

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTERE DE
L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1



MECANIQUE



OPTION : Génie Des Matériaux (GM)

Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master Académique

Thème

***Effet des traitements thermiques sur le comportement
tribologique des aciers à outils pour travaille à Froid
BÖHLER-K110***

Présenté Par :

DRARENI ABDERRAHMANE

MELLAL Mohamed AMINE

Encadrant :

Dr HADJI YUCEF

Année universitaire : 2024/2025

Résumé

La production d'outils revêt une importance capitale pour l'industrie. Les aciers à outils pour travail à froid répondent à ces exigences grâce à leur forte teneur en éléments d'alliage et en carbone. Leurs propriétés sont déterminées par leur composition chimique et leur microstructure.

Dureté, résistance à l'usure, résistance mécanique, ténacité et résistance à la corrosion élevées peuvent être obtenues par des traitements thermiques adaptés, qui modifient la microstructure. Dans cette étude, nous avons analysé l'influence des traitements thermiques (trempe, premier revenu, deuxième revenu) sur la microstructure, la dureté et les propriétés tribologiques (frottement et usure) de l'acier K110 (Z160CDV12), l'un des aciers les plus couramment utilisés pour les applications de travail à froid (matrices, poinçons, outils de découpe). Les échantillons ont été caractérisés à l'aide d'un microscope optique (MO), d'un duromètre, d'un tribomètre (essai bille sur disque) et d'un profilomètre.

Mots clés : Les aciers à outils pour travail à froid, composition chimique, microstructure, dureté, résistance à l'usure, traitements thermiques, trempe, revenu, les propriétés tribologiques, frottement, usure, l'acier K110.

Abstract

Tool production plays a crucial role in the industry. Cold work tool steels meet these requirements due to their high content of alloying elements and carbon. Their properties are determined by their chemical composition and microstructure.

High hardness, wear resistance, mechanical strength, toughness, and corrosion resistance can be achieved through appropriate heat treatments, which modify the microstructure.

In this study, we analyzed the influence of heat treatments (quenching, first tempering, second tempering) on the microstructure, hardness, and tribological properties (friction and wear) of K110 steel (Z160CDV12), one of the most commonly used steels for cold work applications (dies, punches, cutting tools).

The samples were characterized using an optical microscope (OM), a hardness tester, a tribometer (pin-on-disk test), and a profilometer.

Keywords : Cold work tool steels, chemical composition, microstructure, hardness, wear resistance, heat treatments, quenching, tempering, tribological properties, friction, wear, K110 steel.

ملخص

تُعد صناعة الأدوات ذات أهمية بالغة في المجال الصناعي. وتلبي الفولاذات الخاصة بالأدوات المخصصة للتشغيل على البارد هذه المتطلبات، بفضل احتوائها على نسب عالية من عناصر السبائك والكربون. وتُحدد خصائصها الأساسية من خلال تركيبها الكيميائي وبنيتها المجهرية. يمكن تحقيق صلابة عالية، ومقاومة متميزة للتآكل، ومتانة ميكانيكية، ومقاومة للصدمات والتآكل الكيميائي من خلال المعالجات الحرارية المناسبة، التي تُحدث تغيرات في البنية المجهرية.

في هذه الدراسة، تم تحليل تأثير المعالجات الحرارية (التقسية، والتطبيع الأول، والتطبيع الثاني) على البنية المجهرية، والصلابة، والخصائص التريبولوجية (الاحتكاك والتآكل) لفولاذ K110 (Z160CDV12)، وهو من أكثر أنواع الفولاذ استخدامًا في تطبيقات التشغيل على البارد (قوالب، مثاقب، أدوات قطع).

تم توصيف العينات باستخدام المجهر البصري، جهاز قياس الصلابة، جهاز قياس الاحتكاك (اختبار الكرة على القرص) بالإضافة إلى جهاز قياس الملامح.

الكلمات المفتاحية : فولاذات الأدوات للتشغيل على البارد، التركيب الكيميائي، البنية المجهرية، الصلابة، مقاومة التآكل، المعالجات الحرارية، التقسية، التطبيع، الخصائص التريبولوجية، الاحتكاك، التآكل، فولاذ K110.

Remerciement

Nous remercions tout d'abord ALLAH le tout puissant de nous avoir donné le courage, la confiance en soi, et la patience pour terminer ce travail.

On remercie nos parents de leurs soutiens durant nos études.

On tient à remercier en premier lieu, et avec toute notre gratitude, notre encadreur l'honorable **Dr. HADJI YUCEF, qui nous a fait l'honneur de diriger ce modeste travail, pour son soutien, pour le temps consacré avec nous, et pour son aimable encouragement.**

On remercie les membres de jury qui nous ont honorés par leurs présences.

Finalement merci à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicace

Je dédie ce mémoire à ma chère mère, qui m'a soutenu tout au long de mon parcours universitaire

Table des matières

Résumé

Remerciement

Dédicace

Introduction Générale _____ 1

Chapitre I : Généralités Sur les aciers

I.1. Introduction _____ 2

I.2. Composition chimique des aciers _____ 2

I.3. Classification des aciers _____ 2

I.4. Les aciers au carbone _____ 3

 I.4.1. Les aciers calmés _____ 3

 I.4.2. Les aciers effervescents _____ 3

 I.4.3. Les aciers semi-calmés _____ 3

I.5. Les aciers inoxydables _____ 3

 I.5.1. Les aciers inoxydables austénitiques _____ 4

 I.5.2. Les aciers inoxydables martensitique _____ 5

 I.5.3. Les aciers inoxydables ferritiques _____ 6

 I.5.4. Les aciers inoxydables austéno-ferritiques _____ 6

I.6. Les aciers à outils _____ 7

I.7. L'utilisation des aciers à outils _____ 8

I.8. Désignation des aciers à outils _____ 9

 I.8.1. Aciers à outils alliés et non alliés pour travail à froid _____ 10

 I.8.1.1. Aciers au manganèse et au manganèse-vanadium _____ 11

 I.8.1.2. Aciers au chrome _____ 11

 I.8.1.3. Aciers au chrome-molybdène _____ 12

 I.8.1.4. Aciers au chrome-tungstène _____ 12

 I.8.2. Aciers à outils pour travail à chaud _____ 12

 I.8.3. Les Aciers rapides _____ 13

I.9. Structure de solidification des aciers à outils _____ 14

 I.9.1. Diagramme fer - chrome - carbone _____ 14

 I.9.2. Diagramme d'équilibre fer-carbone _____ 17

Chapitre II : les traitements thermiques des aciers à outils de travail à froid

II.1. L'objectif du traitement thermique des aciers à outils	19
II.2. Paramètres d'optimisation des traitements thermiques	19
II.2.1. Chauffage des aciers à outils de travail à froid	19
II.2.2. La durée de maintien	20
II.2.3. Refroidissement des aciers à outils de travail à froid	21
II.3. Composants obtenus après le chauffage et le refroidissement	22
II.3.1. Nature des carbures primaire	23
II.3.2. Grosseur de grain	24
II.4. Les traitements thermiques des aciers à outils de travail à froid	25
II.4.1. Le recuit	26
II.4.1.1. La structure à l'état de recuit	26
II.4.1.2. Les types de recuit	27
II.4.2. La trempe	28
II.4.2.1. Les paramètres du traitement	30
II.4.2.2. La trempabilité	31
II.4.2.3. La quantité d'austénite résiduelle présente après trempe	32
II.4.3. Le revenu	33
II.4.3.1. Structures de revenu	34
II.4.3.2. Revenu des aciers contenant du chrome	35
II.4.3.3. Les types de revenu	37
II.4.4. La normalisation	37
II.4.5. Le traitement cryogénique	39
II.5. Un certain résultat de recherche	40

Chapitre III : Partie expérimentale

III.1. Description du matériau utilisé	41
III.1.1. Données techniques sur l'acier K110 (Z160CDV12)	41
III.1.2. Composition chimique (% moyen)	41
III.1.3. Caractéristiques de l'acier K110 (Z160CDV12)	41
III.1.4. Applications	42
III.2. Protocole de travail	42
III.2.1. Le découpage	42
III.2.2. Les traitements thermiques	43
III.2.3. La métallographie	44

III.2.4. Essai de dureté	46
III.2.5. Essai de tribologie	48

Chapitre IV : Résultats et interprétation

IV.1. La microstructure	49
IV.2. La dureté	53
IV.3. La tribologie	55
Conclusion finale	61
Les références bibliographiques	62

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralités Sur les aciers

Tableau I.1 : Fourchettes de compositions chimiques des différentes familles d'aciers inoxydables	4
Tableau I.2 : Différentes nuances d'aciers inoxydables austénitiques ainsi que leurs domaines d'applications	5
Tableau I.3 : Différentes nuances d'aciers inoxydables martensitiques ainsi que leurs domaines d'applications	5
Tableau I.4 : Différentes nuances d'aciers inoxydables ferritiques ainsi que leurs domaines d'applications	6
Tableau I.5 : Principales classes d'acier à outils	8
Tableau I.6 : Résistance à l'usure, ténacité et dureté à chaud des aciers à outils	9

Chapitre II : les traitements thermiques des aciers à outils de travail à froid

Tableau II.1 : Composition chimique des carbures primaires et secondaires (% en poids) déterminée par spectromètre à dispersion d'énergie (EDS) de l'acier D2	24
Tableau II.2 : Types d'aciers à outils pour travail à froid, selon la classification américaine [UNS, AISI et SAE]	29
Tableau II.3 : Caractéristiques d'usure, de dureté et de carbure de l'acier à outils AISI A8 à différentes températures d'austénitisation et de revenu	35
Tableau II.4 : Effet de différents procédés de traitement thermique sur le coefficient de frottement et l'usure de l'acier à outil pour travail à froid K110	40

Chapitre III : Partie expérimentale

Tableau III.1 : La composition chimique de l'acier K110	41
--	----

Chapitre IV : Résultats et interprétation

Tableau IV.1 : Les résultats de la dureté	54
Tableau IV.2 : Le volume d'usure selon l'état du matériau	58

Liste des figures

Chapitre I : Généralités Sur les aciers

Figure I.1 : Microstructures des aciers inoxydables ferritiques (a), martensitiques (b), austénitiques (c), et austéno-ferritiques (d).....	7
Figure I.2 : Micrographies d'aciers à outils pour travail à froid.....	11
Figure I.3 : Microstructures d'aciers à outils	13
Figure I.4 : Micrographie d'un acier fritté	14
Figure I.5 : Diagramme d'équilibre Fe-Cr-C à 13 % de chrome.....	15
Figure I.6 : Structure d'un acier Z160CDV12 à l'état brute de coulée.....	16
Figure I.7 : Micrographie d'un acier lédeburitique Z160CDV12 forgé à partir d'un Lingot	16
Figure I.8 : Courbe établie par A. KULMBURG, donnant le volume de carbure en fonction de la teneur en carbone pour un alliage à 12 % de chrome.....	17
Figure I.9 : Diagramme d'équilibre fer-carbone	18

Chapitre II : les traitements thermiques des aciers à outils de travail à froid

Figure II.1 : les courbes TRC et TTT à 1020 °C de 30min pour l'acier K110.....	21
Figure II.2 : Impact des éléments d'alliage sur la localisation du domaine de température Ac	22
Figure II.3 : Microduretés comparées des carbures contenus dans les aciers à Outils	23
Figure.II.4 : Impact de la composition et les traitements thermiques sur la structure de l'acier ...	25
Figure.II.5 : les microstructures à l'état recuit a) D2(K110) b) Uddeholm Dievar (travail à chaud) c) acier ordinaire d) AISI 410 inox	27
Figure II.6 : microstructure of D2(K110) dans différents milieux de refroidissement a) à l'air 1020°C b) à l'huile 1020°C (*1000).....	30
Figure II.7 : Diagramme de durcissement de l'acier en fonction de la température et du temps.....	30
Figure II.8 : Impact de la température d'austénitisation sur le niveau d'austénite résiduelle de certains aciers à outils alliés par froid	32
Figure II.9 : Divers phénomènes métallurgiques conduisant à un adoucissement avec le revenu	33
Figure II.10 : Microstructures de l'acier D2 (K110) a) trempé à l'air à 1020°C et revenu à 580°C b) trempé à l'huile à 1050°C et revenu à 550°C c) acier inox martensitique trempé à l'huile à 1040°C et revenu 400°C d) D2 trempé à l'huile à 1010°C et double revenu à 550°C	36
Figure II.11: Plage de température de normalisation typique pour les aciers au carbone moulée.....	38
Figure II.12 : Traitement thermique cryogénique de l'acier Böhlér M340 ISOPLAST	39

Chapitre III : Partie expérimentale

Figure III.1 : Le Découpage	43
Figure III.2 : Four à moufle de laboratoire Type L (L5/11) Nabertherm	43
Figure III.3 : les paramètres des traitements thermiques	44
Figure III.4 : polisseuse MINITECH 233	45
Figure III.5 : Microscope optique (Nikon Eclipse LV150N).....	46
Figure III.6 : Duromètre NEMSIS 9100	47
Figure III.7: Tribomètre TRB³ et profilomètre de contact de marque AMETEK Taylor Hobson	48

Chapitre IV : Résultats et interprétation

Figure IV.1 : La micrographie de K110 à l'état de recuit	49
Figure IV.2 : La micrographie de K110 trempé à l'air du Nital 3 % et 5 %	50
Figure IV.3 : La micrographie de K110 trempé à l'huile du Nital 3 % et 5 %.....	51
Figure IV.4 : La micrographie de K110 trempé à l'huile et un revenu	52
Figure IV.5 : La micrographie de K110 trempé à l'huile et deux revenus.....	52
Figure IV.6 : Les carbures coalescés a) le 1er revenu b) le 2eme revenu	53
Figure IV.7 : Variation du coefficient de frottement en fonction de temps pour un acier K110...	55
Figure IV.8 : Variation du coefficient de frottement en fonction de temps pour un acier K110 à l'état de trempé a) à l'huile b) à l'air	56
Figure IV.9 : Variation du coefficient de frottement en fonction de temps pour un acier K110 à l'état de revenu a) 1er revenu b) 2eme revenu	57
Figure IV.10 : Variation de la profondeur de l'usure en fonction de la largeur pour un acier K110 avec différents traitements thermiques en comparaison avec l'acier 100cr6	58
Figure IV.11 : Les étapes de travail	60

Introduction Générale

Introduction Générale

Imaginer, imaginer un monde sans traitements thermiques, pour nous c'est difficile, car ils sont indispensables à l'avancement technologique et industriel. Leur rôle crucial dans l'amélioration des propriétés des matériaux, en particulier les aciers, justifie pleinement notre choix de les étudier

Les aciers à outils pour travail à froid sont utilisés depuis plus d'un siècle pour des applications exigeant une combinaison de propriétés mécaniques complexes, telles qu'une haute résistance aux déformations permanentes et à l'usure (abrasion, adhérence, fatigue superficielle). Conçus majoritairement de façon empirique [1], ces aciers sont destinés aux opérations à basse température ($< 200\text{ °C}$), contrairement aux aciers pour travail à chaud [2]. Leurs propriétés résultent de leur composition chimique, de leur technologie de fabrication et surtout de leur microstructure, modulée par les traitements thermiques (recuit, normalisation, trempe, revenu) [3]. Riches en carbone et en éléments d'alliage, ils présentent une faible distorsion à la trempe, une dureté élevée et une bonne usinabilité à l'état recuit, ce qui les rend adaptés à la fabrication de poinçons et de matrices [4].

Dans le cadre de notre projet de fin d'études (PFE), nous avons étudié les effets des traitements thermiques sur la microstructure, la dureté et le comportement tribologique des aciers à outils pour travail à froid, notamment l'acier K110.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres :

- * Le premier chapitre présente des rappels théoriques sur les principales familles d'aciers et leur classification.
- * Le deuxième chapitre est consacré à une étude approfondie des traitements thermiques appliqués aux aciers à outils destinés au travail à froid.
- * Le troisième chapitre porte sur la présentation du matériau d'étude, la description des traitements appliqués ainsi que les procédures expérimentales utilisées pour les caractérisations microstructurales et mécaniques.
- * Le quatrième chapitre expose les résultats obtenus et leur interprétation.
- * Enfin, les résultats majeurs seront synthétisés dans la conclusion.

Cette organisation vise à faciliter l'examen systématique des aspects théoriques, techniques et analytiques du sujet.

Chapitre I :

Généralités sur les aciers

I.1. Introduction

L'acier est un matériau largement utilisé dans l'industrie, ce sont des alliages de fer, de carbone et d'autres éléments tels que le silicium, le phosphore, le soufre et le manganèse. la teneur en carbone a une influence considérable sur les propriétés de l'acier, en dessous de 0,008 %, l'alliage est plutôt malléable et on parle de fer, au-delà de 2,14 %, les inclusions de carbone sous forme graphite fragilisent la microstructure et on parle de fonte, entre ces deux valeurs, l'augmentation de la teneur en carbone a tendance à améliorer la résistance mécanique et la dureté de l'alliage.

On modifie également les propriétés des aciers en ajoutant d'autres éléments, principalement métalliques, et on parle d'aciers alliés, de plus, on peut encore améliorer grandement leurs caractéristiques par des traitements thermiques notamment les trempes, on parle alors d'aciers traités, outre ces diverses potentialités, et comparativement aux autres alliages métalliques, l'intérêt majeur des aciers réside d'une part dans le cumul de valeurs élevées dans les propriétés mécaniques fondamentales : module d'élasticité, limite élastique, résistance mécanique, dureté, résistance aux chocs.

Malgré un développement considérable des matériaux dits nouveaux (polymères, composites, céramiques), les aciers restent le matériau le plus répandu et développé dont la production et la consommation augmente constamment.

Dans ce chapitre, nous présentons la généralité sur les aciers et leurs classifications, les aciers à outil en particulier.

I.2. Composition chimique des aciers

Les aciers sont des alliages de fer et de carbone dont la teneur en carbone est de 0,008 % à environ 2,14 % outre le fer et le carbone qui en sont les éléments principaux rentrant dans sa composition, un acier ordinaire contient principalement du silicium, du manganèse, du soufre et du phosphore [5]. Pour la famille des aciers non alliés il contenant du, Mn, S, P en quantité faible, Des additions judicieuses d'éléments, comme le Si, Ni, Mo, Cr, au cours de l'élaboration ou du traitement de l'alliage liquide permettent de modifier le comportement à la solidification et aussi d'ouvrir [6].

I.3. Classification des aciers

L'acier est classé selon une variété de systèmes différents, en fonction de divers paramètres, à savoir sa composition, comme l'acier au carbone, faiblement allié, fortement allié où

Inoxydable, méthodes de fabrication, La classification par composition chimique est la méthode la plus courante [7].

Trois grands groupes d'aciers alliés sont identifiés et discutés :

- Les aciers au carbone.
- Les aciers inoxydables.
- Les aciers à outils

I.4. Les aciers au carbone

Les aciers au carbone (Aciers de construction d'usage général) forment deux classes, celles des aciers courants (ordinaires) et de qualité. D'après les conditions et le degré de désoxydation on distingue trois types de nuances [8]

I.4.1. Les aciers calmés

Ils sont obtenus par désoxygénation complète du métal dans le four puis dans une poche de coulée. Ces aciers contiennent une quantité minimale de protoxyde de fer en assurant ainsi une solidification (calme) du métal dans la lingotière, qui s'accompagne de diminution de volume. A la partie supérieure du lingot solidifié, se forme une retassure et une porosité dues au retrait éliminé par chauffage lors du laminage [8].

I.4.2. Les aciers effervescents

Ce sont des aciers insuffisamment désoxygénés et qui contiennent une quantité non négligeable de FeO. Le métal est dit effervescent à cause des bulles de gaz CO qui se dégagent suite à la réaction de FeO avec le carbone du métal. Le grand nombre de bulles de gaz, empêche la formation d'une retassure. Les aciers effervescents sont moins coûteux car les rebuts de leur fabrication sont réduits au minimum. Ils possèdent une plasticité élevée et se prêtent bien à l'emboutissage à froid [8].

I.4.3. Les aciers semi-calmés

Ce sont des aciers intermédiaires entre les aciers calmés et effervescents et trouvent aujourd'hui un emploi toujours plus large [8].

I.5. Les aciers inoxydables

L'une des propriétés la plus importante des aciers inoxydables dit (inox) est sa résistance à la corrosion. La résistance de ces alliages métalliques aux attaques chimiques des produits corrosifs, provient de leur faculté à s'auto-protéger par la formation spontanée à leur surface

D'un film complexe d'oxydes et d'hydroxydes de chrome, appelé (couche passive), qui protège le substrat métallique de la corrosion généralisée et des attaques localisées [9].

Cette couche extrêmement mince, d'une épaisseur de l'ordre de 1,0 à 2,0 nm, rend négligeable la vitesse de corrosion. L'élément le plus important dans les aciers inoxydables est le chrome, mais d'autres éléments tels que le molybdène, le nickel ont aussi une influence sur sa résistance à la corrosion.

Les aciers inoxydables sont classés en 4 grandes familles en fonction de leur composition et de leur structure

Tableau I.1 : Fourchettes de compositions chimiques des différentes familles d'aciers inoxydables.[9]

Catégorie d'acier	Composition (% pds)				
	C	Cr	Ni	Mo	Autres
Ferritique	< 0.1	11 - 28	0 - 5	< 5	Ti
Martensitique	0,05 - 1.2	12 - 18	1- 7	-	-
Austénitique	< 0,2	16 - 35	7 - 26	< 6	N, Cu, Ti
Austéno-ferritique	< 0,05	22 - 25	1- 9	< 4	N (<0.3)

I.5.1. Les aciers inoxydables austénitiques

Les aciers inoxydables austénitiques conservent à température ambiante une structure austénitique cubique à faces centrées. Il s'agit de solutions solides de fer, généralement à grains fins, obtenues par hypertrempe. En dehors du chrome, le nickel constitue le plus important des éléments d'alliage principalement en raison de son caractère gamma-gène qui permet de stabiliser la structure austénitique à température ambiante. Des éléments stabilisateurs tels que le titane et le niobium sont régulièrement ajoutés afin de piéger le carbone et l'azote [10]

Tableau 1.2 : Différentes nuances d'aciers inoxydables austénitiques ainsi que leurs domaines d'applications. [10]

Nuances DIN	HB état recuit	R (dan/mm ²)	Applications
X12 CrNi18-8	175	50 à 70	Ustensiles de cuisines, ferrures de portes et fenêtres, instruments chirurgicaux.
X10 CrNiTi18-9	185	50 à 75	Ustensiles, appareils pour l'industrie alimentaire et chimique, pièces pour réacteurs nucléaires.
X8 CrNi12-12	175	50 à 65	Ustensiles de cuisines.

