rapport au sens de glissement (figure I.19a), l'abrasion sera analogue à un processus de coupe et la trace laissée sera désignée comme une rayure de micro coupe, contrairement, si elle est arrondie est polie, il y'aura un très peu de matériaux enlevé (figure I.19b).



Figure I.19 : Mécanisme de l'abrasion ; (a) par coupe ;(b) par déformation plastique [5].

- Si les grains abrasifs roulent entre les deux surfaces provoquent moins d'usure que s'ils glissent ou s'incrudent dans l'une des deux surfaces.

La perte de matière dépend à la fois du matériau utilisé et de l'abrasif et l'aspect des sillons fournit de précieuses indications :

- S'ils sont brillants et très peu profonds, les aspérités de la pièce antagoniste ont raclé les couches d'oxydes.
- S'ils sont isolés, et interrompus, des particules dures introduites entre les surfaces se sont plus ou moins incrustées.
- S'ils sont continus et rayent la pièce dure, des particules abrasives sont enchâssées dans la pièce tendre.
- S'ils sont continus aussi et marquent la pièce tendre, la pièce antagoniste plus dure et sa surface de contact est rugueuse.

Pour rayer une surface il suffit d'une autre plus dure de 20% à 25%.

### I.2.2.3. Aspect Métallurgique de l'usure abrasive des aciers

Il est à noter que la résistance à l'usure des aciers recuits est proportionnelle à leur dureté, pour chaque type d'aciers trempés, la relation résistance à l'usure-dureté est linéaire mais possède une pente plus faible que celle des métaux recuit (figure I.20).

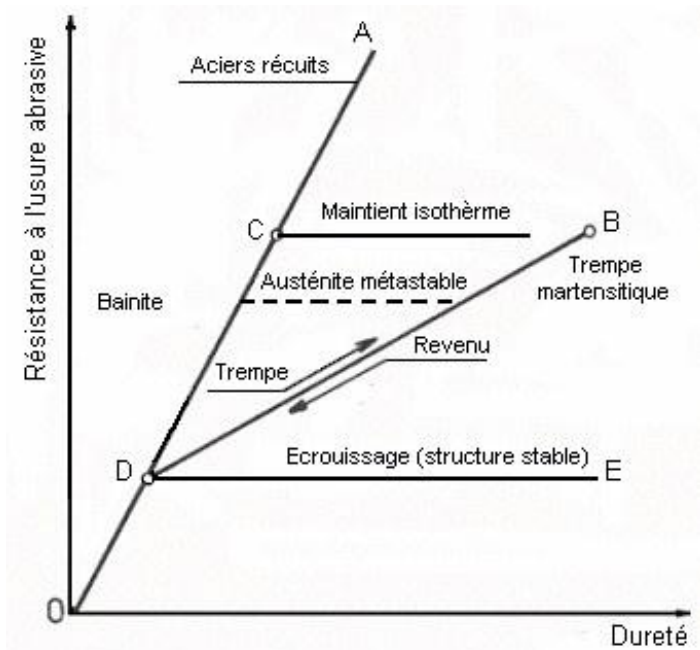


Figure I.20 : La résistance à l'usure abrasive  $\varepsilon$  en fonction de la dureté due par traitement thermique des aciers au carbone [5].

La résistance à l'abrasion des aciers au carbone et des aciers faiblement alliés augmente avec la teneur en carbone indépendamment de celle des autres éléments d'alliage. La résistance à l'usure croît proportionnellement avec la teneur en cémentite pour un acier contenant seulement la ferrite et la cémentite. La structure de l'acier est aussi importante, une structure perlitique a une résistance à l'usure supérieure qu'une structure sphéroïdale.

Dans les aciers hypoeutectoïdes, la résistance à l'usure augmente, avec la quantité de perlite, c'est-à-dire en carbone et aussi lorsque la distance interlamellaire moyenne de la perlite diminue. Ce qui concerne les aciers hypereutectoïdes, la résistance à l'usure continue son augmentation jusqu'à ce que le réseau de cémentite intergranulaire ne devienne pas continu et fragile [7].

L'effet des traitements thermiques sur le comportement des aciers au carbone est représenté sur la figure précédente, où il apparaît que la trempe augmente la résistance à l'usure alors que le revenu la diminue. Les traitements thermiques isothermes, tels que la trempe différée martensitique (martempering) et la trempe bainitique (Austempering) améliorent la ténacité des aciers. Le durcissement par écrouissage préalable des aciers ne conduit à aucune amélioration de leur résistance à l'usure bien que des travaux aient montré que l'écrouissage d'une surface métallique par des grains abrasifs améliorant sa résistance à l'usure.

Pour les aciers faiblement alliés, la résistance à l'abrasion s'améliore pour les éléments donnant lieu à des carbures dispensables dans la ferrite. L'addition d'une faible teneur en manganèse améliore la résistance à l'usure d'une structure perlitique mais abaisse celle d'une structure martensitique.

Pour les aciers fortement alliés, la précipitation fine et uniforme de carbures dans la matrice est désirable pour l'augmentation de la résistance à l'usure. La meilleure structure est la structure martensitique. Par contre les aciers possédant une structure austénitique stable et homogène, comme les aciers inoxydables, ne possèdent pas une résistance à l'abrasion très élevée.

L'acier qui résiste à l'abrasion sous des charges importantes est l'acier austénitique à 12% de manganèse : qui sont des aciers austénitiques hyperboloïdes au manganèse formant une couche martensitique dure par écrouissage). Sous charge modérée, ses performances sont celle d'un acier au carbone

ordinaire, mais sous charge élevée, l'écroissage transforme l'austénite en martensite très résistante à l'usure abrasive. On améliore aussi la résistance à l'abrasion par l'addition de molybdène ou de niobium qui augmente la limite élastique.

### I.2.3. Usure par oxydation

#### I.2.3.1. Introduction

La majorité des surfaces des métaux réagissent avec l'oxygène de l'atmosphère pour former des oxydes [12].

Si un métal forme plusieurs oxydes, les composés sont arrangés de telle sorte que le plus riche en oxygène soit à l'interface solide-gaz, tandis que le plus pauvre se situe à l'interface métal-oxyde [13], comme le cas du fer illustré par la figure I.1.21.

La présence d'oxydants dans les atmosphères courantes tend à favoriser la formation d'un film d'oxyde favorable au glissement. Dans un contact métallique en frottement, la puissance mécanique dissipée à l'interface entraîne un échauffement qui favorise l'oxydation.

Si un alliage est oxydé, les produits de la réaction qui en résulte, se présentent sous forme de couches séparées ou comme une mixture hétérogène (figure I.1.21) [7].



Figure I.21 : Formation des couches d'oxydes superposées sur la surface du fer à 625 °C après 24 h.

#### I.2.3.2. Oxydation du fer

Etant donné le rôle que jouent les oxydes de fer dans les processus de frottement et d'usure. Une surface de fer s'oxyde pour donner les oxydes de fer :  $FeO$ ,  $Fe_3O_4$  et  $Fe_2O_3$ .

##### I.2.3.2.1. L'oxyde ferreux $FeO$

Stable au-dessus de 570 °C qui présente un caractère plastique [8].

##### I.2.3.2.2. La magnétite $Fe_3O_4$

De couleur noire, cet oxyde est poreux [13].

##### I.2.3.2.3. L'oxyde ferrique $Fe_2O_3$

C'est l'oxyde le plus dur des oxydes de fer (10<sup>4</sup> MPa), il est rouge-brun [6]. Vu son caractère d'abrasif,  $Fe_2O_3$  joue un rôle essentiel dans l'endommagement par le frottement et l'usure.

### **I.2.3.3. Mécanismes de l'usure par oxydation**

L'usure par oxydation est un mécanisme d'usure douce, elle résulte de l'adsorption de l'oxygène sur les surfaces métalliques mises à nu lors du frottement et des réactions chimiques de cet oxygène avec le métal [9]. Le taux d'oxydation est contrôlé par la diffusion de l'oxygène dans les couches superficielles, les films d'oxyde se développent sur le plateau de contact à la température  $\theta_0$ , l'usure se produit par écaillage de l'oxyde et émission de débris.



## **II. Matériaux**

### **Introduction**

Dans ce chapitre, nous présentons l'ensemble des outils mis en œuvre pour une approche expérimentale méthodique. Ce chapitre va consister aussi en une présentation du matériel qui sert à l'étude des évolutions de l'usure, des mesures des pièces usinées et des observations microscopiques.

### **II.1. Les aciers au carbone**

Les aciers au carbone représentent environ 90 % en volume de l'acier utilisé. Leur application est notamment dans la construction : les ponts, les conteneurs, des poutres, les tôles de châssis de voiture, des bateaux etc. sont des exemples d'application. Vu ces applications, les exigences principales aux aciers au carbone sont : résistance mécanique élevée, ductilité/ténacité élevée, et soudabilité.

Pour comprendre les aciers au carbone et les aciers faiblement alliés, il faut garder en tête le diagramme de phase binaire du fer/carbone. En contraste avec les additions délibérées d'éléments d'alliages dans les aciers faiblement alliés, les aciers au carbone contiennent toujours des traces de manganèse (0.5-1.5 %) et de silicium (0.5 %) qui sont présentes dans le fer dû à sa production industrielle.

D'autres éléments comme le chrome, le nickel et le cuivre entrent notamment par la ferraille en raison de quelques dixièmes de pour cent. Cette faible teneur en élément d'alliage n'affecte pas le diagramme fer carbone.

À température ambiante, les aciers au carbone sont dans une structure ferritique perlitique et la fraction volumique des deux phases dépend de la teneur en carbone. Plus la teneur en carbone est élevée, donc plus la fraction volumique de carbures est élevée, plus la résistance mécanique augmente.

L'augmentation de la concentration en carbone diminue malheureusement la ductilité et fait que la résilience chute à de plus en plus hautes températures.

La chute en valeur de résilience marque une transition en mécanisme de rupture dans l'acier : à plus haute température, la rupture est facilitée par de la déformation plastique, alors qu'à très basse température, la rupture se fait par séparation le long des plans

Cristallographique.

La température à laquelle cette transition se fait est appelée la température de Transition ductile fragile.

#### **II.1.1. La microstructure des aciers au carbone**

La microstructure des aciers au carbone change d'une manière marquée avec la teneur en carbone : de 0 à 0.8 % poids de carbone, la microstructure de ferrite est graduellement remplacée par la perlite. A des teneurs encore plus élevées de carbone il y a formation de cémentite aux anciens joints de grains de l'austénite [10].



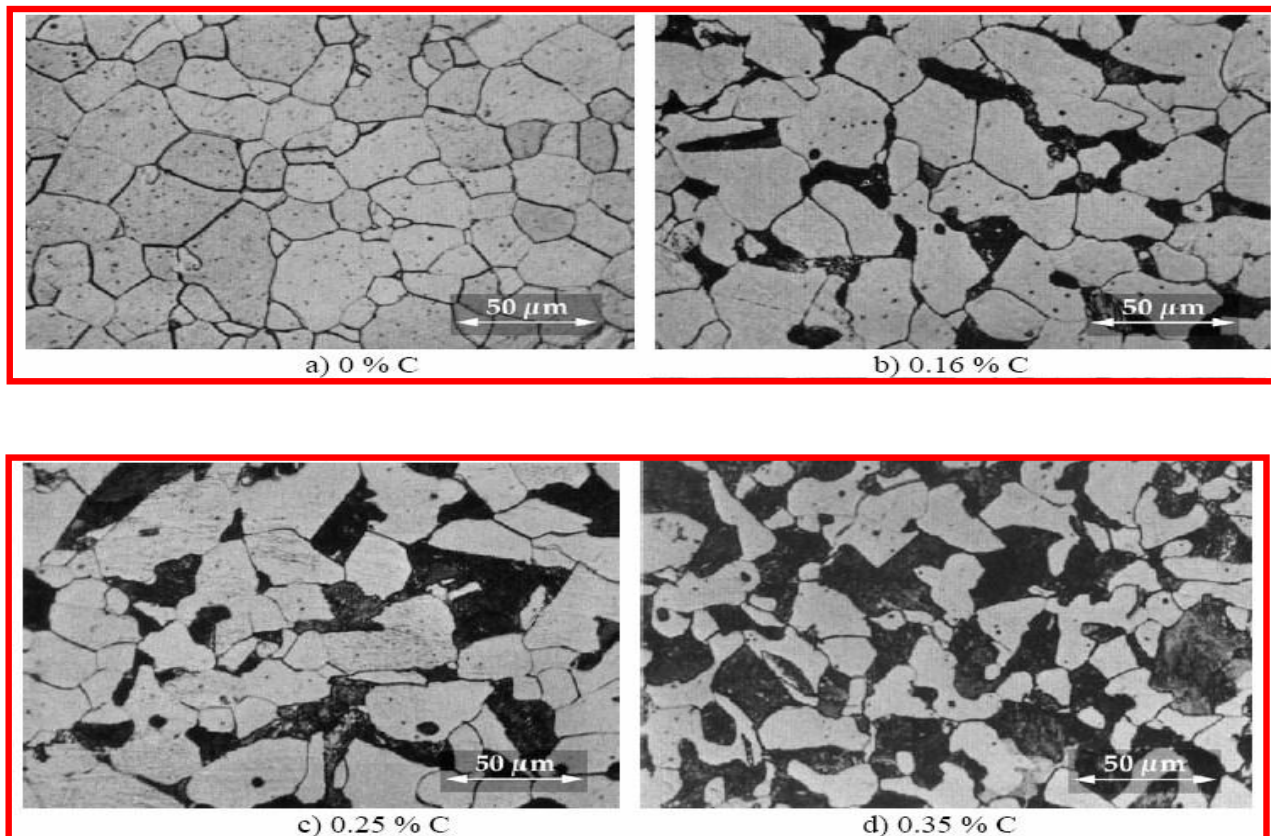


Figure II.1. Microstructures des aciers au carbone en fonction de la teneur en carbone.

