



FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT
DEPARTEMENT DE METALLURGIE ET GENIE DE MATERIAUX

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE	SCIENCE ET TECHNOLOGIE
FILIERE	MÉTALLURGIE
OPTION	GENIE METALLURGIQUE

THEME

Etude des causes de dégradation prématurée d'un marteau de concassage fabriqué en acier riche en chrome

Présenté par:

Mr. SAKER Akram

Dirigé par:

Pr. Boudebane Said

Jury de soutenance:

- | | | | |
|----------------------|------------|-----|-----------------------------|
| - Boudebane Said | Président, | Pr, | Univ. Badji Mokhtar- Annaba |
| - BACCOUCHE Mostefa | Examineur, | Pr, | Univ. Badji Mokhtar- Annaba |
| - Bouras Leila | Examineur, | Dr, | Univ. Badji Mokhtar- Annaba |
| - MERAKEB Noureddine | Examineur, | Dr, | Univ. Badji Mokhtar- Annaba |

Promotion : juin 2018

Remerciement

Nous remercions Dieu de nous avoir donné la force de mener à bien ce modeste travail.

Nous remercions aussi tous ceux qui nous ont aidé, de près ou de loin pour l'élaboration de ce projet notamment nos parents qui ont consacré leur existence à bâtir le nôtre, par leur amour, patience soucis et affection.

*Je tiens à exprimer profondément et sincèrement mes remerciements et ma reconnaissance au **Pr .Boudebane Saïd**, pour m'avoir encadré dans les meilleures conditions, pour ces judicieux conseils et pour la confiance qu'il m'a témoignée.*

*J'exprime mes vifs remerciements au jury composé de : Président **Pr. BACCOUCHE Mostefa** et aux membres **Dr. Bouras Leïla, Dr. MERAKEB Noureddine** d'avoir bien voulu accepter d'examiner mon travail de fin d'étude.*

*Je remercie chaleureusement le **Pr Bouhamla khadidja** pour les conseils et leur aide qui m'était précieuse, et aussi ma profonde gratitude à tous les enseignants qui sans eux, nous serions par arrivés à ce niveau.*

*Un grande merci à **LAAMARI Sihem, Lemboube Samia***

Enfin, merci à ma famille et enfin mes amis sans oublier les étudiants de ma promo pour leurs encouragements et leur soutien durant ces longues années.

[Tapez un texte]

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à ma très chère mère qui m'a encouragé et veillé à mon succès dans mes études.

Sans oublier le soutien indéfectible de mon père durant toutes mes années d'étude.

Finalement, à ma sœurs Hadile sara rima houssem et à toute ma famille pour leur aide et encouragement toutes ces années d'études, et à mes amies rami, mabrouk, et nounou,

Sans oublier les étudiants de ma promo, pour leurs encouragements, et leur soutien durant ces longues années.

Je vous aime

SOMMAIRE

CHAPITRE.I.

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIE

Introduction générale.....	1
I.1 Définition d'un acier.....	2
I.2 Les différentes classes d'aciers.....	2
I.2.1 Aciers non alliés et aciers alliés.....	3
I.2.2 Aciers de qualité	4
I.2.3 Les aciers spéciaux.....	5
I.2.4 Aciers inoxydables	6
I.2.5 Aciers à outils.....	6
I.3 TRAITEMENT THERMIQUE DES ACIERS.....	7
I.3.1 l'Austénitisation	8
I.3.2.Trempe.....	13
I.3.3.Revenu.....	16
I.3.4.Recuit.....	18
I.4.DETERIORATION DES PIECES PAR USURE.....	20
I.4.1.Définition.....	20
I.4.2. Mode d'usure.....	21
I.4.2.1.Usure par abrasion.....	21
I.4.2.2.Usure par Erosion.....	23
I.5.1. introduction.....	24
I.5.2.L'acier Hadfield.....	25

[Tapez un texte]

I.5.2.1 composition chimique.....	25
I.5.2.2.Caractérisation mécanique.....	28
I.5.2.2.1.comportement mécanique durant l'essai de traction.....	28
I.5.2.2.2.Mécanismes de l'écroutissage.....	30
I.5.2.2.3.Dureté.....	31

CHAPITRE.II.

II.MATERIAUX ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES.....	33
II.1. Partie technologique	33
II.1.1.Définition.....	33
II.1.2.Types de concasseur.....	34
II.2.La composition chimique.....	38
II.3. Etude métallographique.....	38
II.3.1. Préparation des échantillons.....	38
II.3.2. Observation.....	40
II 4 Essai de dureté.....	40
II.5.Essai d'usure.....	41
II.5.1.Usure par frottement.....	41
II.6. Traitement thermique.....	42

CHAPITRE.III.

III Résultat et discussions.....	45
III.1Expertise de la pièce endommagée	45
III.1.2 confirmation de la composition chimique	47

[Tapez un texte]

III.1.3 Analyse métallographique.....	48
III.1.4.Microstructures de l'acier exploité après déférent traitements.....	52
III 1 4 La dureté.....	64
Bibliographie.....	65
Liste des figures.....	66
Liste des tableaux.....	66
Conclusion	67

Introduction générale

Les matériaux durs occupent une place prépondérante dans le processus de traitement des matériaux dans les industries minières, métallurgiques et autres. Ils sont souvent sollicités pour la confection des pièces maîtresses des concasseurs et broyeurs industriels de tout genre. Parmi ces aciers, on retrouve les aciers Harfield contenant des % élevés de Mn, en présence de carbone. D'autres aciers martensitiques à haute teneur en C et Cr peuvent également répondre aux exigences recherchées par les conditions de travail des marteaux de concasseur, et mâchoires de broyeur et autres.

Cependant, l'élaboration des ces aciers fortement alliés nécessite une attention particulière du fait des risques de formation de structures fortement hétérogènes qui, dans la majorité des cas, diminuent sensiblement les propriétés de ces aciers.

L'objet du présent travail est dans ce cadre et porte sur « l'étude des causes de dégradation prématurée d'un marteau de concassage fabriqué en acier au chrome ».

La recherche de ces causes a permis d'avoir une vision plus claire quant à l'amélioration de la qualité de l'acier et l'optimisation des paramètres de traitements thermiques. L'aspect inclusionnaire lors de l'élaboration de cet acier doit faire, à l'avenir, l'objet d'une attention particulière.

Ces résultats sont résumés dans une conclusion finale avec des recommandations pratiques

I. RECHERCHE BIBLIOGRAPHIE

I.1 Définition d'un acier :

Selon le dictionnaire ROBERT, un acier est un « alliage de fer et de carbone (moins de 1,5 %) auquel on donne, par traitement mécanique ou thermique, des propriétés variées (malléabilité, résistance...) ».

Selon la norme NF EN 10020 (qui en juin 1989 a remplacé la norme NF A 02-025), « acier un matériau dont le fer est l'élément prédominant, sa teneur en carbone est généralement inférieure à 2 % et il contient d'autres éléments ; un nombre limité d'aciers au chrome peut avoir une teneur en carbone supérieure à 2 %, mais cette valeur de 2 % est la teneur limite courante qui sépare l'acier de la fonte ».

À la lecture de ces deux définitions, on constate que la limite supérieure de la teneur en carbone des alliages Fe-C susceptibles de s'appeler des aciers (par différence avec les fontes) est délicate à préciser. C'est la raison pour laquelle il peut être préférable d'adopter un point de vue plus métallurgique en prenant en compte la différence intervenant lors de la solidification de ces alliages.

La solidification d'une fonte s'achève par une réaction eutectique qui inclut la précipitation de carbure de fer et/ou de graphite [1].

I.2 Les différentes classes d'aciers :

Les familles d'aciers sont classées en deux critères :

A- La composition chimique : nature et teneur des éléments d'alliage, aciers non alliés ($\leq 1\%$ d'éléments d'alliage), aciers peu alliés (teneur de chaque éléments d'alliage $\leq 5\%$), aciers très alliés.

B- Propriétés d'usage ou qualité : aciers de qualité, aciers spéciaux, (aciers d'usage général, aciers de construction mécanique, aciers pour appareils à pression, aciers à outils, aciers inoxydables).

C'est ainsi que la norme NF EN 10020 distingue selon des classes de qualité définies dans le Tableau I 1

Aciers	Non alliés	Alliés
De qualité	Aciers de qualité non alliés	Aciers de qualité alliés
Spéciaux	Aciers spéciaux non alliés	Aciers spéciaux alliés
Inoxydable		Aciers inoxydables

Tableau I 1 Les différentes classes d'aciers [1]

I.2.1 Aciers non alliés et aciers alliés

Pour définir ces 2 classes d'aciers, il faut prendre en compte :

- pour un élément d'alliage autre que Mn, la teneur minimale imposée pour l'analyse de coulée ou 70 % de la teneur maximale imposée si seule cette dernière est fixée;
- pour le manganèse, la teneur minimale imposée pour l'analyse de coulée ou la teneur maximale imposée si seule cette dernière est fixée (la limite prévue au tableau suivant est alors portée à 1,80 %).

Les limites des teneurs en éléments d'alliage qui séparent le domaine des aciers non alliés du domaine des aciers alliés sont indiquées dans le Tableau : II.2. Un acier est considéré comme allié dès qu'une de ces limites est atteinte.

Élément spécifié	Limite %
Al	0,30
B	0,008
Cr	0,30
Cu	0,40
Mn	1,65(2)
Mo(1)	0,08
Nb(2)	0,08
Ni(1)	0,30
Si	0,60
Ti(2)	0,05
V(2)	0,10
W	0,30
Zr	0,05
Autres éléments(C S P N...)	0,05

Tableau I 2 Les limites des teneurs en éléments d'alliage

(1) et (2) lorsque ces éléments sont spécifiés par 2 ou 3 ou 4 la valeur limite de la somme est égale à 70 % de la somme des valeurs individuelles. (3) Si Mn est défini par un maximum la limite est 1,80

I.2.2 Aciers de qualité

Les aciers de qualité sont des aciers pour lesquels il existe, par exemple, des exigences de propriétés spécifiées de ténacité, de grosseur de grain et/ou de formabilité.

A- Aciers de qualité non alliés Tous les aciers non alliés qui ne sont pas des aciers spéciaux.

A.1 Aciers au carbone pour appareils à pression

Aciers de qualité non alliés (Fe/C ou Fe/C/Mn) auxquels il est demandé de retrouver leur structure d'emploi par normalisation (et éventuellement revenu) après mise en forme à chaud (à l'état austénitique). Ces aciers doivent satisfaire à des exigences particulières relatives à leur résistance à la rupture fragile et, lorsqu'ils sont employés à température supérieure à l'ambiante, à leur limite d'élasticité à chaud et à leur tenue au fluage .

A.2 Aciers pour emboutissage et pliage à froid

Aciers de qualité livrés en produits plats auxquels il est demandé de présenter des propriétés particulières de ductilité, d'emboutissage et d'état de surface. En général, les teneurs en éléments interstitiels de ces aciers sont réduites le plus possible (sauf parfois en phosphore ajouté pour augmenter la limite d'élasticité). Parmi ces aciers, on peut classer les aciers pour emballages, aciers de qualité auxquels, outre l'aptitude à l'emboutissage, on demande une propreté inclusionnaire particulière et, dans certain cas, une protection spécifique contre la corrosion (fer blanc et fer chromé notamment).

B- Aciers de qualité alliés

Aciers qui contiennent des éléments d'alliage mais ne sont pas, en général, destinés à un traitement thermique. Font partie de cette catégorie :

- des aciers à grains fins soudables de construction métallique;
- des aciers pour tôles magnétiques;
- des aciers pour rails, palplanches ou cadres de mine;

- des aciers en produits plats destinés à un formage à froid sévère et contenant des éléments d'affinement du grain tels que B, Nb, Ti, V et/ou Zr;
- des aciers ne contenant comme élément d'alliage que Cu;
- des aciers dits « dual phase » (aciers biphasés ferritiques avec 10 à 35 % de martensite) [1].

I.2.3 Les aciers spéciaux :

Les aciers spéciaux présentent, par rapport aux aciers de qualité une plus grande pureté, notamment vis-à-vis des inclusions non métalliques. Ils sont généralement destinés à un traitement thermique et se caractérisent par une réponse régulière à ce traitement.

A- Aciers spéciaux non alliés : Font partie de cette catégorie : – des aciers avec garantie de résilience à l'état trempé et revenu; – les aciers avec garantie de réponse aux traitements thermiques; – des aciers à teneur faible en inclusions; – des aciers à teneur en S et P ne dépassant pas 0,020 % à l'analyse sur coulée et 0,025 % à l'analyse sur produit; – des aciers dont la résilience KV en long à – 50 °C est supérieure à 27 J sur éprouvettes prélevées en long et 16 J sur éprouvettes prélevées en travers; – des aciers pour réacteurs nucléaires avec $Cu \leq 0,10 \%$, $Co \leq 0,05 \%$ et $V \leq 0,05 \%$; – des aciers ferrito-perlitiques micro-alliés au V et/ou Nb dont la teneur en carbone n'est pas supérieure à 0,25 %; – des aciers pour armature de précontrainte du béton[1].

B- Aciers spéciaux alliés : Tous les aciers alliés qui ne sont ni des aciers de qualité ni des aciers inoxydables. Font partie de cette catégorie : – les aciers de construction mécanique; – certains aciers soudables à grains fins pour appareils à pression; – certains aciers résistant au fluage; – les aciers pour roulement; – les aciers à outils et les aciers à coupe rapide; – des aciers à propriétés physiques spéciales.

I.2.4 Aciers inoxydables : On appelle aciers inoxydables des aciers qui résistent à la corrosion atmosphérique et à la corrosion électrochimique Les aciers inoxydables sont des aciers contenant au minimum 10,5 % de chrome et au maximum 1,2 % de carbone (pour éviter la précipitation de carbures de chrome). Bien qu'un certain nombre tels que Mo, Cu, Si, Ti ,Nb , etc., soient ajoutés pour améliorer la tenue a la corrosion ou les propriétés

mécaniques, l'essentiel des propriétés des aciers inoxydables est lié à la connaissance des diagrammes de phases et des diagrammes TRC des alliages ternaires Fe-C-Cr et quaternaires Fe-C-Cr-Ni.

I.2.5 Aciers à outils :

I.2.5.1 Généralités sur les aciers à outils Ces aciers sont utilisés dans la fabrication d'outils destinés ; □ soit à la mise en forme d'autres matériaux avec ou sans enlèvement de matière ; □ soit à la préhension ou au mesurage d'objets. La diversité des problèmes posés dans ces domaines conduit à l'existence d'un très grand nombre de nuances d'aciers à outils [2].

A- Propriétés générales d'emplois :

- Dureté la plus élevée possible, permettant une grande résistance aux déformations lors du travail par enfoncement, pénétration ou cisailage.
- Ténacité élevée permettant de supporter des contraintes élevées sans rupture brutale, caractéristique souvent complétée par une bonne résistance aux chocs répétés.

B- Propriétés de mise en œuvre :

- Bonne trempabilité afin d'obtenir des duretés homogènes et élevées sur de grandes épaisseurs sans déformation excessives.
- Résistances convenables à la surchauffe, au grossissement de grain, à la décarburation.
- Résistance à l'adoucissement au revenu.
- Bonne usinabilité et bonne aptitude à la rectification [3].

I.2.5.2 Classification des aciers à outils : Il est intéressant de classer ces aciers selon la température atteinte par la partie active en cours de service, c'est-à-dire d'utiliser comme critère la résistance à l'adoucissement en fonction de la température (ou la dureté à chaud). La norme NF EN ISO 4957 range les aciers en quatre classes ;

A- Aciers non alliés pour travail à froid

B- Aciers alliés pour travail à froid

C- Aciers alliés pour travail à chaud

D- Les aciers rapides : Les éléments d'alliage de base sont W, Mo, V, Cr

I.3 TRAITEMENT THERMIQUE DES ACIERS :

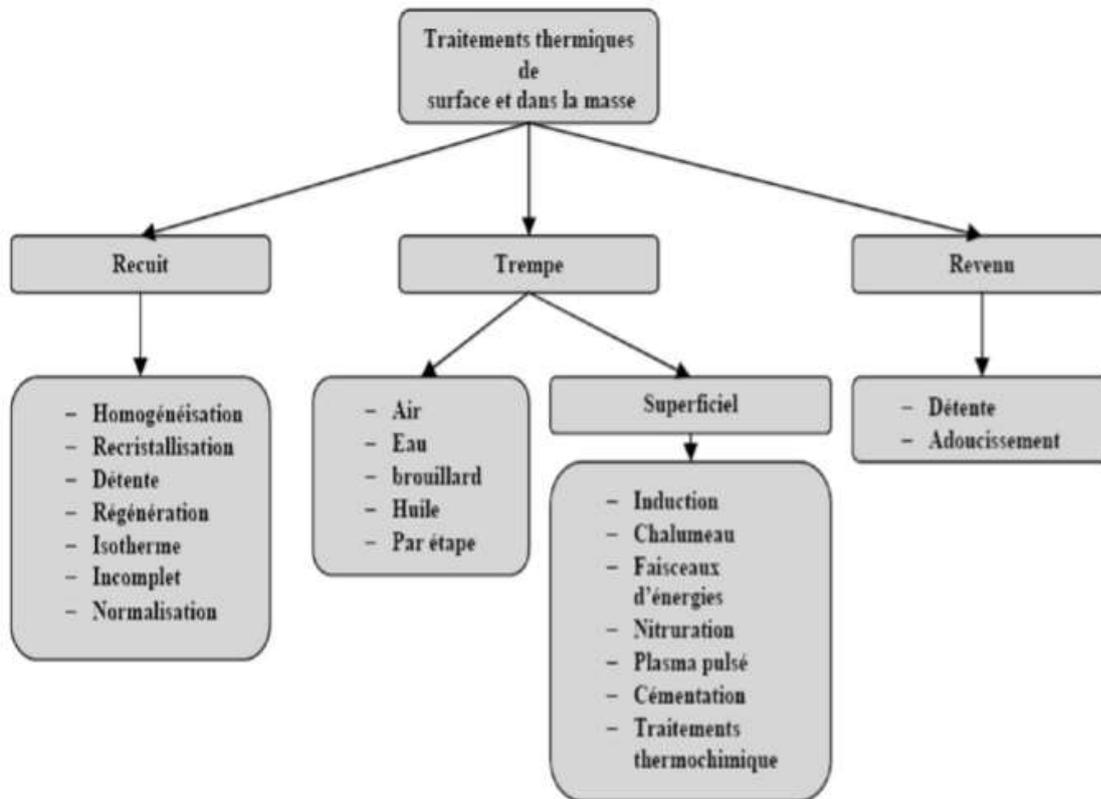


Figure I.1 traitement thermique [6]

Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but d'améliorer les caractéristiques des matériaux et rendre ceux-ci plus favorables à un emploi donné, à partir des modifications suivantes : Augmentation de la résistance à la rupture et de la limite élastique R_m , R_e , Augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs. De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi le forgeage. De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux avant d'être soumis à une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage). En dehors du recuit de recristallisation qui permet de supprimer l'écrouissage, les traitements thermiques ne s'appliquent pas aux métaux purs, mais seulement à quelques alliages pour lesquels on recherche principalement une augmentation de la limite élastique et une diminution de la fragilité [5].