I.5.2. Les aciers inoxydables martensitique

Ces aciers contiennent en général 12 à 18 % de chrome, leur teneur en carbone variant de 0,05 à 1,2 %, ils peuvent contenir du nickel et du molybdène ainsi que certains éléments d'addition tels que le cuivre, le titane ou le vanadium. Ils sont le plus souvent livrés à l'état recuit, il est évidemment recommandé de les utiliser – au même titre que les aciers alliés pour la construction mécanique - à l'état trempé revenu - représentant le meilleur compromis entre les propriétés mécaniques et la résistance à la corrosion. Ils présentent un intérêt certain dans les applications à chaud lorsque la température de service n'excède pas 650 °C [11].

Tableau I.3 : Différentes nuances d'aciers inoxydables martensitiques ainsi que leurs domaines d'applications. [11]

Nuances DIN	HB état recuit	R (dan/mm ²)	Applications
X10 Cr13	160	50 à 65	Insermentés médicaux, canons de fusils de chasse, rivets, ustensiles de cuisine.
X20 Cr13	240	60 à 70	Moulage : hélices de navires, roues, godet pour turbines Forgeage : arbres, boulons.
X40 Cr13_	225	70 à 85	Instruments de chirurgie, couteaux de table, hachoir, pieds à coulisse

I.5.3. Les aciers inoxydables ferritiques

Les aciers ferritiques contiennent généralement 11 à 18 % de chrome, une faible part de nickel et une faible part de carbone $\leq 0,12$ %. Les ferritiques présentent la même structure que l'acier au carbone, mais ne sont pas apte à la trempe du fait de leur faible teneur en carbone. L'aciers inoxydables ferritiques sont relativement doux, présentent une résistance mécanique moins élevée que l'inox austénitique. Ils peuvent être transformés à froid, mais pas dans la même mesure que l'acier inoxydable austénitique [9].

Tableau I.4 : Différentes nuances d'aciers inoxydables ferritiques ainsi que leurs domaines d'applications. [9]

Nuances DIN	HB état recuit	R (dan/mm ²)	Applications
X8Cr7	150	45 à 60	Ustensiles de cuisines, ferrures de portes et revêtements de comptoirs.
X8CrTi7	150	45 à 60	Résistant à la corrosion inter cristalline : bacs, pales d'agitateurs.
X8CrMoTi17	160	50 à 60	Résistant aux acides : citrique, Sulfurique, borique bouillant, acétique froid et bouillant, sulfate d'ammoniac bouillant

I.5.4. Les aciers inoxydables austéno-ferritiques

Les aciers austéno-ferritiques ou Duplex ont des propriétés fonctionnelles très intéressantes tenue à la corrosion, caractéristiques mécaniques. Ces aciers nécessitent cependant des précautions particulières lors de leur élaboration, de leur moulage et traitement thermique pour révéler tout leur potentiel [8]. Les aciers duplex contiennent de 20 à 30 % de chrome, de 2 à 10 % de nickel et une teneur en azote comprise entre 0,1 et 0,3%. Ils peuvent en plus contenir d'autres éléments comme du molybdène jusqu'à 4,5 % environ, du cuivre jusqu'à 2%, et du tungstène [12].

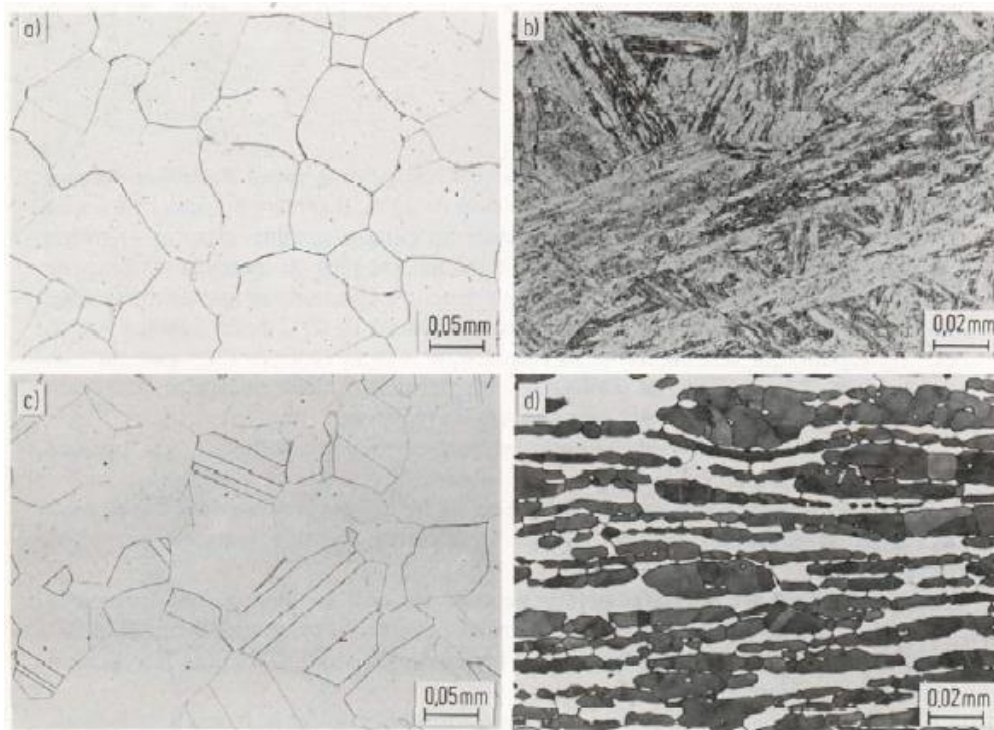


Figure I.1 : Microstructures des aciers inoxydables ferritiques (a), martensitiques (b), austénitiques (c), et austéno-ferritiques (d).[13]

I.6. Les aciers à outils

On appelle acier un alliage de fer et de carbone dont la teneur en carbone est inférieure à 2% massique. Cette teneur limite vient de la limite de solubilité du carbone, à haute température, dans la phase cubique à faces centrées (CFC), appelée austénite. Des éléments d'alliages sont généralement ajoutés à un alliage Fe-C afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques.

Le fer pur possède une structure cubique à faces centrées pour une température s'étendant de 912 °C à 1394 °C. Cette phase est plus communément appelée phase austénitique pour les aciers au carbone et est notée γ . [14]

En dehors de cet intervalle de température, le fer pur possède une structure cubique centrée. Cette structure est appelée $Fe\delta$ si l'on se trouve entre 1394 °C et 1538 °C et, en dessous de 912 °C, on note $Fe\alpha$ la phase présente, et on la nomme ferrite α . Ces deux structures sont moins compactes que la structure CFC. [15]

Ils sont caractérisés par :

- Une dureté élevée (60 à 65) HRC.
- Une grande résistance à l'usure.
- Une forte résistance mécanique.

Il peut s'agir d'opérations d'usinage (tournage, perçage, fraisage...), de mise en forme à froid

et à chaud (poinçons, lames, matrices, cylindres de laminaires), de moulage (alliages légers, alliages de zinc, plastiques...). Les aciers à outils font partie intégrante du domaine des aciers spéciaux. [16]

L'outil peut travailler à température ambiante ou à température supérieure.

L'échauffement résulte du contact avec une matière chaude ou du travail de frottement.

Il doit alors résister aux déformations plastiques et à l'usure (conservation de forme, dimensions et propriétés) afin de pouvoir répondre aux conditions de travail.

I.7. L'utilisation des aciers à outils

Les principales utilisations des aciers à outils sont de mettre en œuvre des pièces. Bien qu'ils soient développés initialement pour la fabrication d'outils d'usinage, de moules ou de matrices, ils sont de plus en plus utilisés dans la fabrication de pièces finies ou semi-finies qui sollicitent une résistance à l'usure élevée (ex. : sièges de soupapes). Il existe plusieurs classes d'aciers à outils qui sont classés selon leur utilisation principale tableau (5). Les propriétés spécifiques de chacune de ces classes d'acier sont obtenues en ajoutant des éléments d'alliage (Mn, Cr, Si, V, Ni, Mo, W et Co) à des teneurs appropriées, ainsi que de la teneur en carbone. La teneur en carbone varie beaucoup (0.1 à 2.85 %m C ; 1 à 43 %m). [17]

Tableau I.5 : Principales classes d'acier à outils [17]

	Classe d'acier à outils	Principaux éléments d'alliage (%m)	%mC	Teneur en éléments d'alliage (%m)
W	Non alliés	Cr et V	0.7 – 1.5	< 1
L	Faiblement Alliés	Mn, Cr, V, Ni et Mo	0.45 – 1.1	1.8 – 5
S	Résistants aux Chocs	Mn, Si, Cr, Mo, W et V	0.4 – 0.65	1.5 – 7.5
O	Pour travail à froid, trempé à l'huile	Mn, Si, Cr, Mo et W	0.85 – 1.55	1 – 5.5
A	Pour travail à froid, trempé à l'air	Mn, Si, Cr, Ni, Mo, W et V	0.45 – 2.85	3.5 – 15
D	Pour travail à froid, à haut Cr et haut C	Cr, Mo, V et Co	1.4 – 2.5	11 – 18.7
H	Pour travail à Chaud	Si, Cr, Mo, W, V et Co	0.25 – 0.7	6.6 – 27.8
T, M	Aciers à coupe rapide	Cr, Mo, W, V et Co	0.75 – 1.4	5.8 - 43
P	Pour moules	Mn, Cr, Ni et Mo	0.1 – 0.65	1.2 – 17.6

Les trois propriétés les plus importantes pour les aciers à outils sont typiquement la résistance à l'usure, la ténacité et la dureté à chaud. Le tableau (I.5) présente de façon qualitative les propriétés typiques pour les classes d'acier à outils. En règle générale, plus la teneur en éléments d'alliage et carbone augmentent, plus la résistance à l'usure et la dureté à chaud augmente, alors que la ténacité diminue. Ceci est principalement dû au fait qu'avec une augmentation en carbone et en éléments d'alliage, la fraction volumique de carbures alliés augmente. La dureté des carbures alliés est élevée (1200 à 3000 HV [17]), mais ils sont généralement fragiles. Les cinq types de carbures alliés qui sont présents dans les aciers à outils sont : MC, M₂₃C₆, M₂C, M₇C₃ et M₆C.

Tableau I.6 : Résistance à l'usure, ténacité et dureté à chaud des aciers à outils. [17]

Classe	Classe Résistance à l'usure	Ténacité	Dureté à chaud
W	Faible	Moyenne	Faible
L	Faible	Moyenne	Faible
S	Faible	Elevée	Moyenne
O	Moyenne	Faible	Faible
A	Moyenne	Moyenne	Moyenne
D	Elevée	Faible	Moyenne
H	Moyenne	Moyenne	Élevée
T	Elevée	Faible	Élevée
M	Elevée	Faible	Élevée
P	Faible	Elevée	Moyenne

I.8. Désignation des aciers à outils

La désignation des aciers à outils a fait l'objet d'une révision avec la sortie de la norme internationale ISO 4957 en 1999 et de la norme européenne NF EN 10027-2 en 1992 [18].

Les nuances d'aciers à outils sont classées, selon leur mode de travail, en trois catégories :

- Les aciers à outils alliés et non alliés pour travail à froid ;
- Les aciers à outils pour travail à chaud ;
- Les aciers à coupe rapide.

I.8.1. Aciers à outils alliés et non alliés pour travail à froid

Ces types d'acier contiennent la teneur totale en éléments d'alliage la plus élevée dans les aciers à outils pour travail à froid (13 à 19 %m). Ces aciers contiennent principalement du chrome (typiquement 11 à 13.5 %mCr), mais ils peuvent contenir également du molybdène, du tungstène ou du vanadium. Une des particularités de ce type d'acier est sa teneur élevée en carbone qui se situe typiquement entre 1.4 et 2.5 %mC, mais certains aciers à outils spécifiques à la métallurgie des poudres peuvent contenir près de 3 %mC (ex. : Vanadis 10 : 2.9 %mC, 8 %mCr, 1.5 %m Mo et 9.8 %mV. La résistance à l'usure exceptionnelle des aciers de cette classe provient de la fraction importante de carbures alliés (principalement de type M_7C_3 et MC) qui peut atteindre près de 50 %v. La figure (I.2 (a)) présente la microstructure d'un acier de classe D qui contient une fraction volumique importante de carbures. Un acier typique D contient une teneur élevée en carbone (2.15 – 2.5 %mC), en chrome (12.5 %mCr) et en vanadium (4 %mV), ce qui favorise une fraction élevée de carbure. Une réduction de la teneur en carbone et en éléments d'alliage aura pour effet de réduire la fraction volumique de carbures. [18]

Cette classe d'aciers comprend six nuances dont la teneur en carbone est comprise entre 0,45 et 1,20 % en masse. Leur désignation comporte le symbole préfix C, suivi d'un nombre exprimant la teneur moyenne en carbone, en centièmes pour cent, puis de la lettre U spécifique de la désignation d'aciers à outils. Ces aciers sont caractérisés par :

- Des niveaux de dureté élevés à la température ambiante (entre 56 et 63 HRC)
- Une résistance à l'adoucissement faible
- Des teneurs en carbone élevées (supérieures à 0,6 % en masse)
- Des teneurs en éléments fortement carburières tels que tungstène, molybdène et vanadium assez basses ($W < 2 \%$, $Mo < 1 \%$, $V < 0,5 \%$).

Cette catégorie regroupe les aciers dont les compositions chimiques s'étendent des faibles additions de Cr, Mn, Si, W à des teneurs en chrome correspondant à celles des aciers très résistants à l'usure de la famille X 210Cr12 (de composition : 12 % Cr, 2,1 % C). **Figure (I.2)**

Les aciers à outils pour travail à froid sont de plusieurs sortes :

- Aciers au manganèse et au manganèse-vanadium.
- Aciers au chrome.
- Aciers au chrome-molybdène.
- Aciers au chrome-tungstène.

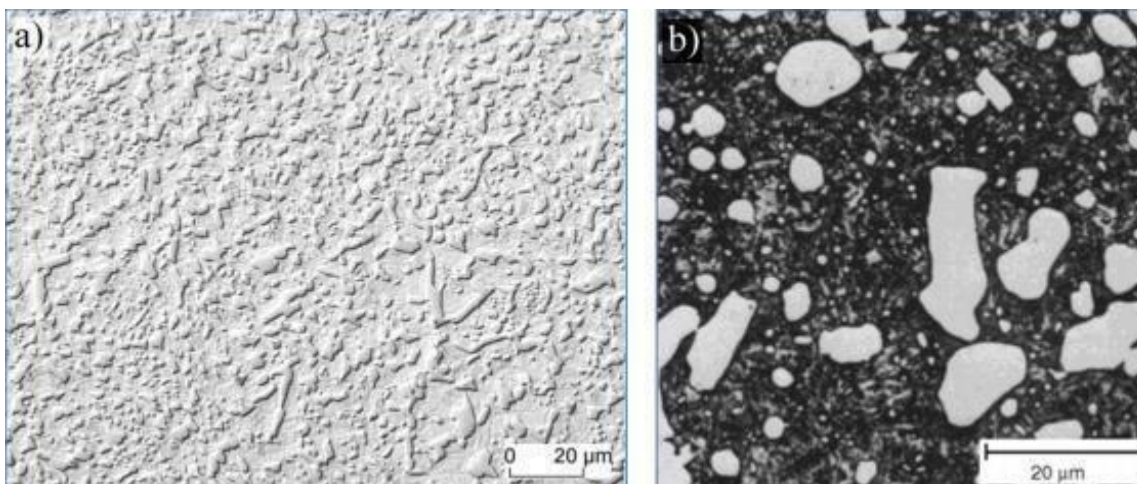


Figure I.2 : Micrographies d'aciers à outils pour travail à froid [18]

I.8.1.1. Aciers au manganèse et au manganèse-vanadium

Les teneurs moyennes sont de l'ordre de 0,8 % C, 2,1 % Mn et de 0 à 0,25% V. Les aciers de cette Classe sont appelés aciers indéformables. Ils ont pour principale Caractéristique, une bonne indéformabilité au traitement thermique due à une température de trempe relativement basse. On les trempe, soit à l'huile, soit au bain de sels par trempe étagée. Ils forment une solution commode pour les outils de précision et de mesure, ne demandant pas une résistance particulière à l'usure, par exemple (poinçons, matrices de découpage, calibre vérificateurs, instruments de mesure) [8].

I.8.1.2. Aciers au chrome

La composition moyenne comporte les additions suivantes : (1 à 2) % C, (0,2 à 1,3) % Cr, (0 à 0,25) % V. Les aciers à faible teneur en chrome présentent une faible trempabilité et sont employés pour de petits outils à fabriquer en grande série (mèches, tarauds), et pour des pièces demandant une bonne tenue au choc ou à la flexion (extracteurs, butées).

Les nuances, à plus forte teneur en chrome 13% et contenant du vanadium, sont très indéformables et très résistantes à la flexion et sont destinées à la fabrication, par exemple (filières, mandrins d'étirage, galets de formage, matrices d'extension à froid, molettes de coupes, fraises et outils à bois) [8].

I.8.1.3. Aciers au chrome-molybdène

La composition moyenne de ces aciers comporte : (1 à 1,5) % C, (5 à 12) % Cr, (0,9 à 1,1) % Mo, (0,1 à 0,4) % V. Les aciers de ce type se déforment très peu à la trempe et sont employés pour les mêmes catégories d'outils que précédemment [8].

I.8.1.4. Aciers au chrome-tungstène

Ces aciers contiennent en général, les teneurs suivantes : (0,4 à 1,1) % C, 0,9 % Mn, (0,85 à 1,1) % Cr, (1 à 2) % W. Ces aciers sont d'un emploi très général, ils sont durs, tenaces et d'un assez grand pouvoir trempant. Leur application est très variée, outils coupants (forets, mèches, cisailles), autres outils (alésoirs, tarauds, filières, poinçons, matrices) [8].

I.8.2. Aciers à outils pour travail à chaud

Les outils de ces types ont été élaborés pour résister à l'adoucissement durant de longs sphéroïdes à haute température. Les aciers de cette classe sont divisés en trois catégories basées sur leur principal contenu en éléments d'alliage soit : le chrome, le tungstène ou le molybdène. Leur teneur en carbone est relativement faible (0.25 – 0.70 %C), ce qui leur confère une bonne ténacité. La microstructure typique d'un acier H13 est présentée à la **figure (I.3.a)**.

La fraction volumique des principaux carbures (type MC, riche en vanadium) est relativement faible étant donné sa faible teneur en carbone (0.41 %C) [21]. La trempabilité de la matrice est élevée, étant donné sa teneur en chrome, qui est typiquement supérieure à 4 %m Cr. La **figure (I.3.b)** présente la microstructure typique d'un acier H23, qui contient des carbures principalement composés de tungstène. La fraction volumique de carbures des aciers à outils pour travail à chaud au tungstène et au molybdène est beaucoup plus élevée puisque les carbures de tungstène (M₆C ; typiquement Fe₄W₂C ou Fe₃W₃C) contiennent une fraction importante de fer et le ratio Métal/Carbone est élevé (6/1). Ce faible élevé M/C permet de générer une fraction volumique importante de carbures, même si la teneur en carbone est relativement faible. Ces aciers sont caractérisés par :

- Des niveaux de dureté moyens à la température ambiante, compris entre 44 et 55 HRC ;
- Une résistance à l'adoucissement relativement forte ;
- Des teneurs en carbone comprises entre 0,3 et 0,6 % (en masse), avec des additions plus ou moins importantes d'éléments carburières tels que le chrome, le molybdène, le tungstène et le vanadium et, dans certains cas, une addition complémentaire de cobalt.

En dehors des aciers qui figurent dans la norme ISO 4957, il existe des nuances à très basse

teneur en carbone durcies par précipitation de phases intermétalliques associant les éléments d'alliage nickel, aluminium et cuivre **figure (I.3) [19]**.

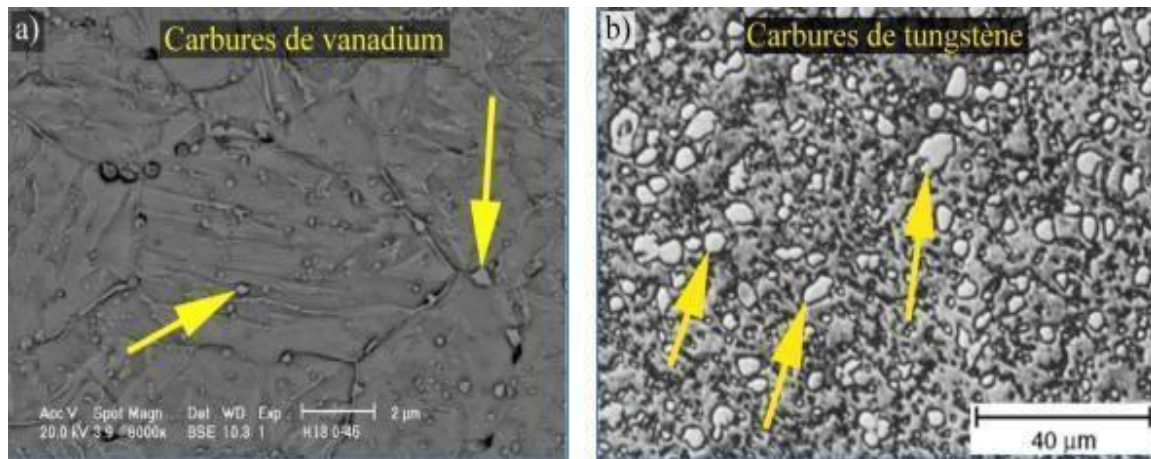


Figure I.3 : Microstructures d'aciers à outils [19].

I.8.3. Les Aciers rapides

Les aciers rapides sont les aciers à outils qui contiennent la teneur totale la plus élevée en éléments d'alliage (≈ 6 à 45%). Ces classes d'acier contiennent principalement du Mo, du W, du Cr, du V et du Co. La classe M contient principalement du molybdène, alors que la classe W contient principalement du tungstène. La particularité des aciers rapides est de maintenir une dureté élevée à haute température (dureté à chaud). La dureté à chaud typique est de ≈ 52 HRC à 540°C et de ≈ 48 HRC à 595°C (Roberts, 1998). La microstructure typique des aciers rapide est composée d'une matrice martensitique et de carbures alliés (principalement M_6C et MC) [15]. La **figure (I.4)** présente des micrographies typiques d'aciers rapide frittés et revenus ; un acier M2 à la **figure (I.4(a))** et un acier T6 à la **figure (I.4(b))** Les aciers à coupe rapide sont caractérisés par

- Des niveaux de dureté élevés à la température ambiante, compris entre 60 et 70 HRC ;
- Une résistance à l'adoucissement élevée;
- Des teneurs en carbone supérieures ou égales à $0,8\%$;
- Des additions importantes d'éléments carburigènes tels que le tungstène, le molybdène, le vanadium et, à un degré moindre, le chrome. La résistance à l'adoucissement peut être fortement améliorée par des additions de cobalt allant dans certains cas jusqu'à 10% . Leur composition chimique permet une désignation abrégée définie de la manière suivante ;
- Les trois chiffres donnant les teneurs moyennes en W, Mo, V dans cet ordre pour les aciers sans cobalt ;

- Les quatre chiffres donnant les teneurs moyennes en W, Mo, V, Co dans ce même ordre pour les aciers contenant du cobalt ;
- Les trois ou quatre chiffres sont précédés du symbole HS (high speed).