## II.1.1.2. Principaux types des défauts

### II.1.1.2.1 Défauts ponctuels (sans dimension)

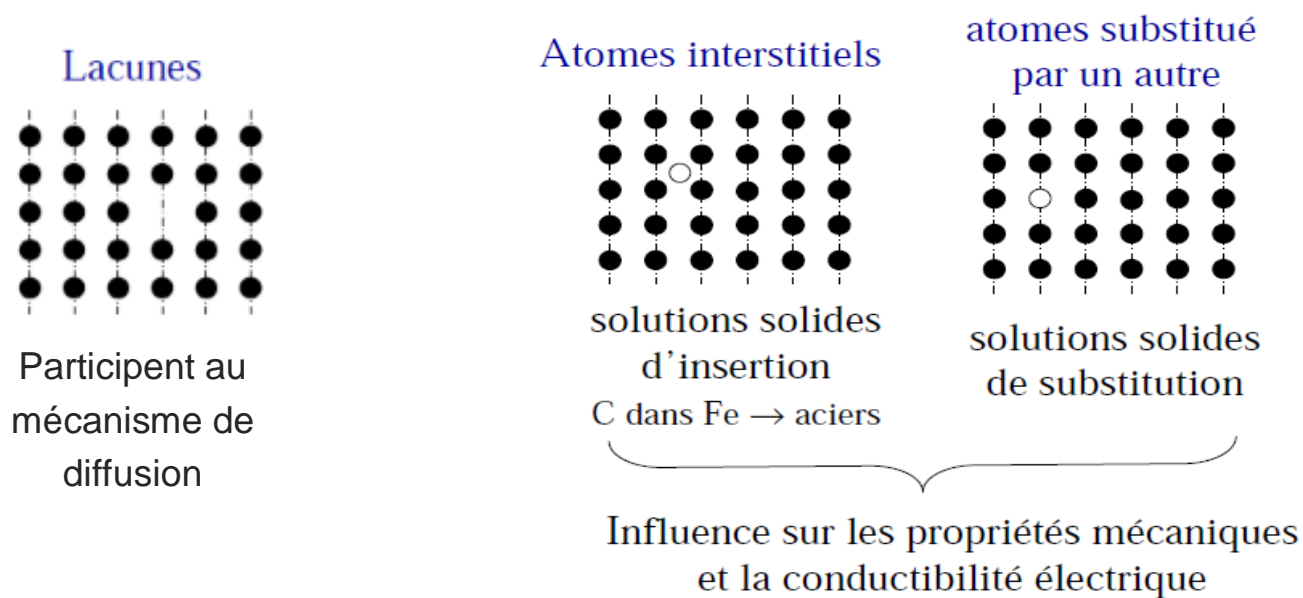


Figure II.2. Représentation des défauts ponctuels

### II.1.1.2.2. Défauts linéaires (à une dimension)

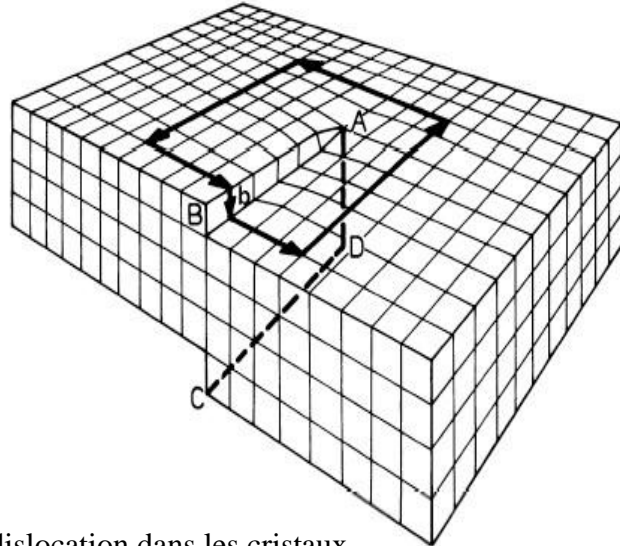
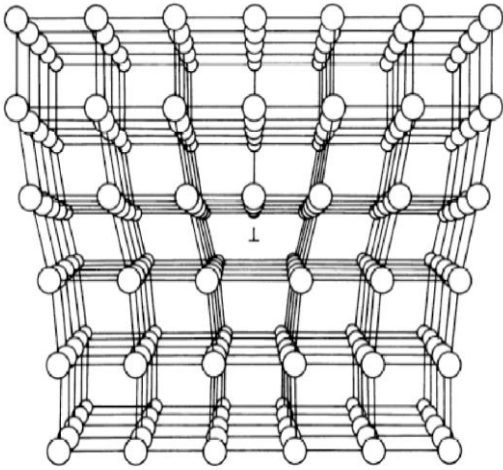


Figure II.3. : Représentation schématique de dislocation dans les cristaux

#### Dislocation coin :

Défaut centré autour d'une ligne le long de laquelle se termine un 1/2 plan atomique supplémentaire à l'intérieur du cristal.

#### Dislocation vis :

Résultat d'un cisaillement du réseau parallèlement à la ligne de dislocation

### II.1.1.2.3. Défauts surfaciques (à deux dimensions)

#### Joint de grains

Chaque matériau est constitué de petits cristaux = **grains**

→ taille des grains :  $d \approx 1 \mu\text{m}$  à quelques mm

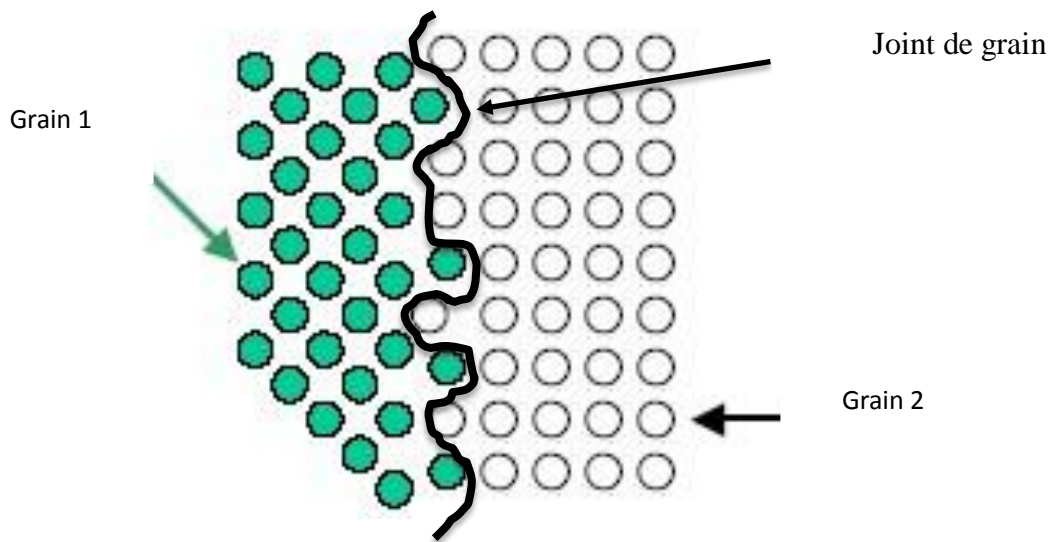
Les surfaces d'accolement des grains s'appellent des **joint de grains** ;

→ ils assurent la cohésion entre les cristaux d'orientation différente

Des grains s'appellent des **joint de grains** ; ils assurent la cohésion entre les cristaux d'orientation différente

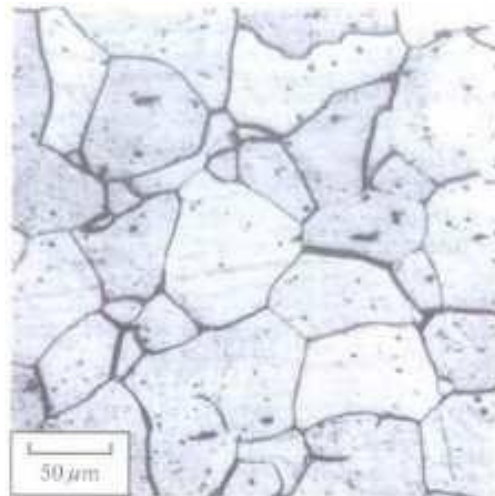
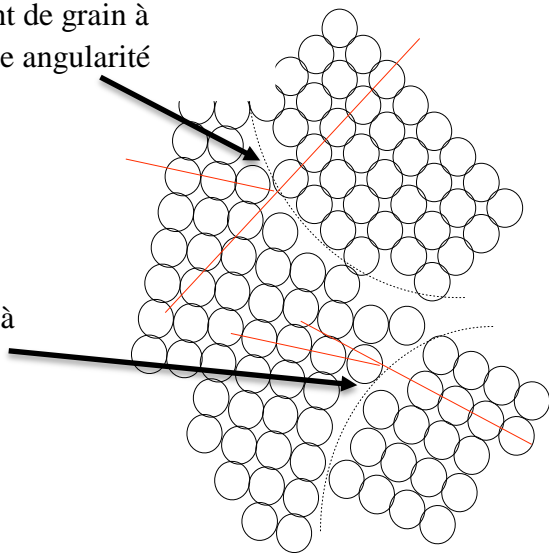
Zone d'accommodation structurale d'environ 2 à 3 couches atomiques.

C'est une zone de concentration d'énergie (interface).



Joint de grain à forte angularité

Joint de grain à faible angularité



Fe poly cristallin

Figure II.4 : Représentation schématique de joint de grain

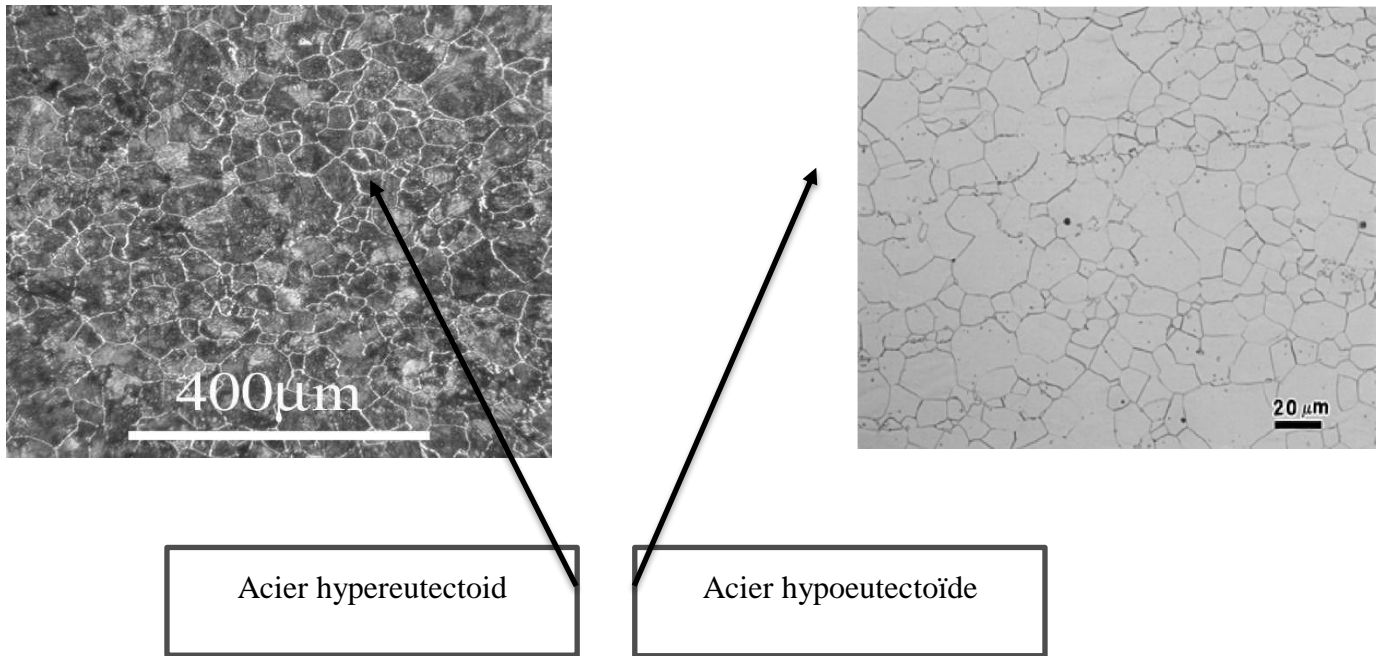
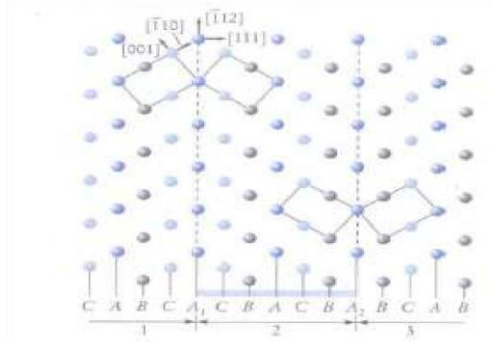


Figure II.5 : Représentation microscopique de joint de grain dans deux cas d'acier en fonction de pourcentage de carbone en masse l'un hypereutectoïde et l'autre hypoeutectoïde

**Une macle**

Une macle est un grain présentant un plan de macle dire qu'il existe deux orientations cristallographiques différentes dans un même grain



c'est-à-

précipités

**II .1.1.2.4. Défauts volumiques (à trois dimensions)**

Ce sont les fissures, les pores, les inclusions et les  
 → Sont introduits dans les matériaux au cours des différentes étapes de traitement et de fabrication

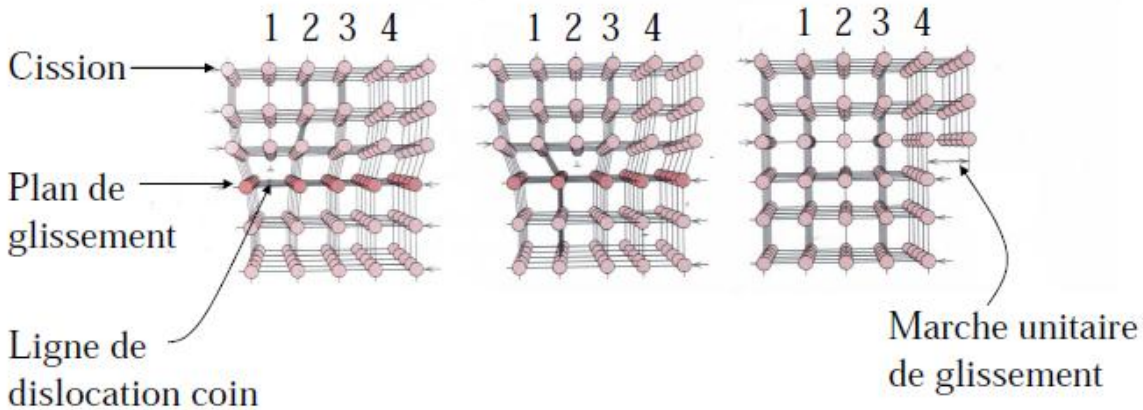
→ Précipités introduits volontairement : durcissement structural

Exemple d'un alliage Al-4,5%Cu traité dans le chapitre consacré à la modification des propriétés

**II.1.1.3. Rôle des dislocations dans les déformations plastiques**

→ Les dislocations sont des défauts linéaires mobiles

→ La déformation plastique correspond au déplacement d'un grand





- La production d'une déformation plastique par déplacement d'une dislocation constitue un glissement.
- Le plan cristallographique que traverse la ligne de dislocation porte le nom de plan de glissement.