I.3.1 l'Austénitisation

L'austénitisation a pour objet de mettre en solution le carbone et, éventuellement, les éléments d'alliage précipités sous forme de carbures. Pour ce faire, il est nécessaire de se placer dans les conditions où le carbone est soluble dans le fer c'est-à-dire de provoquer, par chauffage, la transformation du fer α en fer γ . L'examen des diagrammes d'équilibre montre que les carbures précipités après solidification ou formage à chaud peuvent être de la cémentite (dans les aciers non alliés), de la cémentite substituée (dans les aciers peu alliés) ou être formés à partir d'éléments carburigènes (dans les aciers alliés) et qu'alors leurs conditions de mise en solution sont généralement fort différentes [5].

L'austénitisation comporte deux étapes :

- un chauffage jusqu'à la température dite température d'austénitisation (et, de manière incorrecte, température de trempe) ;
- un maintien à cette température.

La température d'austénitisation doit être choisie de telle sorte qu'après le maintien, non seulement le carbone nécessaire au durcissement soit en solution mais aussi que cet élément d'alliage soit bien réparti dans l'austénite afin que puisse être acquis in fine un durcissement homogène.

Ce résultat peut être obtenu si la température d'austénitisation est supérieure à Ac_3 tout en ne s'élevant pas trop pour éviter le risque de grossissement des grains d'austénite. La Figure III.1 montre qu'il est possible de retenir divers couples température-durée de maintien, la température pouvant être d'autant plus proche d' Ac_3 que le maintien à température est plus long. Les conditions optimales sont donc définies après examen des spécificités du chauffage et du maintien [5].

A. Chauffage :

Le chauffage doit permettre de porter l'ensemble de la pièce à la température d'austénitisation. Or, la chaleur étant apportée par transmission à travers sa surface, la température de cette dernière est toujours supérieure à celle du cœur, l'opération s'achevant quand, justement, la différence entre ces deux températures est devenue nulle ou tout au moins inférieure à la tolérance admise.

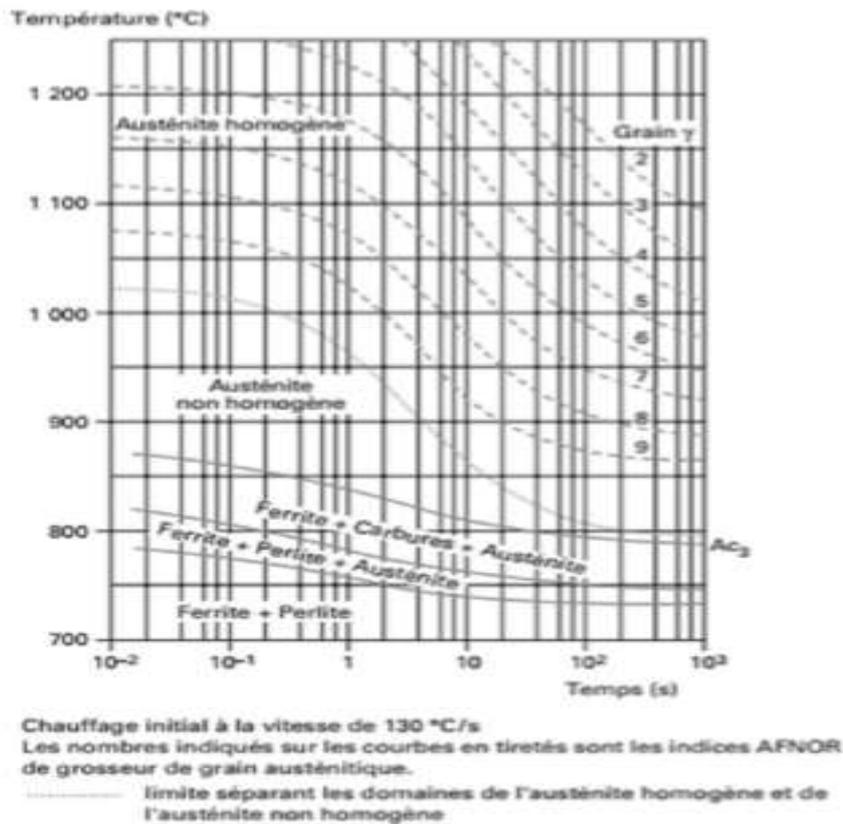


Figure I 2. Diagramme de transformation isotherme d'un acier 35CrMo4 [5]

B. Déformations au chauffage :

Pendant tout le chauffage, il existe un gradient de température entre la peau et le cœur de la pièce, gradient d'autant plus important que le chauffage est plus rapide et la pièce de plus forte section. Ce gradient crée des hétérogénéités de dilatation qui peuvent, à l'instant où elles apparaissent, engendrer soit des déformations élastiques (c'est-à-dire, dans ce cas, une mise en contrainte de l'acier), soit des déformations plastiques, suivant les propriétés de l'acier à la température correspondante. Par ailleurs la transformation $\alpha \rightarrow \gamma$ engendre, au moment où elle se produit, une contraction volumique importante (de l'ordre de 1 %) [6].

La Figure montre comment, à partir des lois de chauffage enregistrées à la peau et au cœur d'un cylindre (de 100 mm de diamètre ici) en acier à 0,25 % C, il peut mettre en évidence (à l'aide des courbes dilatométriques) les écarts de dilatation susceptibles d'apparaître lors d'un chauffage (réalisé ici par immersion dans un bain de sel porté à 1 000 °C). On constate que :

- la déformation apparaissant au début du chauffage conduit toujours (peau plus chaude que le cœur) à une mise en compression de la peau et, donc, à une mise en tension du cœur, situation qui n'engendre pas de gros risques de fissuration ;

- lorsque la transformation $\alpha \rightarrow \gamma$ de la peau commence, le sens de la déformation s'inverse ; la peau est donc sollicitée en traction mais, compte tenu de sa température, elle va subir un allongement plastique ;
- la transformation $\alpha \rightarrow \gamma$ du cœur provoque à nouveau une inversion du sens de la déformation ; la peau se trouve une nouvelle fois comprimée et subit donc un raccourcissement plastique. Cette dernière déformation tend à se résorber quand le gradient de température s'annule [6].

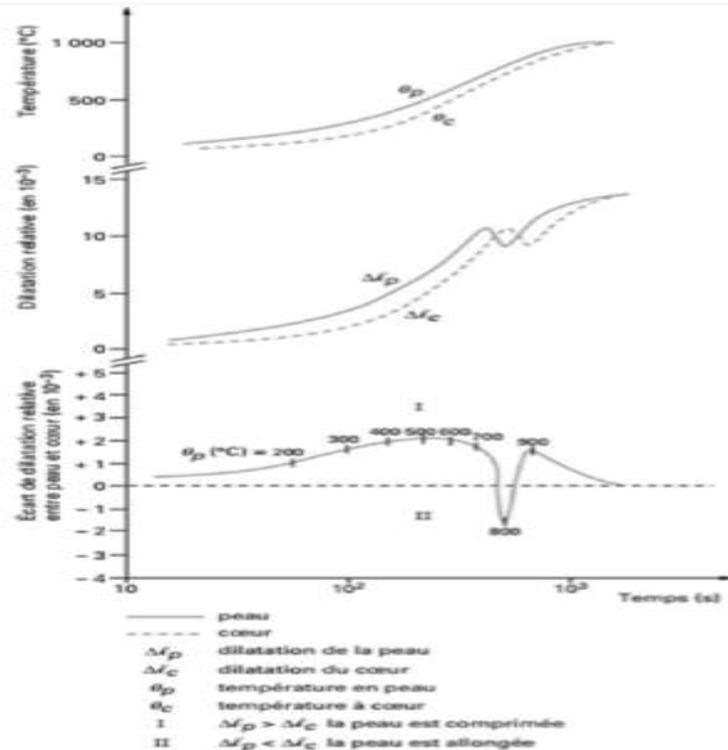


Figure I.3: Évolutions, en fonction du temps, de la température, de la dilatation en peau et à cœur [6]

Au cours du chauffage, ils assistent donc à une sorte de « pétrissage » de la peau, dont l'ampleur croît avec la rapidité du chauffage et la dimension de la pièce. Si, dans le cas des aciers de construction pour traitement thermique dans la masse, ce pétrissage ne crée pas un risque de fissuration, il engendre par contre des modifications de la géométrie de la pièce, qui constituent une part non négligeable des déformations dues au traitement thermique. Il est donc préférable de réaliser un chauffage d'autant plus lent que la section de la pièce à traiter est plus forte et, éventuellement, de procéder à des interruptions du chauffage pendant lesquelles le gradient de température se résorbera, tout au moins pour sa plus grande part. De telles interruptions peuvent être prévues aux températures suivantes :

- vers 300 °C, ce qui permet de diminuer sensiblement l'importance du gradient maximal ;

- légèrement au-dessous de A_{c1} (environ entre $A_{c1} - 50\text{ °C}$ et $A_{c1} - 25\text{ °C}$) ; le gradient thermique est fortement diminué avant que ne se manifestent les anomalies de transformation [5]

B. Maintien à la température d'austénitisation :

Le maintien à la température d'austénitisation le temps pendant lequel la température de l'ensemble de la pièce est conservée constante et égale à la température d'austénitisation, étant entendu que le chauffage ne s'achève que lorsque la température est uniforme dans toute la section de la pièce (ou lorsque l'écart de température entre peau et cœur est inférieur ou égal à la tolérance admise). Comme le montre la Figure I.4, ce maintien a essentiellement pour objet de parfaire l'austénitisation, c'est-à-dire de permettre d'achever la mise en solution des carbures et d'homogénéiser la répartition du carbone dissous. Cette même Figure III.1 montre aussi que la durée de ce maintien doit être d'autant plus longue que la température d'austénitisation est plus proche de A_{c3} et, à l'inverse, que le maintien peut être écourté si l'on adopte une température d'austénitisation plus élevée (tout en la limitant pour éviter le grossissement des grains d'austénite). Étant à l'état austénitique, l'acier n'a plus, à chaud, qu'une limite d'élasticité basse, voire très basse. De ce fait, il est susceptible de se déformer plastiquement sous son propre poids que ce soit par déformation banale ou par fluage. Il est donc indispensable d'éviter ce risque et, pour ce faire, il est nécessaire de bien positionner les pièces et de les soutenir lorsqu'elles sont en porte-à-faux (Figure I.4).

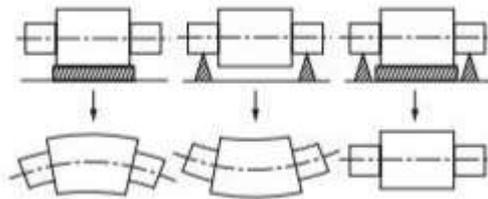


Figure I.4 les distorsions subies par un cylindre arbré au cours d'un maintien à haute température, à l'état austénitique [5]

a) Pour les aciers hypoeutectoïdes :

L'austénitisation entre $A_{c3} + 25\text{ °C}$ et $A_{c3} + 50\text{ °C}$ (souvent, lors du traitement des aciers non alliés trempés à l'huile, on relève ces températures de 25 °C environ pour augmenter un peu la trempabilité en provoquant un léger grossissement des grains d'austénite) ; La durée du

maintien très souvent définie en fonction de la taille de la pièce chauffée et dans le but de parvenir à une mise en température uniforme. Cette façon de faire découle du choix de température indiqué ci dessus ($Ac_3 + 25\text{ °C}$ à 50 °C) ; la durée du maintien nécessaire (maintien qui ne débute que lorsque l'isothermie de la pièce est acquise, à la tolérance près admise dans la pratique pour l'écart de température entre peau et cœur) est alors très courte (quelques minutes suffisent, en général, pour les aciers hypoeutectoïdes non alliés et faiblement alliés). La relation empirique qui peut lier le temps nécessaire pour porter le cœur de la pièce à la température d'austénitisation et l'épaisseur de la pièce est propre à chaque équipement et ne peut donc être généralisée [6].

b) Pour les aciers hypereutectoïdes :

L'austénitisation vers $Ac_1 + 50\text{ °C}$ environ (ce dernier cas est surtout celui des aciers à outils ; la quantité de carbone dissous dans l'austénite est suffisante pour obtenir un durcissement important, on évite le grossissement du grain austénitique, on limite la quantité d'austénite résiduelle subsistant après la trempe et on conserve des carbures non dissous, relativement grossiers, qui concourent à améliorer la résistance à l'usure et à l'abrasion). La durée du maintien surtout définie en fonction de la quantité de carbone que l'on souhaite mettre en solution, puisque l'austénitisation est généralement réalisée à une température comprise entre Ac_1 et A_{cm} et donc dans le domaine mixte : ferrite + carbures + austénite, en notant toutefois qu'une légère modification de la température d'austénitisation a , dans ce domaine, beaucoup plus d'influence qu'un changement de la durée du maintien. Pour les aciers alliés contenant des éléments carburigènes, il faut tenir compte des conditions particulières de mise en solution des carbures, qui peuvent obliger à adopter une température d'austénitisation élevée et une durée de maintien assez importante. Dans ce cas, comme dans tous les cas où les informations disponibles sont jugées insuffisantes, on peut procéder à une série d'essais relativement simples qui permettent de définir les conditions optimales d'austénitisation .

I.3.2. Trempe :

La trempe a pour objet d'empêcher la précipitation du carbone au cours du retour depuis la température d'austénitisation jusqu'à la température ambiante, et cela dans la plus grande partie possible de la section de la pièce. Pour des raisons économiques (économie d'éléments d'alliage), on admet qu'une certaine proportion de bainite puisse se substituer à la martensite dans la mesure où le revenu est réalisé à une température supérieure à 500 °C . Pour un acier donné, les deux facteurs qui vont conditionner le résultat de la trempe sont : □ la trempabilité de

l'acier dans les conditions d'austénitisation adoptées ; □ les conditions de refroidissement de l'austénite [1]

A. Trempabilité de l'acier :

Pour les procédés habituels de trempe, la trempabilité est caractérisée à l'aide des diagrammes de transformation en refroidissement continu (diagramme TRC) et indirectement, à l'aide des courbes Dureté (HV) = f (conditions de refroidissement). Plus la trempabilité d'un acier est grande : □ plus est grande la section des pièces dans lesquelles, pour des conditions de refroidissement données, on peut provoquer la transformation martensitique à cœur ; □ moins il est nécessaire de refroidir rapidement une pièce de dimensions données pour engendrer la transformation martensitique à cœur [5].

B. Conditions de refroidissement lors de la trempe :

Dans la pratique, la trempe est généralement réalisée par immersion de la pièce dans un milieu qui extrait la chaleur contenue dans celle-ci, ce milieu peut être :

- gazeux : air, gaz (N₂, Ar, H₂, He, etc.) ;
- liquide : eau, huiles et bains de sels fondus (l'eau et les huiles peuvent contenir des additifs qui modifient leur pouvoir refroidissant) ;
- mixte : brouillard (gaz + liquide atomisé), lit fluidisé (gaz + solide pulvérulent).

Le milieu de trempe peut être plus ou moins agité (brassage) ou projeté (refroidissement par aspersion). Le refroidissement en chaque point d'un volume d'acier dépend :

- des propriétés thermiques du métal ;
- de la géométrie de la pièce (forme, dimensions, etc.) ;
- de la position du point considéré dans la section de la pièce ;
- des propriétés thermiques du milieu de trempe et de certaines de ses propriétés physiques (viscosité notamment) ;
- de la température du milieu de trempe ;
- des conditions dans lesquelles se déroule l'échange thermique entre pièce et milieu de trempe (volume et agitation du milieu de trempe, état de surface de la pièce, etc.).

Cette énumération montre que le praticien dispose d'un petit nombre de moyens de refroidissement et qu'il va devoir tenir compte d'un très grand nombre de paramètres. Mais compte tenu du fait que l'eau et les huiles sont les principaux fluides de trempe utilisés dans la pratique, il nous semble utile ici d'insister sur certaines de leurs particularités [6].