Le chrome et le carbone sont omis. Dans le cas où deux nuances se différencient uniquement par la teneur en carbone, le symbole C placé en fin de la désignation abrégée permet de distinguer la variante à teneur en carbone plus élevée.

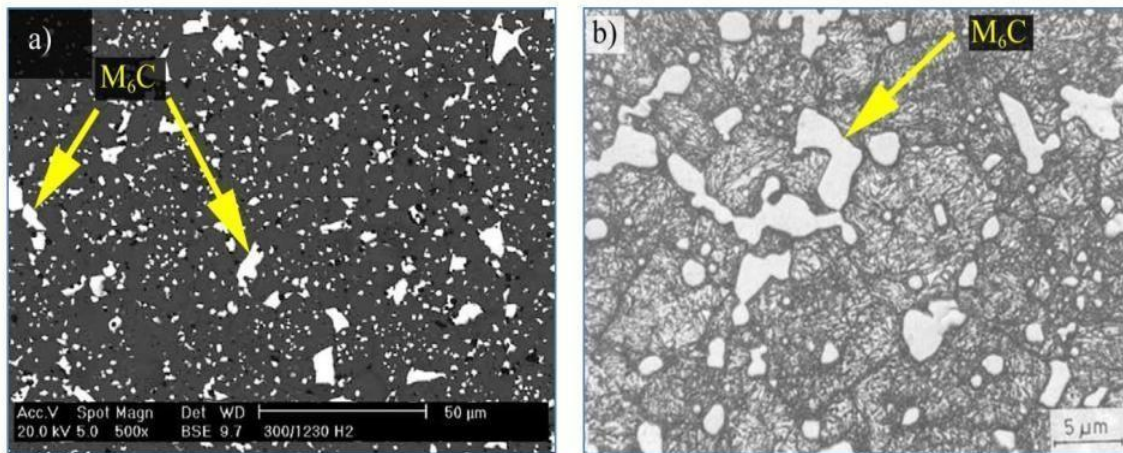


Figure I.4 : Micrographie d'un acier fritté [20]

I.9. Structure de solidification des aciers à outils

I.9.1. Diagramme fer - chrome - carbone

En présence de chrome, la structure de solidification n'est que très peu modifiée lorsque la teneur en cet élément est inférieure ou égale à 6 %, le constituant lédeburitique qui peut se former avec une teneur en carbone élevée (≥ 2 %) est un carbure KC qui n'est autre qu'une cémentite substituée du type $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$. Par contre, lorsque la teneur en chrome est supérieure à 8 %, il apparaît dans la lédeburite le carbure K2 qui est du type $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$. L'addition de molybdène ou de vanadium à ce type d'acier se traduit par une substitution partielle de ces deux éléments dans le constituant lédeburitique [18].

Voir figure I.5 (diagramme d'équilibre Fe-Cr-C à 13 % de chrome).

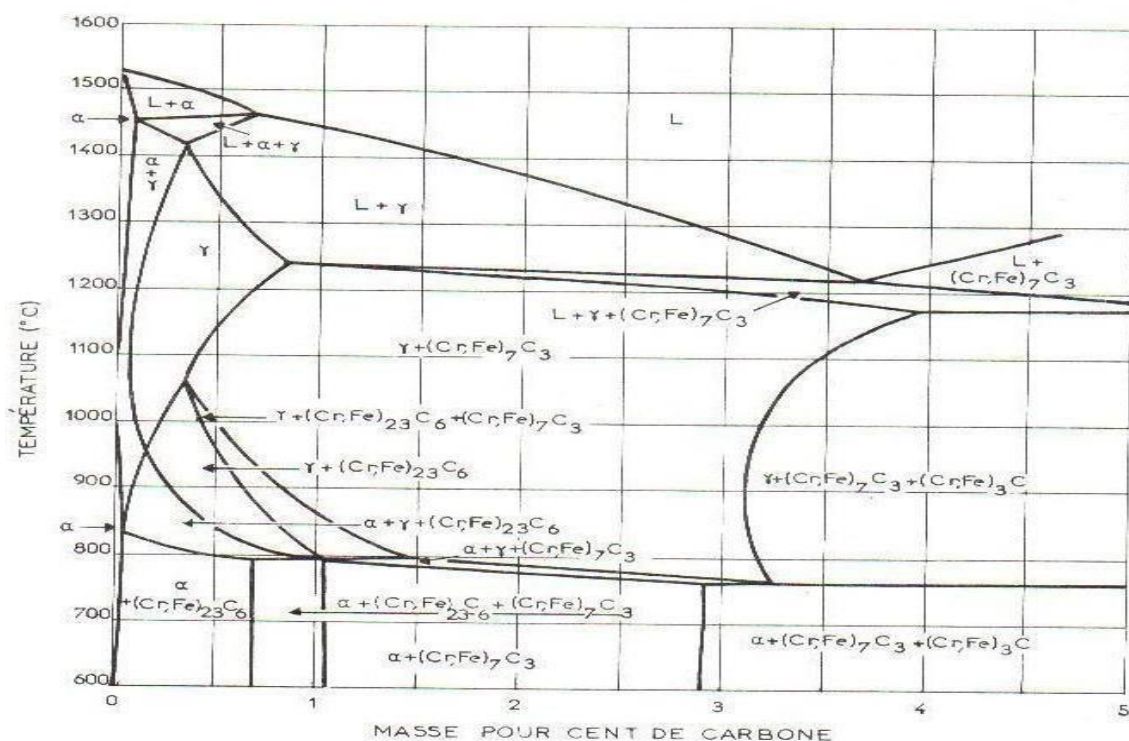


Figure I.5 : Diagramme d'équilibre Fe-Cr-C à 13 % de chrome [18]

La structure de ce métal est caractérisée par la présence de carbures de formation et des propriétés différentes, on trouve :

- D'une part : les carbures dits eutectiques $(Cr, Fe)_7C_3$, qui sont formés au moment de la solidification. Ils sont insolubles dans la matrice de l'acier à toutes températures. Seules les transformations mécaniques à chaud peuvent en modifier la répartition et les dimensions.
- D'autre part les carbures $(Cr, Fe)_7C_3$ précipitent dans le métal solidifié au cours du refroidissement dans le domaine austénitique. Ce sont ces carbures qui peuvent être mis en solution au cours des chauffages d'austénitisation de façon d'autant plus complète que la température et le maintien sont élevés. A la trempe, ils restent en solution dans le métal martensitique et précipitent au revenu sous forme très fine.

Ce sont eux qui ont un rôle essentiel au cours des traitements thermiques, dont le mécanisme est commun à tous les aciers.

A l'inverse, les carbures de solidification (lédeburite) sont inertes.

La composition de phase à l'état brute de coulée est :

Ferrite alliée + lédeburite $[\alpha + (Cr, Fe)_7C_3]$ + carbure $(Cr, Fe)_7C_3$

La **figure I.6** montre la structure d'un tel acier à l'état brute de coulée avant toute déformation.

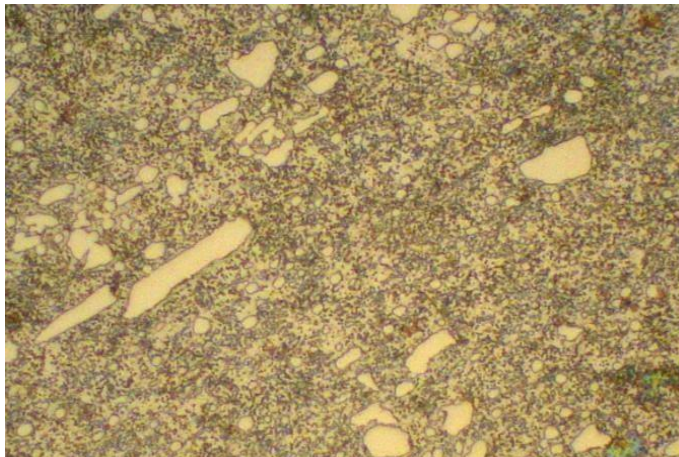


Figure I.6 : Structure d'un acier Z160CDV12 à l'état brute de coulée

La **figure I.7** représente la micrographie d'un acier Z160CDV12 forgé à partir d'un lingot.



Figure I.7 : Micrographie d'un acier lédeburitique Z160CDV12 forgé à partir d'un Lingot.

Les carbures eutectiques formés lors de la solidification se présentent dans le métal du lingot sous forme d'un réseau épais ayant une structure en lamelles et entourant les grains.

F. MARATRAY et S. BECHET proposent la relation suivante établie à l'aide d'un microscope quantitatif :

$$K\% = 11.3 \text{ C } \% + 0.5 \text{ Cr } \% - 13.4$$

Relation entre le pourcentage de carbures primaires et les teneurs en carbone et en chrome.

Par ailleurs, A. KULMBURG [24] à établi une courbe donnant le volume de carbure formé en fonction de la teneur en carbone, pour un alliage à 12% de chrome (**figure I.8**).[20]

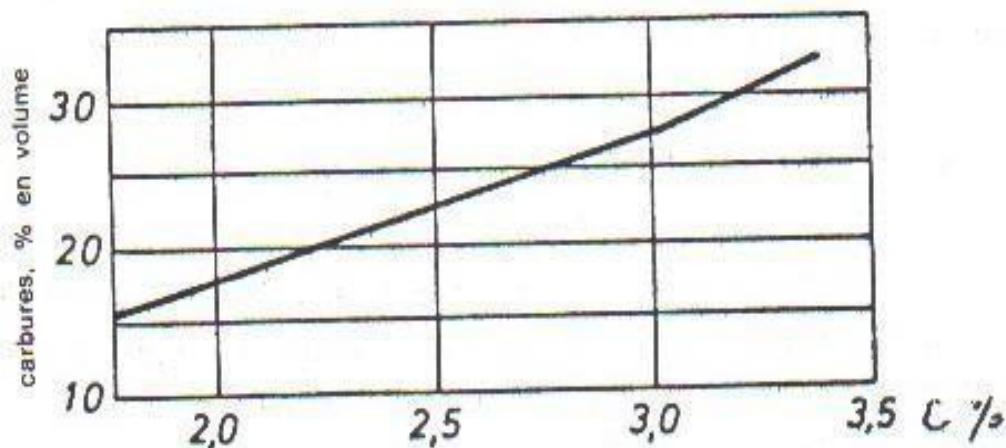


Figure I.8 : Courbe établie par A. KULMBURG, donnant le volume de carbure en fonction de la teneur en carbone pour un alliage à 12 % de chrome.[20]

I.9.2. Diagramme d'équilibre fer-carbone

Le diagramme d'équilibre Fer-carbone (**Figure I.9**), Représente la composition des phases et la structure des alliages dont la concentration varie du fer pur à la cémentite. Elle correspond à 6,67% de carbone. Ce diagramme permet de visualiser la forme d'acier que l'on a selon la température et la teneur en carbone.

La détermination des phases et des constituants d'un acier à une température donnée est fournie par la lecture du diagramme. La structure du fer pur dépend de la température :

- En dessous de 912°C : Cubique Centré (fer α , ferrite).
- Entre 912°C et 1394°C : Cubique à Face Centrées (Fer γ , austénite).
- Entre 1394°C et 1538°C : Cubique Centré (Fer δ).

Toutefois, ce diagramme n'est valable que pour des aciers non alliés, c'est-à-dire ne contenant que du fer et du carbone. Certains éléments d'alliage favorisent l'élargissement de la phase γ (éléments gamma gènes) et certains autres favorisent le cas inverse (éléments alpha gènes). Il existe deux diagrammes fer-carbone, car il existe du carbone à l'état libre (graphite), et du carbone en combinaison chimique (cémentite). Il y a donc un diagramme fer graphite (dit diagramme stable) et un diagramme fer-cémentite (dit diagramme métastable) [21].

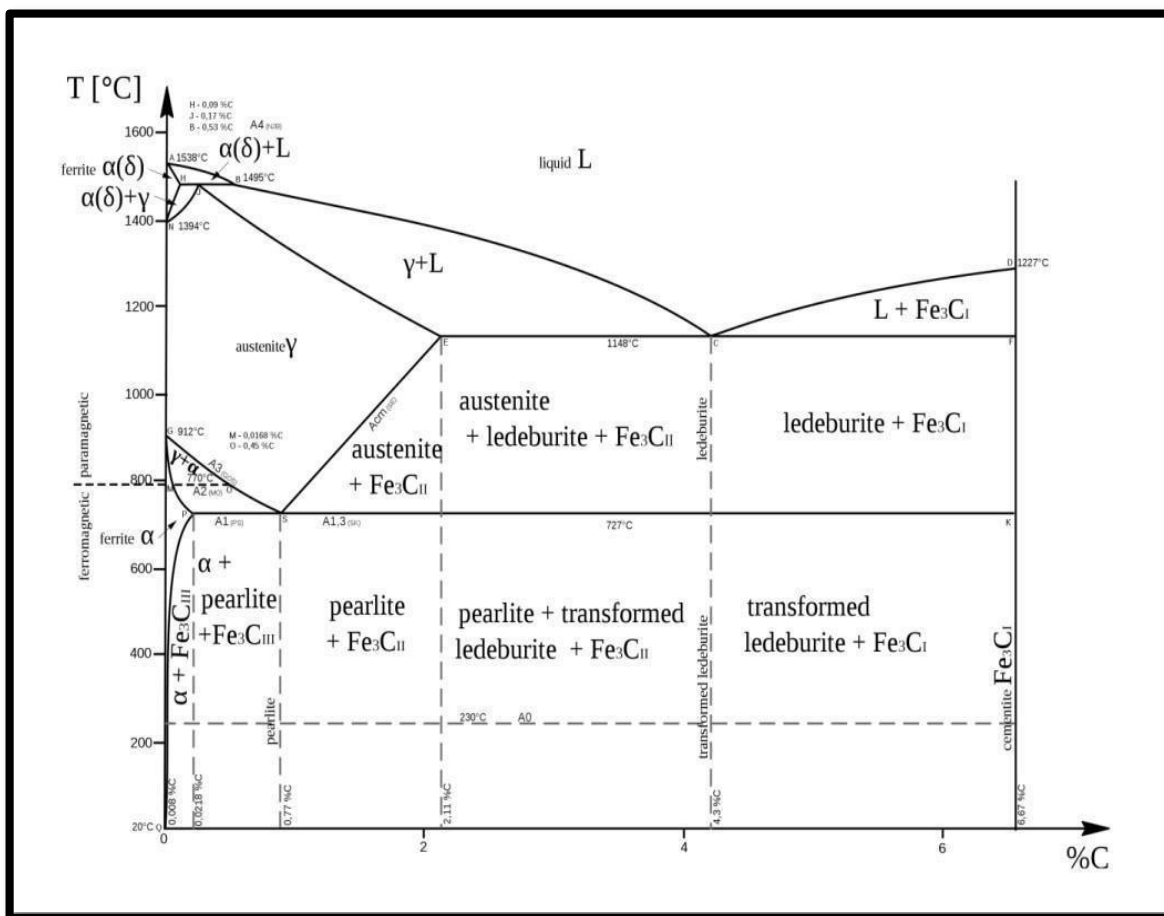


Figure I.9 : Diagramme d'équilibre fer-carbone [22]

Chapitre II :

Les traitements thermiques des
aciers à outils de travail à froid

II.1. L'objectif du traitement thermique des aciers à outils

On définit techniquement un traitement thermique comme une modification de la température en relation avec le temps. Le traitement thermique de l'acier peut être segmenté en trois phases distinctes :

- Un réchauffement à la température désirée ;
- Une phase à la température définie selon le procédé thermique effectué et son but final (homogénéisation, durcissement, adoucissement, accroissement de la ductilité, relaxation des contraintes internes...).

- La structure du métal, concernant les composants et la précipitation, est déterminée par une vitesse de refroidissement fixe, et plusieurs vitesses de refroidissement peuvent être appliquées successivement avant d'atteindre la température finale du traitement, [1] pour :

- * Optimiser les propriétés des matériaux pour les mieux adaptés à des applications spécifiques, grâce aux modifications suivantes :

- Renforcement de la résistance à la rupture et de la limite élastique R_m , R_e , $A\%$ en offrant une meilleure stabilité de la pièce.

- Amélioration de la dureté, permettant à des composants de mieux résister à l'usure et aux impacts.

- * De raffiner un métal ayant une texture grossière (rendre les grains plus fins, uniformiser la structure) dans le cas des matériaux ayant subi un forgeage.

- * D'éliminer les contraintes internes (écrouissage) des matériaux avant une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage). [1 4 23]

Habituellement, les traitements thermiques n'affectent pas la composition chimique de l'alliage mais ils modifient :

- La structure en surveillant la formation des carbures (dimensions, distribution...) et en régulant la nature ainsi que le pourcentage des éléments (ferrite, austénite, martensite...) ;
- L'équilibre des contraintes du métal (tensions internes, dilatation...).[1]

II.2. Paramètres d'optimisation des traitements thermiques

II.2.1. Chauffage des aciers à outils pour travail à froid

Le chauffage a pour fonction d'élever la température de l'ensemble de l'outil à la valeur choisie.

Un réchauffement trop rapide ou une hétérogénéité de température peut provoquer un Gradient de température entre la surface et le centre de la pièce, entraînant des expansions

Différentielles (Dilatations hétérogènes) et des risques de déformation.

Un autre danger encouru par les aciers à outils lors du chauffage est la modification chimique de la surface, notamment la décarburation. C'est principalement à des températures élevées, au-delà de 700 à 800 °C, qu'un risque de décarburation (extraction de carbone de la surface) apparaît, provoquant :

- L'usure prématurée est due à la fois à une dureté de surface insuffisante et à une diminution de la concentration en carbures en surface.
- Un défaut de dureté dans la partie usinée peut entraîner des écaillages ultérieurs, souvent attribués à tort à une fragilité excessive dans le métal.
- Dans certaines situations, la zone décarburée ayant une résistance mécanique réduite peut provoquer la destruction de l'outil par l'émergence des fissures dans les sections les plus sollicitées.

Il faut particulièrement veiller à la durée du chauffage et du maintien à une température spécifique. D'après l'expérience, on remarque que la pièce semble sombre au milieu de la masse rouge du four. Une fois qu'elle a atteint sa température, sa couleur sera uniforme. Aujourd'hui, les dispositifs de chauffage modernes par induction contrôlée ou les fours à atmosphère contrôlée (fours à gaz inertes ou sous vide) offrent un contrôle extrêmement précis de la température et minimisent les gradients thermiques, réduisant ainsi les probabilités des déformations et assurant la qualité de la surface des pièces.

Il faut s'assurer que l'outil ne se déforme ni ne se rompe lors du chauffage, car les contraintes thermiques dans un matériau s'accroissent alors que les limites d'élasticité et de traction se réduisent avec l'augmentation des températures.[23]

II.2.2. La Durée de maintien

A une importance primordiale sur les caractéristiques des aciers à outils destinés au travail à froid.

Une durée de traitement trop courte conduit à une dissolution incomplète des carbures, alors qu'une durée trop longue entraîne un agrandissement des grains et une diminution excessive du contenu en carbures, ce qui nuit à la résistance à l'usure. Une dissolution modérée favorise la ténacité, toutefois une quantité insuffisante de carbures dissous diminue la dureté post-trempe, tandis qu'une surabondance génère de l'austénite résiduelle et rend l'acier fragile.

La taille des grains est influencée par le temps, la température et la composition chimique, ce qui nécessite une durée appropriée pour homogénéiser l'austénite sans surchauffe. Pendant le maintien, il est également nécessaire d'assurer une homogénéité thermique dans le composant

Tout en favorisant la dissolution des carbures. Ces paramètres varient selon la géométrie de l'outil et le type d'acier, nécessitant un équilibre précis pour garantir des performances optimales en termes mécaniques et tribologiques. [1 4 23]

II.2.3. Refroidissement des aciers à outils pour travail à froid

L'éventail des vitesses de refroidissement est particulièrement vaste : elles peuvent varier des plus lentes, comme celles correspondant à la fin du cycle d'un four dont le chauffage a été stoppé, aux plus rapides lors d'une trempe à l'eau salée, ce qui est directement corrélé à la structure de l'acier. La microstructure et les caractéristiques mécaniques des aciers sont directement affectées par la vitesse de refroidissement.

On appelle la vitesse critique de trempe (V_c) (dépend de la composition de l'acier) la vitesse minimale de refroidissement nécessaire pour transformer l'ensemble de l'austénite surchauffée jusqu'au point M_s en martensite évitant ainsi la formation d'autres phases telles que la perlite ou la bainite (**Voir Figure.II.1**).

Lorsque la vitesse de refroidissement excède cette vitesse critique, seule la transformation martensitique affecte l'austénite. Plus la vitesse de trempe critique est basse, plus l'acier sera capable de se durcir en profondeur. Les aciers dotés d'une austénite plus stable favorisent des vitesses de refroidissement plus lentes, tels que la trempe à l'air, qui est particulièrement appropriée pour les pièces de taille modérée.[23]

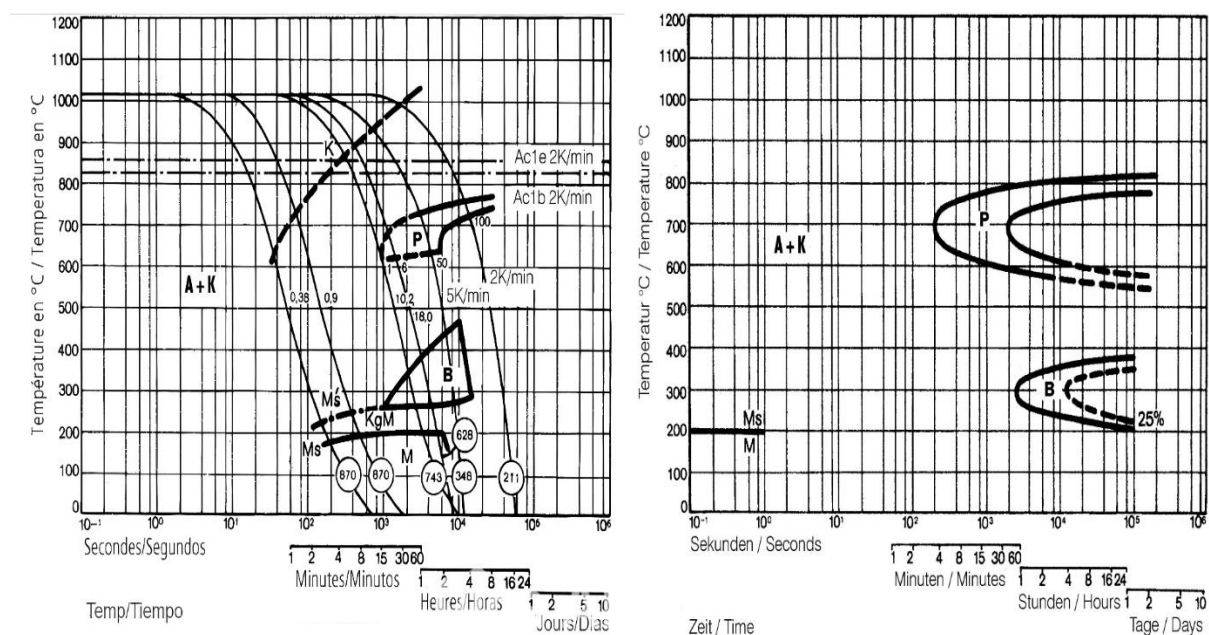


Figure II.1 : les courbes TRC et TTT à 1020 °C de 30 min pour l'acier K110[24 25]

II.3. Composants obtenus après le chauffage et le refroidissement

En se référant au diagramme fer-carbone, il est remarqué qu'à partir de 720 °C, le mélange de ferrite et de cémentite, qui constitue la phase stable de l'acier à température ambiante, se transforme en austénite lors du chauffage.