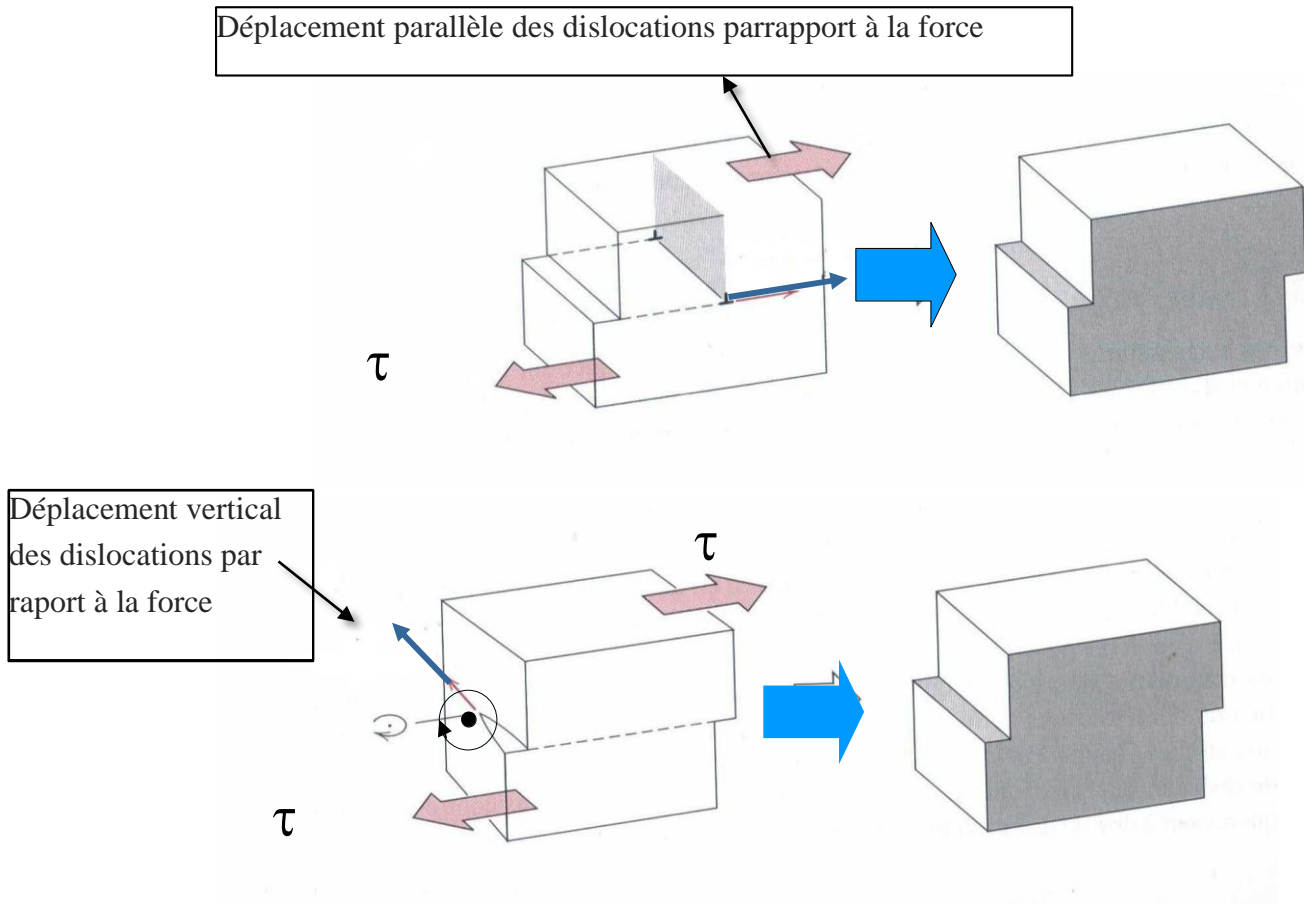


Figure II.6: Déplacement des dislocations par rapport à la force appliqué

#### II.1.1.4. Mécanismes mis en jeu lors de la déformation plastique

$Re < \sigma < Rm$  la densité des dislocations augmente dans le matériau



$\sigma = Rm$  Le nombre des dislocations atteint son maximum



$\sigma > Rm$  Rupture des liaisons atomiques Création de microfissures qui finissent par se rejoindre



Rupture fragile

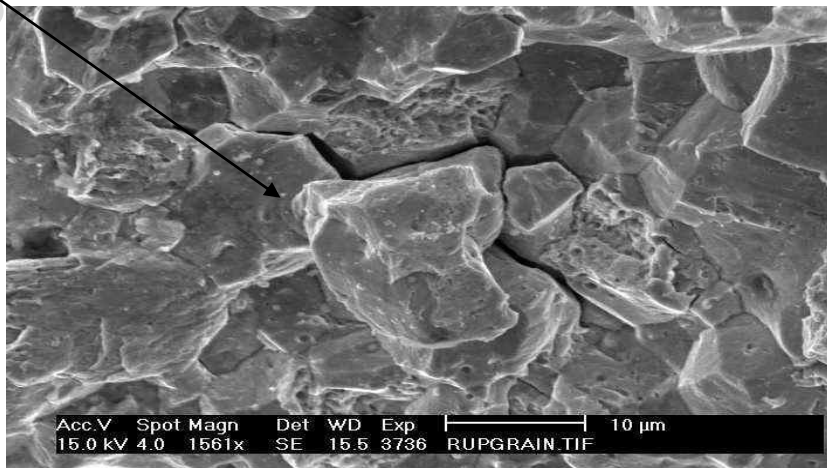


Figure II.7. : Images obtenues en MEB mode électrons secondaires

## II.1.2. INSTRUMENTS DE CARACTERISATION DES MICROSTRUCTURES

Les propriétés mécaniques (Re, Rm, A, Z, E...) dépendent de la microstructure des matériaux

→ contrôler leurs propriétés, il faut décrire et quantifier leur microstructure [11].

**Microstructure** { nature densité et arrangement des défauts  
nature des phases en présence  
morphologie des phases  
dispersion des phases

### II.2.1 Matériaux utilisés

La composition chimique d'acier utilisé dans ce travail est donnée dans le tableau II.1

Composition	C	Mn	Si
%	0.17_ 0.22	0.58	0.25

Tableau II.1 Composition chimique de l'acier utilisé

L'examen micrographique (Figure II.8.), permet de voir l'aspect et la distribution des phases à des grossissements généralement élevés x600.

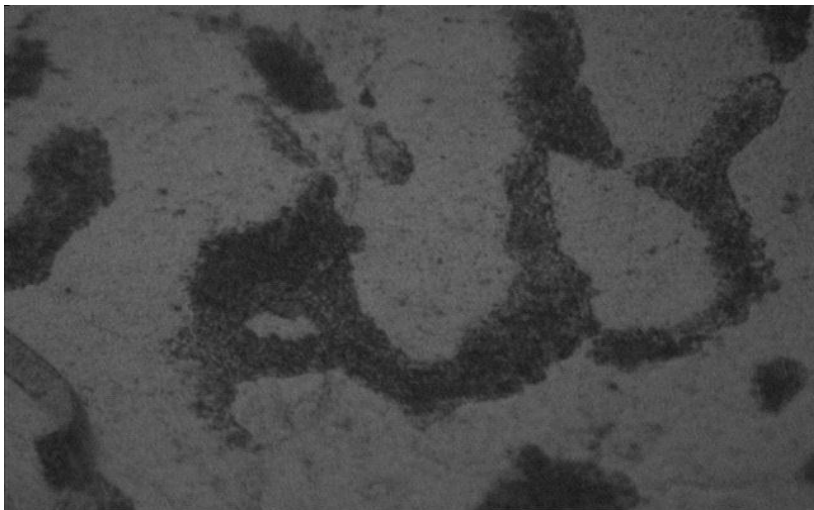


Figure II.8. : Echantillon de l'acier C18, Grossissement : 600x

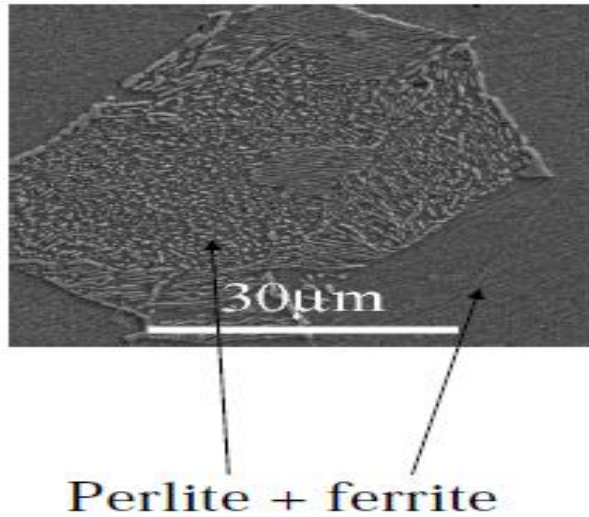


Figure II.9. *Images obtenues en MEB mode électrons secondaires* [11]

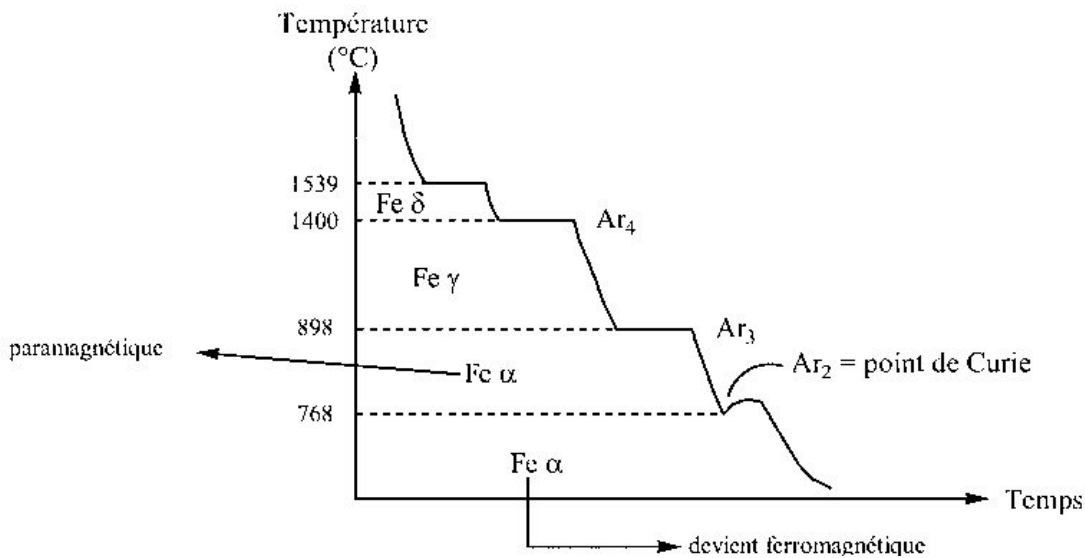
### II.3. Les traitements thermiques

Le fer ayant plusieurs formes allotropiques, on voit plusieurs changements de phases sur le graphe :

- De 1539 à 1400 °C, le fer cristallise sous forme de **fer delta**
- A 1400 °C (Ar4), il y a recristallisation
- De 1400 °C (Ar4) à 898 °C (Ar3), le fer cristallise sous forme de **fer gamma**
- A 898 °C (Ar3) : recristallisation
- De 898 °C (Ar3) à la température ambiante, le fer cristallise sous forme de **fer alpha**

[18]

#### II.3.1 Courbe de refroidissement du fer



- Si maintenant, on met en face la courbe de chauffe du fer, on obtient alors :



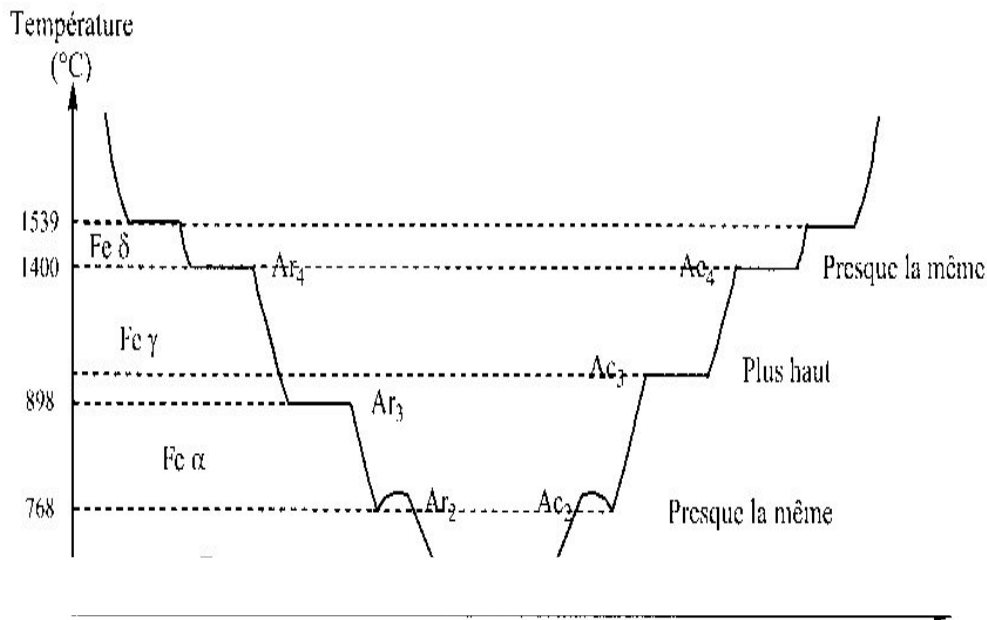


Figure II.10. Courbe de refroidissement du fer [12]

### II. 3.2.LES RECUITS :

Parmi les traitements thermiques, les recuits sont des traitements fondamentaux, car ils déterminent très souvent l'état initial de l'alliage qui sera ultérieurement soumis à d'autres traitements d'amélioration.

On a coutume de définir les recuits comme traitements réduisant la dureté ou modifiant la structure de grains de l'acier, mais en fait cette définition demeure très incomplète, et il est nécessaire de préciser le but visé, afin de fixer les paramètres caractéristiques de l'état initial avant recuit et de la structure à obtenir.

Dans la pratique industrielle, un recuit se définit essentiellement par deux points principaux :

- La température de chauffage.
- La durée du traitement.

En fait il ne faut pas négliger deux autres éléments d'importance qui sont :

- La vitesse de chauffage.
- La vitesse de refroidissement.

Avec toutes les précautions que ces deux facteurs englobent, en particulier lors du passage des points de transformation eutectoïdes qui doivent être l'objet de soins attentifs.

Il existe une classification technique des différents recuits, en fonction des objectifs visés, mais il convient de reconnaître que le gradient de température utilisé gravite autour des lignes A1 et A3 du diagramme ci-dessous, il faut convenir également qu'un certain recuit peut remédier à plusieurs défauts à la fois, donc englober plusieurs objectifs.

Une autre classification ne qualifiant plus l'objectif mais le processus utilisé est également en usage, on parlera de recuit isotherme, de recuit contrôlé avec refroidissement continu, de recuit à basse température.

#### II.3.2.1.Cycle thermique :

- Un chauffage jusqu'à une température dite « température de recuit »
- Un maintien isotherme déterminée, maintient de durée variable ou, en variante, des oscillations autour de cette température.

- Un refroidissement généralement lent, de toute façon, refroidissement à une vitesse inférieure à la première vitesse critique de trempe, le plus souvent à l'air ou dans le four, parfois dans le sable.

### **II.3.2.2.Processus de recuit :**

#### **a)Recuit contrôlé avec refroidissement continu :**

Il consiste en un chauffage au-dessus d'A1 (voir diagramme), suivi d'un refroidissement contrôlé en dessous d'A1.

Ce contrôle est effectué par un appareil thermostatique régulateur, programmé à une vitesse de x degrés à l'heure.

On obtient par ce traitement des microstructures ou des duretés particulières.