C. Trempe à l'eau :

L'eau constitue le milieu de refroidissement le moins cher qui permette, dans la pratique de tous les jours, de réaliser les refroidissements les plus énergiques.

Toutefois, il faut noter qu'au cours d'une trempe à l'eau la vitesse de refroidissement n'est pas constante et qu'elle est maximale lorsque la température de surface de la pièce est voisine de 300 °C. L'eau a l'avantage de faire éclater la calamine au début du refroidissement et donc de nettoyer la surface et d'améliorer l'échange thermique. Lorsque la géométrie de la pièce le permet, l'eau peut former facilement des bulles de vapeur prisonnières qui ralentissent localement le refroidissement du métal et donnent naissance à des points doux ; la circulation de l'eau, l'agitation de la pièce ainsi que sa présentation doivent donc être adaptées. Si la température de l'eau s'élève, son pouvoir refroidissant diminue très sensiblement (la période de caléfaction est prolongée). Ainsi donc, l'exécution d'une bonne trempe à l'eau exige le contrôle permanent :

- De la température de l'eau ;
- De l'agitation des pièces ;
- De la circulation de l'eau et de son renouvellement éventuel.

D. Trempe à l'huile :

Il existe une très grande variété d'huiles de trempe qui peuvent différer : par l'huile de base (minérale ou synthétique) ; par les additifs qu'elles contiennent, additifs qui ont pour objet soit de modifier le pouvoir refroidissant, soit d'améliorer certaines propriétés (notamment la résistance à l'oxydation). Lors d'une trempe à l'huile, la vitesse de refroidissement n'est pas constante; elle est maximale lorsque la température de surface de la pièce est encore assez élevée et généralement comprise, suivant les propriétés de l'huile considérée, entre 400 et 600 °C, soit à un niveau bien supérieur à celui correspondant à la trempe à l'eau. La viscosité de l'huile diminue quand sa température augmente. Ce phénomène provoque une augmentation du pouvoir refroidissant. Il est donc nécessaire de contrôler en permanence la température du bain et de

mettre en œuvre un moyen de refroidissement. Il est important d'éviter l'introduction d'eau dans un bain d'huile, eau qui diminue les vitesses de refroidissement à haute température mais les augmente à basse température, c'est-à-dire dans les conditions les plus critiques pour l'apparition de tapures. Enfin, l'utilisation de la trempe à l'huile impose la mise en œuvre de moyens de prévention et de lutte contre les incendies [6].

E. Trempe à gaz :

La trempe par refroidissement à l'aide d'un gaz quand les lois de refroidissement réalisées sont plus rapides que celles obtenues par refroidissement de la même pièce dans l'air calme. Les conditions de refroidissement dépendent ici :

- De la nature du gaz (et essentiellement de sa capacité thermique)
- De la température du gaz
- De la pression du gaz
- De la vitesse relative du gaz par rapport à la surface de la pièce

F. Trempe au brouillard :

La trempe au brouillard est réalisée en projetant à la surface de la pièce un fort courant d'air dans lequel de fines gouttelettes d'eau sont mises en suspension. Le refroidissement est dû à fois au pouvoir refroidissant de l'air en circulation et à la vaporisation des gouttelettes d'eau lorsqu'elles entrent en contact avec la surface de la pièce.

Le pouvoir refroidissant d'un tel brouillard peut être de quatre à cinq fois plus grand que celui de l'air utilisé ; les vitesses de refroidissement obtenues sont grandes lorsque la température de la surface de la pièce est peu élevée [4].

G. Trempe en bain fluidisé :

Un bain fluidisé pour la trempe est constitué par de fines particules (généralement d'alumine) en suspension dans un courant gazeux

H. Trempe en bains fondus :

Utilisés pour réaliser les trempes étagées les bains fondus peuvent être constitués par :

- Un ou plusieurs métaux ;

Un ou plusieurs sels. La composition est choisie pour permettre de réaliser un bain fondu suffisamment fluide à la température visée afin que les échanges thermiques soient efficaces. Ceux-ci peuvent être sensiblement améliorés par une agitation. Pour la trempe en bain de sels fondus, une composition très souvent citée est la suivante (% en masse) :

- 50 à 60 % de KNO_3 ;
- 40 à 50 % de NaNO_2 ;
- 0 à 10 % de NaNO_3 ;

Qui fond vers $140\text{ }^\circ\text{C}$ et est utilisable entre 160 et $500\text{ }^\circ\text{C}$.

I.3.3.Revenu :

Appliqué aux aciers au carbone alliés ou non alliés, après une trempe martensitique et/ou martensito-bainitique, le revenu a pour objet de provoquer une précipitation du carbone sous une forme et dans des conditions contrôlées afin de parvenir au durcissement optimal. Cette opération engendre une évolution structurale depuis l'état métastable obtenu après trempe vers un état plus proche de l'équilibre physico-chimique. Éventuellement, ce revenu peut provoquer la transformation de l'austénite résiduelle en bainite pendant le maintien ou en martensite secondaire au cours du refroidissement final. Les paramètres qui définissent les conditions d'exécution d'un revenu sont :

- la température de revenu ou température maximale à laquelle est porté l'acier ;
- la durée du maintien à la température maximale, c'est-à-dire le temps pendant lequel la température des zones martensitiques et/ ou martensito-bainitiques est maintenue constante et égale à la température de revenu ;
- la loi de refroidissement à laquelle la pièce est soumise à la fin du revenu. Pour apprécier ou prévoir le comportement au revenu d'un acier.

Différents type de revenu (après trempe) existe :

- le revenu de détente
- le revenu habituel (ou banal)
- le revenu de durcissement secondaire [6]

A. Choix des conditions de revenu après trempe :

Le choix des conditions de revenu commence par la définition du type de revenu qui est réalisé (fonction des propriétés recherchées) :

- Dureté maximale et conditions de service n'imposent pas une certaine ductilité par exemple ; revenu de détente à la T 180-220°C, compatible avec les exigences de dureté)
- Compromis bien déterminé entre le niveau haut de la résistance et un niveau haut de ductilité revenu banal
- Pour les aciers contenant des éléments carburigènes revenu de durcissement secondaire Tenir compte que la périphérie d'une pièce subit toujours un maintien à la température de revenu plus long que celui auquel est soumis le cœur. Cette différence est d'autant plus grande que le chauffage est plus rapide et la section de la pièce plus importante chauffage lent et contrôlé [4].

B. Le revenu de détente

- Réalisé à une température comprise entre 180 et 220°C
- Appliqué uniquement une structure totalement martensitique
- Provoque une précipitation souvent incomplète (fonction T) du C sous forme de Carbone
- Permet une diminution des contraintes interne Évolution des propriétés :
- Faible \hat{t} de la résistance à la traction et de la dureté très sensiblement la limite d'élasticité
- améliore un peu le niveau des caractéristiques de ductilité

Réalisé lorsque les conditions d'emploi exigent :

- conservation des caractéristiques de résistance à leur niveau le plus élevé
- sans imposer de contrainte en ce qui concerne la ductilité

Ne provoquant pas de transformation de l'austénite résiduelle (si ce n'est sa stabilisation), il peut être précédé d'un traitement par le froid si l'on veut disposer du durcissement maximal [5].

Le revenu usuel

- Réalisé à une température comprise entre 500 et 575°C

□ Provoque la précipitation complète du carbone sous forme de cémentite Fe_3C Suivant la température de revenu, ces carbures sont plus ou moins fins, dispersés et durcissants ou globulisés, coalescés et peu durcissants. Suivant la température de revenu, dans le domaine considéré, on provoque une baisse plus ou moins forte des caractéristiques de résistance mais aussi un relèvement très sensible des caractéristiques de ductilité

C. Le revenu de durcissement secondaire

□ Réalisé à une température comprise entre 600 et 675°C

□ Provoque précipitation complète du C sous forme de carbures spéciaux (Cr_7C_3 , $Cr_{23}C_6$, Mo_2C , ...)

□ Provoquer un durcissement important accompagné d'une diminution des caractéristiques de ductilité.

□ Particulièrement effectué sur les pièces devant travailler à haute T [5].

I.3.4.Recuit :

Objectif : éliminé toute l'histoire thermique de l'acier en ramenant le métal à l'équilibre physico-chimique et mécanique

Principe : réalisé un cycle thermique

- Chauffage à une température de recuit
- Maintien isotherme à cette température
- Refroidissement lent dans l'air ou le four

Propriété recherchée :

- Ductilité maximale
- Dureté minimale
- Bonnes propriétés mécaniques

Dans la pratique, on distingue différents recuits en fonction des buts à atteindre :

- Le recuit d'homogénéisation
- Le recuit de régénération
- Le recuit complet

- Le recuit de détente

A. Le recuit d'homogénéisation

Objectif : réduire les hétérogénéités de composition chimique engendrées par le procédé de solidification Pour réduire ces hétérogénéités, on fait intervenir la diffusion en portant l'acier à haute température ($T > 1100^{\circ}\text{C}$) et en le maintenant à cette température pendant le temps nécessaire pour obtenir le résultat souhaité Le maintien est suivi d'un refroidissement assez rapide, provoquant généralement un fort grossissement des grains, nécessité d'affiner ultérieurement (réalisation d'un recuit de régénération).

B . Le recuit de régénération

Objectif : affiner le grain de l'acier après que celui-ci ait subi un grossissement excessif à la suite d'une surchauffe accidentelle ou d'un recuit d'homogénéisation par exemple : L'affinement des grains de l'acier est possible grâce à la transformation austénitique et au processus de germination et de croissance de l'austénite Le maintien à T maximale du cycle assurer la mise à T uniforme de la pièce à T ambiante la structure de l'acier est constituée de ferrite (ou de cémentite) et de perlite.

C . Le recuit complet

Objectif : homogénéiser la structure d'un acier non allié ou faiblement allié ; il permet aussi d'affiner le grain de cet acier. Il se définit essentiellement par son cycle thermique qui comporte :

- une austénitisation (conditions identique que celle qui précède la trempe)
- un refroidissement à l'air libre

Un des intérêts de ce recuit est d'obtenir un matériau dont l'usinage et la déformation à froid est facilitée.

D . Le recuit de détente

Objectif : diminuer les contraintes résiduelles préalablement générées par des cycles thermiques ayant créé, des gradients thermiques et donc des déformations hétérogènes (à l'occasion d'opération de formage, de soudage ou de traitements thermiques) Un traitement de relaxation comporte

- un chauffage relativement lent (limiter les contraintes liées au gradient thermique) à la température choisie ;
- un maintien à la température choisie ;
- un refroidissement relativement lent (limiter les nouvelles contraintes liées au gradient thermique)

I.4.DETERIORATION DES PIECES PAR USURE

I.4.1.Définition :

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

L'usure est généralement combattue à cause de ses effets négatifs mais elle présente aussi des aspects favorables. L'affûtage d'un outil, la finition d'une surface par rectification, l'écriture de la craie sur le tableau ou du crayon sur le papier sont des exemples d'usures abrasives utiles. A l'image des pompiers qui allument parfois des contre-feux pour mieux lutter contre un incendie, il arrive que l'on provoque sciemment certaines formes d'usure pour lutter contre d'autres formes qui seraient beaucoup plus dévastatrices. Quand il est bien conduit, le rodage d'un mécanisme, c'est-à-dire la phase de fonctionnement où les pièces « apprennent à vivre ensemble », provoque des usures qui se révéleront « protectrices » lors des phases suivantes [7].

La plupart du temps, l'usure globale d'un mécanisme est due à plusieurs processus qui agissent simultanément, plus rarement à un processus bien défini et identifiable. L'effet de ces actions simultanées est souvent plus important que la somme des effets que l'on produirait en faisant agir séparément les divers processus. À l'opposé, certaines formes d'usure s'excluent mutuellement : par exemple, les dents s'usent principalement par carie et par abrasion, mais ces deux processus ne coexistent absolument pas, les zones abrasées ne sont jamais cariées. Un mécanisme passe normalement par trois phases d'usure successives Figure I.5:

- L'ultime finition des surfaces lors du rodage : les actions sur les grosses aspérités diminuent avec le temps, les pics sont arasés progressivement tandis que les vallées restent intactes. Le taux d'usure et le facteur de frottement baissent, les portées s'améliorent, les films d'huile s'amincissent. Une nouvelle topographie remplace la rugosité originale de la pièce. Si l'usure se ralentit lors de la mise en fonctionnement, on constate une amélioration de l'état de surface et réciproquement ;

- La vie utile correspond au régime d'usure douce : la couche superficielle très dure qui semble se former est éliminée peu à peu sous forme de petites écailles. L'usure douce diminue la rugosité, tandis que l'usure sévère l'accroît ;
- Enfin, la vieillesse se caractérise par une usure sévère qui aboutit à la mise hors d'usage [8]

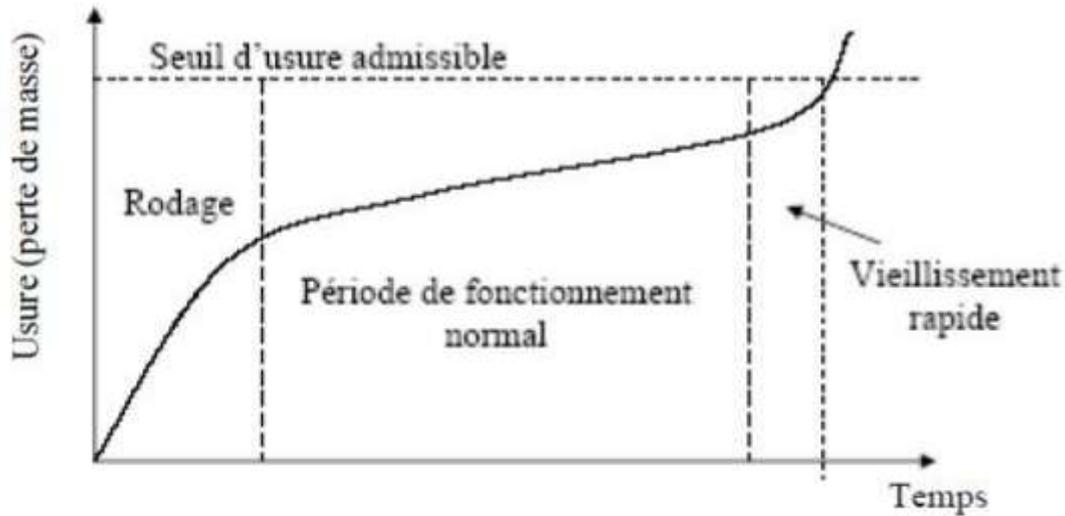


Figure I.5. Evolutions de l'usure d'un matériel

I.4.2. Mode d'usure :

I.4.2.1. Usure par abrasion : Cette forme de dégradation est généralement combattue, mais aussi utilisée pour l'usinage. Des taux d'usure importants sont recherchés et obtenus avec des outils abrasifs en rectification, affûtage, etc. L'abrasion coûte très cher, on lui attribue à peu près le tiers du total des pertes économiques dues à l'usure. Elle concerne de nombreux mécanismes fonctionnant dans des conditions sévères : machines agricoles, matériels de travaux publics, matériel minier etc....

Les surfaces présentent des sillons de profondeur variable, parallèles au déplacement. L'usure est assez constante au cours du temps, le volume des débris croît linéairement avec la charge appliquée et la distance parcourue. La vitesse n'intervient que si l'échauffement modifie les caractéristiques du matériau. Eventuellement, des particules arrachées de la pièce la plus tendre peuvent être transférées mécaniquement sur la plus dure mais sans y adhérer très solidement, comme fait le plomb lorsqu'il "beurre" une lime, la rendant inopérante [7].

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

- L'abrasion à deux corps, dans laquelle la pièce la plus dure "lime", "râpe" la plus tendre ;
- L'abrasion à trois corps, dans laquelle des éléments plus durs que les pièces en présence s'incrudent dans la pièce la moins dure.

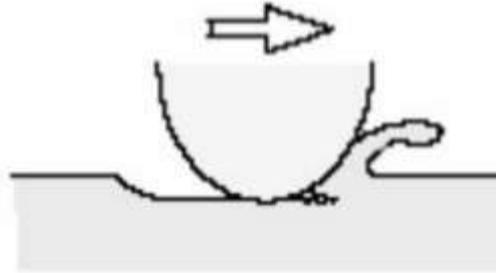


Figure I.6 Abrasion

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

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

L'abrasion combine déformation et coupe. Elle creuse d'abord des sillons puis, si les capacités de déformation sont dépassées, elle enlève des micros copeaux. Les bourrelets latéraux des sillons peuvent se détacher ultérieurement. Lors d'un usinage par abrasion, on fait tout pour que le métal soit enlevé sous forme de petits copeaux, tels que ceux que l'on retrouve dans le fluide de refroidissement d'une rectifieuse [7].

Pour rayer une surface, il suffit d'une autre plus dure de 20 à 25 %. L'usure croît dès que la dureté de l'abrasif atteint 0,7 fois celle de la surface usée et se stabilise quand elle atteint 1,7 fois. L'abrasion par coupe, fonction de la forme des aspérités, est négligeable si le rapport des duretés est compris entre 0,8 et 1,3. Les débris émis par les surfaces acquièrent une dureté bien supérieure à celle des matériaux en présence, provoquant une abrasion à trois corps. Ceci est dû à

l'écaillage et à l'oxydation, cette dernière dépendant entre autres de l'humidité atmosphérique. L'abrasion modifie profondément les couches superficielles qui deviennent comparables à celles obtenues par laminage

. Les surfaces durcissent et résistent mieux à l'abrasion elle-même.