Les propriétés des aciers à outils sont considérablement modifiées par les composants d'alliage.

Les éléments alphagènes (Cr, Mo, W, V, Si, Al) réduisent le domaine austénitique et augmentent les températures de transformation des phases, favorisant ainsi la formation de ferrite et de carbures. En revanche, les gammagènes comme le manganèse et le nickel tendent à étendre la zone austénitique.

Ces composants diminuent également la concentration en carbone eutectoïde. Ainsi, la limite entre les aciers hypoeutectoïdes et hypereutectoïdes est abaissée (**Voir Figure.II.2**).

La teneur en carbone influence significativement les diagrammes TTT et réduit le point Ms, ce qui augmente la quantité d'austénite résiduelle.

- Les éléments Mo, W, V renforcent la capacité de trempe et stabilisent les carbures (M_7C_3 , MC), qui sont cruciaux pour la résistance à l'usure et le coefficient de frottement.[23]

- Les éléments Cr, Mo, V qui privilégient favorisent la formation de ferrite au détriment de la résistance à la corrosion.

L'oxydation de ces composants d'alliage forme une couche protectrice des produits réactifs sur la surface de la martensite améliorant la résistance à la corrosion.[26]

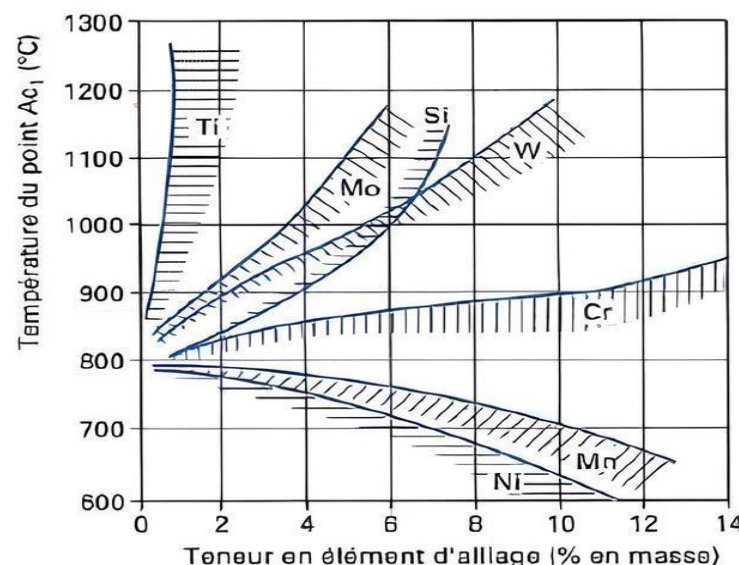


Figure II.2 : Impact des éléments d'alliage sur la localisation du domaine de température Ac [23]

II.3.1. Nature des carbures primaire

Les traitements thermiques et la composition chimique (Cr, Mo, V, Co) influencent considérablement la microstructure complexe des aciers à outils destinés au travail à froid. En état de recuit, ils contiennent des carbures (M_3C , $M_{23}C_6$, M_7C_3 , M_6C , MC) qui se dissolvent progressivement sous l'effet de la chaleur. Les carbures riches en Cr (M_3C , $M_{23}C_6$) fondent entre 800 °C et 1130 °C, alors que les carbures complexes (M_6C , MC, plus résistants) demeurent stables jusqu'à 1150-1200°C.

Après un traitement d'austénitisation à environ 1000 °C, les aciers contenant 12 % de Cr maintiennent entre 10 et 15 % de M_7C_3 , alors que ceux avec une teneur de 5 % de Cr retiennent seulement 4 à 5 %. La dureté est déterminée par le nombre de carbures non dissous et la matrice martensitique post-trempe. Les carbures MC (abondants en V) et M_6C (riches en Mo/W) augmentent la résistance à l'érosion. La présence des carbures durs (MC, M_7C_3) qui réduisent l'adhésion et l'abrasion, améliore le comportement tribologique, tandis qu'une matrice durcie contenant une distribution fine de carbures garantit la ténacité. Les aciers contenant une forte proportion de Cr et V offrent donc une remarquable résistance à l'usure pour les utilisations à froid. Ainsi, les aciers à outils ayant des carbures primaires plus résistants, de taille inférieure et répartis de manière plus uniforme montrent une résistance accrue à la rupture.[23]

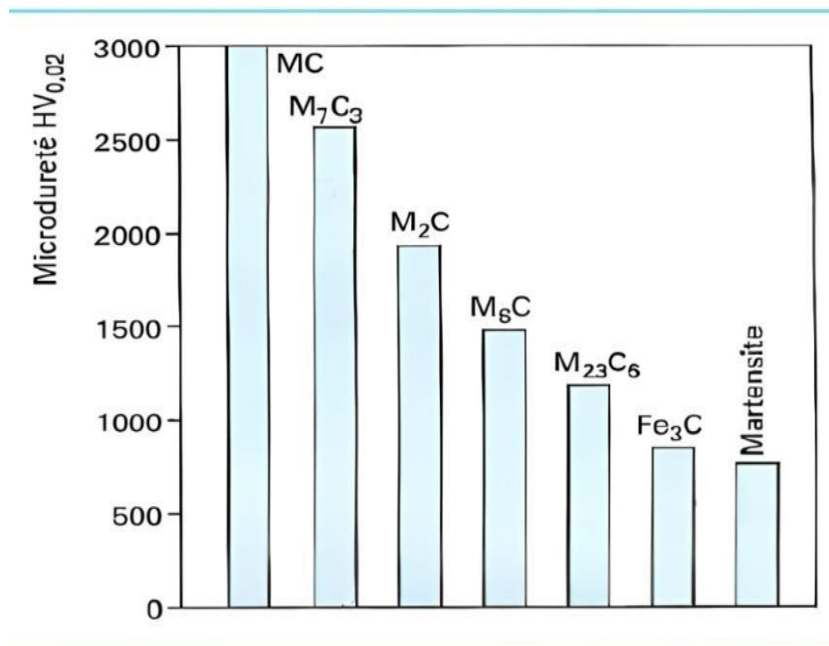


Figure II.3 : Microduretés comparées des carbures contenus dans les aciers à Outils [23]

La **figure II.3** met en parallèle la dureté des carbures dans les aciers à outils, mettant l'accent sur le fait que le carbure MC (le plus dur) est parfait pour la résistance à l'usure, Cependant, son utilisation doit être modérée pour ne pas nuire à l'usinabilité.

Tableau II.1 : Composition chimique des carbures primaires et secondaires (% en poids) déterminée par spectromètre à dispersion d'énergie (EDS) de l'acier D2 [27]

Le traitement thermique	Les carbures	Fe %	Cr %	Si %	V %
Trempe et revenu à 523 K	Carbure primaire	88.25	11.06	0.69	<0.05
	carbure secondaire	51.19	44.67	0.22	<0.05
Trempe et revenu à 923 K	Carbure primaire	90.54	8.82	0.49	<0.05
	Carbures secondaires grossiers	93.88	6.21	0.37	<0.05
	Carbures secondaires fins	51.83	48.03	0.07	<0.05
Trempe	Carbure primaire	92.58	8.03	0.57	<0.05
	Carbures secondaires grossiers	51.05	46.84	0.29	0.11
	Carbures secondaires fins	91.39	8.51	0.46	<0.05

Le **Tableau II.1** résume la composition chimique (en % atomique ou massique) des carbures primaires et secondaires déterminée par EDS, incluant les éléments majeurs tels que Cr, Fe, Mo, V et C, ainsi que leur phase probable

II.3.2. Grosseur de grain

Selon la relation de Hall-Petch : « L'augmentation de la dureté et la limite d'élasticité d'un matériau polycristallin se produit lorsque la taille des grains diminue ».[26]

La taille du grain austénitique et la répartition des carbures (M_3C , M_7C_3 , M_6C , MC) déterminent la microstructure des aciers destinés au travail à froid. Ces carbures, notamment les types MC et M_7C_3 jouent le rôle de barrières qui limitent l'élargissement des grains pendant l'austénitisation (jusqu'à 1200 °C), ce qui améliore leur ténacité. Il est essentiel d'assurer une distribution fine et uniforme de ces carbures pour éviter toute hétérogénéité de taille des particules.[23]

Néanmoins, la présence de ségrégations de carbures entraîne des irrégularités dans la structure du grain, ce qui a un impact négatif sur les performances. Il est donc crucial de maîtriser précisément les paramètres thermiques (La température d'austénitisation, La durée de conservation) et la Composition chimique pour trouver un compromis entre résistance à l'usure, ténacité, coefficient de frottement et stabilité dimensionnelle (**Voir Figure II.4**). Le risque de corrosion des structures à grains fins dépasse celui des structures à grains

Grossiers (faible densité) car les joints de grains pourraient servir des points déclencheurs anodiques pour le processus de création des piquûres.[26]

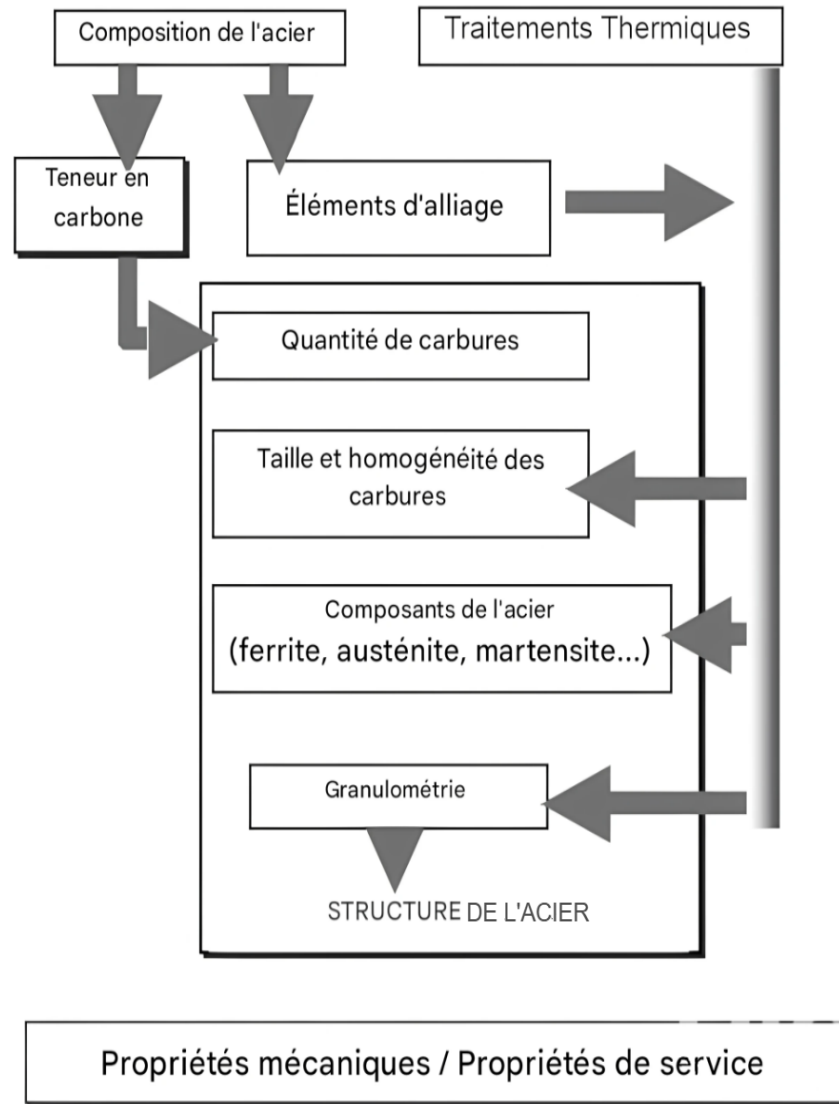


Figure.II.4 : Impact de la composition et les traitements thermiques sur la structure de l'acier.[1]

II.4. Les traitements thermiques des aciers à outils de travail à froid

Les aciers à outils pour le travail à froid subissent des traitements thermiques spécifiques : normalisation, recuit, trempe (durcissement) et revenu afin d'optimiser leurs propriétés mécaniques : dureté, résistance à l'usure et ténacité et d'obtenir une microstructure optimale (martensite et carbures) tout en maîtrisant les contraintes interne. Ces procédures ont un impact direct sur la durée de vie de l'outil et son coût global.[4]

II.4.1. Le recuit

Le processus de recuit des aciers à outils permet d'adoucir la microstructure en éliminant les tensions résiduelles liées à la fabrication (notamment la répartition des carbures).

Ce traitement prépare parfaitement la matière aux opérations de durcissement ultérieures (trempe et revenu). En perfectionnant la structure, il améliore la résistance à l'usure, la Ténacité et prévient les défauts potentiels. Une exécution correcte du recuit garantit la stabilité microstructurale requise.

Ces améliorations augmentent considérablement la longévité des outils en cours d'utilisation. Les températures de recuit peuvent être légèrement inférieures, identiques ou supérieures à la température AC1, marque à laquelle débute la transformation de la ferrite en austénite.

Le choix des températures de recuit d'adoucissement dépend des caractéristiques d'usinage désirées ou de la composition du métal.[4]

II.4.1.1. La structure a l'état de recuit

Dans leur état de recuit (doux), les aciers à outils affichent une microstructure comportant une matrice ferritique, des carbures sphéroïdaux et parfois de la perlite. Pendant le processus de recuit doux, l'acier est réchauffé et exposé à la température de recuit pendant plusieurs heures avant d'être lentement refroidi jusqu'à 500 °C, généralement à des taux de refroidissement variant entre 10 et 22 °C/h. Le matériau est par la suite refroidi à l'air jusqu'à atteindre une température ambiante. Ce procédé non seulement procure un adoucissement de l'acier, mais assure également une uniformité de sa microstructure (une distribution uniforme des carbures globulaires fins), condition préalable à un éventuel traitement de durcissement. C'est pourquoi, les aciers destinés aux outils sont fournis dans un état de recuit doux.

Les aciers ledeburitiques (à 12 %Cr) nécessitent spécifiquement une distribution homogène des carbures primaires, les concentrations excessives étant préjudiciables aux caractéristiques mécaniques.[4]

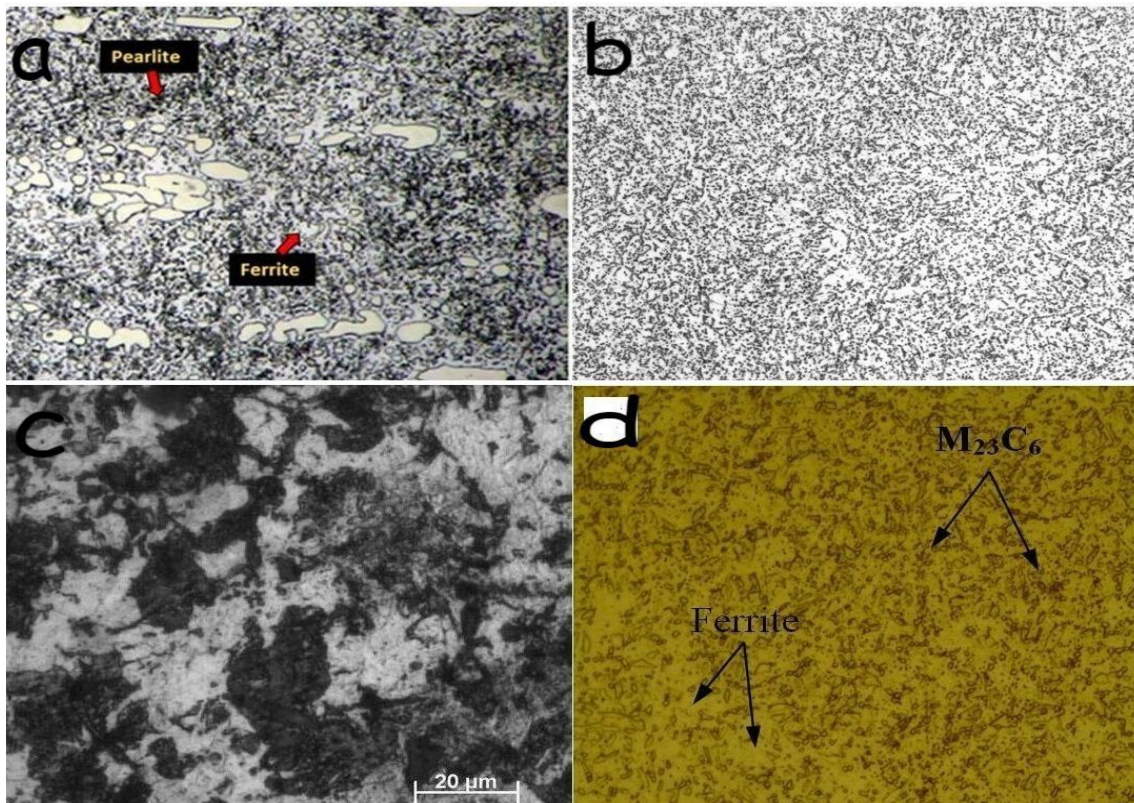


Figure.II.5 : les microstructures à l'état recuit a) D2(K110) b) Uddeholm Dievar (travail à chaud) c) acier ordinaire d) AISI 410 inox. [28 29 30 31]

Après la **figure.II.4** ont observé que L'acier D2(K110) contient des carbures grossiers (primaires) dans une matrice ferritique, accompagné de perlite, ce qui le rend idéal pour les outils de coupe. Le Dievar présente une composition uniforme des carbures fins adaptée aux chocs thermiques. L'acier standard présente une ferrite/perlite ductile, idéale pour la formabilité. L'AISI 410 allie ferrite et carbures modérés ($M_{23}C_6$), équilibrant ainsi la résistance et la corrosion. [28 29 30 31]

II.4.1.2. Les types de recuit

On distingue principalement deux types de recuit :

Recuit complet :

Permet de restructurer et d'adoucir l'acier dans les conditions optimales pour faciliter son usinage.

Il intègre un chauffage au-delà du point de transformation, $\alpha \rightarrow \gamma$ sans dépasser significativement cette température, une stabilisation prolongée à cette chaleur pour établir l'équilibre structural, suivie d'un refroidissement extrêmement progressif Permettant la

Décomposition de l'austénite à des températures plus élevées, ce qui conduit à une globalisation des carbures dans une masse ferritique. Plus la vitesse de refroidissement est lente, plus l'adoucissement se manifeste. [23]

Il faut donc sélectionner la vitesse de refroidissement en fonction de l'effet désiré, en prenant en compte la composition de l'acier, mais elle ne doit jamais dépasser 25 °C/h jusqu'à ce qu'elle atteigne 550 °C. Elle peut être accélérée après complétion de la transformation $\gamma \rightarrow \alpha$.

Recuit de détente :

A pour objectif principal d'éliminer les contraintes résiduelles, résultant de déformations mécaniques ou d'usinage.

Ce recuit s'effectue à une température inférieure d'Ac1 (600-700 °C) et nécessite refroidissement contrôlé, généralement lent pour éviter l'introduction des nouvelles contraintes, surtout dans les outils de forme non uniforme.[23]

II.4.2. La trempe

Le procédé de trempe consiste à :

- Un chauffage progressif est effectué pour minimiser la déformation et prévenir les fissures (causées par des contraintes) jusqu'à ce que la température soit légèrement inférieure à Ac1. Ensuite, une phase de maintien (dont la durée varie en fonction de l'épaisseur) est réalisée afin d'uniformiser la température sur l'ensemble de l'épaisseur. Puis, réchauffage jusqu'à atteindre la température d'austénitisation ($>Ac_3$) ;
- Pour obtenir une température uniforme sur toute la pièce, l'acier doit être transformé en austénite et un maximum de carbures précédemment formés doit être dissous en maintenant à la température d'austénitisation.
- Refroidissement dans un fluide de refroidissement approprié (l'eau, l'huile ou un gaz...) pour obtenir une structure martensitique fournissant une dureté élevée. [1]

Le choix du moyen de refroidissement est essentiel, selon les normes de l'American Iron and Steel Institute (AISI), on classe les aciers pour outils destinés au travail à froid en aciers à trempe à l'eau (série W), à trempe à l'huile (série O) et à trempe à l'air ou à l'huile (séries A et D).[255]

Groupe trempé à l'eau W (water) :

On désigne par aciers à outils du groupe W ceux qui sont uniquement alliés avec une forte concentration de carbone, sans ajout d'autres éléments d'alliage comme le Cr, le Mo, le W et

le V. Ces propriétés mécaniques leur sont conférées après trempage à l'eau, en se basant sur leur température d'austénitisation. Il s'agit simplement d'aciers non traités. Ce groupe d'aciers pour outils est fabriqué en quantités importantes et connaît une utilisation plus étendue que les groupes alliés, du fait de son coût de production réduit.

Groupe trempé à l'huile O (Oil) :

La série trempée à l'huile englobe tous les aciers, allant d'O1 à O7.

Groupe trempé à l'air A (Air) :

L'acier au chrome, anciennement appelé d'acier durcissable à l'air, était le premier acier à outils capable de se durcir à l'air.