#### **b) Recuits à basse température :**

Ce type de traitement est surtout destiné aux aciers dont on souhaite un adoucissement par coalescence de la perlite, ce traitement détruit également l'écrouissage, enfin il peut contribuer à la détente dans certaines pièces coulées ou mécano-soudées.

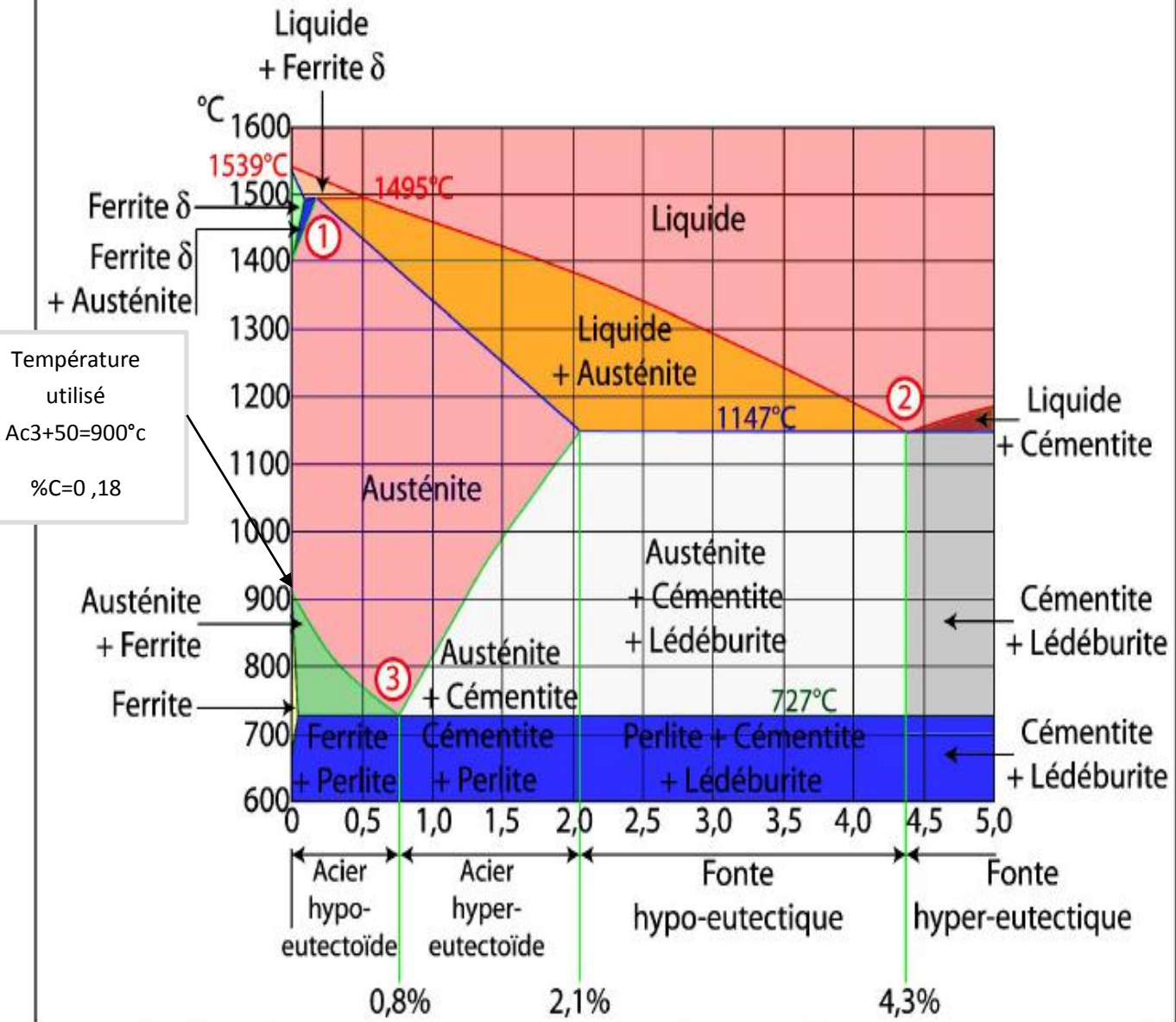
#### **c)Recuits isothermes :**

Le recuit isotherme consiste à austénitiser l'acier, puis à la faire transformer aussi complètement que possible dans la zone perlitique.

Le type de perlite formé est fortement influencé par la température d'austénitisation. Les basses températures austénitiques favorisent la formation de perlite globulaire, par contre les températures plus élevées produisent une perlite lamellaire.

La perlite globulaire est souhaitable pour les opérations ultérieures de formage à froid et le tournage, par contre la structure lamellaire est préférable pour le fraisage, le brochage et le perçage. [13]

Figure II.11. : Diagramme de phases des alliages Fer-Carbone (en concentration massique) [14]



En 1 : transformation péritectique En 2 : transformation eutectique En 3 : transformation eutectoïde (solide-solide)

Planche 23

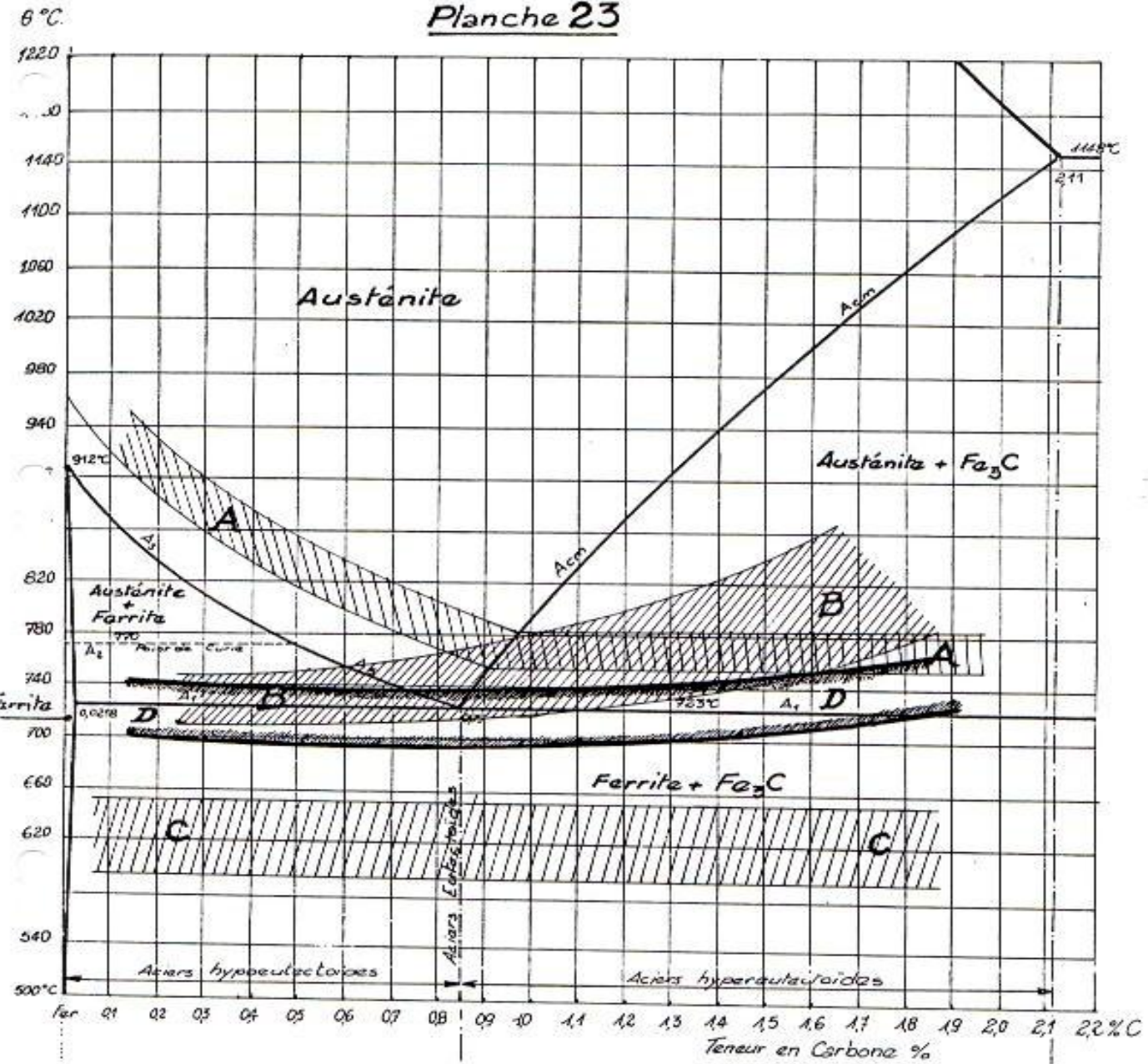


Fig 67: Zones des températures les plus favorables pour les différents recuits

- A : Recuits de normalisation et de recristallisation
- B : Recuits d'adoucissement
- C : Recuits de détente
- D : Recuits d'homogénéisation ou de diffusion

Figure II.12 : Diagramme de phases des alliages Fer-Carbone avec Différents types de recuit

En pratique, on distingue quatre types élémentaires de recuits :

- Le recuit d'adoucissement
- Le recuit de normalisation
- Le recuit de détente
- Le recuit de diffusion.

Il existe des nuances même de ces types de recuits, ce qui fait que l'on rencontrera d'autres dénominations. Ces quatre familles étant déterminées en fonction des bandes de températures qu'elles recouvrent sur le diagramme d'équilibre (voir graphique ci-dessus).

#### **A) Le recuit d'adoucissement :**

Ce recuit s'effectue soit sur des pièces trempées pour faciliter leur usinage (chauffage à  $A1+50$ ) avec maintien 15 à 20 minutes, le refroidissement intervenant lentement à l'air (ou au four), c'est le recuit intégral, généralement, si poussé assez loin, ce recuit entraîne le retour à la structure d'origine.

Une deuxième variante de ce recuit se nomme « recuit de coalescence » conduisant à la structure globulaire des carbures dans une matrice ferritique (voir ci-dessous).

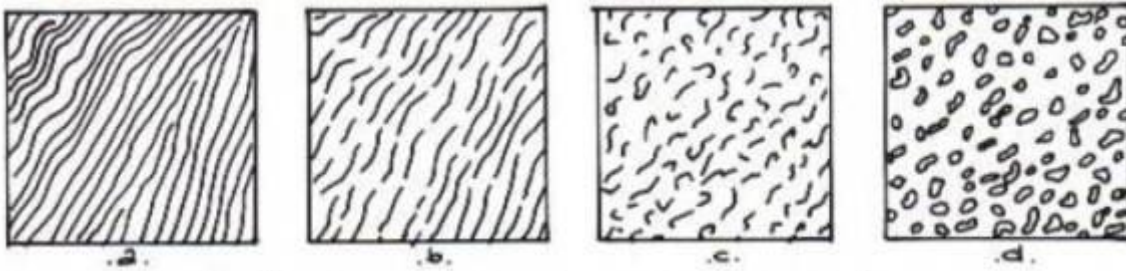


Figure II.13. : Variation de la structure avec le Recuit d'adoucissement

C'est souvent le cas le plus fréquent du recuit d'adoucissement. La façon la plus simple d'effectuer ce recuit est de maintenir les pièces quelques heures juste au-dessous de  $A1$  ou en oscillant autour de cette ligne de température. Cette dernière méthode est plus rapide mais elle implique un ensemble pièces/four présentant une faible inertie thermique, afin que les fluctuations de températures puissent être assez fréquentes. Le refroidissement se fait ensuite à l'air.

Ce recuit d'adoucissement par coalescence de la perlite donne un acier présentant une meilleure aptitude à la déformation par pliage, laminage à froid, estampage, et dans le cas des aciers à plus de 0.5% de carbone la meilleure usinabilité à la scie, à la fraise, au tour,

Pour les aciers à plus faible teneur en carbone, le recuit est défavorable à ce genre d'usinage, parce que les copeaux se détachent mal, ce qui donne des surfaces usinées rugueuses, il est préférable de conserver une structure perlitique normale (lamellaire) pour ces aciers.

Cette structure n'est pas souhaitable avant trempe, car elle retarde la mise en solution de la cémentite dans l'austénite.

#### **B) Le recuit de normalisation :**

Ce type de recuit est utilisé principalement pour les aciers eutectoïdes et hypoeutectoïdes. Il consiste en un chauffage au-dessus d' $A3$  suivi d'un refroidissement à vitesse bien définie.

Ce recuit (appelé également perlitisation) a pour objectif de produire une structure perlitique à grains fins régulièrement repartis, ce qui, pour un acier perlitique, correspond aux propriétés mécaniques optimales. Par cette opération, on élimine les hétérogénéités mécaniques et cristallographiques provenant des structures brutes de coulée très grossières ou éventuellement de laminage (Voir ci-dessous).



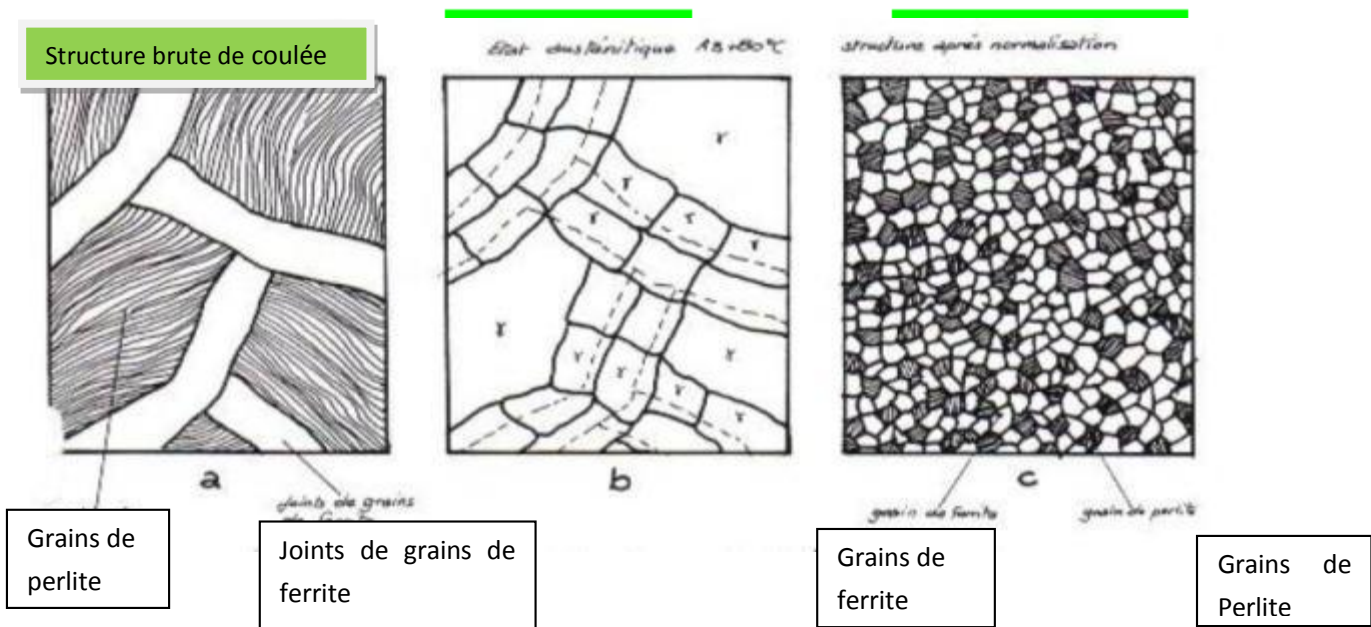


Figure II.14. : variation de la structure de l'acier avec Le recuit de normalisation

La normalisation comprend en fait deux recristallisations :

- Transformation de la ferrite et de la perlite en austénite.
- Puis transformation, avec une répartition différente de l'austénite en perlite et ferrite. Chaque transformation entraînant une recristallisation et un affinage du grain.