L'usure dépend des vitesses relatives des surfaces et des particules, de la forme et de la résistance des grains. Elle croît avec la taille de ces derniers, se stabilisant pour une dimension critique voisine de 0,1mm, et varie selon que les contraintes sont faibles ou fortes. Les charges agissent directement ou indirectement, en brisant ou en déformant les grains abrasifs.

Les caractéristiques de l'ambiance modulent l'abrasion mais influent en général assez peu si la vitesse d'usure est grande.

I.4.2.2. Usure par Erosion :

L'érosion est une usure abrasive particulière, causée par des impacts de particules solides contenues dans un fluide en mouvement ou par des particules liquides en milieu gazeux. Lors des chocs, il y a ébranlement du matériau à la surface et bris du système cristallin. Les dégâts sont fonction de l'énergie cinétique, donc de la masse et du carré de la vitesse de la particule. L'enlèvement du matériau croît très vite avec la vitesse, comme la cinquième puissance pour les gouttes [7].

Le comportement est très différent selon la nature du matériau. Si ce dernier est ductile, on trouve des rides annulaires très écaillées et cassantes et la vitesse d'usure passe par un maximum pour des angles d'incidence de 20 à 30°. S'il est très dur et fragile, on ne trouve que des craquelures et l'usure augmente continuellement avec l'angle d'incidence.

L'érosion diffère de l'abrasion car elle est corrélée avec l'énergie cinétique des particules qui, frappant les surfaces à grande vitesse, créent des petits cratères par déformation plastique du matériau sous l'effet du cisaillement. La perte de matière résulte de la coupe ou des déformations alternées des aspérités formées par les impacts successifs.

Quand l'angle d'impact est faible, le phénomène de coupe est important, la résistance du matériau dépend très étroitement de sa dureté. S'il est grand, l'usure est due à la déformation des surfaces et le phénomène est beaucoup plus complexe : un matériau moins dur mais plus tenace peut fort bien résister [7].

I.5.1. introduction :

L'acier austénitique au manganèse est connu depuis un siècle. A. Pourcel en a perfectionné l'élaboration, mais on leur a donné le nom d'aciers Hadfield, car R. A. Hadfield en a entrepris l'étude systématique dès 1878. Il est bien connu que les matériaux cubiques à faces centrées présentent une aptitude importante au durcissement par écrouissage à cause du grand nombre de systèmes de glissement qui peuvent être activés. C'est particulièrement le cas des aciers Hadfield car ils contiennent une teneur importante en carbone (12 %C). Si cet acier est trempé énergiquement à l'eau à partir d'une température supérieure à 1000°C, les carbures n'ont pas la possibilité de précipiter et la structure reste totalement austénitique, donc ductile et non fragile. Par écrouissage (chocs, martelage ...) cette austénite peut se transformer en martensite très dure et très résistante à l'usure car il y a alors précipitation de carbures. Au fur et à mesure que la couche superficielle s'use, elle se reforme à partir des couches à la fois aux chocs et à l'usure (pièces de broyeurs, aiguillages).



Figure. I.7 mâchoire de concassage de la nuance Hadfield

Il est bien connu aussi que les aciers austénitiques sont typiquement métastables, c'est à dire qu'ils peuvent subir une transformation martensitique lorsqu'ils sont soumis à des basses températures ou à des déformations plastiques à la température usuelle d'utilisation. Le taux de durcissement par écrouissage de ces aciers est augmenté lorsqu'il y a formation de martensite.

I.5.2.L'acier Hadfield :

I.5.2.1 composition chimique :

Les marteaux et mâchoires de concassage sont des pièces moulées en acier austénitique au manganèse de nuance Hadfield, dont la composition chimique type est donnée par le Tableau IV.1, Le manganèse et le carbone sont les principaux éléments d'alliage d'un acier austénitique au manganèse : ils assurent la formation de la phase austénitique cubique à faces centrées (CFC)

. γ par hypertrempe depuis la phase austénitique haute température, Combiné avec le manganèse, le carbone influence beaucoup les caractéristiques de l'austénite, c'est-à-dire sa résistance et sa limite élastique. La stabilité de l'austénite croît avec la teneur en carbone, mais la ductilité globale de l'alliage diminue quand cette dernière dépasse 1.2 % par suite de formation de précipités que l'on ne peut totalement remettre en solution. La teneur en manganèse n'a pas un grand effet sur la limite élastique.

Tofaute et Linden [11] ont montré que l'acier Hadfield peut avoir une structure austénitique à la température ambiante lorsque l'indice Mneq, fonction des teneurs en Mn et C, vérifie :

$$Mneq = (\%Mn) + 13(\%C) \geq 17 \dots\dots\dots (I.1)$$

Les autres éléments d'alliage peuvent être rajoutés pour les raisons suivantes :

- Obtenir un durcissement de la solution solide γ par précipitation.
- Améliorer la résistance à l'usure.
- Augmenter la stabilité de l'austénite, c'est-à-dire diminuer la vitesse critique de trempe pour l'obtention de la phase austénitique, retarder la décomposition de l'austénite durant la déformation plastique ou un abaissement de température.

Les éléments d'addition ont pour effet d'améliorer les propriétés, notamment mécaniques, de ce matériau. En effet, l'ajout de chrome augmente la limite élastique et par suite la résistance à l'usure et à la déformation en service, sans nuire à la ténacité tant que sa teneur ne dépasse pas 2.5%.

Des éléments tels que le titane et le vanadium peuvent produire un affinement de la taille des grains et par suite améliorent la résistance à l'usure et à la fatigue [7]. Le silicium permet une bonne désoxydation de cet acier, ainsi que d'améliorer sa fluidité à l'état fondu. Le phosphore a des effets néfastes sur la ductilité à chaud quand sa teneur dépasse 0.06%. Le nickel quant à lui est ajouté principalement en vue d'améliorer la soudabilité de l'alliage par son influence gammagène.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu
0,95- 1.3	0.65	11.5- 14	0.05	0.03	0.5	0.75	1.75	0.045	0.3

Tableau I.3 : Composition chimique type de l'acier Hadfield

Les propriétés mécaniques sont directement liées à la composition chimique. Pour ce type d'acier, le rapport Mn/C doit être supérieur à 11, sinon, des carbures se forment dans les joints de grains et à l'intérieur de ceux-ci. Le métal est alors plus résistant avant écrouissage mais aussi plus fragile [11]. Cette condition s'écrit : $Mn \geq 11(\%C)$ (I.2)

Les relations (I.1) et (V.2) définissent un domaine optimal de composition chimique des aciers Hadfield. On note que l'acier actuel de boulet de broyage se situe près de la frontière définie par la relation (I.1), ce qui explique la nécessité du traitement thermique d'hypertrempe. Quelle que soit la vitesse de refroidissement de l'alliage au moment de son élaboration, des carbures se forment dès que la teneur en carbone atteint 1%, rendant le traitement thermique d'hypertrempe nécessaire.

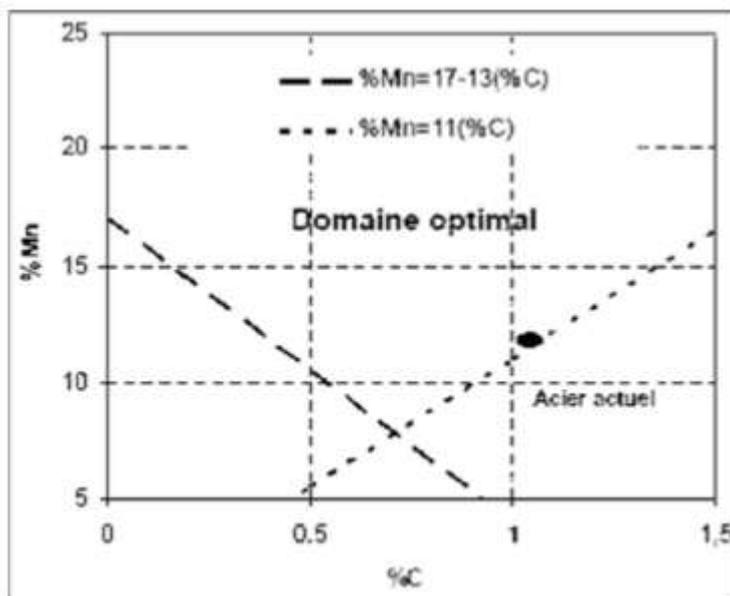


Figure I.8.Domaine de composition optimale selon les équations (I.1) et (I.2) des aciers Hadfield

La structure à haute température de l'alliage Fe-Mn dépend essentiellement de la proportion relative de manganèse, élément γ -gène qui étend le domaine austénitique γ . Les autres éléments présents dans l'alliage ont un caractère α -gène ou γ -gène. Parmi les éléments γ gènes, outre le manganèse, on retrouve le nickel, le carbone, le cuivre et l'azote. Parmi les éléments α -gènes, outre le chrome, on retrouve le silicium et le molybdène ; le niobium, le titane et le tungstène sont des éléments réputés carburigènes.

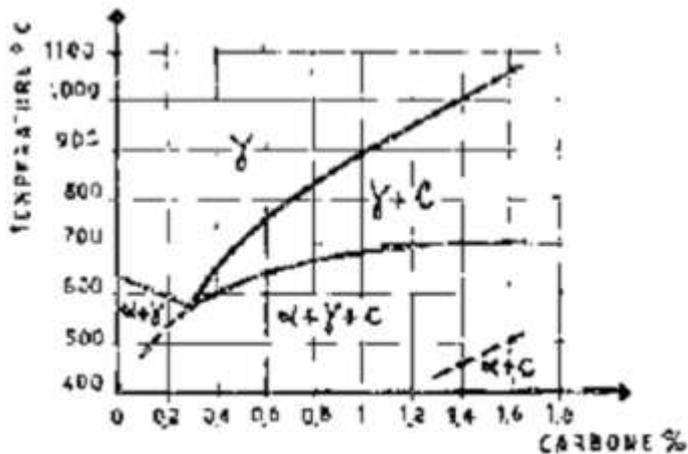


Figure I.9. Diagramme d'équilibre des aciers à 13%Mn [8]

Ces aciers sont constitués en majeure partie d'austénite métastable. En effet, comme le montre la figure I.9, on ne peut retrouver à la température ambiante 100% d'austénite qu'après un refroidissement rapide. Dans le cas d'un refroidissement insuffisamment rapide, on voit que la structure sera constituée de cémentite – ferrite – austénite ou cémentite – ferrite suivant la teneur en carbone de l'alliage [10]. Suivant son degré de stabilité, fixé par sa composition chimique, l'austénite peut se transformer partiellement en martensite α lorsque le matériau est soumis à un écrouissage suffisant ou à un abaissement de la température. La formation de la martensite α (structure cubique centrée) ne se fait pas, en général, directement à partir de l'austénite, mais par l'intermédiaire de la formation préalable de martensite ϵ à structure hexagonale compacte qui, contrairement à la martensite α , n'est pas ferromagnétique [10].

Après un traitement thermique d'hypertrempe (TTH), à la température ambiante, les aciers Hadfield présentent une structure austénitique cubique à faces centrées réputée stable vis-à-vis de la transformation martensitique (d'origine thermique ou mécanique), qui permet d'obtenir en service la formation à la surface d'une zone durcie capable de résister aux sollicitations mécaniques [11]. Le traitement thermique garantit l'obtention d'une structure austénitique propre, sans précipités. En effet, le traitement thermique a pour effet de dissoudre et mettre en solution les éléments carburigènes et d'éviter la formation de carbures aux joints de grains qui fragiliseraient la pièce. Les propriétés physiques de l'acier Hadfield sont données par le Tableau I.4.

Point de fusion (°C)	1350
Masse volumique à 20 °C (kg.m ⁻³)	7900
Conductivité thermique à 20 °C (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0.02
Résistivité électrique à 20 °C (Ω.m)	70
Chaleur spécifique à 20 °C (J.kg ⁻¹)	0.14
Retrait après solidification (mm/m)	25

Tableau I.4 Propriétés physiques de l'acier Hadfield [13]

I.5.2.2. Caractérisation mécanique :

I.5.2.2.1. comportement mécanique durant l'essai de traction :

L'essai de traction a été abondamment utilisé pour étudier les propriétés mécaniques des alliages Fe-Mn. Tableau I.5 présente les propriétés mécaniques d'un acier Hadfield déduites d'un essai de traction réalisé à faible vitesse et 20 °C. Ce matériau est caractérisé par une résistance mécanique élevée, un écrouissage important et une ductilité très élevée, ce qui lui donne une ténacité et une résilience (~2.35 MJ/m²) élevées [14].

Résistance à la rupture (MPa)	650 – 1000
Limite élastique (MPa)	320 - 400
Module d'élasticité (GPa)	196 - 203
Allongement (%)	30 - 65
Striction (%)	30 - 40

Tableau I.5. Ordre de grandeur des propriétés de traction d'un acier Hadfield (Dureté Brinell 170-220) [13]

La valeur élevée de l'allongement uniforme au cours d'un essai de traction est due à la forte capacité d'écrouissage des Fe-Mn : au-delà de la limite élastique, la contrainte est une fonction linéaire de la déformation, dont la pente $d\sigma/d\varepsilon$ est constante et élevée ~ 2,7 GPa, Ce comportement est très différent de celui de la majorité des alliages métalliques dont le taux de

consolidation $d\sigma/d\varepsilon$ décroît fortement quand la déformation croît. Contrairement aux aciers très durs et aux aciers mi -durs. L'acier Hadfield constitue un cas intermédiaire où la montée de la courbe de traction n'atteint la contrainte de rupture qu'après un allongement considérable ; il cumule ainsi les conditions optimales d'une déformabilité élevée associée à un fort durcissement [3]. Cette forte capacité de consolidation explique notamment leur bonne emboutissabilité [9], ainsi que leur bonne résistance aux chocs répétés et à l'usure...

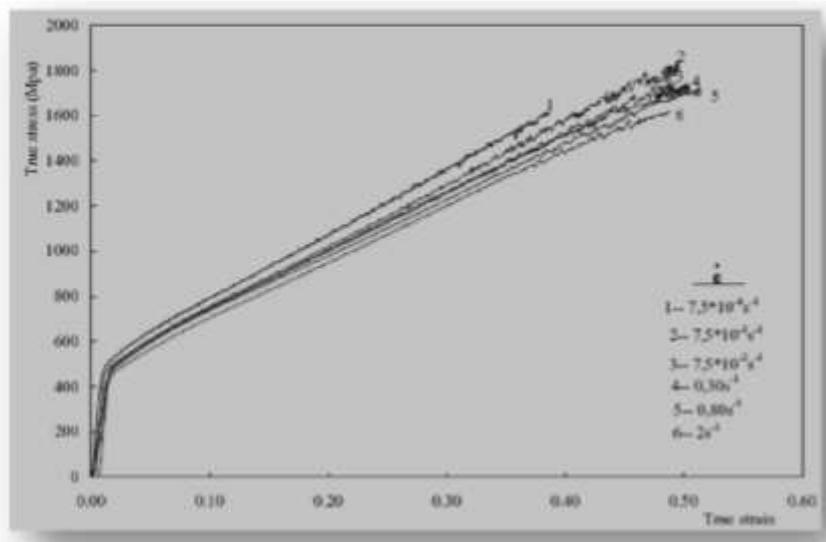


Figure I.10. Effet de la vitesse de déformation, entre 10^{-4} et 2 s^{-1} , sur la courbe contrainte-déformation à 20°C d'un acier Hadfield corroyé [12].

I.5.2.2.2. Mécanismes de l'érouissage :

L'étude de Collette et al. [10] a permis de définir le caractère essentiel des aciers Hadfield : à l'état hyperefféché ils sont plutôt mous, à l'état éroué, ils n'ont pas une résistance exceptionnelle de décohésion. Mais ils ont une capacité d'érouissage élevée et qui se maintient tout au long de la déformation, grâce à un ensemble de mécanismes compliqués faisant intervenir en premier lieu une très faible mobilité des dislocations. Les atomes de carbone en insertion dans l'acier Hadfield, dont la teneur atomique est assez importante, seraient à l'origine de fortes interactions avec les champs de contraintes des dislocations, tout en restant « liés » aux atomes de manganèse les environnant sur le réseau austénitique ce qui expliquerait, au moins en partie, la faible mobilité des dislocations, ainsi que les instabilités plastiques sur les courbes de traction. Un autre argument, complémentaire, évoque la faible valeur de l'énergie de faute d'empilement de ces aciers, de l'ordre de 20 mJ/m^2 [12], qui permet la dissociation des dislocations, les rendant également peu mobiles. Cette faible mobilité des dislocations limite les processus de

restauration, ce qui a pour effet de conserver un taux d'écroutissage élevé, et favorise un mécanisme de déformation par maillage [9], produisant un durcissement du type Hall-Petch, les joints de macles se comportant, au même titre que des joints de grains, comme autant d'obstacles au mouvement des dislocations [14]. La faible mobilité des dislocations serait également à l'origine de l'apparition des faciès de « clivage ductile », et de l'importante résistance à la rupture par cisaillement.

La capacité d'écroutissage de cet alliage dépend du mode de sollicitation. En effet, à partir de 5 % de déformation environ, le module d'écroutissage $d\sigma/d\varepsilon$ est 30 % plus important en compression qu'en traction. Ce phénomène a été attribué dans un premier temps à la formation de martensite, qui se produit par glissement local des plans denses de la structure cubique à faces centrées de sorte de former l'empilement hexagonal compact, suivi par une contraction de cet empilement hexagonal compact [9].

Un certain nombre de travaux se sont attachés à essayer de déterminer entre les deux mécanismes de déformation plastique, à savoir glissement de dislocations et maillage, lequel apportait le plus fort durcissement et dans quel ordre ils se produisaient.