Groupe D (haute teneur en carbone-chrome) :

La gamme D des aciers pour outillage à froid, comprenant initialement les types D2, D3, D6 et D7, renferme un taux de chrome variant de 10 % à 13 %.[32]

Tableau II.2 : Types d'aciers à outils pour travail à froid, selon la classification américaine [UNS, AISI et SAE].[32]

L'acier à outil	Préfixe	Types spécifiques
Travail à froid	W = Trempe à l'eau O = Trempe à l'huile A = Trempe à l'air pour alliage moyen D = Teneur élevée en carbone et en chrome	W1, W2, W5 O1, O2, O6, O7 A2, A4, A6, A7, A8, A9, A10, A11. D2, D3, D4, D5, D7

Après la **figure II.6** Le processus de trempe à l'air de l'acier D2 donne une microstructure constituée de martensite en aiguilles grises, d'austénite résiduelle (zones lumineuses) et des carbures primaires grossiers, dû à un refroidissement progressif. En revanche, le traitement thermique à l'huile, associé à un refroidissement rapide, produit une structure martensitique contenant de l'austénite résiduelle et favorise la création des carbures secondaires plus petits et mieux répartis.

A partir de sa on peut dire que la trempe à l'huile confère une dureté plus élevée et une résistance accrue à l'usure, tandis que la trempe à l'air offre une stabilité dimensionnelle supérieure bien qu'avec des caractéristiques mécaniques inférieures. [23 28]

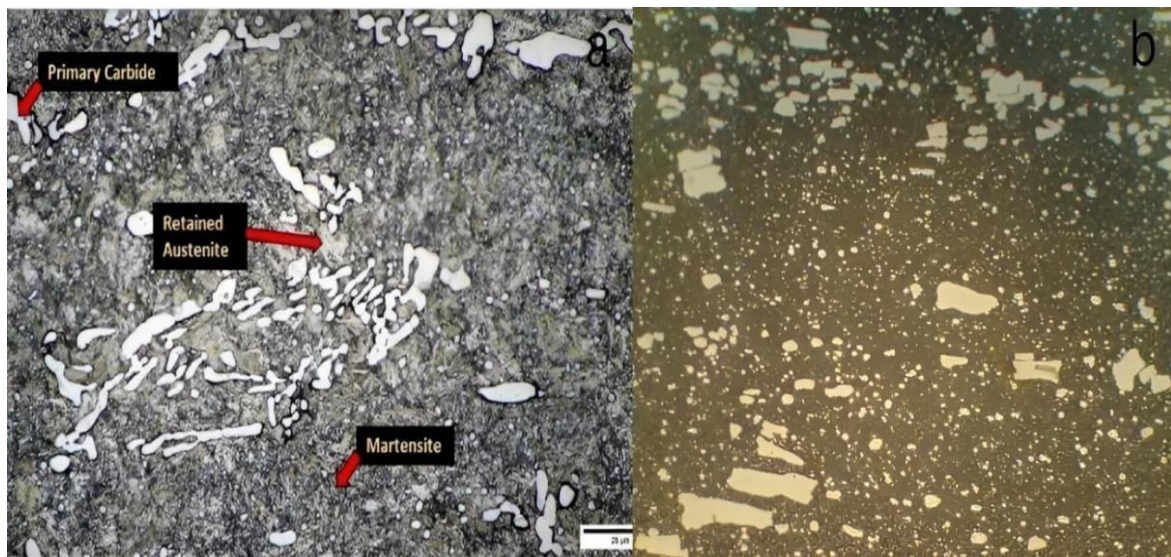


Figure II.6 : microstructure of D2(K110) dans différents milieux de refroidissement a) à l'air 1020°C b) à l'huile 1020°C (*1000) [23][28]

II.4.2.1. Les paramètres du traitement

A) Le pré chauffage :

Cette étape permet d'équilibrer la température entre le noyau et la surface de l'outil.

Comme illustré sur la **figure II.7**, la courbe verte indique la température mesurée à la surface du matériau, tandis que la courbe bleue indique la température au cœur de l'outil.[3]

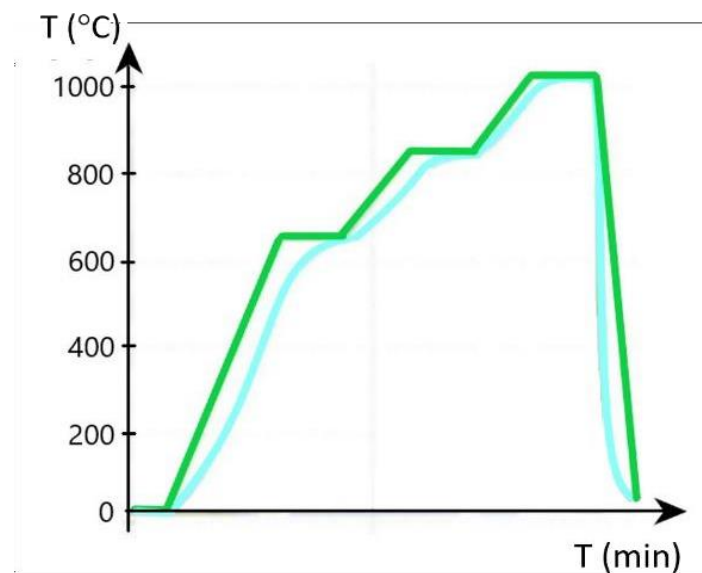


Figure II.7 : Diagramme de durcissement de l'acier en fonction de la température et du temps.[3]

B) L'austénitisation :

Une attention particulière est nécessaire lors de la sélection des températures d'austénitisation (850-1200 °C), car des choix inadaptés peuvent entraîner une aggrégation des grains d'austénite, pouvant nuire à la ténacité de l'acier.

Une température élevée favorise la dissolution des carbures mais augmente l'austénite résiduelle, agrandit les grains et accroît le taux d'usure, alors qu'une température basse réduit l'usure en empêchant la dissolution complète des carbures.

On utilise fréquemment une double austénitisation (à haute puis à basse température) pour maximiser la dureté et la ténacité ce qui diminue le coefficient de frottement.

Concernant les aciers faiblement alliés (qui contiennent des carbures M₃C), il est suffisant d'appliquer des températures modérées (750-900 °C) pour dissoudre les carbures tout en préservant une taille de grain fine.

Pour la dissolution partielle des aciers fortement alliés (contenant des carbures tels que M₇C₃, M₂₃C₆ et MC), des températures supérieures à 950 °C sont requises. Avec l'augmentation de la température, les vitesses de corrosion augmentaient, tandis que la dimension des grains diminuait.[23]

Il est démontré qu'une augmentation des températures d'austénitisation unique et double renforce la dureté de l'acier pour outils. Cela est attribué à la restriction de la croissance des grains d'austénite et à l'accroissement de la teneur en carbone de la matrice martensitique suite à la dissolution des carbures.[33]

II.4.2.2. La trempabilité

La capacité à produire de la martensite lors de la trempe, appelée la trempabilité, est influencée par trois facteurs principaux :

- Les conditions d'austénitisation (température et durée).
- La taille de la pièce.
- Le milieu dans lequel il est refroidi.

Il se distingue par son coefficient de sévérité H (variant de 0,02 dans l'air calme à 2,0 dans l'eau salée), qui est déterminé par sa conductivité thermique, sa chaleur spécifique et sa viscosité. La dureté finale est définie par deux notions distinctes :

- L'intensité de durcissement, qui est associée à la quantité de carbone dissous dans l'austénite.
- La profondeur de trempe, qui est influencée par les éléments d'alliage (tous les éléments de l'alliage, à l'exception du cobalt, tendent à augmenter la trempabilité) et la dimension du grain austénitique. Ces éléments réunis maximisent les caractéristiques mécaniques des outils.[23]

II.4.2.3. La quantité d'austénite résiduelle présente après trempe

L'austénite résiduelle est générée lors du processus de trempe, lorsque certaines portions de l'austénite demeurent inaltérées en martensite est une phase non souhaitée, car elle entraîne des tensions et des fluctuations dimensionnelles. L'austénite non transformée présente dans le matériau génère une contrainte, étant donné que son volume est moindre par rapport à celui de la martensite. Ainsi, des contraintes de traction et de compression sont créées entre les phases. L'austénite résiduelle est une phase instable et molle qui, outre sa capacité à diminuer la dureté pendant l'utilisation de l'outil, se convertit en martensite en présence de contraintes.

Cela peut entraîner des fractures et des défaillances d'outil.[3]

Dans la plupart des aciers à outils, la quantité d'austénite résiduelle dépend de trois facteurs :

- La température d'austénitisation
- La vitesse de refroidissement
- La composition chimique.[23]

La **figure II.8** illustre l'impact de la température d'austénitisation sur le pourcentage d'austénite résiduelle de certains aciers à outils alliés par traitement à froid.

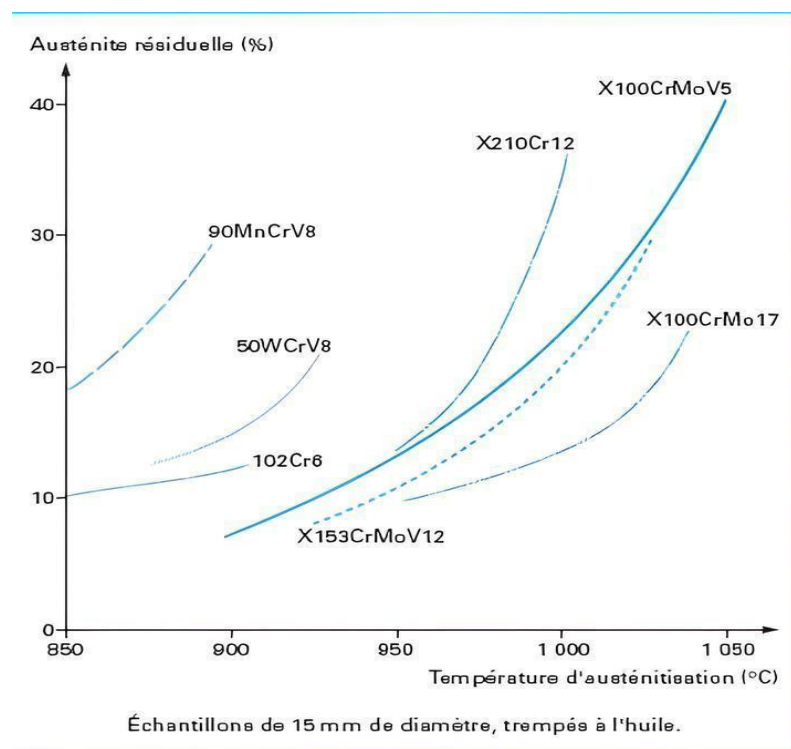


Figure II.8 : Impact de la température d'austénitisation sur le niveau d'austénite résiduelle de certains aciers à outils alliés par traitement à froid.[23]

II.4.3. Le revenu

Après une trempe, la microstructure martensitique est fragile et n'est pas conseillée pour une application pratique. Il est nécessaire de procéder à un revenu immédiat, sauf s'il est soumis à un traitement cryogénique.

Le revenu à basse température aide à la relaxation de la martensite, alors que le revenu à haute température favorise la conversion de l'austénite résiduelle en martensite tendre, renforçant ainsi la dureté, la ténacité et la ductilité (La résistance à la traction). [34]

Toutefois, un chauffage à une température inférieure à A_{c1} (température de changement de phase) permet de réduire les tensions et le volume d'austénite résiduelle.

Lors du traitement des aciers à outils, l'objectif est de parvenir à une microstructure homogène de type sphéroïdal.[3]

Ainsi, les principaux objectifs des traitements de revenu sont :

- D'une part, augmenter la température de l'acier martensitique pour améliorer sa ductilité en réduisant la concentration de carbone dans la martensite sursaturée, ce qui se fait par la précipitation des carbures au sein de la martensite. (Voir figure II.9)
- D'autre part, éliminer l'austénite résiduelle présente dans la microstructure.[1]

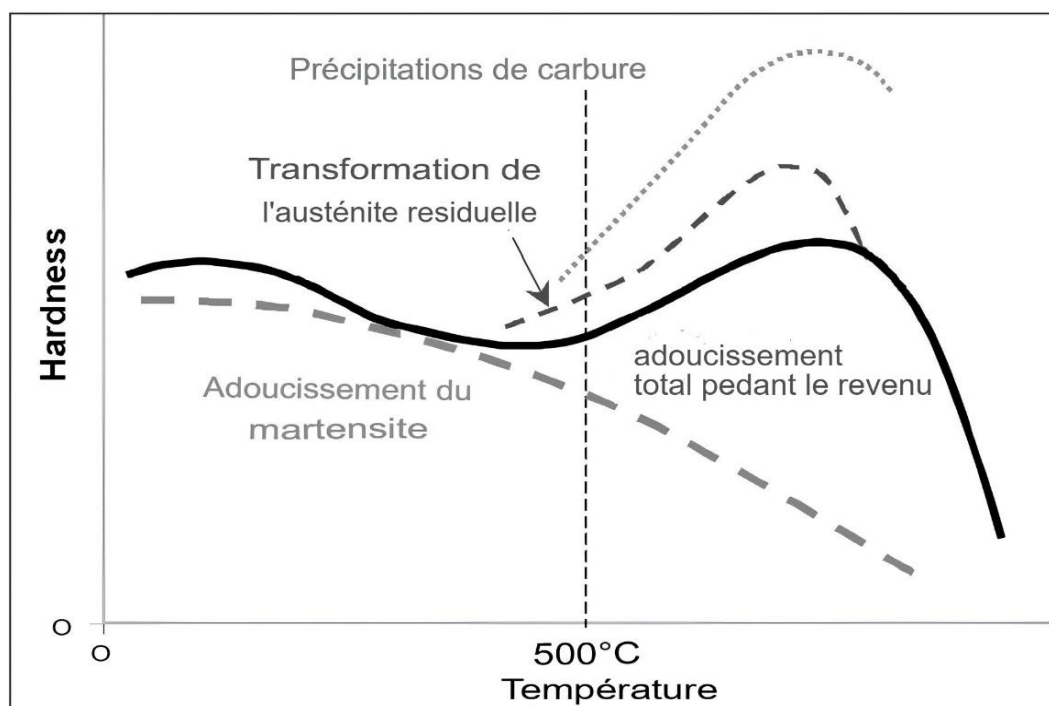


Figure II.9 : Divers phénomènes métallurgiques conduisant à un adoucissement avec le revenu [1]

II.4.3.1. Structures de revenu

Le revenu est le dernier traitement thermique, effectué en deux ou trois cycles. Pour les aciers qui renferment des grandes proportions d'austénite résiduelle (supérieures à 15 %), un seul cycle de revenu ne permet pas de convertir entièrement l'austénite résiduelle. Chaque cycle de revenu modifie l'austénite résiduelle et trempe en même temps la martensite nouvellement créée lors du précédent refroidissement.[4]

Après la trempe, la microstructure des aciers à outils comporte de martensite (qui est dure mais cassante) et d'austénite résiduelle, avec des carbures qui ne se dissolvent pas dans les aciers fortement alliés.[3]

Le revenu, réalisé sous AC1, transforme cette microstructure instable en quatre phases :

- (1) Formation des carbures « ϵ » à basse température (<150 °C).
- (2) Formation de cémentite et disparition de la tétragonalité martensitique à température intermédiaire (150-350 °C).
- (3) Transformation de l'austénite résiduelle en bainite à température modérée (200-300 °C).
- (4) Agglomération des carbures, suivie de la recristallisation de la ferrite à haute température (>350 °C).

Les aciers à faible teneur en carbone (<0,4 %) tendent à s'adoucir graduellement, alors que les aciers avec une teneur en carbone plus élevée peuvent subir un durcissement temporaire dû à la précipitation de carbures « ϵ » (50-150 °C). Pour les aciers alliés (par exemple, Z160CDV12), l'ajout d'éléments tels que le Cr, le V et le Mo modifie ces processus : la cémentite (M3C) est substituée par des carbures secondaire complexes (M7C3, MC) aux alentours de 450-550 °C, entraînant un durcissement secondaire, augmentant ainsi la dureté, la ténacité et l'usure à l'adhésion. Ce phénomène est fonction de la température d'austénitisation et de la composition chimique.

Ces réponses complexes, associées aux interactions entre la martensite, l'austénite résiduelle et les carbures, justifient la complexité de la prévision exacte des changements des propriétés mécaniques pendant le processus de revenu.

Après un traitement de revenu, la microstructure globale de l'acier destiné aux outils est constituée de martensite revenue, de martensite nouvellement formée, d'austénite résiduelle et divers carbures tels que Me3C, Me7C3, etc. [23]

Le **tableau II.3**, présente l'usure de l'acier à outils AISI A8 après une seule austénitisation et un seul revenu, ainsi que les caractéristiques de dureté et de carbure. L'usure des aciers à outils a été caractérisée par la perte de volume (mm³) obtenue par l'essai DSRW.

Tableau II.3 : Caractéristiques d'usure, de dureté et de carbure de l'acier à outils AISI A8 à différentes températures d'austénitisation et de revenu. [33]

Usure (mm³) ± 0,2	Dureté (HRC) ± 0,5	Volume de carbure Fraction (%) ± 0,2	Taille moyenne du carbure (µm) ± 0,01	Austénitisation Température (°C)	Revenu Température (°C)
88.9	53	53	1.25	980	500
85.3	53	53	1.28	980	520
78.0	51	51	1.33	980	540
95.5	54	54	1.22	1010	500
88.8	56	56	1.27	1010	520
83.7	52	52	1.30	1010	540
91.1	59	59	1.15	1040	500
90.8	58	58	1.21	1040	520
82.3	57	57	1.27	1040	540

II.4.3.2. Revenu des aciers contenant du chrome

Dans les aciers contenant du chrome, deux carbures majeurs sont à noter : le Cr₇C₃ (trigonal) et le Cr₂₃C₆ (cubique). Leur formation suit l'ordre (Fe, Cr) 3C → Cr₇C₃ → Cr₂₃C₆, qui est seulement complet pour des concentrations supérieures à 7 % de Cr. Le Cr₇C₃ se forme dès 500 °C mais se regroupe rapidement, ce qui entraîne un adoucissement entre 500-700 °C.

Cependant, pour une teneur de 12 % en Cr, un deuxième durcissement se produit par la précipitation fine de Cr₇C₃ pendant que le Cr₂₃C₆ commence à cristalliser. Le vanadium stabilise le Cr₇C₃ (permettant de maintenir une structure fine), tandis que le tungstène favorise la formation du Cr₂₃C₆. Ces processus expliquent comment les propriétés des aciers à outils riches en chrome (par exemple : X153CrMoV12) peuvent être optimisées grâce au contrôle des températures de revenu et aux ajouts d'éléments comme le V, Mo et W. [23]

Enfin, lors d'un revenu à haute température. (Dès 500 °C), un durcissement secondaire (la précipitation de fines particules de carbures MC et M₂C (2 à 5 nm) dans la martensite. Les carbures se forment lors du maintien à la température de revenu. On désigne souvent ces précipités par le terme « carbures de revenu ». La formation de ces nanoparticules au sein de la microstructure engendre une dureté plus élevée que celle du revenu obtenu à toutes les autres températures. On parle alors de « trempe secondaire » [4], qui génère la plus grande dureté entre 500 °C et 540 °C pour les aciers destinés aux outils).

Toutefois, un revenu effectué entre 540 °C et 600 °C génère des carbures de revenu plus grossiers, dont la matrice se transforme en une structure plus ferritique, ce qui réduit leur contribution à la dureté. [23]

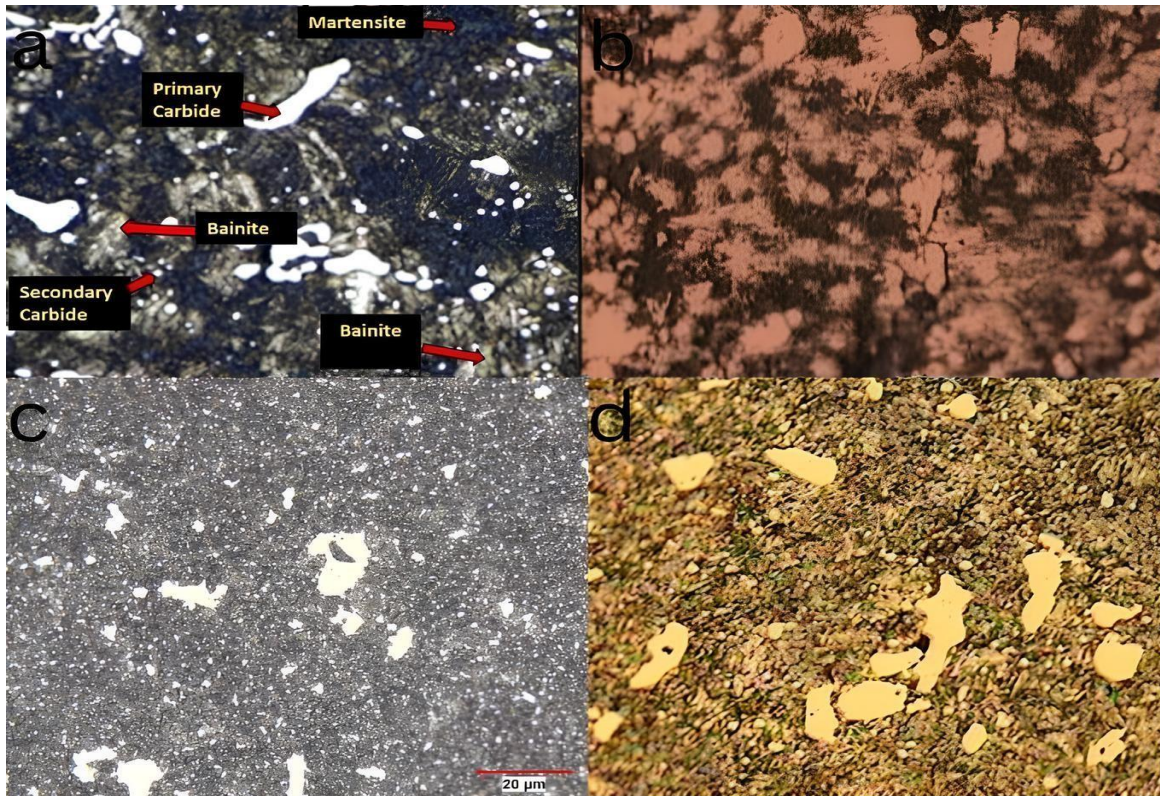


Figure II.10 : Microstructures de l'acier D2 (K110) a) trempé à l'air à 1020°C et revenu à 580°C b) trempé à l'huile à 1050°C et revenu à 550°C c) acier inox martensitique trempé à l'huile à 1040°C et revenu 400°C d) D2 trempé à l'huile à 1010°C et double revenu à 550°C [28 29 35]

La figure II.11 illustre l'acier D2, soumis à une trempe à l'air à 1020°C suivie d'un revenu à 580°C (a), montre une martensite revenue accompagnée des carbures primaires et secondaires (M7C, M23C6) et d'une matrice partiellement recristallisée (Bainite). Le D2, traité avec de l'huile à 1050°C et revenu à 550°C (b), présente une martensite plus fine, des carbures secondaires dispersés (M23C6) et une diminution des carbures primaires due à la dissolution accrue. L'acier inoxydable martensitique qui a été trempé à 1040°C puis revenu à 400°C (c) montre une martensite aciculaire non revenue, pratiquement dépourvue de carbures visibles, caractéristique des aciers inoxydables durcis. Finalement, le D2, qui a été trempé à l'huile à 1010°C puis doublement revenu à 550°C (d), présente une microstructure uniforme, une martensite bien revenue et une répartition fine des carbures, En optimisant la robustesse et la stabilité. Les distinctions majeures se trouvent dans la dimension des carbures, la finesse de la martensite et l'influence du revenu sur la précipitation. [28 29 35]

II.4.3.3. Les types de revenu

On distingue principalement deux types de revenu, les plus utilisés en raison de leur large applicabilité :

Revenu de détente :

Ce traitement vise à alléger les restrictions imposées par l'usinage final ou le réaffûtage.