Les deux allures : chauffe et refroidissement, additionnant leur effet d'affinage. Ce processus produit un nombre accru de petits grains de ferrite et de perlite.

L'affinage du grain dépend dans une large mesure des vitesses de chauffe et de refroidissement. Il ne faut pas non plus maintenir trop longtemps les pièces au-dessus de  $A_3$ , ni dépasser beaucoup  $A_3$ , cette situation entraînant dans les deux cas un gonflement du grain d'austénite, ce qui est l'opposé du but recherché.

Les vitesses de chauffage et de refroidissement sont importantes, plus elles sont grandes, plus le grain est fin.

Il ne faut pas tomber dans l'excès et éviter l'apparition des phénomènes de trempe.

On obtient l'affinage maximal du grain par trempe dans un bain de métal ou des sels fondus et maintenus à une température juste inférieure à  $A_1$  (recuit isotherme).

Ces opérations peuvent être répétées plusieurs fois, les effets d'affinage s'additionneront (en particulier lorsqu'on dispose au départ d'une structure très grossière).

Dans le cas des aciers hypereutectoïdes, l'objectif est plus délicat, car il convient cette fois de briser le réseau de cémentite, plus stable que les constituants hypoeutectoïdes. On procède d'abord par un recuit intermédiaire aux environs d' $A_{cm}$ , suivi par des normalisations répétées pour améliorer l'homogénéisation du grain (recuit de régénération).

Pour les aciers doux ce recuit de normalisation remplace souvent le recuit d'adoucissement, cette structure permet un meilleur fini et des vitesses de coupe supérieures.

Cet état dit normalisé est un état de référence en ce qui concerne l'état marchand des aciers, il est recommandé de partir de cet état avant d'établir des comparaisons entre aciers, nous avons vu que la mise en forme des aciers marchands s'accompagne d'effets perturbant considérablement les structures ( laminage, écrouissage, hétérogénéités diverses entre cœur et surface,..) d'autre part c'est un excellent état de référence avant d'établir une gamme de traitement thermique, c'est une garantie sérieuse pour la réussite de l'opération.

On peut admettre que ce recuit de normalisation, par rapport à l'état de laminage, entraîne une amélioration de 10 à 25% sur l'allongement et de 2 à 5 daN/mm<sup>2</sup> sur la résistance à la traction.

### C) Le recuit de détente :

En fait si l'on tient compte des températures pour qualifier les recuits, on peut considérer le recuit de détente comme un revenu à hautes températures, en effet tous les traitements de ce groupe sont effectués à des températures inférieures à A1. Ils ont surtout pour but de supprimer les contraintes internes provenant de la solidification des pièces du refroidissement, des déformations à froid, de la mécano-soudure, et également de certains traitements thermiques.

Ces types de recuits ne sont pas uniquement destinés à l'acier mais aussi pour les fontes moulées en particulier.

Les températures sont très variables selon la nature de l'état d'origine de même que les temps de maintien. Les contraintes sont décroissantes du temps et de la température et ne disparaissent entièrement qu'au moment où la pièce atteint la température de recristallisation de la ferrite.

Ce recuit n'est pas lié directement avec les points de transformation, il a une action plus physique et mécanique.

Cette opération visant à supprimer les contraintes résiduelles est également nommée relaxation. Ce recuit peut être effectué en plusieurs phases alternées avec des opérations d'usinage.

#### D) recuit de diffusion :

Egalement nommé recuit d'homogénéisation, son objectif est de détruire les hétérogénéités chimiques des alliages produites au cours de la solidification. On l'applique également sur des aciers laminés à chaud afin de neutraliser simultanément les hétérogénéités chimiques et mécaniques souvent, dans ce cas, le traitement se prolonge par une recristallisation provenant du maintien prolongé à températures élevées.

Une variante appliquant le même principe de diffusion, est le recuit de cémentation. Bien que l'aboutissement de la cémentation soit un phénomène de durcissement, la première phase de l'opération se fait dans les conditions de recuit sur le plan températures avec en plus la présence d'un milieu décarburant.

[13]

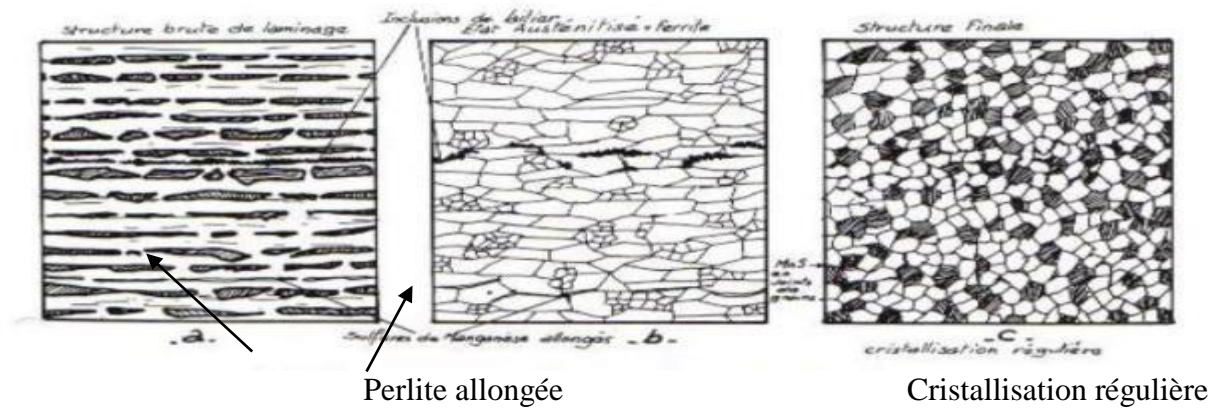


Figure II.15. : influence de recuit de diffusion sur la structure des aciers [19]

### II.3.3.La Trempe

Elle est peu courante compte tenu de la très faible trempabilité de ces aciers, Dans certains cas cependant, elle permet, en élevant la vitesse de trempe, d'affiner nettement la structure ferrite-perlite, ce qui a pour effet d'élever à la fois la limite d'élasticité et la ténacité. On peut ainsi obtenir sur un acier à 0,20 % de carbone les caractéristiques montrées dans le tableau II.2, et par exemple étendre le domaine d'application de cet acier à des températures ambiantes légèrement inférieures à 0 °C [15]

Tableau II.2 – Influence d’une trempe à l’eau sur les caractéristiques mécaniques d’un acier non allié à 0,20 % de carbone en fonction de la vitesse de trempe

Vitesse de refroidissement (°C/h)	Type de traitement sur une épaisseur de 30 mm	Indice de grosseur des grains ferritiques	Limite d'élasticité conventionnelle à 0,2 % d'allongement, Rp 0,2, a + 20 °C (MPa)	Énergie de rupture KV	
				a + 20 °C (J)	à - 20 °C (J)
200	Recuit	7	330	45	18
2 600	Normalisation	8	370	68	38
200 000	Trempe à l’eau	10	400	92	62

### II.3.3.1. Trempabilité

Dans le cas des aciers à outils, la trempabilité peut se définir par la possibilité d’obtenir un niveau de dureté donné à un endroit précis de l’outil en se fixant les paramètres suivants :

- conditions d’austénitisation (température de chauffage et temps de maintien) ;
- dimensions des pièces à traiter ;
- milieu de refroidissement.

Le milieu de refroidissement, en particulier, a une efficacité qui dépend, pour une température donnée, de sa conductivité thermique et de sa capacité thermique.

Cet ensemble conditionne les échanges thermiques avec la surface de la pièce en acier.

La sévérité du milieu peut se caractériser par une échelle de valeurs H définies par le rapport de coefficient de transmission de la chaleur entre la pièce et le milieu de trempe et

De la conductivité thermique du milieu de trempe.

Ces valeurs de dimension L<sup>-1</sup> sont comprises entre 0,02 pour la trempe à l’air calme

Et 2,0 pour la trempe à l’eau salée.

Il faut rappeler qu’il existe deux notions bien distinctes au niveau de l’obtention de la dureté après traitement thermique de trempe dans le cas des aciers à outils :

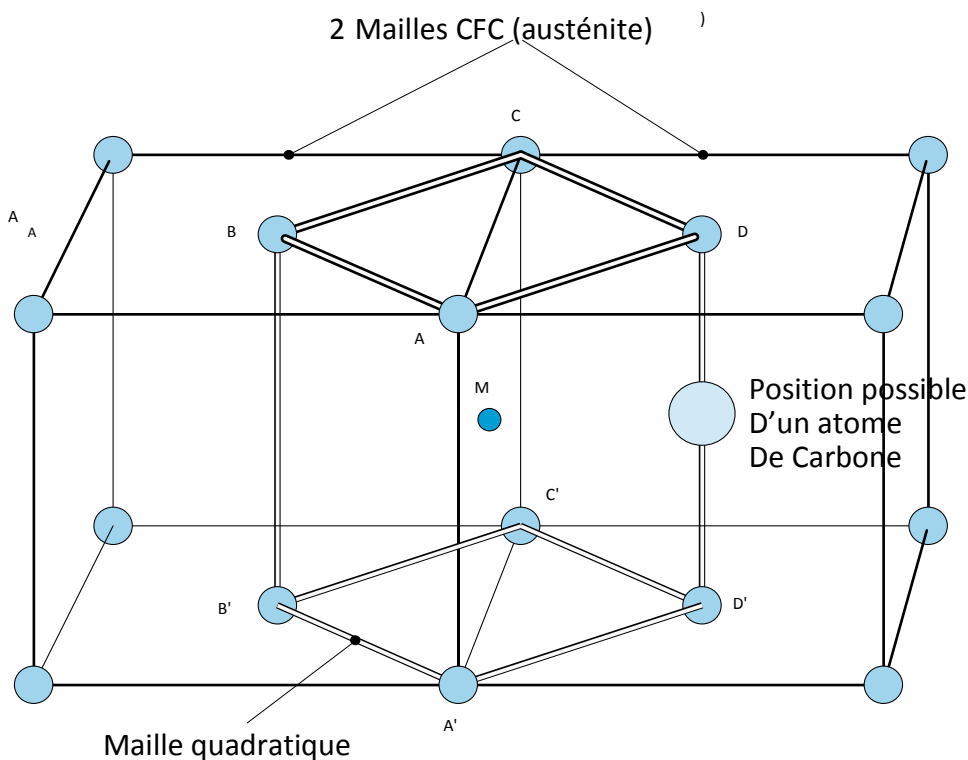
- l’intensité de durcissement, qui dépend essentiellement de la quantité de carbone mise en solution solide dans l’austénite avant trempe ; cette intensité croît rapidement avec la teneur en carbone jusque vers 0,6 %, puis de plus en plus lentement au-delà ;
- la pénétration de trempe, qui dépend essentiellement de la teneur en éléments d’alliage contenus dans l’acier et de la grosseur du grain austénitique. [15]

### II.3.3.2. Transformation martensitique



Au-dessous d'une température repérée  $M_s$  (250°C), la transformation de l'austénite ne provoque que de faibles déplacements des atomes de fer (inférieurs à une distance interatomique) ; de ce fait, on admet qu'elle se fait sans diffusion (ce qui explique l'absence d'influence du temps). Elle progresse seulement en fonction de l'abaissement de la température. Cette transformation, dite martensitique, se produit à la faveur d'un mouvement coopératif d'atomes de fer qui, par groupes, passent, par un mécanisme de cisaillement, de leurs positions dans le réseau de l'austénite à de nouvelles positions correspondant à une disposition plus stable à basse température. Les atomes se déplacent dans la direction de cisaillement, parallèlement à un plan fixe (le plan d'accolement évoqué plus loin) et en quantité proportionnelle à leur distance à ce plan. Cette évolution présente de grandes analogies avec un maillage mécanique (le plan fixe d'accolement jouant le même rôle que le plan de macle) mais elle est plus complexe. Il est généralement admis que la transformation martensitique peut être la combinaison du mécanisme de déformation linéaire et d'une rotation plus ou moins complexe. Le processus consiste à admettre qu'une maille quadratique centrée peut se former à partir d'éléments prélevés dans deux mailles cubiques à faces centrées accolées (figure II.16). Les sommets de la maille quadratique sont constitués par les atomes A, B, C, D, A', B', C', D' tandis que l'atome central est l'atome M ; les arêtes a et b de la maille quadratique seraient alors égales à  $a_A/2$  ( $a_A$  étant la maille de l'austénite) tandis que l'arête c serait égale à  $a_A$ . La maille quadratique, pour prendre ses dimensions normales doit donc être comprimée selon c et dilatée dans le plan perpendiculaire à c. Ce schéma rend compte du fait que la « dilatation » des arêtes c qui subsiste dans la martensite est liée à la présence, dans les sites octaédriques de l'austénite, des atomes de carbone en solution solide, atomes qui subsistent en position dans la maille quadratique et gênent le repositionnement des atomes de fer. Par contre, Ce processus ne permet pas de rendre compte correctement du cisaillement, des relations cristallographiques et du plan d'accolement et c'est la raison pour laquelle on admet l'intervention d'un phénomène complémentaire (la rotation évoquée plus haut). [16]

[20]



Origine de la maille quadratique de la martensite [16]

Tableau II.3. – Principales anomalies dues aux traitements thermiques [17]		
Opération	Causes	Conséquences
<b>Préparation</b>	mauvais nettoyage	aspect coloration points doux
	oxydation	aspect coloration points doux
	mauvais positionnement	déformations
	charge mal constituée	déformations hétérogénéités de dureté
	protections	écarts de dureté
<b>Montée en température et maintien</b>	gradient thermique trop élevé	déformations tapures
	atmosphère oxydante	calamine décarburation oxydation inter granulaire
	pyrométrie	structure incorrecte déformations surchauffe brûlure
	programmation du temps	grossissement du grain
<b>Refroidissement</b>	trop lent	défaut structure dureté faible
	trop rapide	déformations tapures
	agitation	déformations tapures
	présentation dans le bain de trempe	déformations tapures

Figure II.16.

---

## CHAPITRE III : MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

---

### III.1. Traitements thermique sur l'acier C18

-Le traitement thermique a porté sur 3 échantillons .une trempe à 900°C a un temps de maintien de 30 min suivi par un revenu à 250°C et 20 min de maintien a été observé (voir tableau III 1).

-La trempe a été faite dans l'eau.