Les travaux sur les monocristaux d'acier Hadfield ont montré que selon les conditions d'orientation des grains par rapport à la sollicitation, le maillage peut survenir en tout début de déformation plastique sans s'accompagner d'un durcissement notable, comme il peut se produire plus tard avec un durcissement important. Dans des échantillons polycristallins, il a également été observé que la taille de grain a une forte influence sur la survenue du maillage.

D'autres travaux essayé de supprimer le maillage soit par élévation de la température, soit par addition d'aluminium, qui a pour effet d'augmenter l'énergie de faute d'empilement et par conséquent de rendre les dislocations plus mobiles. Dans le premier cas, le taux d'écroutissage ne diminue pas car la précipitation de carbures, qui se produit à partir de 170°C vient compenser l'absence de joints de macles comme obstacle au mouvement des dislocations. Dans le deuxième ; c'est l'organisation des dislocations en parois de haute densité de dislocations qui contribue à la conservation d'un important taux de consolidation.

Grace à cette variété de mécanismes durcissants, le taux d'écroutissage des aciers Hadfield reste élevé dans un grand intervalle de température jusqu'à 300°C.

I.5.2.2.3.Dureté :

La valeur de la dureté mesurée par indentation dépend considérablement des conditions d'essai. Ainsi la dureté Vickers HV de l'état hypertrempé est de l'ordre de 360 pour une force $P=10\text{ N}$, décroît pour des forces supérieures, se stabilisant à HV 220 environ pour $P>50\text{ N}$ [13].

Des mesures de la dureté à 500 N ont été effectuées par Collette et al. [6] sur des échantillons écrouis par compression à 20°C . la dureté augmente linéairement avec la déformation comme dans l'essai de compression, passant de 220 à 600 pour un échantillon comprimé de 50 % environ, la pente $d\text{HV}/d\mathcal{E}$ étant égale en première approximation à 3 fois la pente d'écrouissage $d\sigma/d\mathcal{E}$ en compression.

Le taux d'écrouissage très élevé explique que l'emploi des aciers Hadfield sera indiqué dans les cas suivants ;

- Nécessité d'encaisser des chocs (résilience élevée) avec un durcissement progressif et important à l'endroit des impacts (pièces soumises à des chocs répétés) ;
- Déformation locale dans une couche superficielle devant ensuite résister à une force d'arrachement tangentielle (pièce d'usure). Leur résistance à la décohésion n'étant pas extraordinaire, on comprend que les aciers Hadfield résistent bien mieux dans le cas de sollicitations sous des contraintes de compression, qui évitent les amorces locales de décohésion qui pourraient se produire sous traction.

II.MATERIAUX ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES :

II.1. Partie technologique :

II.1.1.Définition :

Un concasseur est une machine conçue pour réduire les grosses roches en petites pierres, gravier, ou poussière de roche.

Les concasseurs peuvent être utilisés pour réduire la taille ou changer la forme des déchets afin qu'ils puissent être plus facilement éliminés ou recyclés.



Figure II.1 :une image d'un concasseur

Ils peuvent également réduire la taille d'un mélange solide de matières premières (comme le minerai), de sorte que ses différents composants puissent être séparés.

Le concassage est le processus d'application d'une force, amplifiée par avantage mécanique, à l'aide d'un matériau dont les molécules sont liées plus solidement et résistent mieux à la déformation que celles du matériau à concasser.[pas clair] Les appareils de concassage retiennent le matériau entre deux surfaces solides parallèles ou tangentes, et appliquent une force suffisante pour rapprocher ces surfaces, générant suffisamment d'énergie dans le matériau pour que les molécules se séparent (fracturation), ou changent d'alignement les unes avec les autres (déformation).

Les premiers concasseurs étaient des pierres, frappées contre une enclume de pierre, le poids de la pierre aidant la force musculaire. Les meules et les mortiers sont des appareils de concassage de ce type.

II.1.2.Types de concasseur :

Il existe des concasseurs de technologie différente, les plus fréquents sont cités ci-dessous.

1/Concasseur à mâchoires :

Fonctionnement d'un concasseur à mâchoires.

Le concasseur à mâchoire est une machine à broyer des roches (granite, calcaire, etc.) généralement à des fins industrielles, vu que la roche est la matière première par excellence de quasiment toutes les industries (métallurgie minière, etc.)



Figure. II.2. : une image présente un marteau de concassage a mâchoire

L'appellation « à mâchoire » est due au dispositif de concassage, qui reprend le principe de base d'une mâchoire, avec une paroi fixe et une autre mobile, la roche étant coincée entre les deux. La partie mobile est entraîné en rotation par une bielle (excentrique) qui assure la rotation de la mâchoire. Le ressort de rappel à sa base permet de ramener la mâchoire afin de

laisser passer les matériaux broyés. Ce concasseur associe donc deux mouvements. Un mouvement de compression (de gauche à droite) afin de concasser le granulats et un mouvement de friction (du haut vers le bas) afin de faire descendre les matériaux vers le convoyeur de réception des matériaux broyés. Les débits de telles machines sont conditionnés par leur taille d'ouverture et le réglage côté fermé à la base des mâchoires, là où sortent les matériaux.

Les mouvements répétitifs de la partie mobile, entraînés généralement par un moteur et une courroie, brisent la roche en petites pierres, la transformant en un produit fini commercialisable pour la fabrication du béton de construction, voire de route et autres applications.

Le concasseur à mâchoire reste de très loin le concasseur le plus populaire dans le monde, grâce à sa conception rudimentaire, sa fiabilité, sa maintenance peu coûteuse et ne nécessitant pas de grandes notions d'ingénierie.

2/Concasseur giratoire :

Le principe du concasseur giratoire est semblable à celui du concasseur à mâchoires, mais il est composé d'une surface concave et d'une tête conique. Les deux surfaces sont généralement doublées avec des pièces en acier au manganèse. Le cône interne a un léger mouvement circulaire, mais ne tourne pas, le mouvement est généré par un excentrique.[pas clair] Comme avec le concasseur à mâchoires, le matériau chute entre les deux surfaces en étant progressivement écrasé jusqu'à ce qu'il soit assez petit pour tomber dans l'espace entre les deux surfaces.

Le concasseur giratoire est l'un des principaux types de concasseurs primaires dans les mines ou les usines de traitement du minerai. Les concasseurs giratoires sont désignés par leur taille, soit selon l'ouverture maximum et le diamètre inférieur de la mâchoire mobile, soit par la taille de l'ouverture de réception. Les concasseurs giratoires peuvent être utilisés pour le concassage primaire ou secondaire. Le concassage est causé par la fermeture de l'écart entre la mâchoire mobile montée sur l'arbre central vertical et les doublures concaves (fixes) montées sur le châssis principal. Cet écart varie grâce à un excentrique sur la partie inférieure de l'arbre, qui entraîne l'arbre central vertical en rotation. L'arbre vertical est libre de tourner autour de son axe. Le concasseur est illustré d'un type court arbre de broche suspendue [Quoi ?], ce qui signifie que l'axe principal est suspendu au sommet et que l'excentrique est monté

au-dessus de la couronne. La conception à arbre court a remplacé la conception à arbre long dans lequel l'excentrique est monté au-dessous de la couronne.

3/Concasseur à cône :

Un concasseur à cône ou concasseur conique a un fonctionnement similaire au concasseur giratoire, avec moins de pente dans la chambre de cassage et une plus grande zone parallèle entre les zones de concassage. Un concasseur à cône brise la roche en la serrant entre une tête excentrée tournante, qui est couverte par un blindage résistant à l'usure (mâchoire mobile), et le bol, couvert par un concave manganèse ou une mâchoire fixe. Comme la roche entre par le sommet du concasseur à cône, elle se coince et se comprime entre la mâchoire mobile et la mâchoire fixe. De gros morceaux de minerai sont cassés une fois, puis tombent à une position inférieure (car ils sont maintenant plus petits), où ils sont à nouveau cassés. Ce processus continue jusqu'à ce que les morceaux soient assez petits pour passer à travers l'ouverture étroite dans le bas de la chambre de cassage. Un concasseur à cône est adapté au concassage de divers minerais et roches, pour des dureté allant de mi-dure à dure. Il a l'avantage d'une construction fiable, d'une haute productivité, d'un réglage facile et de faibles coûts opérationnels. Le système de libération à ressort d'un concasseur à cône agit comme une protection contre les surcharges qui permet aux matériaux imbroyables de passer par la chambre de concassage sans endommager le concasseur.

4/Concasseur à percussion :

Le concasseur à percussion appelé aussi concasseur à marteau peut être à axe horizontal ou vertical.

a/Concasseur à percussion à axe horizontal :

Le concasseur à axe horizontal utilise la percussion pour briser la roche contrairement aux concasseurs à mâchoires, giratoire et à cône qui utilisent la compression. Il est composé d'un rotor lui-même équipé de battoirs ou marteaux et d'écrans de projection lieux d'impact des cailloux. Ce type de concasseur peut être utilisé en primaire ou secondaire ou tertiaire selon les tailles et technologies.

Le principe de concassage est :

alimentation du concasseur en partie supérieure latérale

percussion des cailloux par les marteaux et projection en direction des écrans

rencontre avec l'écran, le caillou se brise sur l'écran et repart en direction des marteaux par rebond sur l'écran

rencontre avec les marteaux et recommencement du processus ou rencontre avec un autre caillou en sens inverse

Tout au long du processus les cailloux descendent par gravité au fur et à mesure du concassage et sortent ensuite de la chambre de concassage. La capacité du concasseur à briser un caillou est liée à l'énergie accumulée par le caillou lors de l'impact avec le marteau. Cette énergie est donc dépendante de la vitesse du marteau mais aussi de la masse du caillou, c'est pourquoi il peut être difficile de briser des cailloux de petites dimensions avec ce type de concasseur. La variation d'alimentation du concasseur peut aussi influencer sur l'usure des battoirs.

La percussion permet d'obtenir des matériaux avec une meilleure forme, c'est-à-dire une meilleure cubicité des gravillons. Cependant il est bien plus sensible à l'usure et à l'abrasivité des matériaux et n'est donc pas adapté à tous les types de roches.

b/Concasseur à percussion à axe vertical :

Le concasseur à axe vertical est utilisé pour fabriquer des sables de qualité. En effet, il permet de concasser encore plus finement les graviers en finissant de rompre les liaisons les plus faibles rémanentes du granulat. On obtient ainsi un sable dont la consistance et la forme sont optimaux pour les sables types bétons notamment. Cette machine combine l'énergie de rotation avec l'énergie de percussion pour concasser les matériaux. En entrée, les granulats arrivent par la tête du concasseur. Par gravité, ils arrivent par l'intermédiaire d'une goulotte verticale sur une plaque de distribution (en fer fortement chromé pour minimiser l'usure), légèrement conique pour éviter que les matériaux ne stagnent dessus. Le rotor vertical est constitué d'une chambre en rotation, blindée, possédant en général 4 ouvertures avec des pièces d'usure sur les côtés: les blocs de percussions.

II.2.La composition chimique :

Le tableau présente la composition chimique donnée par le fournisseur de la nuance.

Il s'agit à premier abord, d'une nuance au Mn, caractérisée par la possibilité d'obtention d'une grande quantité d'austénite résiduelle .généralement ces nuances sont destinées à la fabrication des pièces travaillant à l'usure intense par abrasion (mâchoires pour broyeur, rails ,outillages minier.....

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu
0,95- 1.3	0.65	11.5- 14	0.05	0.03	0.5	0.75	1.75	0.045	0.3

Tableau II.1.Composition chimique de l'acier expérimentée

II.3. Etude métallographique :

L'étude métallographique est un moyen de contrôler essentiellement la structure micrographique des matériaux métalliques. Toute étude de matériaux métalliques passe presque toujours par l'étude des constituants micrographiques. Ce sont eux qui donnent aux métaux leurs différentes caractéristiques mécaniques. Toutes les étapes de la vie d'un matériau sont concernées par leur mise au point, leur utilisation et leur détérioration par usure.

II.3.1. Préparation des échantillons :

La préparation des échantillons pour l'observation micrographique nécessite un polissage mécanique. Celui-ci consiste en une série de polissage au papier émeri de granulométrie de plus en plus fine pour terminer avec un tissu recouvert de pâte diamantée (à chaque fois suivis de nettoyage à l'eau à la fin de chaque étape de polissage pour enlever les plus grosses particules qui pourraient griffer la surface). Tous les échantillons étudiés sont attaqués au nital à 4%, pour revèler la struture de l'acier

A. le découpage : Pour le découpage on a utilisé une macro tronçonneuse pour préparer les échantillons .Le découpage se fait à la présence de l'eau pour éviter

l'augmentation de la température (à cause de frottement entre le disque abrasif et l'échantillon) donc par conséquent on évite le changement de la structure.

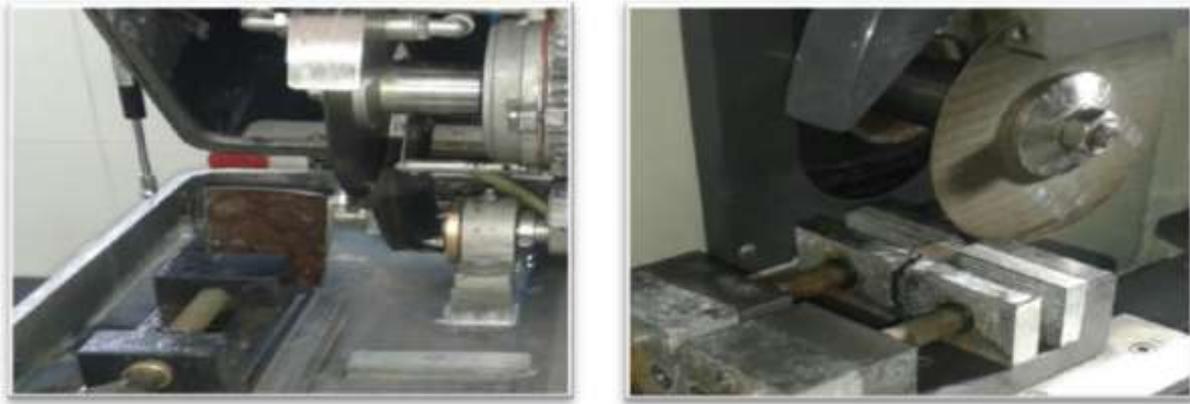


Figure II.3. l'opération de découpage

B. le polissage : L'opération de polissage a été effectuée avec des papiers abrasifs de différentes granulométries : 120, 320, 400, 600, 800, 1000, 2000, 4000. Ensuite les échantillons ont été finis avec la pâte diamantée dans un papier feutre pour avoir un état miroir des surfaces.



Figure II 4: L'opération de polissage

D. l'attaque chimique : L'attaque chimique se fait à l'aide de réactif qui permet de différencier les différentes phases de métal, et de révéler les joints des grains, cette méthode consiste à tremper la face à attaquer dans le réactif choisi pendant un temps convenable.

Pour notre examen nous avons effectué l'attaque suivant :

- Une attaque avec le réactif de Nital (4%) dont la composition chimique est
4ml d'acide nitrique
100ml d'éthanol
- Durée d'attaque : environ 60 secondes.

II.3.2. Observation :

Grâce au microscope optique équipé d'une camera vidéo type « NIKON » (Figure II 5) piloté par ordinateur, il est possible de visualiser tous types de surfaces avec un grossissement pouvant aller jusqu'à 1500 fois. De ces nombreuses observations et grâce à une bonne connaissance de la physique des solides, les diagrammes de phases des matériaux et de nombreux paramètres du microscope, une analyse précise peut être menée.



Figure II.5.L'observation microscopique

II 4 Essai de dureté :

La dureté d'un matériau est une propriété mécanique représentant la résistance à la pénétration d'un indenteur dont la forme dépend du procédé d'indentation choisi, Pendant l'essai de dureté, il se forme une empreinte d'indentation entourée d'une zone déformée plastiquement. Plus la dureté est élevée, plus l'empreinte et la zone déformée sont réduites. La déformation plastique est le résultat de microdéformations intervenantes à l'échelle de la maille cristalline à partir des

défauts microstructuraux comme les précipités, les atomes en insertion ou en substitution et les dislocations. Cet essai sert à mesurer la dureté d'un métal en tenant compte de la profondeur à laquelle une pointe pénètre dans le métal lorsqu'on applique une charge donnée. Les essais de dureté peuvent être réalisés à l'aide de plusieurs appareils de mesure. La principale différence entre les divers essais réside dans la forme de la pointe. Dans notre étude nous avons utilisé la dureté Vickers HV sous faible charge de 100 g le tableau ci-dessus résume les valeurs de profile de dureté sur les types des échantillons.



Figure II 6.le Duromètre utilisé

II.5.Essai d'usure :

II.5.1.Usure par frottement :

Ce dispositif a été réalisé au niveau du laboratoire de l'école (mine et métallurgie Annaba). L'essai effectué sur cet appareil est un essai normalisé utilisé par l'ensemble du monde industriel. Il s'agit de mesurer la quantité de matière perdue après passage de 47min de l'échantillon sur un disque en quartz de granulométrie 120 mm, avec une vitesse de rotation de 150 tours / minute et une charge P de 0.5 Kgf (figure II 7)



Figure II.7: Dispositif utilisé pour l'usure par frottement.

II.6. Traitement thermique :

La trempe est un procédé de durcissement qui consiste à chauffer l'acier au-dessus de sa température de transformation, puis à la refroidir rapidement en la trempant dans un bain liquide ou dans un fluide gazeux. La trempe de l'acier permet d'augmenter sa dureté et sa résistance. On l'utilise pour durcir les pièces mécaniques lorsque leur fonction exige une dureté accrue pour résister à l'usure ou aux chocs répétés.