L'augmentation de la température et la diminution de la limite d'élasticité du matériau qui s'ensuit permettent sa relaxation.

Ce phénomène de relaxation est généralement négligeable aux basses fréquences des températures (qui ne dépassent pas 200 °C), mais son importance grandit pour les températures au-delà de 500°C. [36]

Revenu de durcissement :

Des revenus réalisés entre 450 et 600 °C sur des aciers alliés peuvent entraîner ce qu'on appelle des durcissements secondaires (comme dans le cas des aciers à outils au chrome).

D'abord, on observe la précipitation de carbures complexes maintenus en solution dans une part d'austénite résiduelle. Ensuite, cette dernière se déstabilise et se transforme en martensite lors du processus de refroidissement. Ces deux transformations consécutives vont donc requérir une source de revenus supplémentaire pour empêcher que la martensite secondaire ne cause une fragilité excessive. (Il se peut qu'il soit nécessaire d'effectuer trois traitements de revenu consécutifs sur certains aciers rapides). [36]

II.4.4. La normalisation

La normalisation est un traitement qui consiste à chauffer l'acier à une température supérieure à A_{c3} ou A_{cm} , avant un refroidissement à l'air libre. L'objectif de cette procédure est d'éliminer les effets de tout traitement thermique préalable (y compris les structures grossières pouvant résulter de températures de forge trop élevées) ou d'écrouissage, et de garantir une austénitisation homogène avant trempe ou recuit.

II.4.4. Le traitement cryogénique

Le traitement cryogénique consiste à soumettre l'acier à des températures négatives pour conférer au matériau des propriétés spécifiques.

Le traitement cryogénique se divise en trois intervalles de températures :

- La première plage couvre les températures inférieures à 0 °C, connues sous le nom de traitement en dessous de zéro.
- La deuxième plage s'étend jusqu'à -80 °C, Au sein de cette gamme, la plupart de l'austénite résiduelle se transforme en martensite, améliorant ainsi la résistance à la fatigue de l'acier et accroît sa stabilité dimensionnelle ainsi que sa résistance à l'usure.
- La troisième plage, correspondant au traitement cryogénique profond, couvre les températures de -80 °C à -160 °C. Au sein de cette gamme, la quantité d'austénite résiduelle peut être minimisée à moins de 1,8 %, ce qui garantit la stabilité dimensionnelle et la résistance à l'abrasion et, par-dessus tout, une prolongation de la longévité de l'outil.[3]

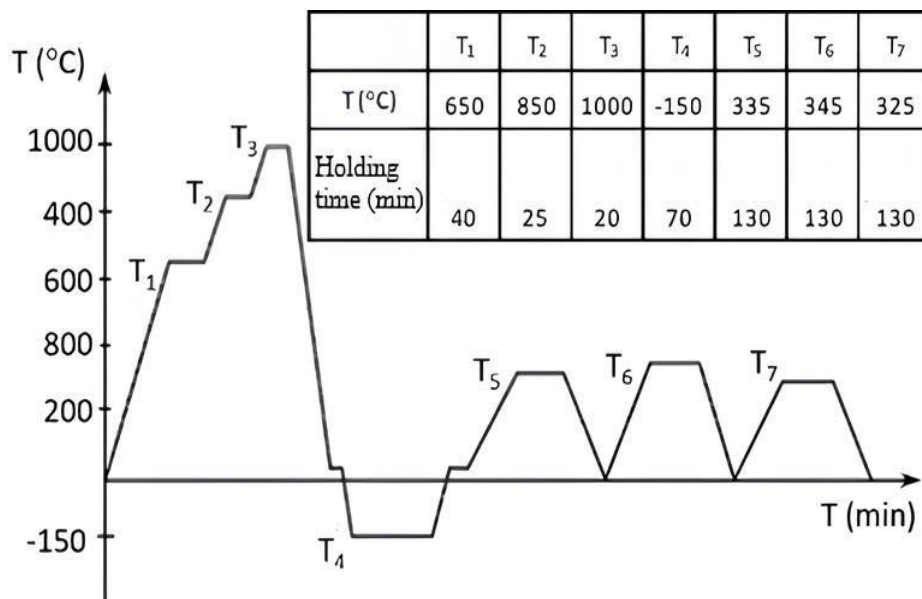


Figure II.12 : Traitement thermique cryogénique de l'acier Böhler M340 ISOPLAST [3]

II.5. Un certain résultat de recherche

L'évolution tribologique est gouvernée par deux principes de base :

- Loi d'usure mécanique : Un accroissement de la force normale appliquée (F_n) conduit à une hausse

Proportionnelle du volume d'usure (V_u), en accord avec l'équation suivante (la loi d'Arshad) :

$$\text{Taux d'usure volumique} = V_u / F_n \cdot d$$

V_u = Volume usé (mm^3)

F_n = Force normale (N)

d = Distance de glissement (m)

$$V_u = K \cdot F_n \cdot d / H$$

K : Coefficient d'usure (sans unité, dépend du matériau et des conditions de frottement) H : Dureté du matériau (MPa ou GPa)

- Dépendance thermique du coefficient de frottement (Dépend de lubrification)

$$\mu = F_T / F_n$$

F_T = Force de frottement tangentielle (N)

F_n = Force normale (N) [39]

Des résultats de recherche pour un essai de tribologie (pion sur disque) pour l'acier K110 :

Le **tableau II.4** présente l'influence de différents traitements thermiques sur le comportement tribologique de l'acier K110.

Tableau II.4 : Effet de différents procédés de traitement thermique sur le coefficient de frottement et l'usure de l'acier à outil pour travail à froid K110 [2]

La force F_n (N)	Traitement thermique	Dureté HRC	Coef de friction	Largeur de la cicatrice d'usure (mm)
10	Sans traitement	17	0.38	0.195
10	Trempé à l'huile	62	0.12	0.065
10	Normalisation	63	0.18	0.020
10	Trempe martensitique	60	0.23	0.075
10	Trempe austénitique	58	0.25	0.025

Chapitre III : Partie expérimentale

Introduction

Dans cette section, nous faisons le bilan des différentes méthodes expérimentales employées dans l'accomplissement de ce travail.

III.1. Description du matériau utilisé

III.1.1. Données techniques sur l'acier K110 (Z160CDV12)

Le BÖHLER K110 (X155CrMoV12) est un acier lédeburitique contenant 12 % de chrome, identifié par le numéro de matériau 1.2379 (Z160CDV12, SKD11, D2). Ce type d'acier à outils combine les bénéfices des aciers conventionnels à chrome lédéburitique avec ceux des aciers à outils avancés, présente la meilleure association de résistance à l'usure, résistance à la compression et ténacité. C'est pourquoi il est employé dans presque toutes les applications de travail à froid. Son comportement exceptionnel au revenu, couplé à une dureté secondaire maximale notable, autorise aussi l'emploi de revêtements sophistiqués. Il est donc parfaitement approprié pour les outils complexes qui nécessitent une stabilité dimensionnelle et de forme élevée.

L'un des aciers les plus couramment utilisés, peut être soumis à un traitement thermique sur une vaste échelle sans perdre ses excellentes caractéristiques.

Livrer à l'état de recuit doux à max 250 HB.[24]

III.1.2. Composition chimique (% moyen)

Le K110 est un acier destiné aux outils, riche en carbone et chrome, qui est également allié au molybdène et au vanadium.

Tableau III.1 : La composition chimique de l'acier K110 [24]

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
1.55%	0.3%	0.3%	11.3%	0.75%	0.75%

III.1.3. Caractéristiques de l'acier K110 (Z160CDV12)

Il se distingue par :

- Un bon traitement thermique en profondeur.
- Une stabilité de traitement thermique élevée.
- Une excellente trempabilité

On utilise ces derniers dans un état trempé et revenu, et ils se distinguent par des niveaux de dureté élevée à température ambiante (55 à 63 HRC).

L'ajout de molybdène a favorisé une meilleure trempe, permettant ainsi la trempe à l'air, tout en renforçant la résistance au revenu.

L'importante concentration en carbone et en chrome, ainsi que l'ajout de vanadium, ont conféré une remarquable résistance à l'usure grâce à la présence des carbures plus durs et plus stables.

Les problèmes principaux rencontrés lors de l'emploi de ces aciers sont notamment associés

En raison de leur résistance insuffisante à la décarburation et d'une capacité limitée à l'usinage.

L'acier, acquis auprès d'un consortium industriel spécialisé dans les aciers spéciaux (BOHLER). [24]

III.1.4. Applications

Il est conseillé Pour les instruments nécessitant une résistance à l'usure élevée, associée à une ténacité modérée (résistance aux impacts).

Offert dans diverses versions, y compris en finition laminée à chaud, pré-usinée et usinée avec précision.

On peut également le trouver aussi sous la forme des barres creuses et d'anneaux. Par exemple :

Laminage, formage à froid, découpage en poudre, pressage, pièces standardisées (moules, Plaques, goupilles, poinçons), vis et barils, éléments pour l'industrie du recyclage, composants pour les travaux souterrains (forage de puits et autres), cylindres, pièces de laminage des filets.[24]

III.2. Protocole de travail

Pour notre travail on a choisi de faire des traitements thermiques (trempe et revenu) sur des différents échantillons de l'acier k110 (même dimensions et différents traitements).

III.2.1. Le découpage

On a fait une acquisition d'une ronde de l'acier Z160CDV12 de diamètre de 20.5mm et h=5cm à (SFMO MOUSSAOUI/ PRO DISTRIBUTEUR, Boufarik). Puis découper dans une soudure à 5 pièces d'épaisseur de 5mm.



Figure III.1 : Le Découpage

III.2.2. Les traitements thermiques

a) Les conditions de trempe T :

On a fait un petit polissage pour éliminer les résidus de découpage avant le T. Le processus de trempe est réalisé à une température dépassant AC_3 de $900\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nous avons déterminé 1020°C comme température pour l'austénitisation et 30 minutes comme durée de maintien (après la fiche technique de l'acier k110). 3 échantillons refroidis dans l'huile et 1 refroidi à l'air.

b) Les conditions de revenu R :

Nous avons généré un revenu pour un échantillon(R1) et deux revenus pour un autre (R1 et R2) pour les pièces qui son refroidi dans l'huile. Les matériaux soumis à une température de $540\text{ }^{\circ}\text{C}$, La durée de maintien est de 75 minutes pour R1, 60 minutes pour R2 et le refroidissement se fait lentement dans le four pour les deux.



Figure III.2 : Four à moufle de laboratoire Type L (L5/11) Nabertherm

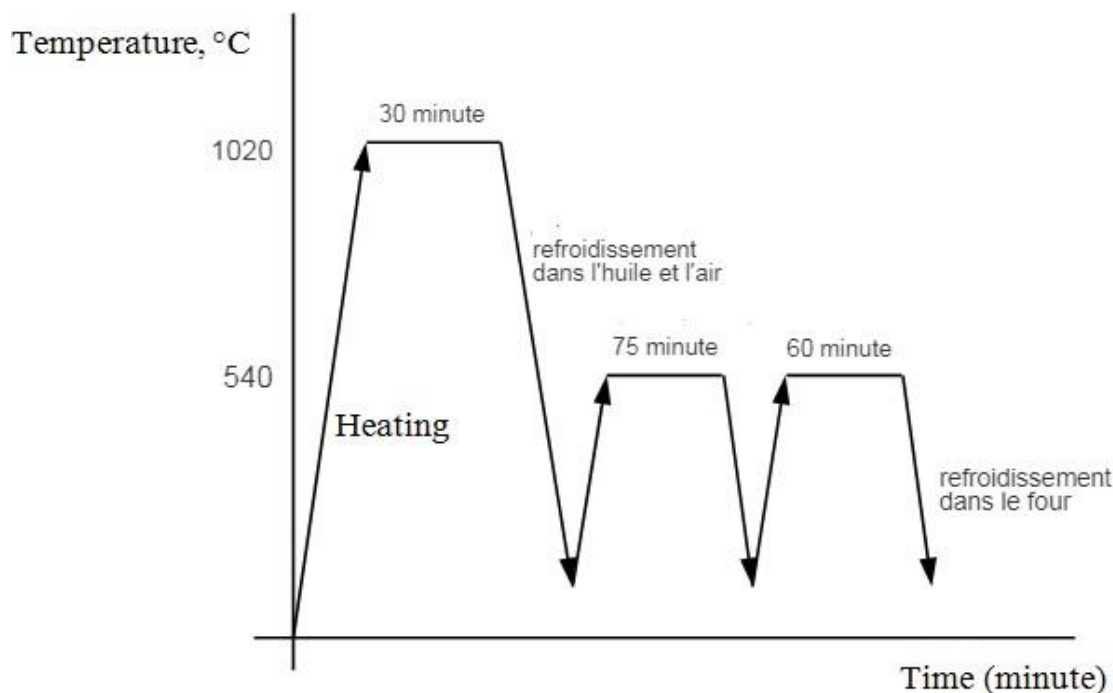


Figure III.3 : les paramètres des traitements thermiques

Nabertherm, un fabricant de premier plan en matière des fours industriels, propose des solutions à la fois standard et personnalisées, comprenant des systèmes complets de traitement thermique dotés d'un contrôle précis et d'une supervision à distance. Grâce à leur technologie novatrice, ils assurent une température constante, une efficacité énergétique et une durabilité maximale. Ils offrent un service à la clientèle adaptée localement tout en étant présents dans le monde entier. Le four à moufle L5/11 (1100°C, 5L) combine efficacité, esthétique et fiabilité, ce qui le rend parfait pour les laboratoires. [40 41]

III.3. La métallographie

a) Le polissage :

Les échantillons sont polis avec du papier à abrasif (grains 60, 80, 180, 240, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500 et 2000) dans le but de supprimer les éraflures avec une polisseuse. Par la suite, les échantillons polis ont été finis à l'aide d'un tissu en velours, avec l'utilisation régulière de l'alumine.

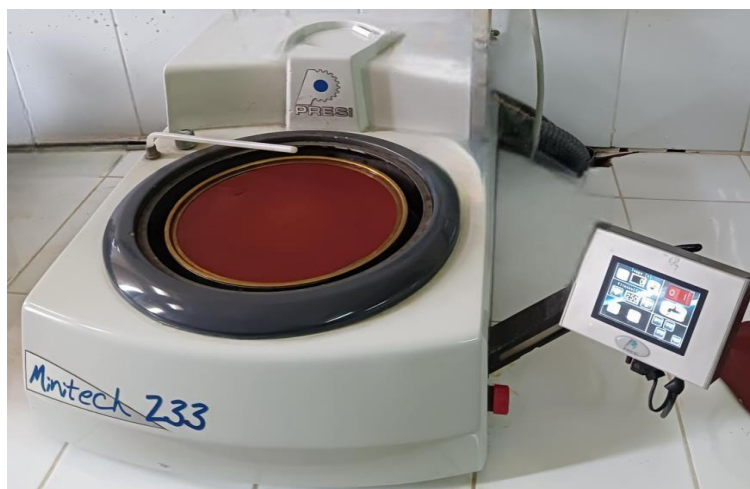


Figure III.4 : polisseuse MINITECH 233

Les polisseuses MINITECH se distinguent par leur solidité, leur puissance et leur fiabilité. Elles sont équipées d'une technologie de pointe qui facilite leur usage et leur maintenance. L'écran tactile (positionnable à gauche ou à droite de la polisseuse) permet la saisie des paramètres tels que la vitesse et le sens de rotation, l'arrosage et le temps.[42]

b) Attaque chimique :

Nos pièces ont subi une attaque chimique avec une solution de Nital à 3 et 5% pour l'analyse microstructurale. Un agent d'attaque récemment préparé, comprenant du Nital (approximativement 3 et 5 ml d'acide nitrique pour 98 et 95 ml d'alcool éthylique respectivement) a été employé pour exposer les microconstituants (les phases et les joints des grains) de l'acier à outils.

c) L'Observation microscopique :

L'examen de la microstructure a été effectué à l'aide d'un microscope optique inversé (Nikon Eclipse LV150N) avec un grossissement de 500 X.



Figure III.5 : Microscope optique (Nikon Eclipse LV150N)

Microscope manuel à tourelle porte-objectifs adapté aux exigences diverses d'observation, d'inspection, de recherche et d'analyse dans une multitude de secteurs industriels. Sa plus grande ouverture numérique et sa distance de travail inégalée assurent une performance optique supérieure et une imagerie numérique de haute qualité. Dimension maximale de l'échantillon : 150 x 150 mm.[43]

III.2.4. Essai de dureté

Le test de dureté sur les échantillons de chaque catégorie a été effectué en utilisant l'appareil de mesure de dureté Vickers (modèle : NEMSIS 9100). Cette tentative a été effectuée en exerçant une pression de 10 kgf, et Les résultats montrent une moyenne de trois mesures.



Figure III.6 : Duromètre NEMESIS 9100

Les duromètres universels NEMESIS 9100 se distinguent par leur précision élevée et leur simplicité d'utilisation, grâce à leur système de contrôle intégré (IMPRESSIONS) et leurs programmes d'essai optimisés qui permettent un gain de temps. Idéaux pour l'évaluation de métaux et plastiques, ils conviennent à des industries rigoureuses telles que l'aérospatiale, l'automobile ou les laboratoires, facilitant des tests polyvalents et performants.[44]

III.2.5. Essai de tribologie

Pour étudier les caractéristiques tribologiques des échantillons, nous avons utilisé un appareil d'essai d'usure (bille sur disque) le tribomètre TRB³. L'essai est réalisé conformément à la norme ASTM G99, en frottant les échantillons (avec un échantillon de 100CR6 comme référence) fixés pendant 25 minutes contre un disque tournant. On a appliqué une charge standard de 10 N tout en maintenant une vitesse de glissement constante de 20cm/s à température ambiante. Le nettoyage avec l'éthanol puis la profolométrie pour mesurer la quantification de l'usure.

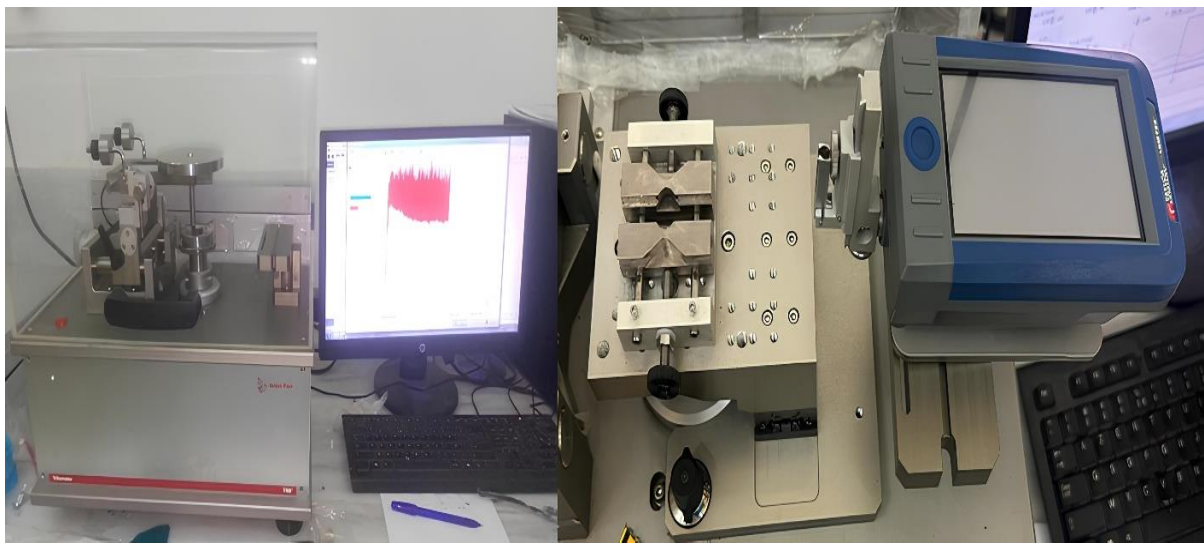


Figure III.7: Tribomètre TRB³ et profilomètre de contact de marque AMETEK Taylor Hobson

Le TRB³ est un outil reconnu à l'échelle internationale pour sa fiabilité dans l'étude et le contrôle de la qualité des matériaux (comme les céramiques, les métaux et les polymères), des lubrifiants, des additifs pour huiles ainsi que des systèmes autolubrifiants.

Anton Paar, qui se consacre à l'innovation en matière d'instrumentation tribologique, participe de manière proactive à des comités internationaux de normalisation tels qu'ASTM G99 et ASTM G133. En accord avec ces standards, le TRB³ assure des tests tribologiques conformes aux pratiques industrielles de premier ordre.[45]

Cette gamme de produits combine une technologie de pointe avec précision et valeur pour garantir la mesure réelle de l'état de la surface en atelier, salle d'inspection ou laboratoire. Portable et flexible, idéale pour mesurer un large éventail de composants, même s'ils sont inaccessibles ou difficiles à déplacer.[46]

Chapitre IV :

Résultats et interprétation

Introduction

Ce chapitre décrit en profondeur les divers résultats obtenus, aussi bien qualitatifs que quantitatifs, lors de l'étude du comportement tribologique et mécanique selon les traitements thermiques appliqués à l'acier à outils pour le travail à froid K110.

IV .1. La microstructure

L'analyse microstructurale met en lumière l'évolution typique des phases de l'acier K110 à travers divers traitements thermiques.