- Les moyennes expérimentales utilisées pour réaliser les différents traitements thermiques sont :

#### III.1.1Four électrique avec T° max=1200 C°

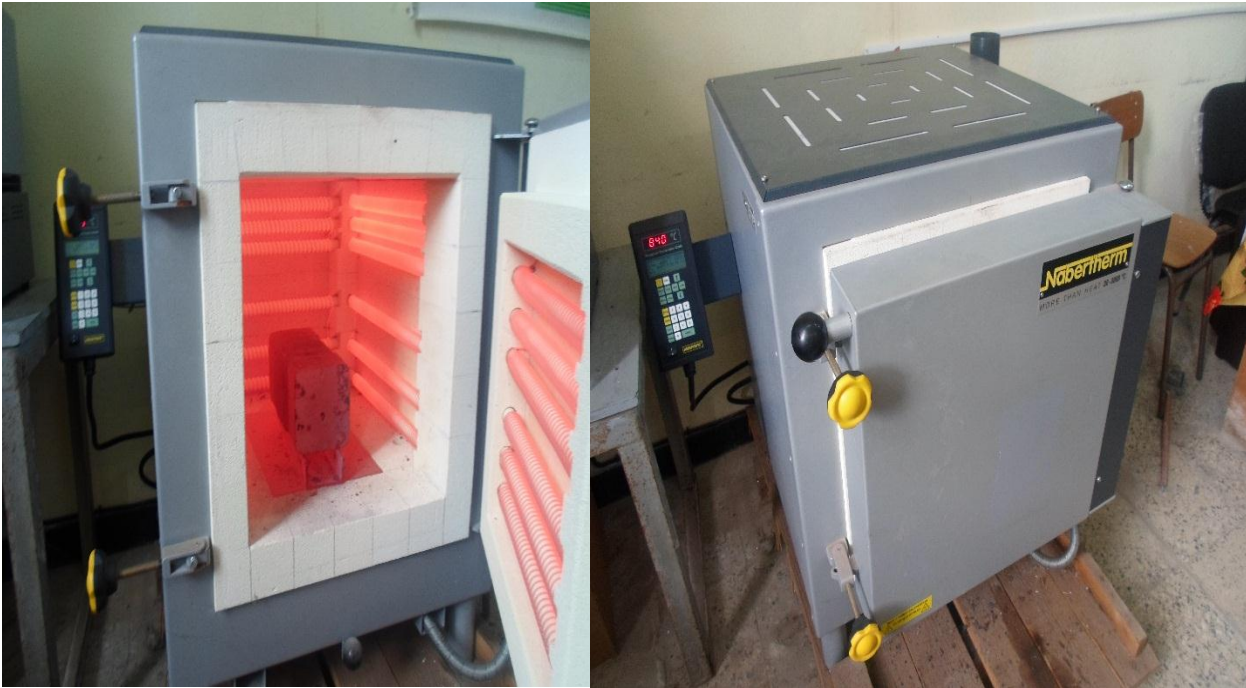


Figure III.1.Four électrique(NABERTHERM)

Ce four permet la programmation de la température de chauffage et de temps de maintien

#### III.1.2Bac de refroidissement



Figure III.2.Bac de refroidissement

Le bac de refroidissement a une capacité d'environ 200 litre

### III.1.3.Extracteur des échantillons \*pelle-pince\*:

Dans le but d'assurer les meilleures conditions de pose et de retrait des échantillons dans et au four des éprouvettes ayant une configuration prismatique et un poids dépassent 7 kg, chauffées à 900°C, un extracteur a été conçu et réalisé par M.MOKAS Nacer, enseignant au département de génie mécanique. Ce dispositif, permet une extraction aisée du four et en toute sécurité cette extracteur se caractérise par une longueur de 1700mm et ayant une pince assurant une bonne prise de l'échantillon bout .cette pince est commandée par une tige de l'autre bout et verrouillée par un système de levier à v. il est doté également d'une bonne télescopique de longueur 500mm, rendant ainsi le traitement et l'extraction plus facile (voire figure III.1.3)

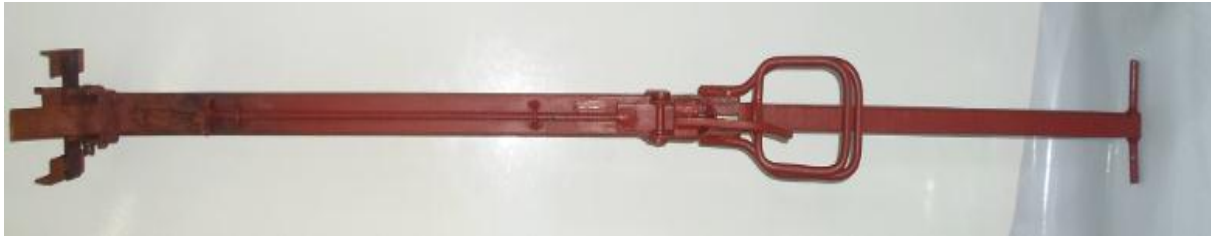


Figure III.3. pelle-pince

### III .1.4. Micro scope optique

Pour mesurer l'usure sur la partie active du foret ,nous avons utilisé d'un microscope d'atelier, qui a été doté d'accessoires, permettant le positionnement du foret pour la mesure de l'usure des différentes surfaces de la partie active ( surface de dépouille, d'attaque , listel et l'arrêt tranchante principale )ce microscope est doté également d'une table à mouvement croises et ayant une précision de 0.005mm.

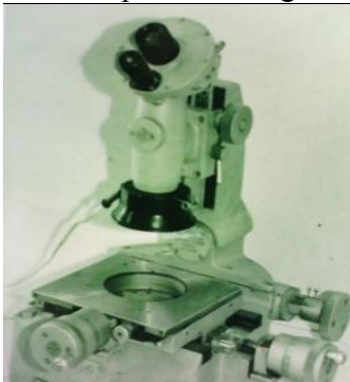


Figure III. 4  
Microscope d'atelier



Figure III.5.Dispositif de  
positionnement  
Des forets

### III.1.5.Méthode expérimentale des traitements thermiques de l'acier C18

3 échantillons d'acier C18 ont subi des traitements thermique à différents température d'échauffement et a des temps de maintien et de » refroidissement appropriés.

Les traitements réalisés sont illustrés dans le tableau suivant :



Tableau III.1 : Les traitements thermiques subis par l'acier C18

N° ordre	N° échantillon	Traitements thermique ; (T° 'c°', t 'min')
01	01	TREMPE (900 C° ,30) +REVENU (240 C° ,20min)
02	02	RECUIT (900 C° ,30)
03	04	ETAT BRUT

### III.2. Essais de dureté :

La micro dureté consiste à utiliser des indenteurs de taille submillimétrique. Les empreintes ne couvrent alors qu'un à quelques grains, et les résultats présentent une dispersion significative, ce qui nécessite de multiplier les mesures.

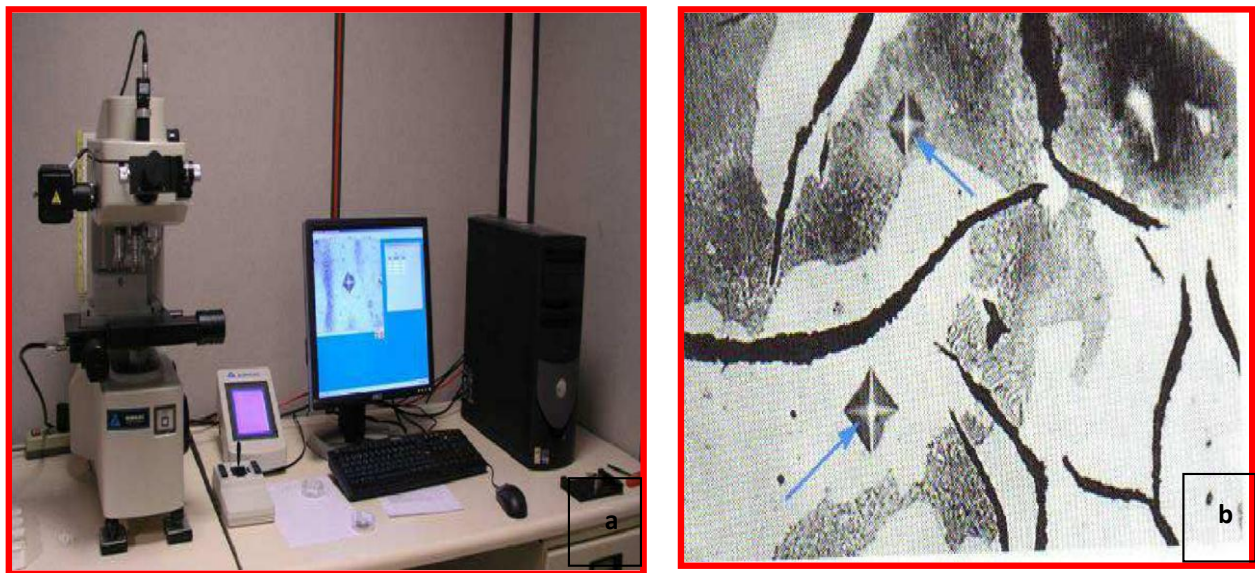


Figure III.6 : (a) : Dispositif d'essais de micro dureté piloté par ordinateur avec Acquisition d'images.  
(b) : Empreinte d'un essai

Les résultats de mesure sont portés dans le tableau III.2.

Ces essais ont été conduits au sein du laboratoire de caractérisation des matériaux au département de génie mécanique.

Tableau III.2 : résultat des Essais de dureté de l'acier C18(les essais fait au sien de laboratoire de caractérisation des matériaux dans le département de génie mécanique)

N=° ordre	N=° échantillon	Traitement th	HV				HRB	HRC
01	04	ETAT BRUT	128.8	125.7	123.6	127.3	71.2	/
02	02	RECUIT (900 C°,30min)	120	117.8	121.2	119.6	66.7	/
03	01	TREMPE (900 C° ,30min) +REVENU (240 C° ,20min)	396	396.1	395.9	396	/	40.6

L'analyse des résultats de la micro dureté, montre que la trempe a conduit à l'élévation de sa dureté plus de trois fois.

### III.3 étude des forets hélicoïdaux lors de l'usinage de l'acier C18 trempé :

La qualité de travail d'un outil dépend de son degré d'usure qui influence directement :

- La qualité de la surface (rugosité, dimension, forme, etc.)
- La tenue de l'outil
- La puissance nécessaire à la coupe (productivité, etc.)

A un certain degré d'usure il y a destruction de l'arrêt de la coupe. La durée de vie de l'outil sera donc liée à ce degré d'usure.

#### III.3.1.outil de coupe :

Les essais son réalisé avec des forets en acier rapide (HSS) ces derniers sont des aciers fortement alliés, leur dureté atteint 60 HRC et leur résistance à chaud aller jusqu'à 600°C

#### III.3.2.machine-outil :

La .machine-outil utilisé est une perceuse à colonne, modèle 2h125T. la gamme de vitesse de cette machine varie entre 45à 200 tr/min

Les avances permises par la boîte des avances varient entre (0.1à 1.6)



Figure III.7. machine-outil

#### III.3.3.Conditions de coupe :

Les Conditions de coupe : les conditions de coupe sont choisies en fonction des capacités de la machine-outil, et des caractéristiques du couple " outil-pince".

-vitesse de coupe : 11.15à 22.30m/min

-avance : 0.10à 0.2mm/tr

### -profondeur de passe

Profondeur de passe dans ce cas est égale au diamètre du foret utilisé.

L'usinage a été effectué en présence d'un lubrifiant avec un débit de 2.5 l/min

### III.3.4. Plan d'expérience :

Le suivi de l'évolution de l'usure a été effectué par trois régime de coupe différents .les régimes de coupe ont été réalisés respectivement suivant les conditions de travail suivants :

- 1)  $V_c = 11.15$  m/min,  $f = 0.10$ mm/min et  $D = a_p = 20$ mm
- 2)  $V_c = 22.30$  m/min,  $f = 0.10$ mm/min et  $D = a_p = 20$ mm
- 3)  $V_c = 11.15$  m/min,  $f = 0.10$ mm/min et  $D = a_p = 10$ mm

L'usinage est accompagné d'une lubrification abondante d'un débit  $Q = 2.5$  l/min.

Résultats des expériences :

- 1) Suivi de l'usure pour le 1<sup>er</sup> régime :

(\*  $V = 11.5$  (m/min) \*  $f = 0.1$  (min/tr) \*  $D = 20$  (mm) \*  $n = 180$  (tr/min)  $Q = 2.5$  (l/min))

Lors de cette expérience, nous avons suivi

-usure suivant la surface en dépouille (VB)

-usure de l'arête tranchante transversale (VATT)

L'usure a été suivie en fonction du temps d'usinage et en fonction du nombre de trous réalisé.

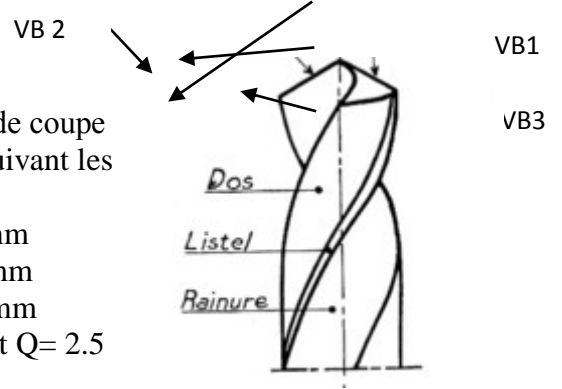


Tableau III.3. Resultats du suivi de l'usure du foret (D=20mm) en fonction du temps- régime1

N°	Nbr de trous	temps par série (mn)	Usure sur la surface en dépouille VB (mm) VB max = 0,5mm			Usure l'arête tranchante VATT (mm)	
				VB1	VB 2		VB3
01	0.27	1	I	-	-	0.02	-
			II	-	-	-	-
02	1	3 44s	I	-	0.02	0.03	0.04
			II	0.03	-	-	-
03	2	11mn 12s	I	0.04	0.02	0.03	0.09
			II	0.04	0.04	0.03	0.13
04	2	18mn 40s	I	0.09	0.04	0.03	0.10
			II	0.08	0.04	0.05	0.13
05	3	29mn 52s	I	0.1	0.04	0.06	0.10
			II	0.1	0.05	0.06	0.13
06			I	0.1	0.05	0.06	0.12



	4	44mn 48s	II	0.1	0.05	0.01	0.13
07	5	63mn 28s	I	0.1	0.05	0.09	0.20
			II	0.11	0.09	0.11	0.25
08	8	93mn 10s	I	0.12	0.10	0.17	0.26
			II	0.11	0.10	0.20	0.40
09	5	111 50s	I	0.13	0.10	0.23	0.35
			II	0.12	0.11	0.29	0.45
10	5	130 10s	I	0.16	0.10	0.28	0.36
			II	0.14	0.14	0.33	0.48
11	5	148 50s	I	0.32	0.15	0.32	0.45
			II	0.24	0.20	0.4	0.53
12	5	167 30s	I	0.34	0.17	0.37	0.51
			II	0.30	0.22	0.45	0.55
13	5	186 10s	I	0.40	0.22	0.42	0.58
			II	0.40	0.22	0.49	0.59
14	5	204 50s	I	0.40	0.22	0.51	0.60
			II	0.46	0.22	0.55	0.62