La première étape de la trempe consiste à chauffer la pièce au-dessus de sa température de transformation. Elle varie selon le pourcentage de carbone contenu dans l'acier et dans notre cas, la température de traitement est de 950 °C.

Pour le chauffage des échantillons, on a utilisé un four (Figure VI.6) qui permet d'obtenir une température uniforme, ce qui se traduit par une trempe de qualité. On utilise un four électrique, il est propre, son réglage est simple et la température développée est uniforme.

Une fois les échantillons installés dans le four, on doit maintenir la température suffisamment longtemps pour permettre à la chaleur de se distribuer à travers toute la pièce.

Donc, le temps de chauffage nécessaire varie en fonction des dimensions de l'échantillon à tremper. Le refroidissement se fait à l'air, l'eau et l'huile et suivi d'un revenu à 180,540, °C, avec refroidissement dans le four .



Figure II.8. Le four utilisé pour les traitements thermique

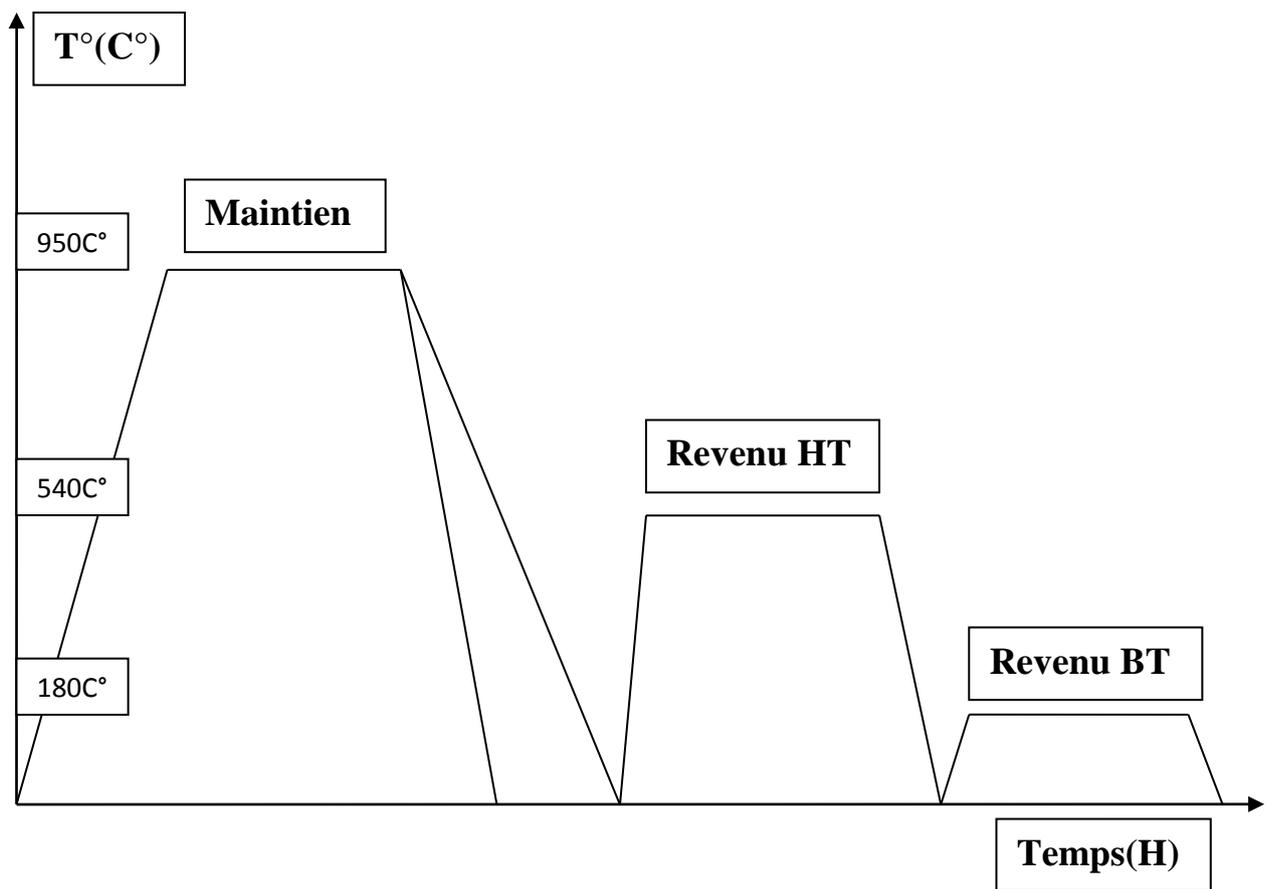


Figure II 9 cycle de traitement thermique

III Résultat et discussions :

III.1 Expertise de la pièce endommagée :

La figure III.1 présente une vue d'ensemble de la pièce (marteau de concassage à mâchoire faisant l'objet de notre étude



Figure III.1. Vue d'ensemble de la pièce endommagée au cours de l'exploitation

Cette étude a été dictée par une rupture prématurée de la pièce au cours de l'exploitation

La figure III.2 montre un macrodéfaut (fissure profonde au niveau des arêtes) qui conduit a la mise hors service de l'outil.



Figure.III.2.macrofissure ayant entraîné la rupture

Après découpage transversal de la pièce un macrodéfaut a été révèlé (figure III.3)

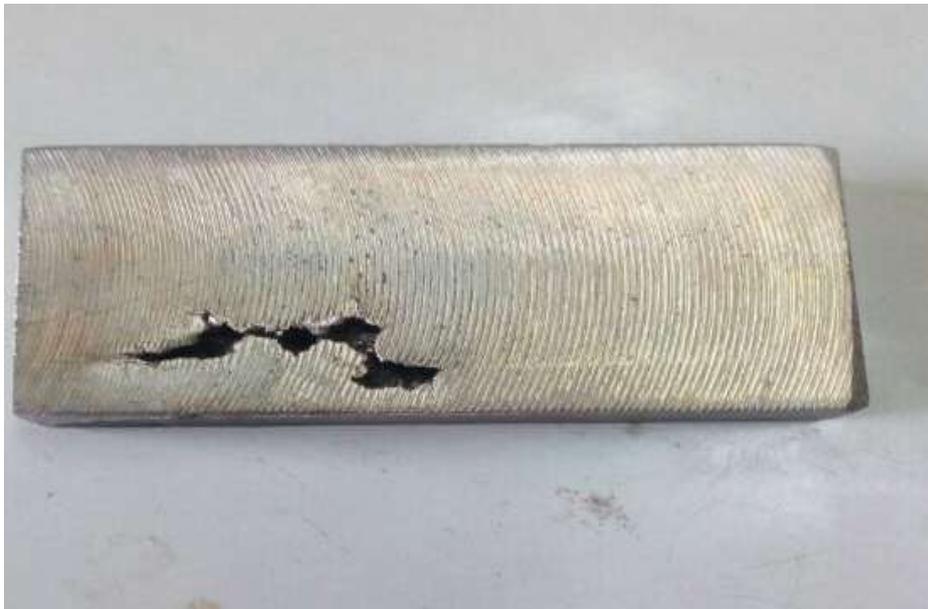


Figure.III.3.Macro défaut de fonderie (cavité)

On peut retenir que cette première investigation macrographique (visuelle) a révélée d'importants défauts ayant conduit a la rupture prématurée de la pièce a premier abord ces défauts sont liée a la technique de fabrication c'est-à-dire la fonderie du moule ou l'absence de masselotte au cours de la coulée conduit à des macro défauts cavités ou retassure) à l'intérieur de la pièce

Ces retassures sont la source d'apparition et de propagation de fissure conduisent a la rupture prématuré du matériau

III.1.2 confirmation de la composition chimique :

Le tableau III.1 présente des résultats d'analyse chimique par Spectromètre FRX

C%	Mn%	P%	Si%	Cu%	Al%	Ti%	Nb%
0,37	0,20	0,037	0,47	0,113	0,006	0,002	0,016
Ni%	Cr%	Mo%	V%	Sn%	B%	S%	W%
0,28	12,36	0,042	0,038	0,010	0,002	0,020	/

Tableau III.1.la composition chimique de la pièce endommagée

Il apparait que la nuance conduit un pourcentage important de Chrome (12,36 en poids) par contre la teneur en Mn est faible (0,2% °LE Carbone a , quand a lui été confirmé a hauteur de 0,37 les autres éléments demeurent en faibles teneurs , donc sans effet perceptibles sur les transformation de phases et les propriétés

Si l'on tient compte les condition de travail de la pièce qui sont

- Choc
- L'usure par abrasion intense
- Torsion (à un degré moindre)

La nuance riche en chrome utilisée réellement ne favorise pas la résistance à l'usure par abrasion et au choc

La formation de carbures de chrome spéciaux de type Cr₂₃C₆ au cours de la solidification primaire dont la disposition selon les joints des grains favorise

En conclusion la composition réelle révélée par l'analyse chimique ne convient pas aux conditions de travail des marteaux de concassages

III.1.3 Analyse métallographique :

L'analyse au microscope optique a mis en évidence a qui suit :

A/ Sans attaque, l'acier analysé comporte une multitude de micro et des macropores

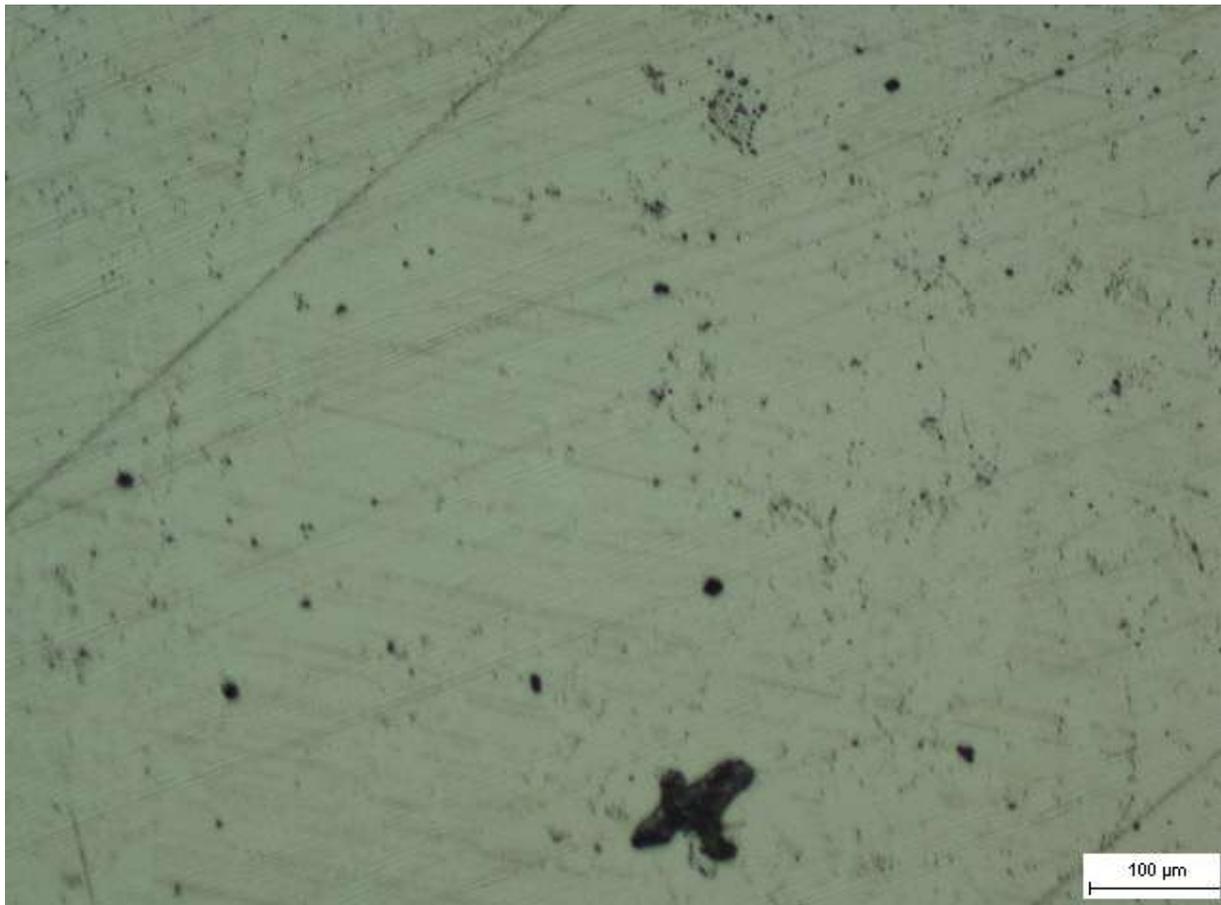


Figure.III.4 Micrographie de la surface polie de l'échantillon de départ,sans attaque chimique.Presence de pores et d'inclusion non métallique



Figure.III.5.details d'une inclusion non metallique :forme de tréfle ,probablement un oxysulfure.



Figure.III.6 details de défauts sur la surface polie et non attaquée de l'échantillon :inclusion d'oxydes

A notre avis des pores proviennent d'une mauvaise maîtrise de l'opération de fusion et de coulée lors de l'élaboration

A l'origine de ces défauts, on peut noter ce qui suit :

Présence d'humidité dans l'environnement immédiat du métal liquide (moule en sable)

Présence d'impuretés volatiles dans la charge liquide (impureté a faible température d'évaporation Zn Sn Al...)

La présence de constituant sombre dans le volume de la pièce laisse a supposé que le bain contient des résidus d'oxyde la formation d'inclusion

B/ avec attaque, l'échenillant de l'acier a révélé un réseau de carbures de chrome grossiers selon les joints de grains.

Les figures ...montrent la structure de l'acier étudié sous différents grossissements (x100, x500, x1000)

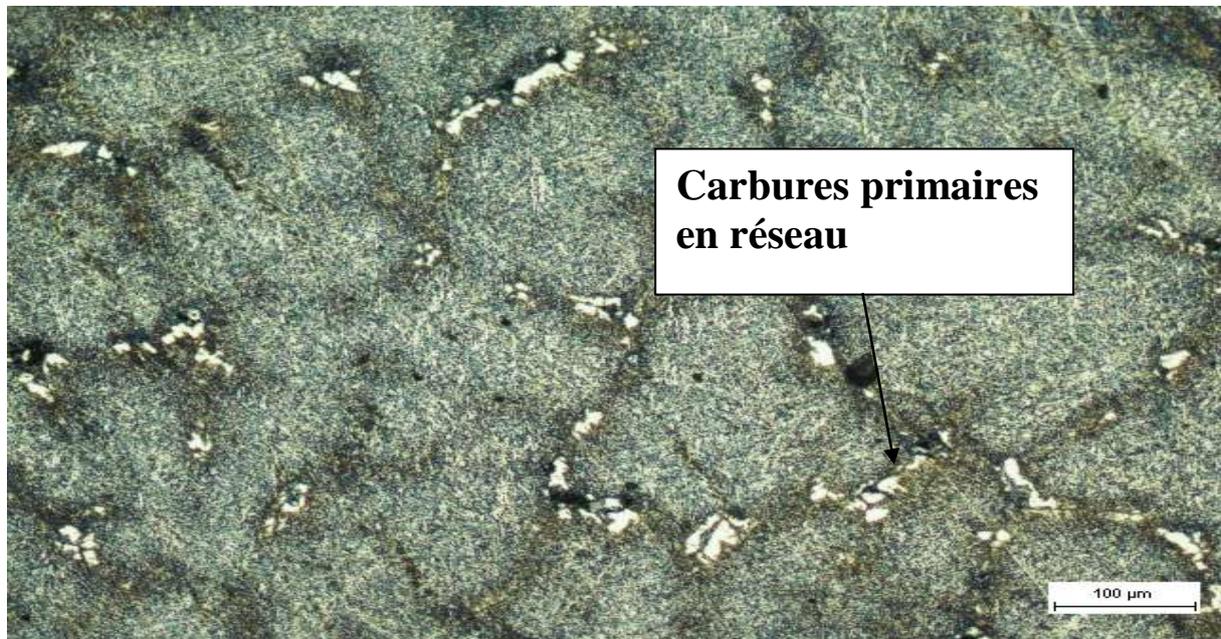


Figure III.7 microstructure à l'état initial (sans traitement thermique) x100

Sous de faible grossissement, le réseau de carbure de chrome est bien visible et reconnaissable par la disposition en « chapelée » selon le joint de grain.