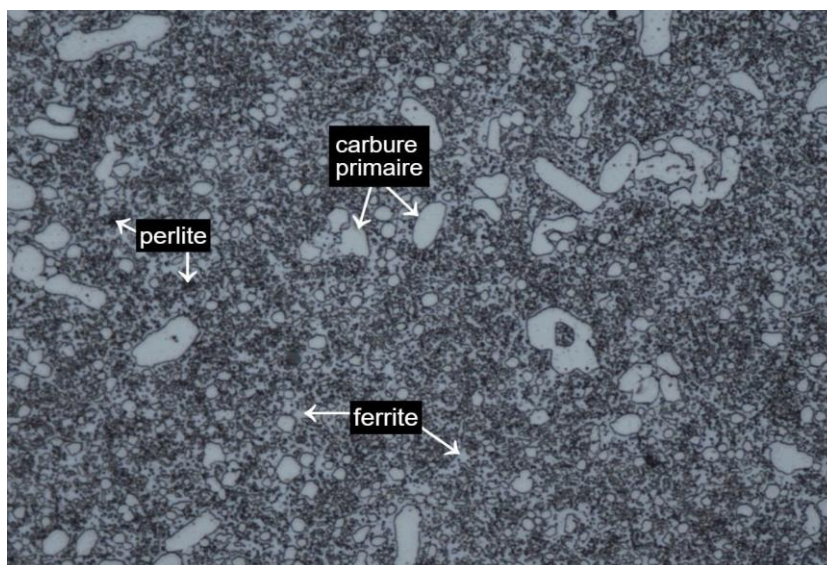


Figure IV.1 : La micrographie de K110 à l'état de recuit

L'échantillon analysé montre la présence de phase de ferrite et de perlite dans l'acier allié K110, résultant du recuit suite à la fabrication de l'acier à outils, une procédure habituelle post-production de l'acier. Le carbure d'alliage, spécifiquement le carbure de chrome, est un carbure primaire qui se forme dès les premières étapes de la fabrication de l'acier Z160CDV12.

La **figure IV.1**. Illustre la phase de ferrite en tant que région claire situé entre les zones de cémentite plus foncées. Les deux phases sont consolidées en une unique phase, les phases de perlite ayant fusionné. La phase blanche, présentant une forme sphéroïdale irrégulière, correspond à la phase de carbure d'alliage. Dans le cas de l'acier K110, il s'agit du carbure primaire de chrome.

Structure à l'état trempé

Après trempe, une structure moins dure en raison de la présence persistante d'une importante quantité d'austénite résiduelle. Le carbure de vanadium est réputé pour sa capacité à résister à la dissolution jusqu'à des températures atteignant 1100°C

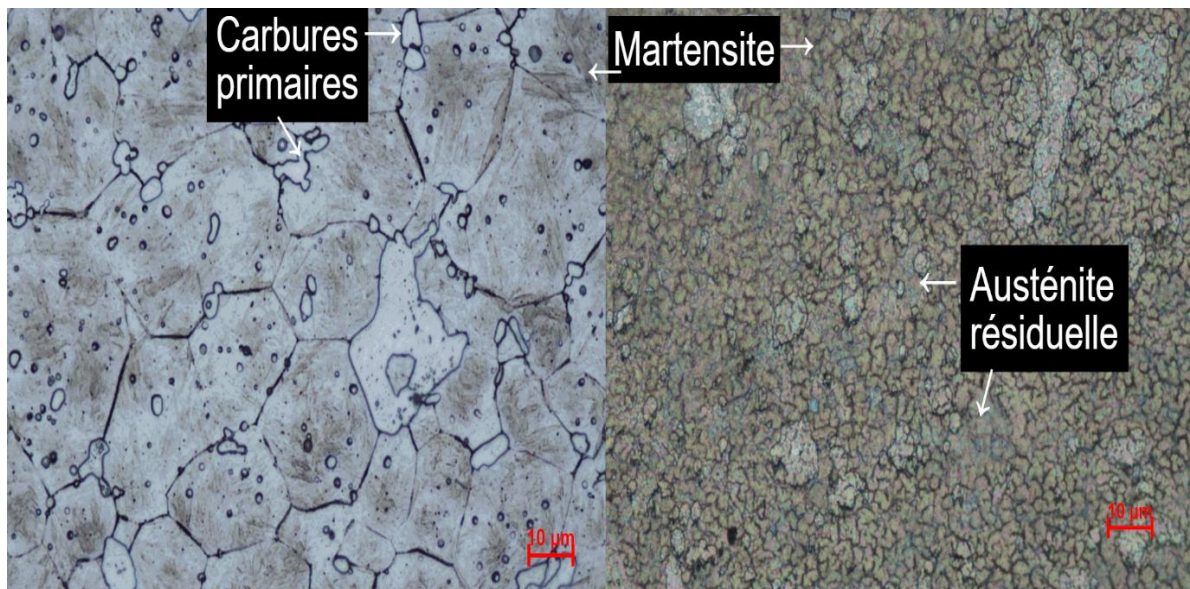


Figure IV.2 : La micrographie de K110 trempé à l'air du Nital 3 % et 5 %

Dans l'échantillon de trempe à l'air, la microstructure de l'acier à outils K110 se transforme pour devenir de la martensite (forme plaques), de l'austénite résiduelle (zones claires), et de carbures de chrome (forme sphéroïde irrégulière) (**figure IV .2**).

Cela est attribuable aux phases de ferrite et de perlite présentes dans l'échantillon brut avant trempe, qui se transforment en austénite lors du processus d'austénisation, puis en martensite et en austénite résiduelle lors de trempe.

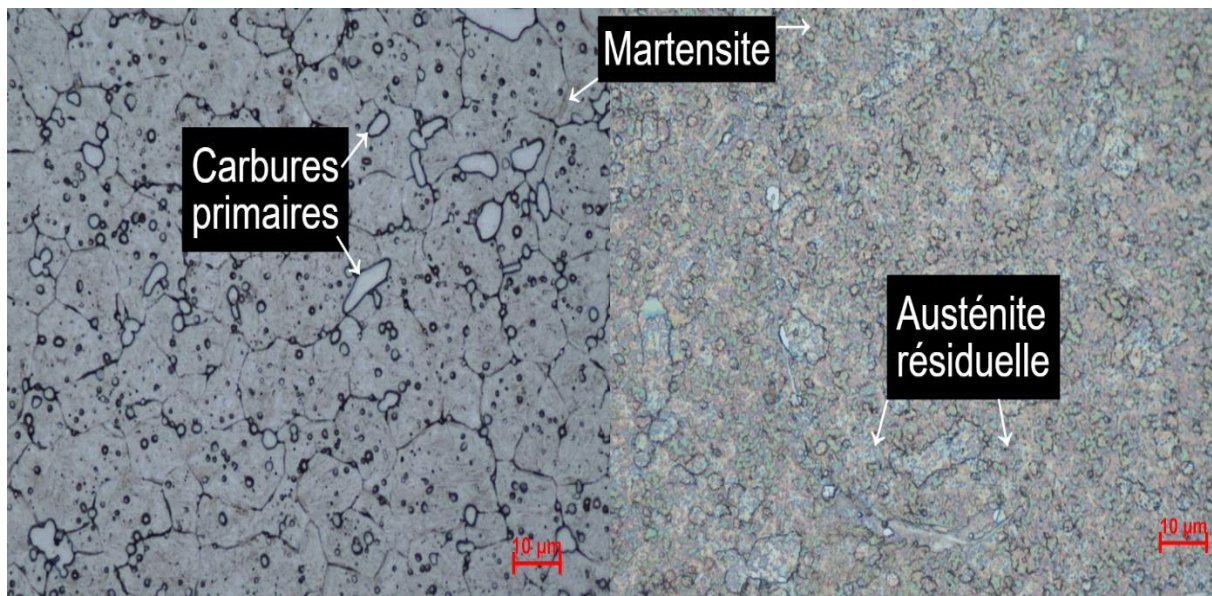


Figure IV.3 : La micrographie de K110 trempé à l'huile du Nital 3 % et 5 %

La **figure IV.3** présente une micrographie (MO) d'un échantillon trempé à l'huile montrant de la martensite fine, d'austénite résiduelle et des carbures de chrome bien dispersés.

Structure à l'état revenu

Les microstructures obtenues après revenu dépendent fortement de la température et de la durée du traitement.

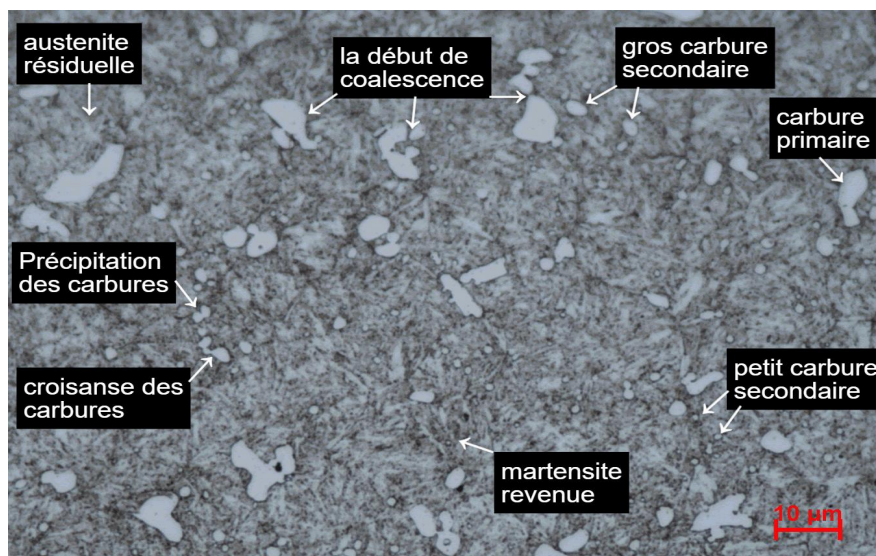


Figure IV.4 : La micrographie de K110 trempé à l'huile et un revenu

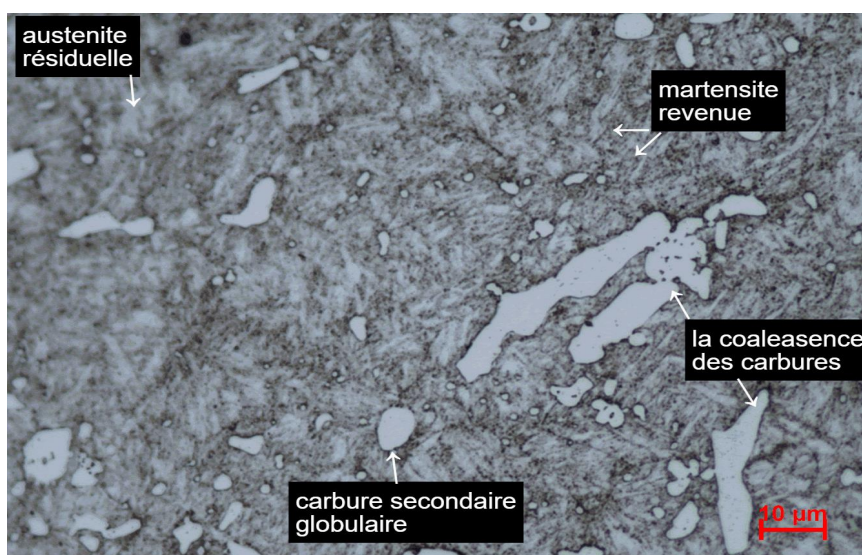


Figure IV.5 : La micrographie de K110 trempé à l'huile et deux revenus

Les échantillons traités par revenu, la microstructure est constituée de martensite revenue accompagnée de deux types des carbures le carbure primaire, et le carbure secondaire.

Les carbures secondaires peuvent être classés en deux catégories selon leur taille : les grands carbures secondaires et les petits carbures secondaires.

Après le processus de revenu, la proportion de martensite et d'austénite résiduelle a diminué. Avec une précipitation, croissanase et début de coalescence des carbures dans l'échantillon traité par un revenu (**figure IV.4**) et une coalescence complète dans le 2 -ème revenu (figure **IV.5**)

Lors du revenu à 540 °C pendant 75 minutes, la diffusion atomique est activée par la chaleur, favorisant la précipitation des carbures, autour des zones enrichies. Avec le temps, ces carbures en croissance se rapprochent par diffusion, puis fusionnent partiellement, formant des agrégats irréguliers souvent laissant des creux et espaces résiduels comme traces de cette union. La petite épaisseur des pièces (5 mm) accélère ces transformations, et le refroidissement lent dans le four prolonge la diffusion, conduisant à une coalescence plus marquée des carbures dans le 1er revenu et complète dans le 2eme revenu (**figure IV.6**).

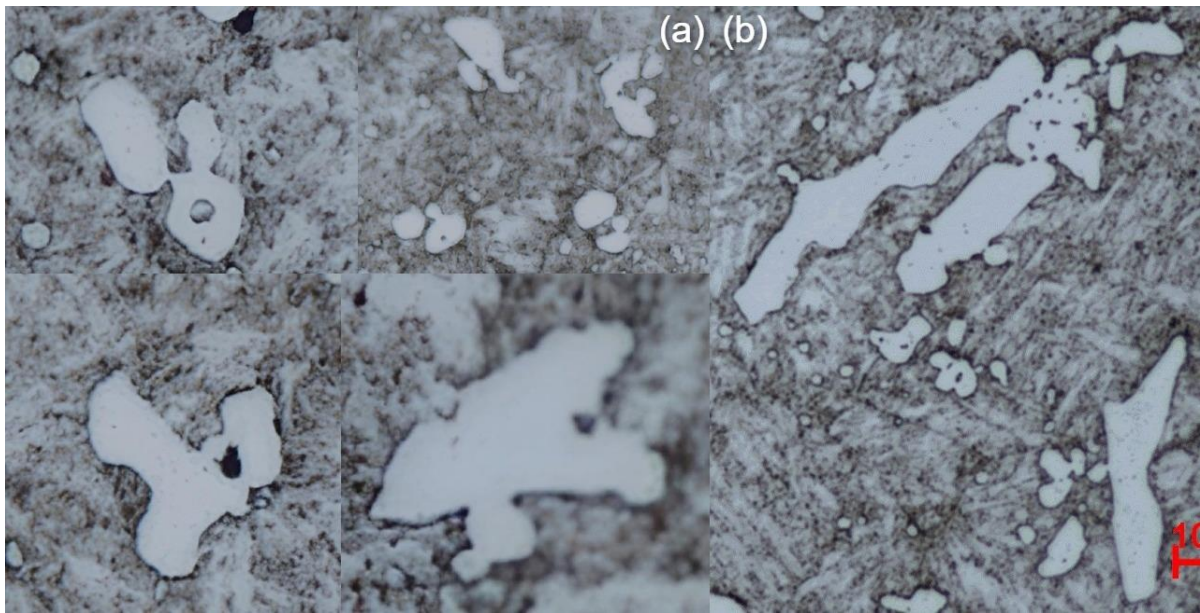


Figure IV.6 : Les carbures coalescés a) le 1er revenu b) le 2eme revenu

REMARQUE :

La microstructure martensitique des échantillons trempés montre une réactivité réduite avec le Nital, nécessitant plus de 60 minutes (Nital 3 %) et 40 minutes (Nital 5 %) contre moins de 30 secondes (Nital 3 %) pour les autres échantillons.

Cet écart s'explique par la présence des carbures de chrome qui résiste l'attaque chimique dans les joints des grains et les phases avec la faible densité des grains et la nature compacte de la martensite.

IV .2. La dureté

Tableau IV.1 : Les résultats de la dureté

Le traitement thermique	À l'état recuit	Trempé à l'air	Trempé à l'huile	Th + revenu1	Th + revenu1 + revenu2
La dureté HV10	260.25	690.55	755.33	502.07	435.61

Les valeurs dureté Vickers (HV10) pour l'acier K110 illustrent l'impact des traitements thermiques sur sa microstructure.

Même si à l'état recuit contient beaucoup de carbures durs, ces derniers sont noyés dans une matrice molle (ferrite + perlite < 200 HV).

La trempe à l'huile donne une martensite plus fine et une bonne dispersion des carbures, ce qui favorise une dureté plus élevée. En revanche, la trempe à l'air forme une martensite en plaques avec plus d'austénite résiduelle et une répartition moins homogène des carbures, entraînant une dureté légèrement plus faible.

Ces constatations confirment les tendances conventionnelles que la dureté diminue après revenu, principalement dû à :

- La transformation de la martensite en martensite revenue (moins durcie).
- La croissance des grains (loi de hall-Petch).
- La coalescence des carbures, qui croissent et réduisent leur effet durcissant (Ostwald ripening).

IV .3. La Tribologie

Le coefficient de frottement

Observation :

La stabilisation du coefficient de frottement entre 0,5 et 0,7 après environ 350 secondes (soit 70 mètres de glissement) est attribuée à la formation dynamique d'un tribofilm d'oxydes nanométriques (Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , Cr_2O_3 , etc.), typique d'un mécanisme d'usure par tribo-oxydation dans les aciers à outils en contact sec. Cependant, cette couche protectrice est régulièrement détruite puis reformée sous l'effet du frottement. Cette dynamique cyclique de formation et de rupture du film d'oxydes entraîne une usure progressive du matériau à long terme, malgré la stabilisation apparente du coefficient de frottement.

A l'état de recuit :

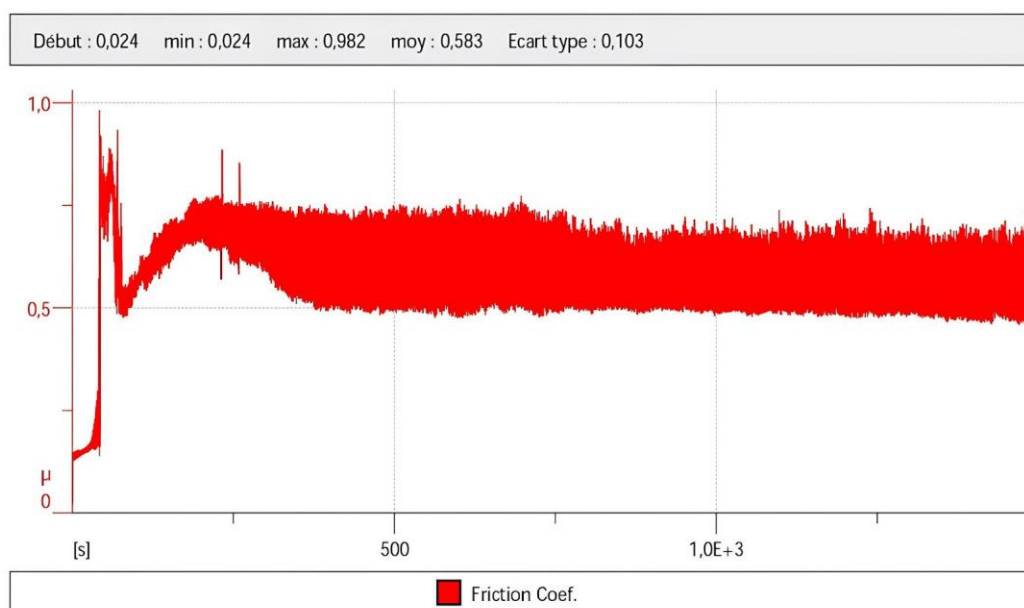


Figure IV.7 : Variation du coefficient de frottement en fonction de temps pour un acier K110

Les informations indiquent une fluctuation considérable du coefficient de frottement pour l'acier K110 recuite, à cause de sa microstructure hétérogène (perlite ductile et carbures durs), après l'analyse tribologique traditionnelle où la perlite ductile favorise l'accroche (haute friction) et les carbures durs réduisent localement la friction. Les aciers recuits, qui présentent une instabilité tribologique, ne sont pas les plus recommandés pour les applications nécessitant un contrôle de la friction.

A l'état de trempe :

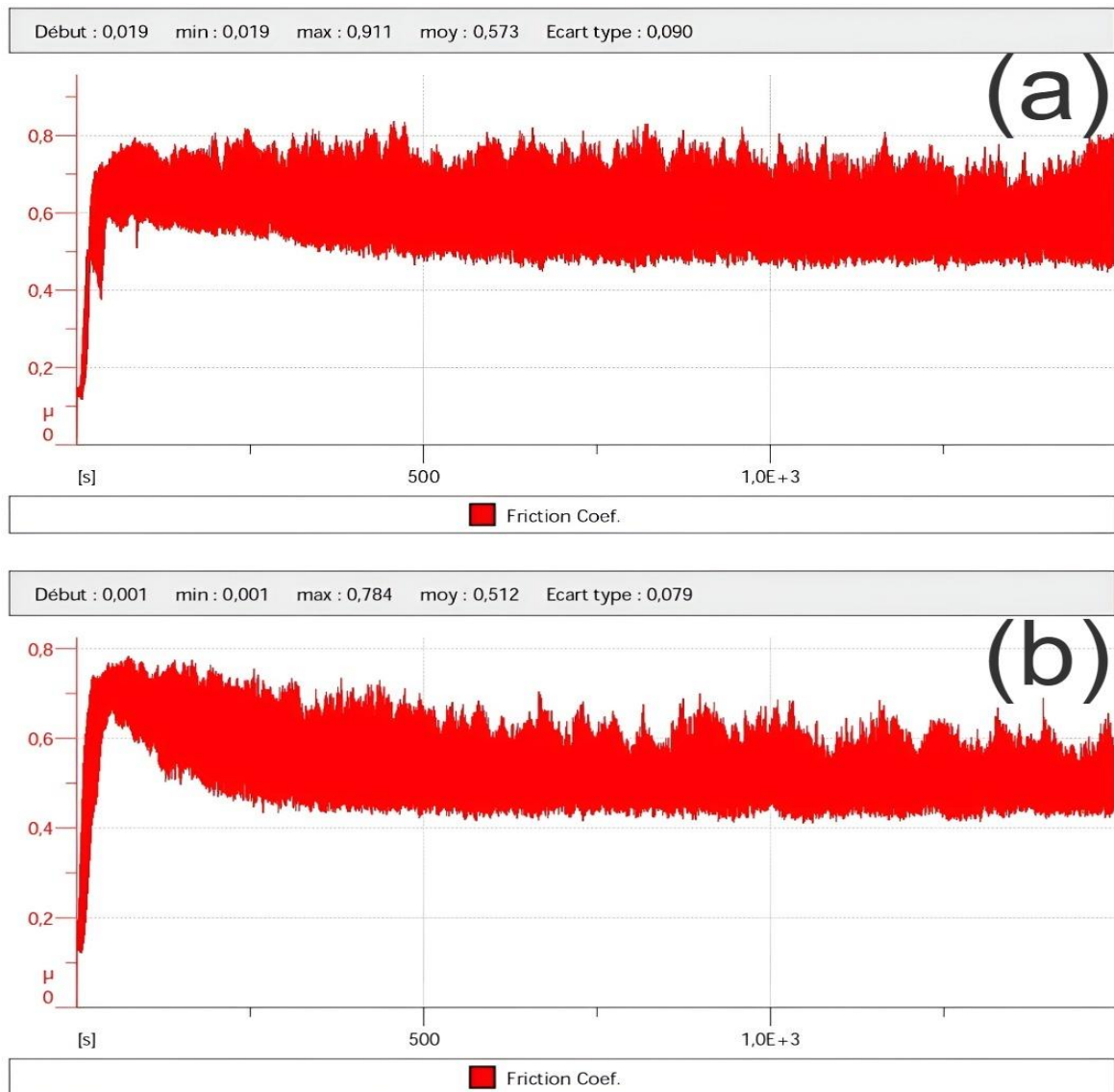


Figure IV.8 : Variation du coefficient de frottement en fonction de temps pour un acier K110 à l'état de trempe a) à l'huile b) à l'air

L'observation microstructurale permet de conclure que la trempe à l'air induit moins de contraintes internes que la trempe à l'huile. Cette faible contrainte favorise la formation progressive et stable de couches protectrices à la surface lors du frottement. En revanche, la trempe à l'huile, en raison des contraintes internes plus élevées, génère des couches protectrices plus rapidement, mais souvent moins stables dans le temps. Ainsi, le coefficient de frottement associé à la trempe à l'air tend à être plus stable à long terme, malgré une formation de couche initialement plus lente.