## 2) Résultats du suivi de l'usure du foret (D=20mm) en fonction du temps (régime2)

(\* V = 22.30 (m/min) \* f = 0.1 (min/tr) \* D = 20 (mm) \* Q = 2.5 (l/min))

Tableau III.4 : Résultats du suivi de l'usure du foret (D=20mm) en fonction du temps-régime2

N°	Nbr de trous	temps par série (mn)	Usure sur la surface en dépouille VB (mm) VB max = 0,5mm			Usure l'arrête tranchante VATT (mm)	
			I	VB1	VB 2		VB3
01	2	3min 46s	I	0.01	0.03	0.02	0.07
			II	0.01	0.02	0.03	0.09
02	2	7min 32s	I	0.01	0.03	0.03	0.07
			II	0.01	0.04	0.03	0.11
03	5	16mn 57s	I	0.03	0.04	0.03	0.09
			II	0.03	0.04	0.03	0.14
04	4	24mn 23s	I	0.04	0.04	0.04	0.10
			II	0.05	0.05	0.05	0.20
05	7	37mn 34s	I	0.05	0.05	0.06	0.15
			II	0.05	0.05	0.07	0.20
06	10	56mn 24s	I	0.06	0.07	0.10	0.20
			II	0.07	0.07	0.10	0.25
07	10	75mn 14s	I	0.06	0.07	0.11	0.23
			II	0.10	0.07	0.11	0.27
08	10	94mn 14s	I	0.13	0.08	0.12	0.32
			II	0.16	0.08	0.12	0.36
09	10	113min 4s	I	0.18	0.08	0.12	0.40
			II	0.22	0.09	0.13	0.44
10	10	131min 54s	I	0.20	0.09	0.14	0.45
			II	0.23	0.10	0.16	0.48
11	10	150min 44s	I	0.25	0.11	0.15	0.46
			II	0.25	0.12	0.19	0.52
12	10	169min 34s	I	0.27	0.12	0.18	0.50
			II	0.29	0.12	0.20	0.60
13	10	188min 24s	I	0.30	0.12	0.20	0.58
			II	0.32	0.13	0.20	0.62

14	10	207min 14s	I	0.33	0.13	0.21	0.62
			II	0.34	0.13	0.22	0.65
15	10	226min 4s	I	0.34	0.15	0.24	0.68
			II	0.36	0.16	0.30	0.70
16	10	244min 54s	I	0.34	0.15	0.25	0.65
			II	0.36	0.16	0.37	0.75
17	10	263min 44s	I	0.34	0.15	0.29	0.68
			II	0.36	0.16	0.41	0.76
18	10	282min 34s	I	0.34	0.15	0.30	0.70
			II	0.37	0.16	0.42	0.78
19	10	301min 24s	I	0.36	0.20	0.40	0.75
			II	0.37	0.25	0.46	0.82
20	10	320min 14s	I	0.37	0.22	0.43	0.77
			II	0.38	0.26	0.48	0.83
21	10	339min 4s	I	0.37	0.23	0.48	0.78
			II	0.40	0.26	0.52	0.84

2) Résultats du suivi de l'usure du foret en fonction du temps (régime3)

(\*V =11.15 (m/min) \* S = 0.10 (min/tr) \* D = 10 (mm) \* Q=2.5l/min)

Tableau III.5 Résultats du suivi de l'usure du foret (D=10mm) en fonction du temps (régime3)

N°	Nbr De trous	Temps (mn)	Usure sur la surface en Dépouille VB (mm) VB max=0.5mm			Usure L'arrête Tranchante Vatt(mm)
			VB1	VB2	VB3	
01	01	1min 52s	-	-	0.03	0.04
			-	-		0.04
02	04	09 min 02 s	0.03	0.03	0.05	0.05
			0.03	0.03	0.06	0.05
03	05	18 min 04 s	0.05	0.03	0.08	0.09
			0.04	0.03	0.07	0.13
04	10	36 min 08 s	0.04	0.05	0.1	0.11
			0.04	0.05	0.12	0.14
05	10	54 min 12 s	0.05	0.09	0.15	0.16
			0.06	0.10	0.16	0.18
06	10	72 min 16 s	0.06	0.15	0.18	0.20
			0.07	0.16	0.18	0.25
07	10	90min 20s	0.07	0.18	0.18	0.26
			0.07	0.17	0.22	0.30
08	10	108min 24s	0.07	0.18	0.20	0.32
			0.07	0.17	0.24	0.45

09	10	126min 28s		0.10	0.18	0.22	0.37
				0.10	0.20	0.26	0.47
10	10	144min 32s		0.12	0.20	0.25	0.42
				0.11	0.21	0.28	0.53
11	10	162min 36s		0.13	0.22	0.28	0.51
				0.12	0.23	0.30	0.60
12	10	180min 40s		0.14	0.24	0.33	0.60
				0.13	0.25	0.45	0.67
13	10	198min 44s		0.16	0.27	0.50	0.77
				0.15	0.28	0.55	0.86

L'usure admissible, retenue pour VB est 0.5 mm.

Les résultats des trois régimes testés, illustrés dans les trois tableaux précédents sont interprétés et exprimés graphiquement dans le chapitre suivant.

---

## CHAPITRE IV INTERPRÉTATIONS DES RÉSULTATS EXPERIMENTAUX

---

## IV.1.Observations microscopique

### a) par le microscope optique de département de mécanique (UBMA)

1) microscopie de la Pièce à l'état brut :

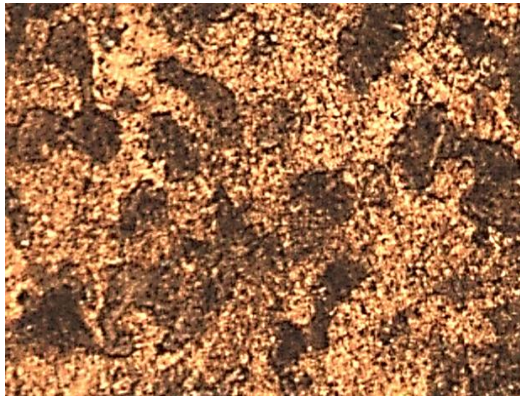


Figure IV .1. Acier C18 à l'état brut grossissement x10

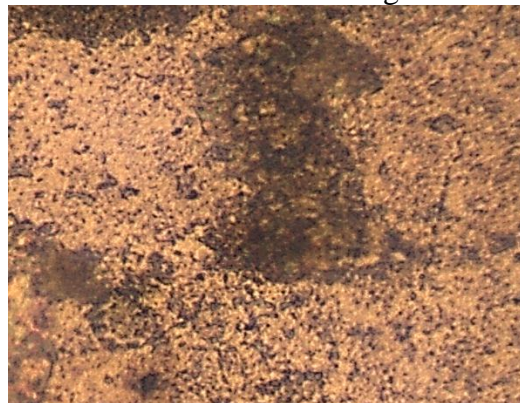


Figure IV .2. Acier C18 à l'état brut dans l'eau grossissement x50

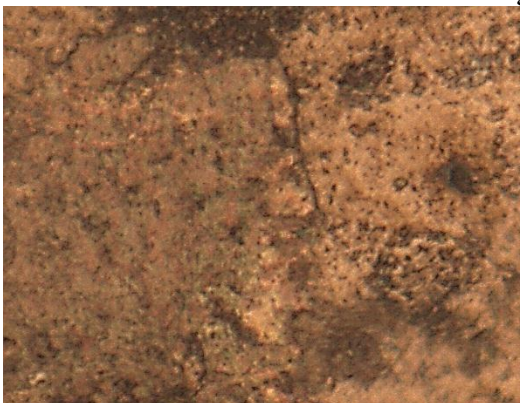


Figure IV .3. Acier C18 à l'état brut. Grossissement x100

2) microscopie de la Pièce à l'état recuit



Figure IV .4. Acier C18 à l'état recuit. Grossissement x50

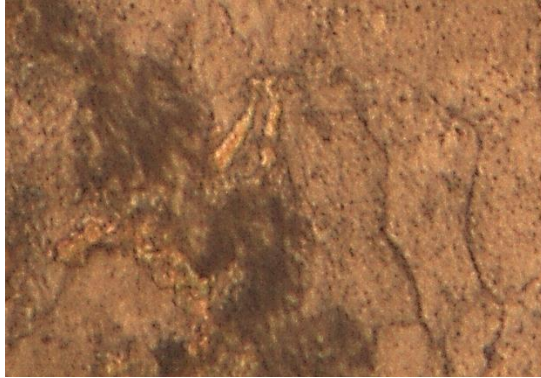


Figure IV .5. Acier C18 à l'état recuit. Grossissement x100

### 3) microscopie de la Pièce à l'état trempé

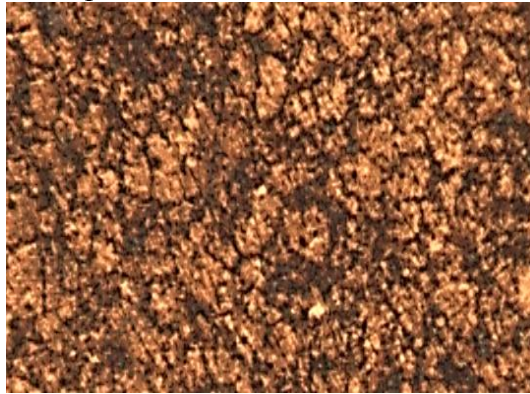


Figure IV .6. Acier C18 trempé dans l'eau grossissement x10

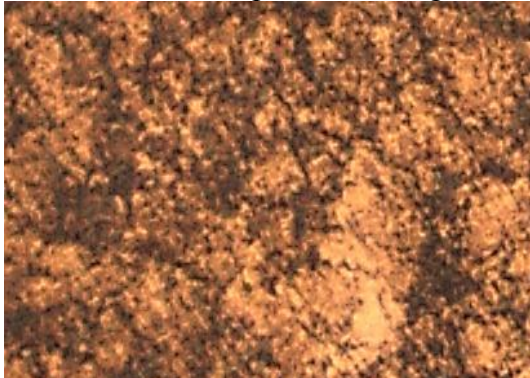


Figure IV .7. Acier C18 trempé dans l'eau grossissement x20





Figure IV .8. Acier C18 trempé dans l'eau grossissement x50



Figure IV .9. Acier C18 trempé dans l'eau grossissement x100

**b) par le microscope optique d'université lorraine (Metz-France)**

Ces microstructures ont été réalisées au laboratoire de caractérisation du département de génie mécanique de l'UBM Annaba.

A titre comparatif, une autre microstructure a été réalisée au laboratoire LEM3 à l'université lorraine de Metz –France. Ces observations sont effectuées par Mr. MOKAS Nacer.

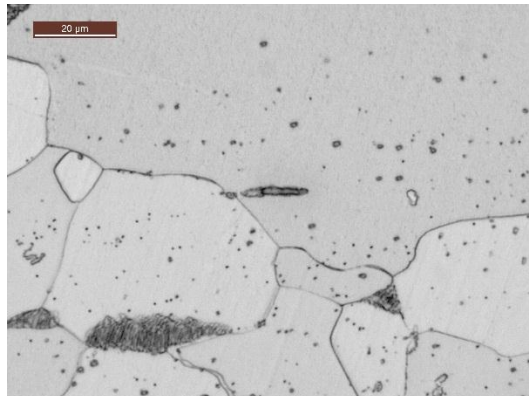


Figure IV.10. Acier C18 avant trempe grossissement x500



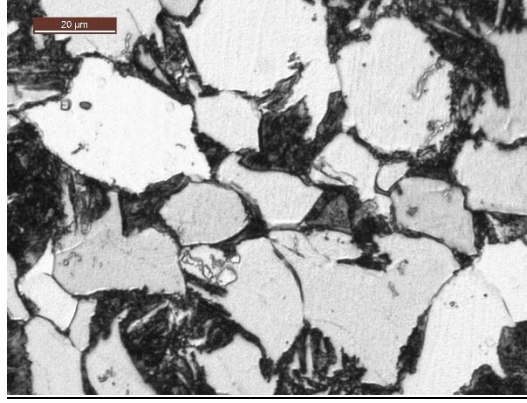


Figure IV.11. Acier C18 après trempe grossissement x500

Remarque 1 : Après le recuit de normalisation (recristallisation) il y a augmentation de la taille des grains de la ferrite avec la recristallisation de matériau à cause de mécanisme de diffusion et la rencontre de deux dislocation (demi plans) l'un est négatif et l'autre est positif donc la formation de nouveaux plans et l'élimination des dislocations avec ce processus le nombre des joints de grains va diminuer et les grains vont grossir

Remarque 2 : Après la trempe il y a multiplication du nombre des joints de grains (la même chose pour les grains) avec le changement structural du au refroidissement rapide de l'acier, de la température d'austénitisation à la température ambiante, donc l'insertion des atomes de carbone dans les sites octaédriques et la formation de la martensite (c'est la martensite à bas carbone due à la très faible teneur en carbone ).

Dans ce cas il y a amélioration des propriétés mécaniques de l'acier C18 (tel que la dureté et la limite élastique). Du à la structure de la maille de martensite (la dilatation par rapport à la maille de la ferrite).