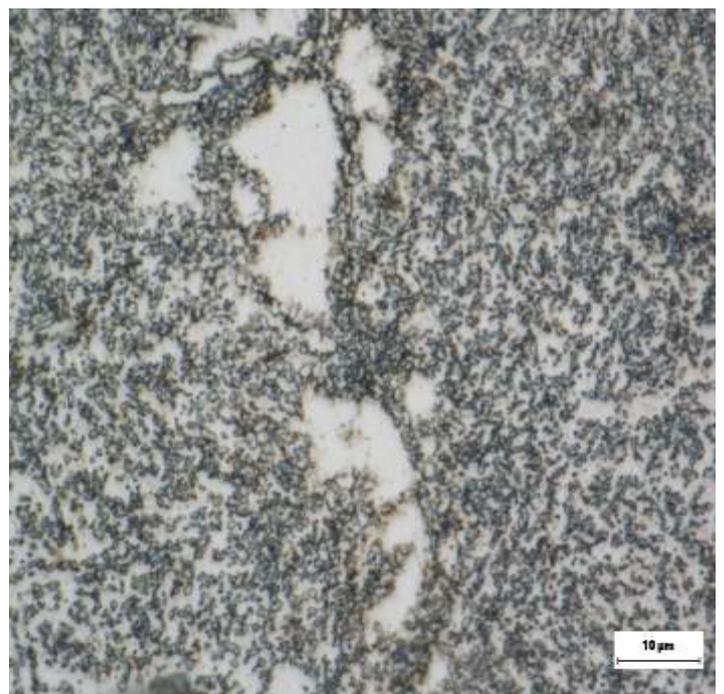
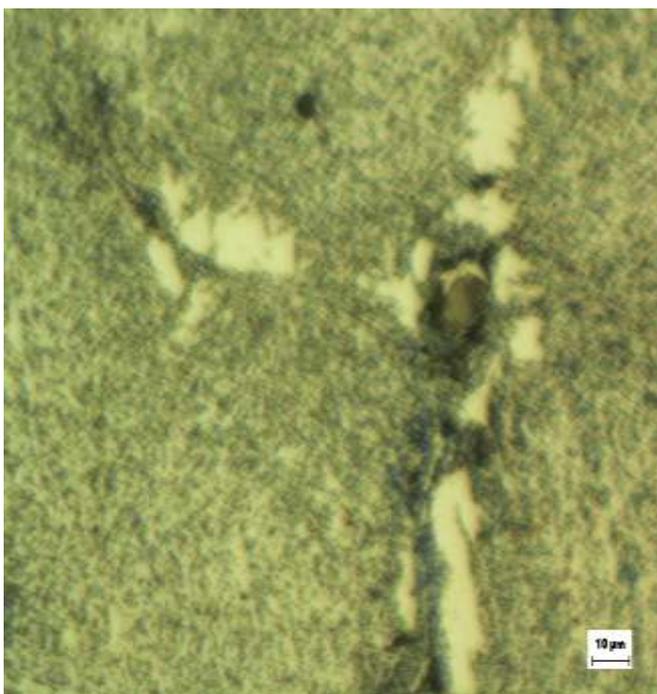


Figure III.8. Microstructure à l'état initial (sans traitement thermique)

Pour des grossissements plus élevés on constate que la morphologie de ces carbure : sous forme d'amas grossiers selon le joint de grain. Leur forme angulaire accentue le caractère fragile de l'acier. Par contre la matrice métallique est constituée de ferrite dans laquelle sont dispersés les carbures de type : $(Fe, Cr)_3C$, $(Cr, Fe)_{23}C_6$, $(Cr,Fe)_7C_3$

III.1.4. Microstructures de l'acier exploité après différents traitements

La microstructure de l'état recuit est présentée la figure .. On note la présence de deux constituants : la ferrite et la perlite. La structure montre clairement des réseaux de carbure de chrome. Outre cela, la structure comporte une quantité non négligeable d'oxydes disposés selon les joints de grains.

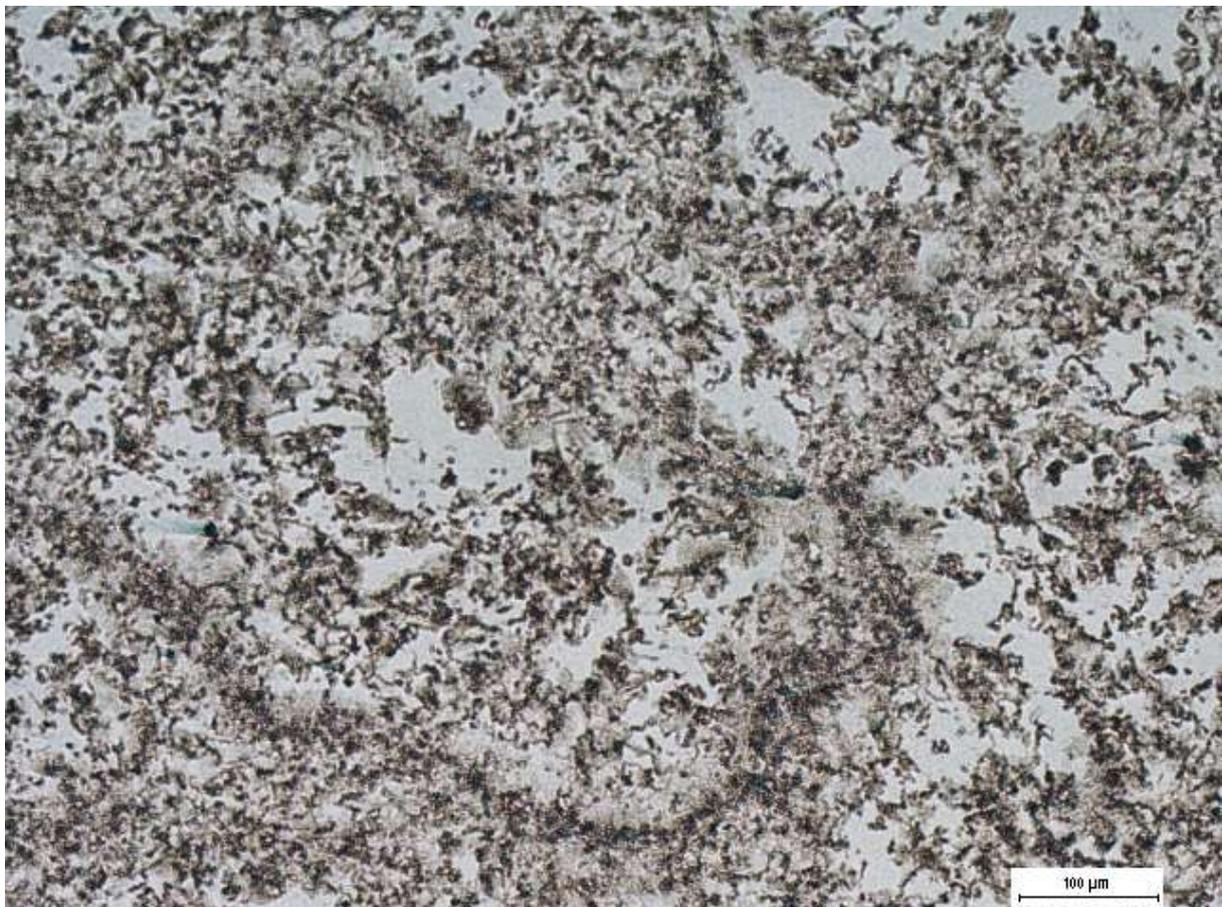


Figure III.9. Microstructure de l'acier à l'état Recuit

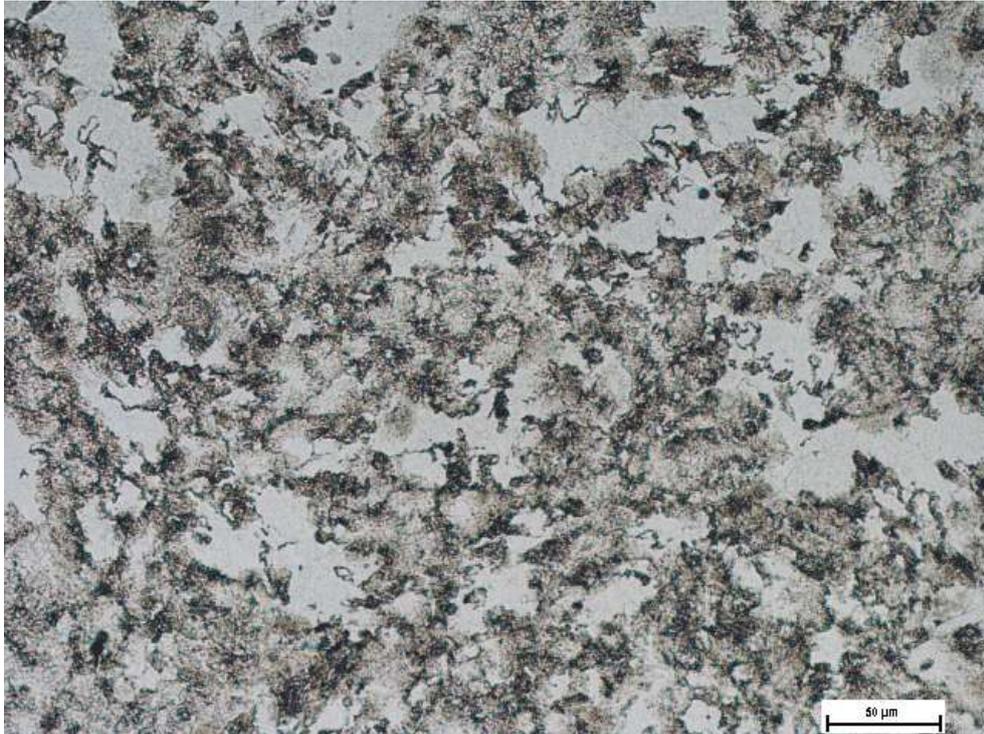


Figure.III.10. Microstructure de l'acier à l'état Recuit

La figure (Figure.III.10.) montre une dispersion des carbures fins dans le grain perlitique, probablement les carbures cités préalablement.

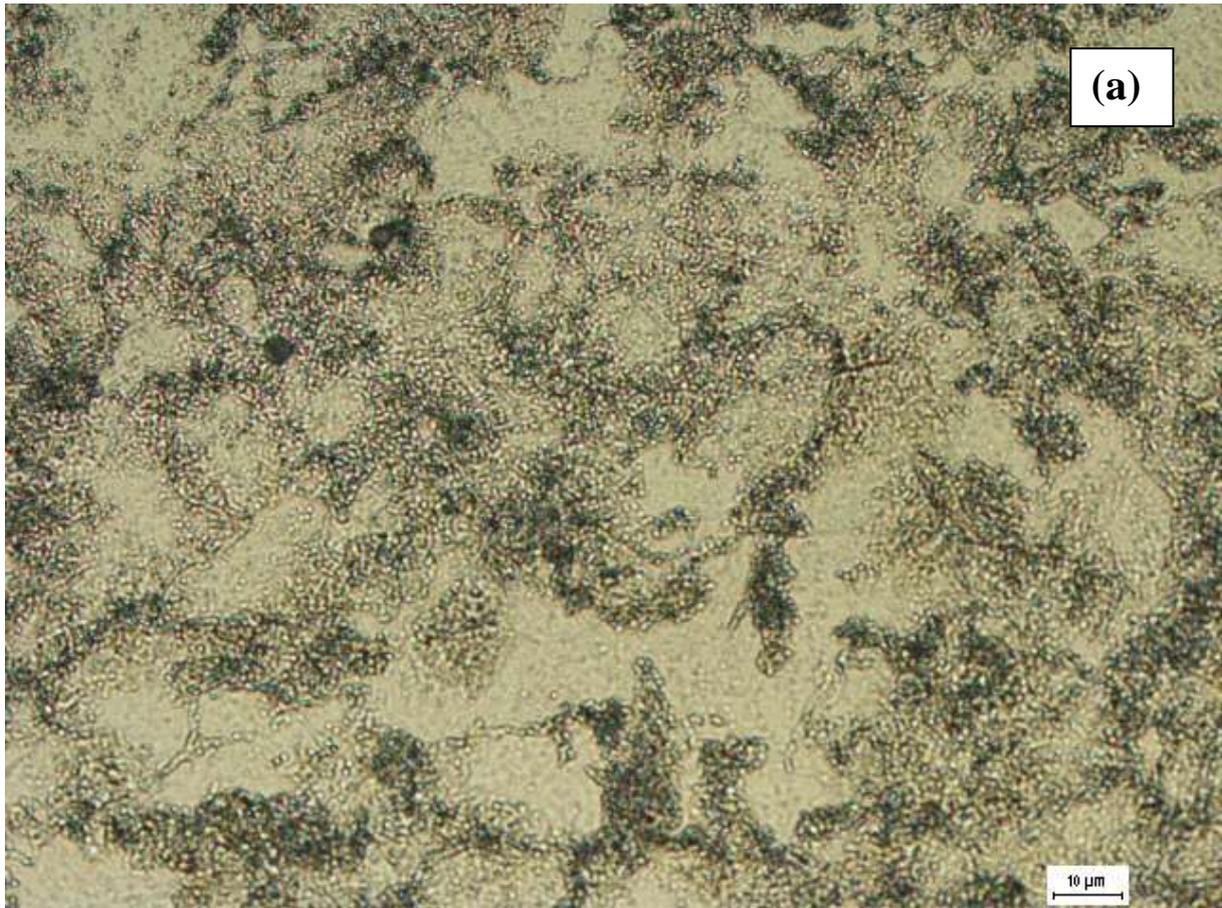


Figure.III.11. Microstructure sous différents grossissements illustrant la dispersion des fins précipités de carbures de chrome dans la matrice ferritique

L'état de trempe :

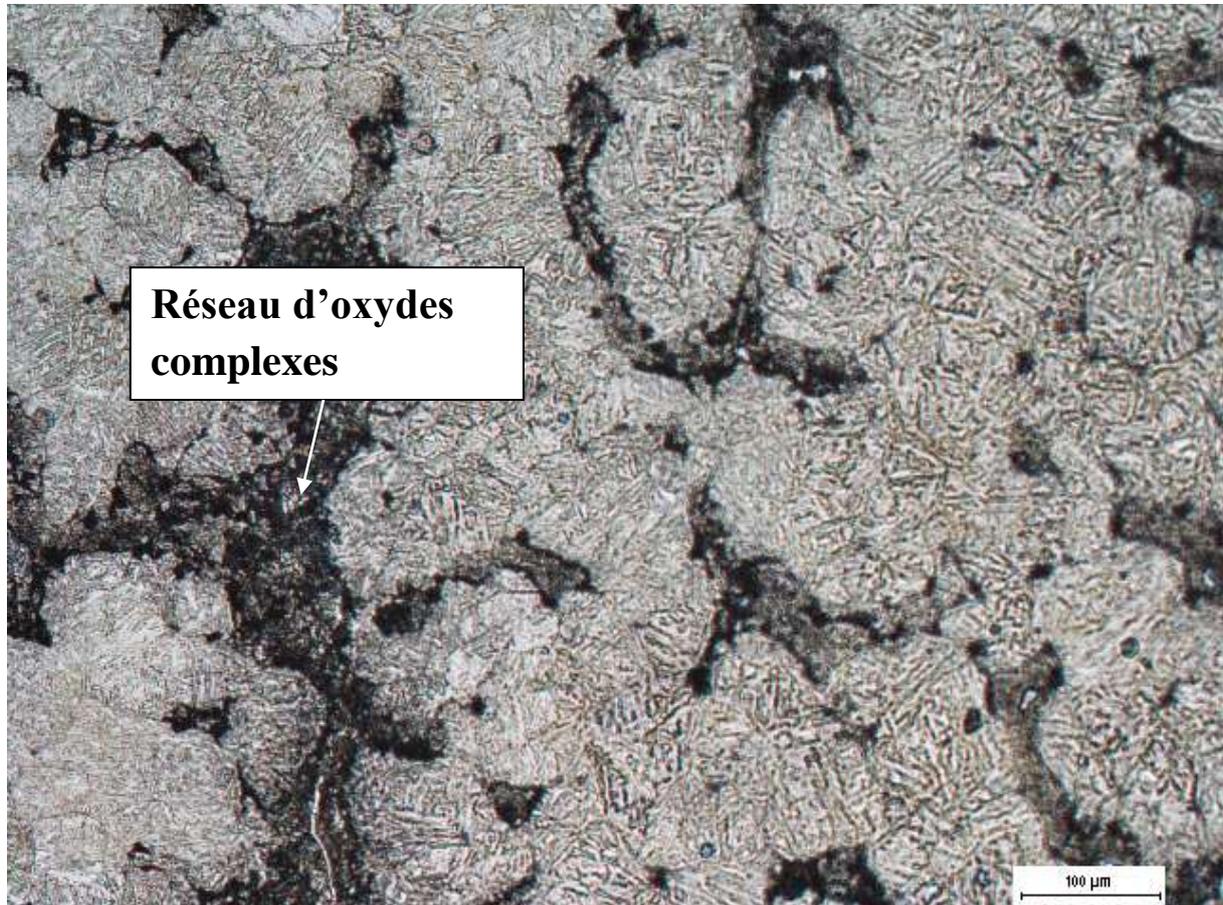


Figure.III.12 détails d'une microstructure présente des réseaux d'oxydes complexes

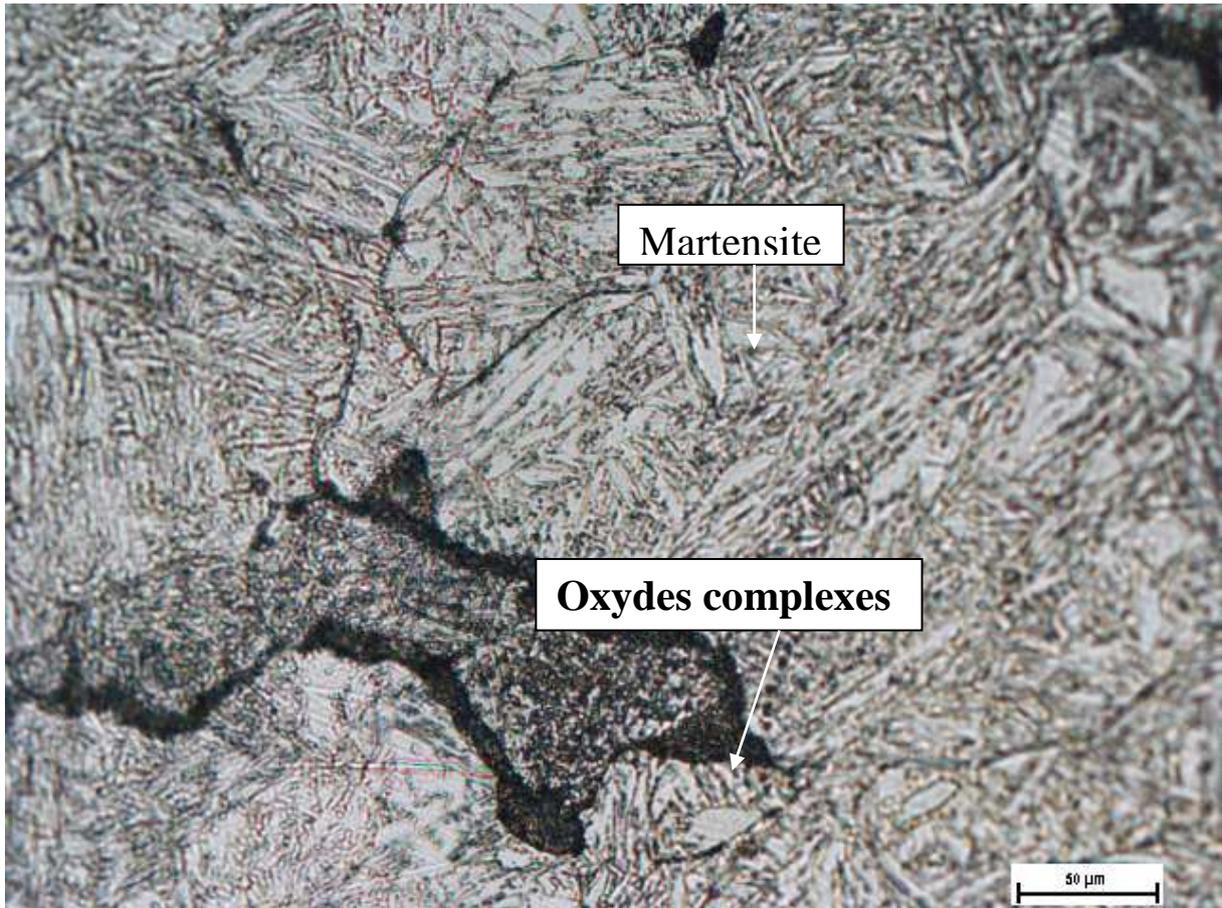


Figure III 13 a et b Microstructures de l'acier trempé (présence d'un réseau d'oxydes complexes)

La figure III.13 montre la microstructure d'une martensite de trempe (martensite riche en C et en Cr). Cet état de la martensite suppose une très forte tétragonalité, source de contraintes structurales.