A l'état de revenu

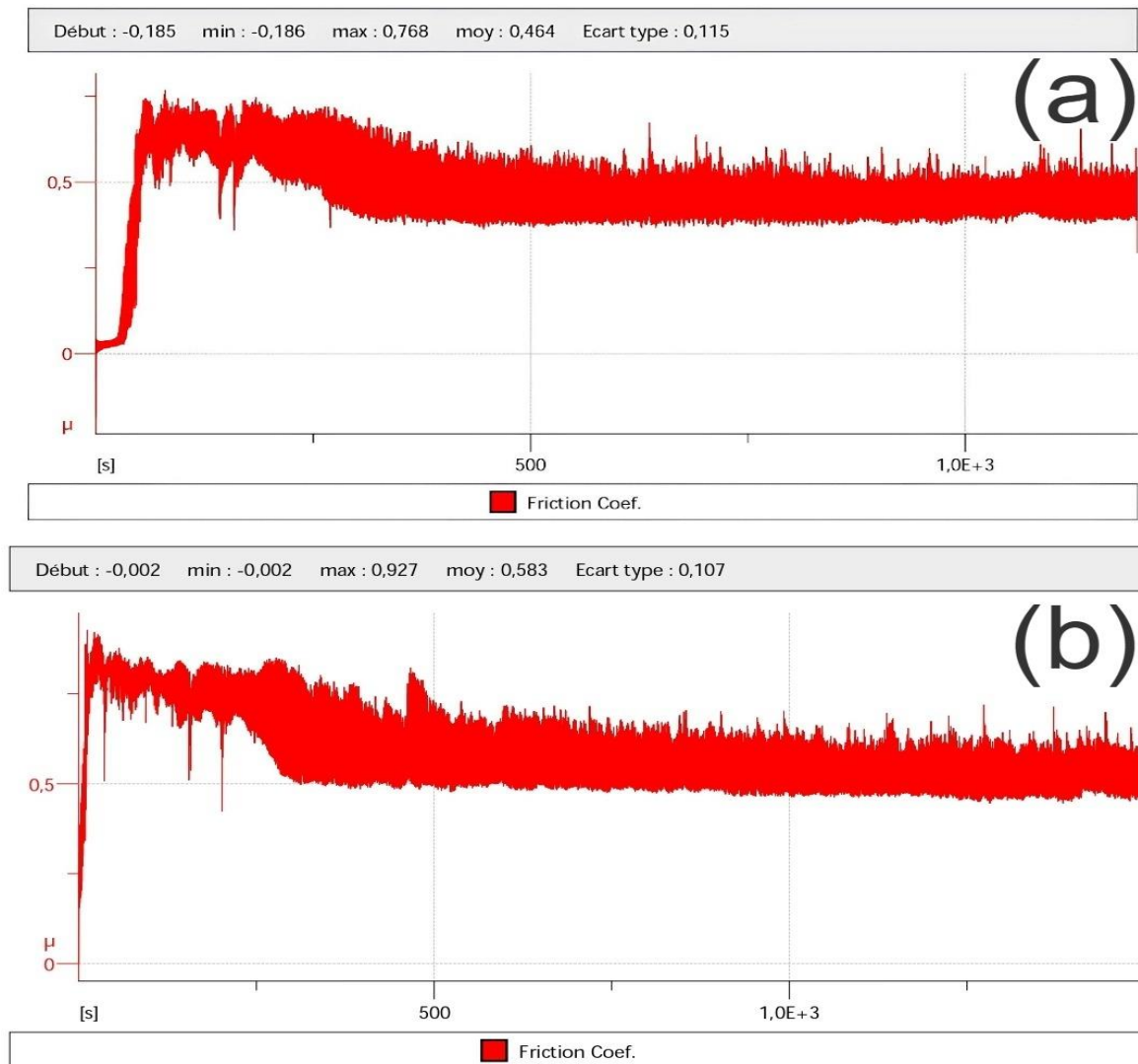


Figure IV.9 : Variation du coefficient de frottement en fonction de temps pour un acier K110 à l'état de revenu a) 1er revenu b) 2ème revenu

L'analyse quantitative confirme les observations microstructurales :

Le K110 à l'état de revenu (**figure IV.9**), présente un comportement tribologique complexe marqué par une forte variation initiale des coefficients de frottement avant stabilisation. Cette phase transitoire révèle l'instabilité microstructurale (martensite revenue, la précipitation, la croissance et la coalescence des carbures).

Le 1er revenu est plus stable que le 2ème car la matrice conserve davantage de chrome, ce qui s'explique par la coalescence des carbures entraînant une migration du chrome vers les carbures, appauvrissant la matrice ce qui rend la formation des couches de chrome protectrice difficile.

La quantification de l'usure

La profilométrie offre une méthode précise pour analyser la relation entre profondeur et largeur des traces d'usure, essentielle pour comprendre et prévenir la dégradation des matériaux sous contraintes mécaniques

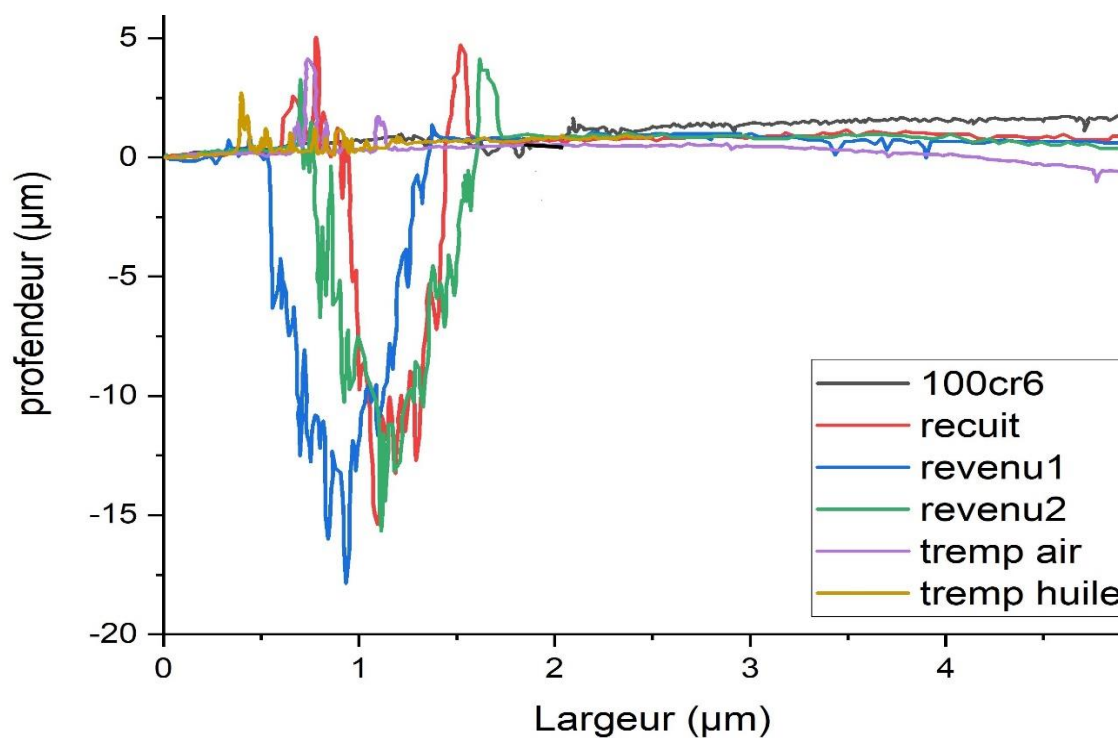


Figure IV.10 : Variation de la profondeur de l'usure en fonction de la largeur pour un acier K110 avec différents traitements thermiques en comparaison avec l'acier 100cr6

Tableau IV.2 : Le volume d'usure selon l'état du matériau

État du matériau	Recuit	Trempe à l'air	Trempe à l'huile	Th + revenu1	Th + revenu1 + revenu2	100Cr6
Volume d'usure mm ³ ± 0,000003	0.000255	0.000008	0.000009	0.000305	0.000265	0.000008

Les mesures de volume d'usure montrent clairement l'impact des différents traitements thermiques sur la résistance à la tribo-oxydation des aciers étudiés.

À l'état recuit, le K110 présente une microstructure hétérogène ferrite-perlite peu dure et facilement déformable, ce qui favorise l'arrachage de matière sous frottement.

Le 100Cr6 et le K110 trempés présentent une excellente résistance à l'usure grâce à leur microstructure martensitique dure, à la présence des carbures de chrome dispersés résistants, ainsi qu'à la formation des couches oxydées protectrices qui limitent le frottement.

À l'état revenu, la coalescence des carbures entraîne une augmentation de la distance entre particules, affaiblissant l'homogénéité de la matrice. Cette dégradation microstructurale réduit la résistance à l'usure, en rendant le matériau plus vulnérable à la dégradation tribo-oxydative, ce qui se traduit par une usure plus marquée.

Ces résultats confirment les analyses microstructurales : la martensite trempée présente la plus grande résistance à la tribo-oxydation, alors que les états revenus perdent cette capacité.

L'augmentation localisée de l'usure s'explique par la formation des carbures grossiers à la suite du revenu.

En conclusion, le volume d'usure dépend à la fois de la dureté et de la stabilité microstructurale, avec une préférence notable pour les traitements de trempe sans revenu et le 100Cr6. Ces observations confirment l'importance de la microstructure et de la composition chimique dans le comportement tribologique des aciers.

Attention : les valeurs positives de profondeur sont les débris de matériau.

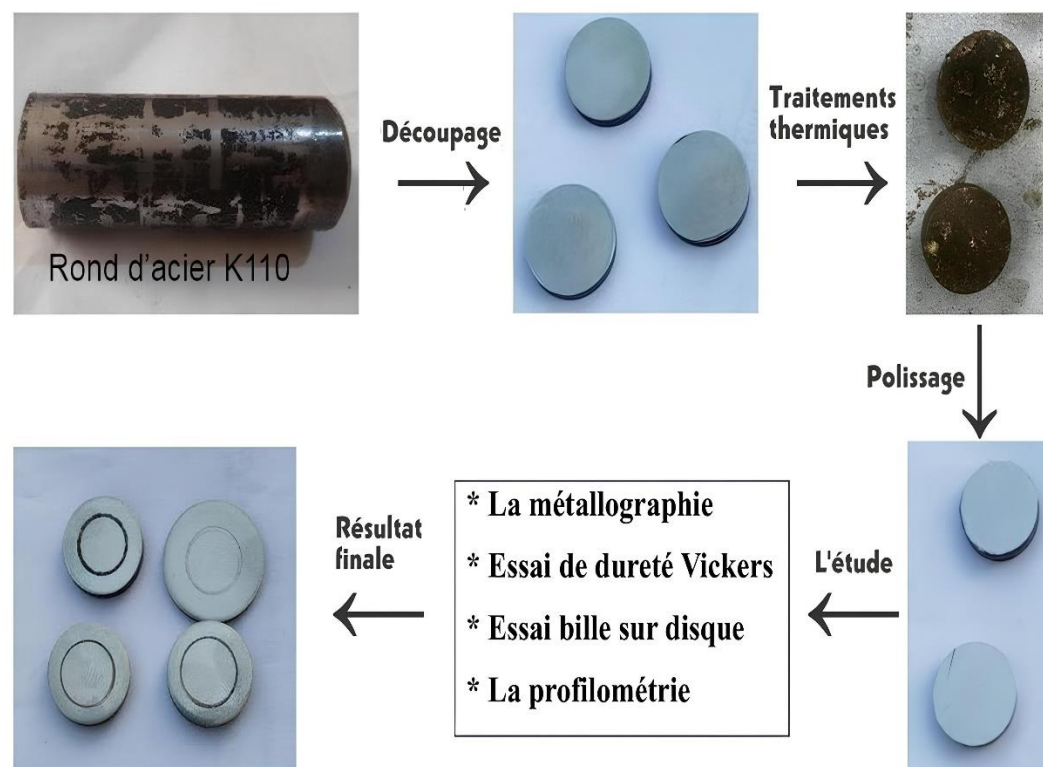


Figure IV.11 : Les étapes de travail

Conclusion finale

Conclusion finale

L'étude menée sur l'acier à outils pour travail à froid, notamment le K110, a permis de mettre en évidence l'influence des traitements thermiques sur leur comportement tribologique, en particulier face à l'usure par tribo-oxydation.

Cette étude a démontré que les paramètres du traitement thermique définie le rôle des carbures dans le K110 :

- Des paramètres contrôler les carbures améliorer les propriétés mécaniques et tribologiques.
- Des paramètres ne sont pas contrôler les carbures va détruire les propriétés mécaniques et tribologiques par la coalescence.

Les références bibliographiques

- [1] Viale, D., Béguinot, J., Chenou, F., & Baron, G. (2002). Optimizing Microstructure for High Toughness Cold-Work Tool Steels. 6th International Tooling Conference, Karlstad University, Suède (pp. 299-318).
- [2] Tawfik, A. H. G., Ibraheem, A. A., Khashaba, M. I., & Ali, W. Y. (2013). Tribological behaviour of heat treated cold work steels. *Journal of the Egyptian Society of Tribology*, 51-61
- [3] Tóth, L. (2023). Effect of heat treatment on the properties of tool steel. *Acta Materialia Transylvanica*, 6(2), 114-120.
- [4] Rehan, M. A. (2019). Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of a 5 wt. % Cr Cold Work Tool Steel. Thèse de doctorat, University West, Suède.
- [5] Bensaada, S. (2001). Elaboration des métaux ferreux. Université de Biskra.
- [6] Loquet, J. N. (2015). Caractérisation métallurgiques et mécaniques de couches.
- [7] Singh, R. (2012). Classification of Steels (Chap. 6).
- [8] Bensaada, S. (2019). Classification des aciers et des fontes. Université de Biskra.
- [9] BENE Inox. (2017). Pourquoi utilise l'acier inoxydable [Fiche technique]. Saint-Priest.
- [10] Bouquet, N. (2014). Étude de la formation des joints soudés par diffusion. Université de Bourgogne.
- [11] Damstahl Stainless Steel. (2020). L'acier inoxydable ferritiques [En ligne]. Disponible sur : www.damstahl.fr/la-connaissance-de-lacier-inoxidable/quest-ce-que-lacierinoxidable/lacier-inoxidable-ferritique (Consulté le 29/04/2020).
- [12] Bensaada, S. (2019). Classification des aciers et des fontes. Université de Biskra.
- [13] Soullignac, P., Bonnefois, B., & Soutif, E. (2007). Chaudronnerie en aciers inoxydables.
- [14] Struers. (2021). Acier à outil [En ligne]. Disponible sur : [HTTPS://WWW.STRUERS.COM/KNOWLEDGE/MATERIALS/TOOL-STEEL](https://www.struers.com/knowledge/materials/tool-steel) (Consulté le 05/05/2021).
- [15] Boom, R., Dancers, O., Van Veen, A., & Kamperman, A. A. (2000). Argon solubility in liquid steel. *Metallurgical and Materials Transactions B*.
- [16] Lévêque, R. (1979). Aciers à outils (M330). *Techniques de l'Ingénieur*.
- [17] Causton, R. J., & Cimino, T. (1998). Machinability of P/M Steels. In G. M. Davidson et al. (Eds.), *ASM Handbook Volume 07 : Powder Metal Technologies and Applications* (pp. 671–680). ASM International.
- [18] Bohler. (S.d.). Fiche technique.
- [19] Christopherson, D., & L'Espérance, G. (2009b). Novel Sinter-Hardening Processes. Canada, Hamilton.
- [20] Clementi, E., Raimondi, D. L., & Reinhardt, W. P. (1967). Atomic screening constants from S.C.F. functions, II. Atoms with 37 to 86 electrons. *Journal of Chemical Physics*.
- [21] Clementi, E., Raimondi, D. L., & Reinhardt, W. P. (1967). Atomic screening constants from S.C.F. functions, II. Atoms with 37 to 86 electrons. *Journal of Chemical Physics*, *47*(4), 1300–1307. <https://doi.org/10.1063/1.1712084>
- [22] Cullity, B. D. *Elements of X-ray diffraction* (2nd ed.). Addison-Wesley.

- [23] Habireche, M. (2009). Amélioration de la longévité et du comportement mécanique d'un acier à outil pour travail à froid. Mémoire de magistère, Université de Saad Dahleb de Blida.
- [24] Böhler Uddeholm. (2023). Böhler K110 – Fiche technique : Acier à outils à haute teneur en carbone et en chrome pour travaux à froid [Fiche technique]. Böhler Uddeholm.
<https://www.boehler-uddeholm.com>
- [25] voestalpine Böhler Edelstahl. (2013, 10 avril). K110 FSP [Fiche technique]. Scribd.
<https://fr.scribd.com/document/135168871/K110FSp>
- [26] Al-Qawabah, S., Mostafa, A., Al-Rawajfeh, A., & Al-Qawabeha, U. (2020). Effect of Heat Treatment on the Grain Size, Microhardness and Corrosion Behavior of Cold-Working Tool Steels AISI D2 and AISI O1. *Materials and Technologies*, 785-790.
- [27] Singh, K., Khatirkar, R. K., & Sapate, S. G. (2015). Microstructure evolution and abrasive wear behavior of D2 steel. *Journal of Materials Research and Technology*.
- [28] Mochtar, M.A., Putra, W.N., & Abram, M. (2023). Effect of Tempering Temperature and Subzero Treatment on Microstructures, Retained Austenite, and Hardness of AISI D2 Tool Steel. *Journal of Materials Science*. Universitas Indonesia
- [29] (s. d.). Fiche 3 : Les types de textes. Metal. <https://metal.ccdmd.qc.ca/fiches/3>
- [30] Hassan, A., & Jawad, Q. A. (2015, May). Experimental study of the effect of austenitizing temperature and multiple tempering on the microstructure of AISI 410 martensitic stainless steel. *The Iraqi Journal for Mechanical and Material Engineering*
- [31] Uddeholm. (2024, mai). Heat treatment [Fiche technique]. Uddeholm.
<https://www.uddeholm.com/app/uploads/sites/241/2024/05/Tech-Uddeholm-Heat-treatment-EN.pdf>
- [32] Azab Elghazaly, S. (2023). Innovations in Cold Work Tool Steels - Research and Development. *International Journal of Materials Technology and Innovation*, 64-73
- [33] Muhammed, M., Javidani, M., Heidari, M., & Jahazi, M. (2023). Enhancing the tribological performance of tool steels for wood-processing applications : A comprehensive review. *Metals*, 13(8)
- [34] Osunbunmi, I.S. et al. (2018). Effect of Heat Treatment on the Mechanical and Microstructural Properties of a Low Carbon Steel. *Proceedings of the International Conference of Mechanical Engineering* (pp. 346-354).
- [35] Elmashai, K. A., Belhaj, N. A., Alqonsoul, M. M., & Keshla, R. A. (2023). Effect of heat treatment on mechanical properties of D2 tool steel. *International Science and Technology Journal*, 23, The Libyan Higher Technical Center for Training and Production, University of Zawia Faculty of Engineering.
- [36] Chaussin, C., & Hilly, G. (1972). *Métallurgie, élaboration des métaux*. Dunod.
- [37] Digges, T.G., Rosenberg, S.J., & Geil, G.W. (1966). *Heat Treatment and Properties of Iron and Steel*. National Bureau of Standards Monograph 88. US Department of Commerce.
- [38] Steel Foundry. (N.d.). General information of heat treatment for steel castings.
<https://www.steel-foundry.com/fr/news/general-information-of-heat-treatment-for-steel-castings/>
- [39] Bensaada, S., & Bouziane, M. T. (2017). *Tribologie, principes et matériaux*. Éditions universitaires européennes.

- [40] Fisher Scientific. (n.d.). Nabertherm. <https://www.fishersci.fr/fr/fr/brands/L6AJNIA6/nabertherm.html>
- [41] Lustiner. (n.d.). Four à moufle de laboratoire T 1100°C P 2400 W Vol 5 litres Type L Nabertherm. <https://www.lustiner.com/Articles/1048119/Four-a-moufle-de-laboratoire-T-1100>
- [42] Presi. (n.d.). Minitech 233. <https://www.presi.com/en/product/minitech-233/>
- [43] Nikon. (n.d.). *Upright microscope Eclipse LV150NA/LV150N*. <https://industry.nikon.com/en-gb/products/industrial-microscopy/industrial-microscopes/upright-eclipse-lv150na-lv150n/>
- [44] Innovatest Europe. (n.d.). NEMESIS 9100. <https://www.innovatest-europe.com/fr/produits/nemesis-9100/>
- [45] Anton Paar. (n.d.). *TRB3 tribomètre pion-disque*. <https://www.anton-paar.com/be-fr/produits/details/trb3-tribometre-pion-disque/>
- [46] Taylor Hobson. (s.d.). Surface Profilomètres. <https://www.taylor-hobson.fr/products/surface-profilers> Consulté le 25 juin 2025

APPENDICE A

Eléments chimiques

Fe : Fer.
C : carbone.
Si : silicium.
Mn : manganèse.
Cr : chrome.
Mo : molybdène.
P : phosphore.
W : tungstène.
V : vanadium.
Ni : nickel.
Mg : magnésium

Composes et phases

M₃C : cémentite.
M₇C₃ : carbure spéciaux.
 α : ferrite.
 γ : austénite.

Abréviation

TRC : transformation en refroidissement continu.
TTT : transformation température temps.
V_c : vitesse critique de trempe.
M_s : début de transformation martensitique.
M_f : fin de transformation martensitique.
HRC : dureté Rockwell C.
Z : acier fortement allié (tel que Z200C12 et Z160CDV12).
HV : dureté Vickers.
HV10 : micro dureté Vickers sous charge 10 kgf.
ISO : norme internationale.
ASTM : norme américaine.
EN : norme européenne

Unité de Mesure

°C : degré Celsius
°F : degré Fahrenheit
mm : millimètre
Kg ; kilogramme
% : pourcentage