#### **IV.2. Traitement graphique des résultats d'usure durant l'opération de perçage :**

L'évolution de l'usure VB en fonction du temps pour le régime 1 est exprimée graphiquement par la figure IV.1

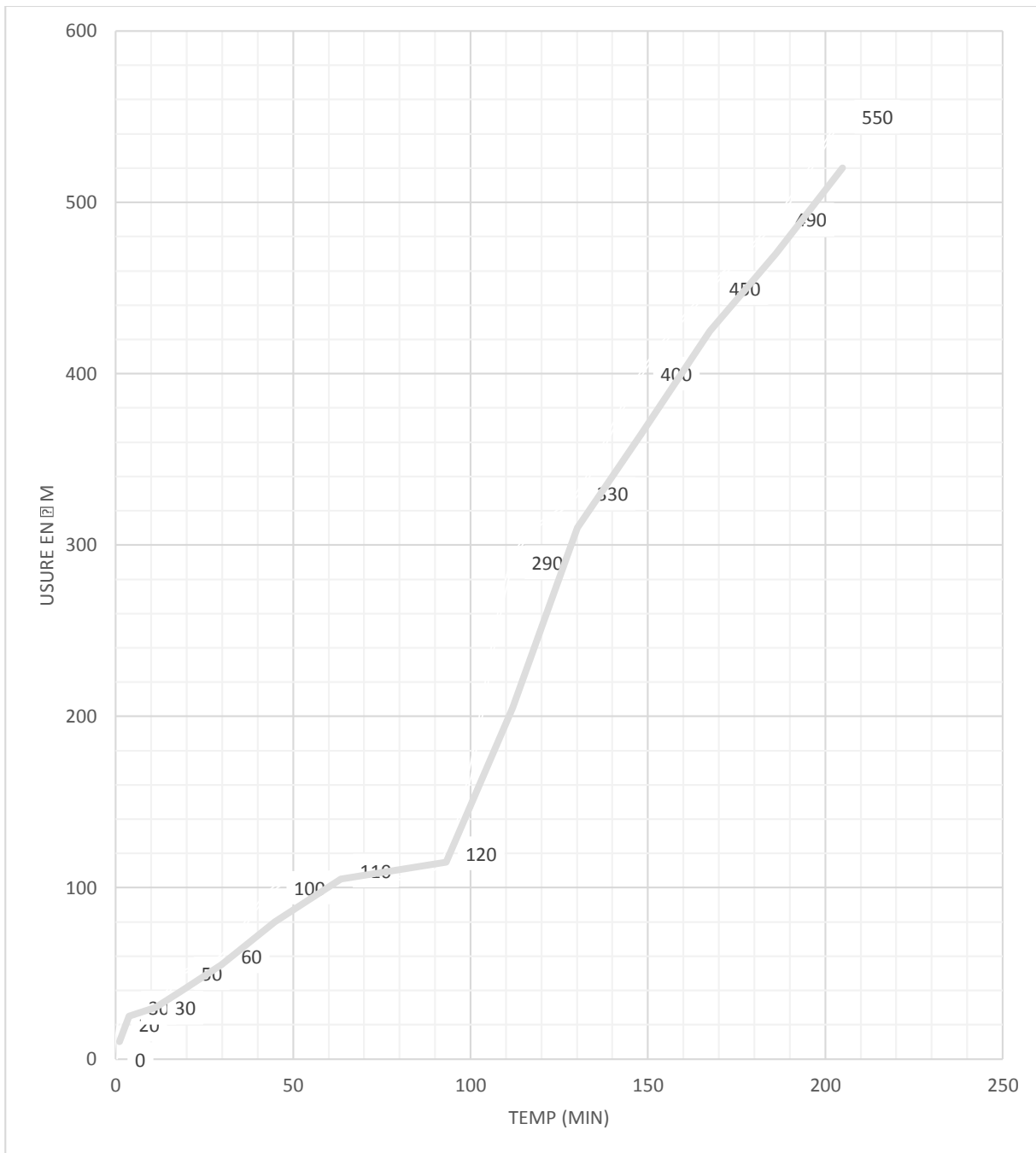


Figure IV.12. Evolution de l'usure en fonction du temps pour le régime 1

L'usure de foret HSS en fonction de temps avec régime de coupe :

(\*  $V = 11.5$  (m/min) \*  $f = 0.1$  (min/tr) \*  $D = 20$  (mm) \*  $Q = 2.5$  (l/min))

En tenant compte de l'usure admissible  $VB = 0.5$ mm, la durée de vie du foret pour les conditions de travail du régime 1 est estimée égale à 204.83min.

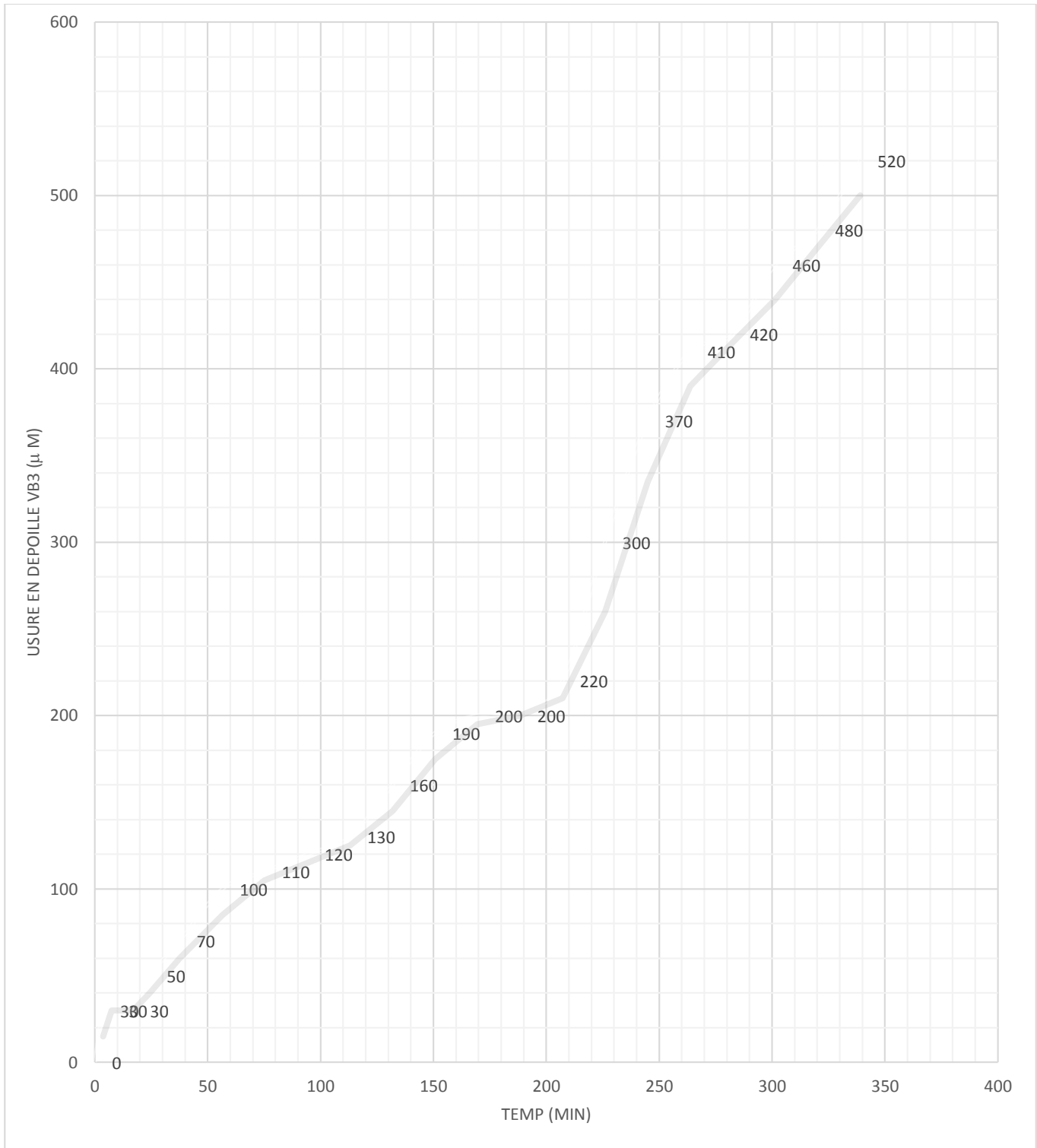


Figure IV.13. Evolution de l'usure en fonction du temps pour le régime 2

L'usure de foret HSS en fonction de temps avec régime de coupe :

(\*  $V = 22.30$  (m/min) \*  $f = 0.1$  (min/tr) \*  $D = 20$  (mm) \*  $Q = 2.5$  (l/min))

La durée de vie du foret pour les conditions de travail du régime 2 est estimée égale à 339.06min.

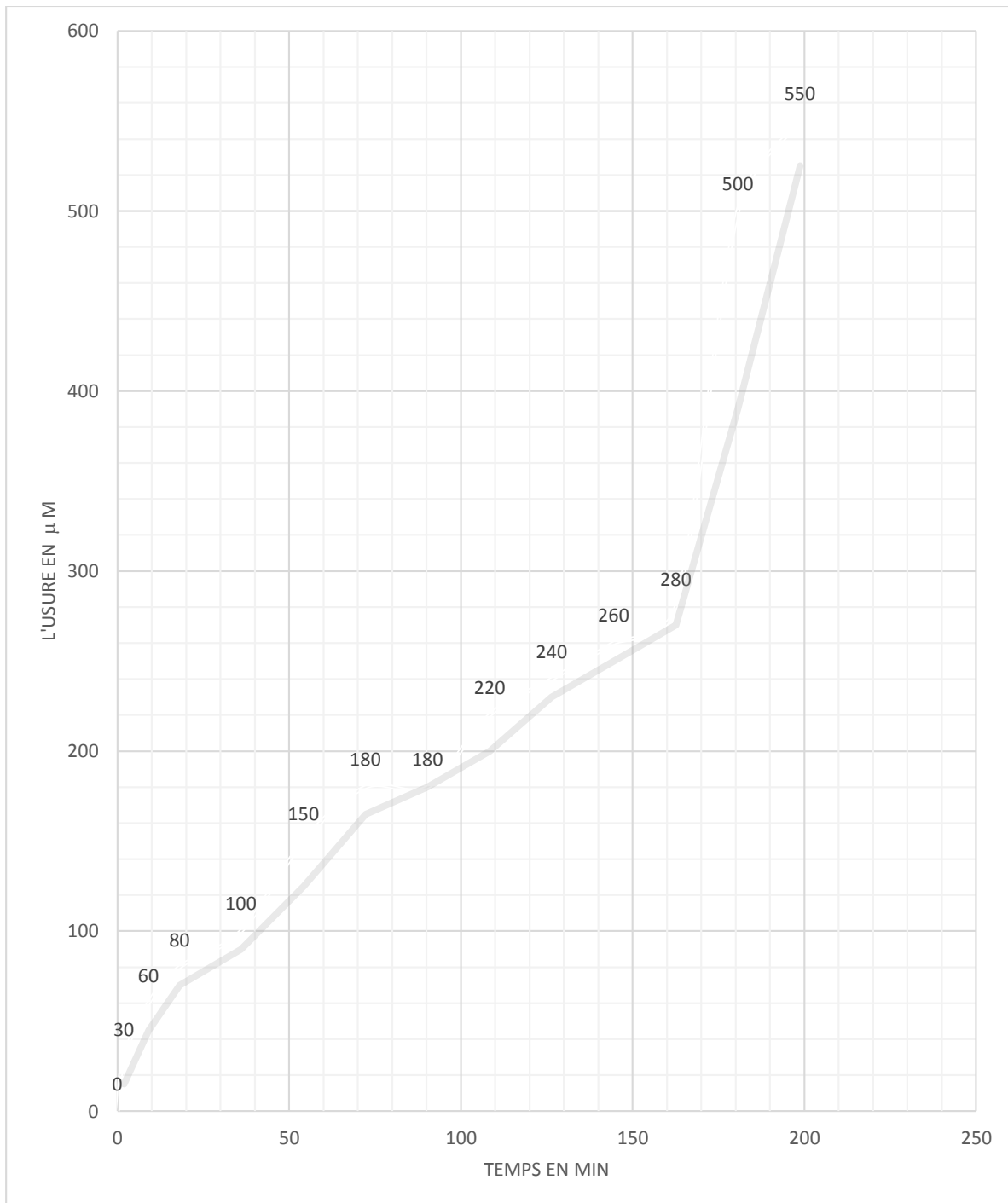


Figure IV.14. Evolution de l'usure en fonction du temps pour le régime 3

L'usure de foret HSS en fonction de temps avec régime de coupe :

(\*  $V = 22.30$  (m/min) \*  $f = 0.1$  (min/tr) \*  $D = 10$  (mm) \*  $Q = 2.5$  (l/min))

La durée de vie du foret pour les conditions de travail du régime 3 est estimée égale à 198.73min.

L'analyse de ces résultats, montre en suivant une allure semblable. Cette courbe de tendance se caractérise par trois zones (zone de rodage, zone d'usure normale et zone l'usure catastrophique).l'usure observée sur les surfaces de la partie active .il a été constaté également que l'usure en dépouille et dominante .l'usure suivant l'arête tranchante transversale évolue avec l'augmentation du temps d'usinage. Cependant sa vitesse d'accroissement est relativement plus faible par rapport à l'usure en dépouille. L'usure du foret  $\varnothing 10$  mm est plus prononcé que celle du foret  $\varnothing 20$  mm, car un diamètre plus grand, donne plus de rigidité et permet une meilleure évacuation de la chaleur, ce qui augmente la résistance à l'usure du foret.

**Conclusion :**

Les principales conclusions tirées de cette étude sont

- 1) Le foret hélicoïdal en acier rapide subit une usure en fonction du temps.
- 2) L'usure des forets, suit la même loi de l'usure de tous les matériaux connus en constriction mécanique
- 3) Les conditions d'usinage ont une influence considérable sur le comportement à l'usure des forets
- 4) L'usure des forets est caractérisée par une usure abrasive
- 5) Malgré la dureté élevée de l'acier C18 (trempe),
- 6) Les forets hélicoïdaux en acier rapide ont montré une très bonne résistance à l'usure. ceci est exprimé par les valeurs des durées de vie qui sont relativement considérables.

**Perspectives :**

L'analyse des résultats obtenus ont montré une bonne résistance à l'usure des forets hélicoïdaux en acier rapide. Ceci nécessite une interprétation plus approfondie, car il est connu dans la littérature que les matériaux trempés deviennent plus agressif Vis-à-vis du matériau de l'outil.

---

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [1] GEORGES SPINLER ; "Conception des machines" ; Principe et application, 1 Statique 1997.
- [2] K. L. JOHNSON ; "Contact Mechanics" ; Cambridge, 1996 ;
- [3] JEAN DHERS ; "Usure, avaries et corrosion" ; Facteur de destruction des matériels industriels. Ed 1978.
- [4] PUBLICATIONS DE L'INSTITUT FRANÇAIS DU PÉTROLE ; "La lubrification industrielle" ; Tome 1, Transmissions, compresseurs et turbines, 1984.
- [5] M. Z. HUQ, J. P. CELIS ; "Wear" ; 212, 1997.
- [6] H. MOHRBACHER, J. P. CELIS, J. R. ROOS ; Tribol. Int., 28, 1995.
- [7] J. AYEL ; "Les lubrifiants, moteur et pertes par frottement et usure" ; Institut Français du Pétrole, 1979.
- [8] Technique de l'ingénieur ; BM5 067, 2005.
- [9] JEAN BLOUET ; "Usure et frottement" T. ing. A 3139. ; B. ARESENAULT, J.G. LEGOUX, H. HAWTHORNE ; « Slurry Erosion of Arc-Sprayed Metal and Composite Coating » ; A United Forum for Scientific and Technological Advances 1997.
- [10] Le site web [www.TECHNIQUE%20ACIERS.mht](http://www.TECHNIQUE%20ACIERS.mht)
- [11] Science et génie des matériaux /Auteur : Callister WD/Ed : Dunod ; des matériaux/Auteur : Bailon JP et Dorlot JM /Ed : Montréal, Presse internationale polytechnique
- [12] microstructures d'équilibre des aciers au carbone TP1-aciers
- [13] Le site web [www.LES%20RECUITS%20\\_.mht](http://www.LES%20RECUITS%20_.mht)
- [14] P. MILLET ; Diagrammes de phases .2009-2010
- [15] Marie-thérèse LEGER ; « Technique de l'ingénieur [M1 148-6] »
- [16] Guy MURRY ; Transformation des aciers ; « Technique de l'ingénieur [M1 115-15] »
- [17] Guy MURRY ; Traitements thermiques dans la masse des aciers. Partie 2 ; « Technique de l'ingénieur [M1 127\_10] »