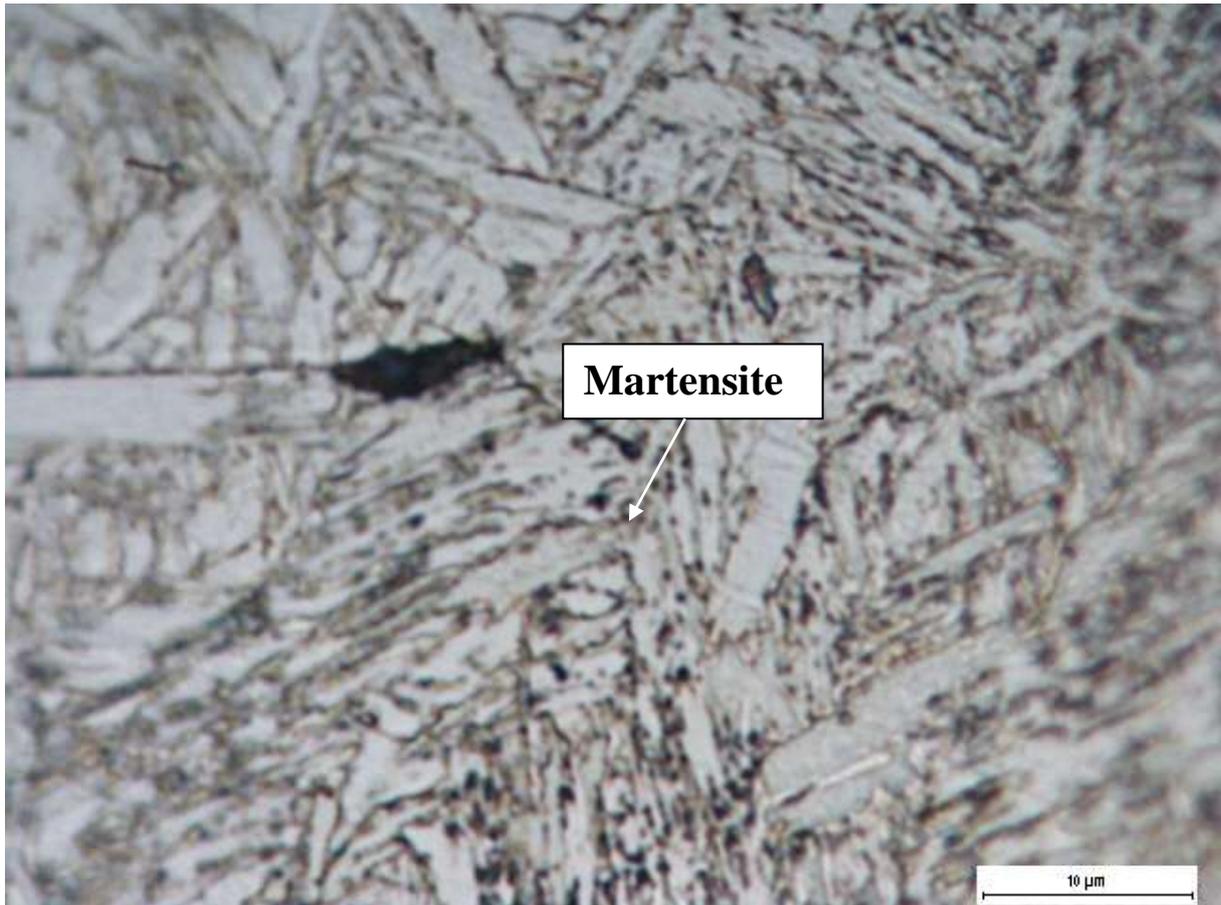


Figure III.14 Détails de la structure martensitique

Les détails de la martensite sont donnés par la figure III 14. Il s'agit d'une martensite en « lattes », issue d'un très fort cisaillement de la élémentaire Cubique Centrée pour donnée une maille quadratique ($c/a > 1$).

L'état de la trempe et revenu à base température

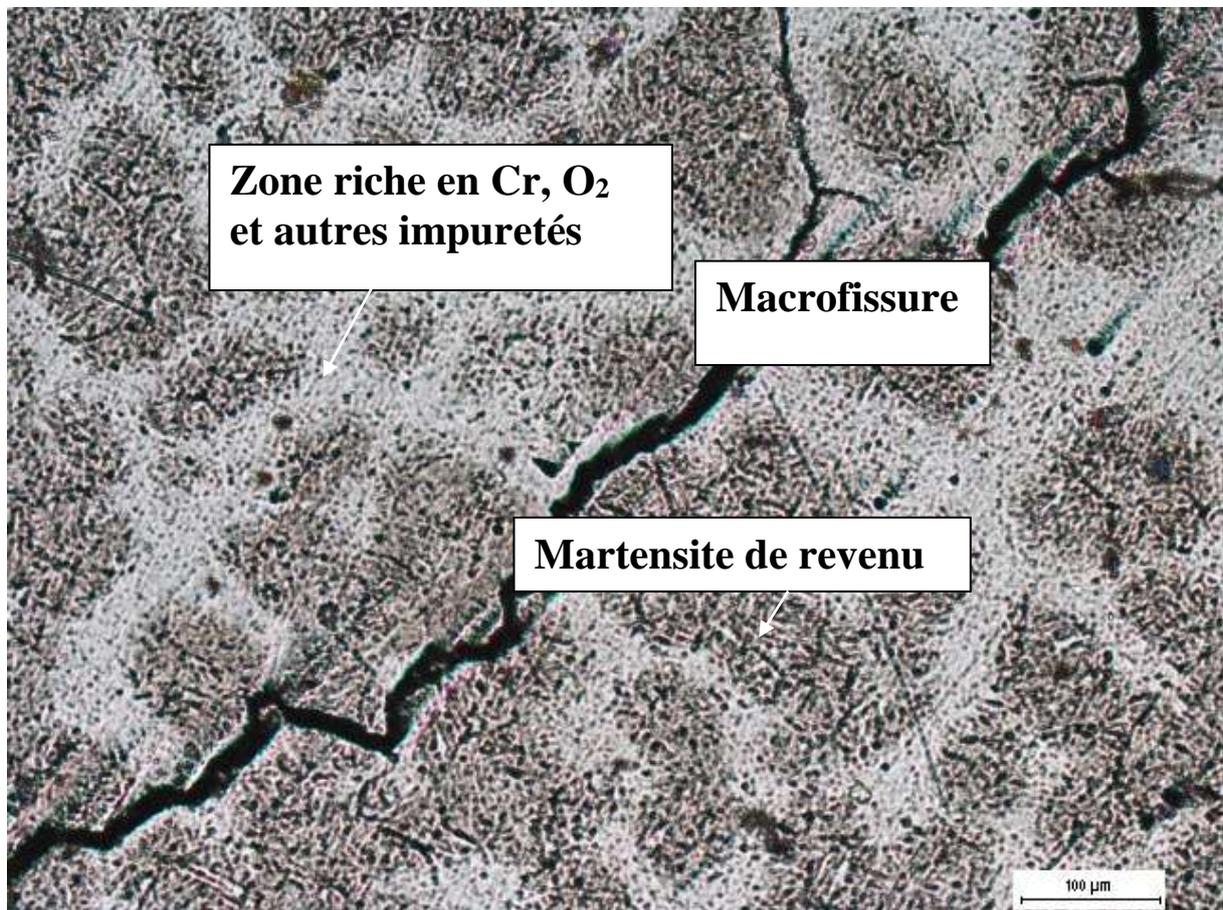


Figure III.15.structure obtenue après trempe et revenu a basse temperature.

La figure III 15 présente la structure obtenue après trempe et revenu à basse temperature. Il ya toujours présence de martensite (de revenu) et formation d'un reseau selon l'ancien joint de grains austénitique, d'un réseau fragilisé par des ségrégations de Cr, O₂ et autres impuretés dues à la technique de coulée en sable. Ce réseau s'est avéré très fragile et constitue le chemin de prédilection de la propagation de la fissure fragile. Ce qui constitue une cause essentielle de la dégradation de l'acier lors de l'exploitation.

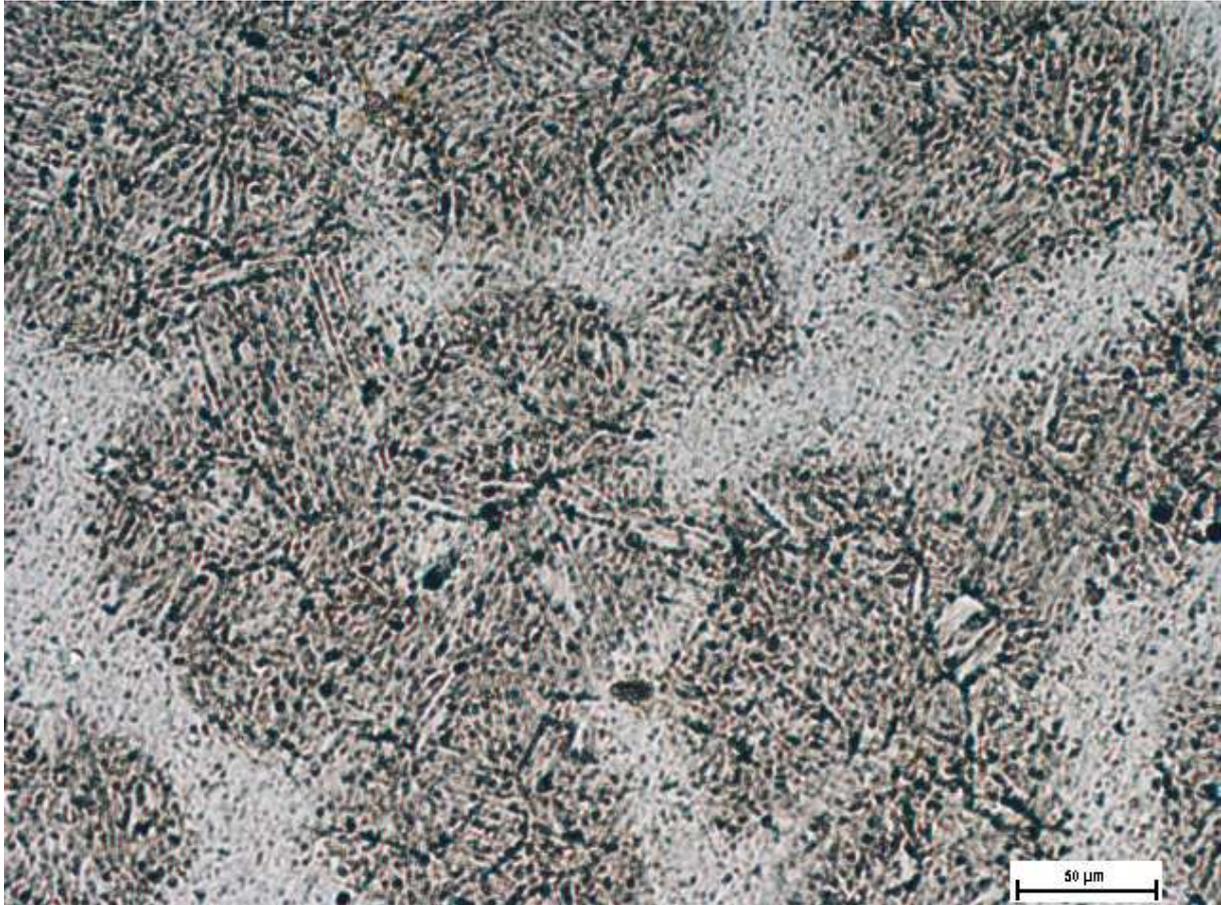


Figure III.16 Détails du reseau fragilisé

La figure III 16 présente les détails du réseau fragilisé et des plages de martensite de revenu

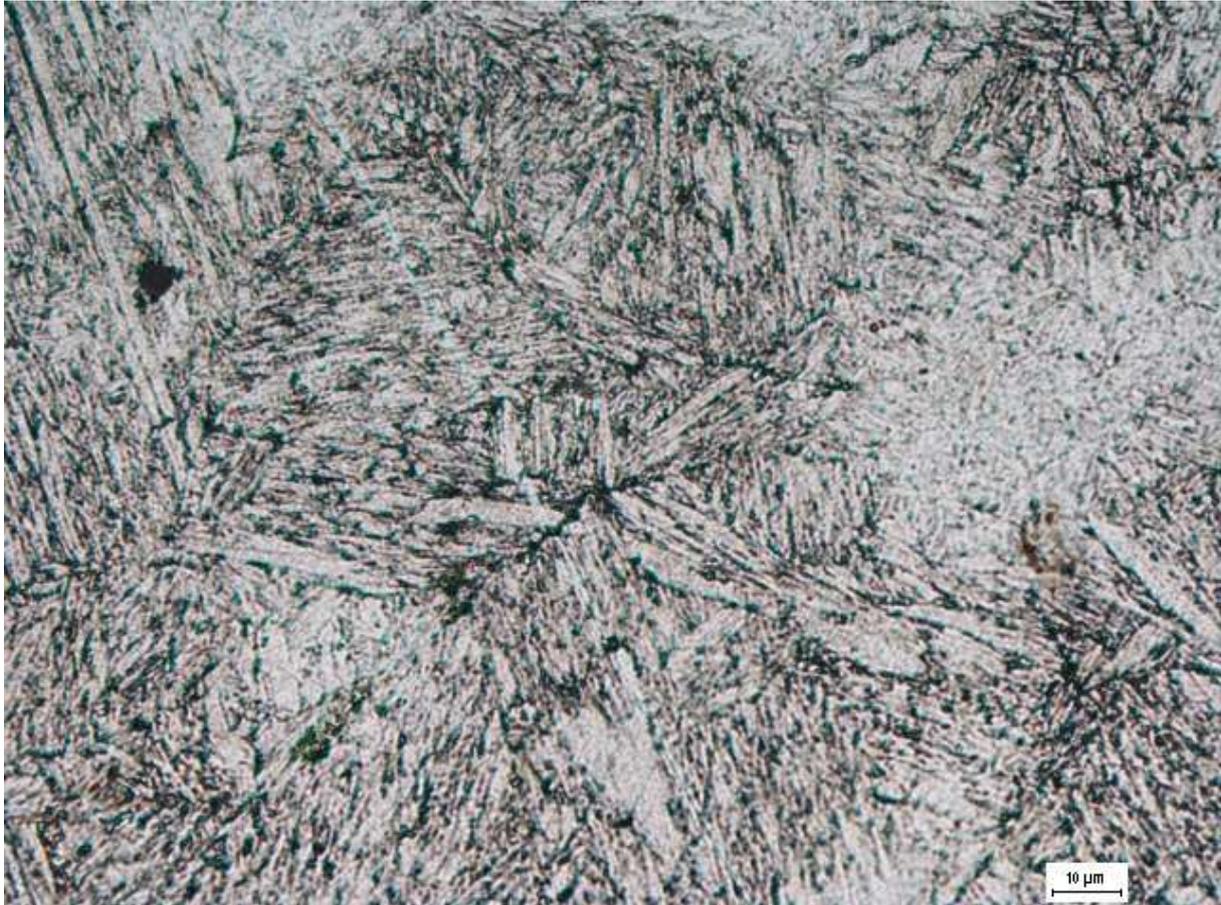


Figure III 17 détails de la martensite de revenu

La figure III 17 présente les détails de la martensite de revenu. On note une structure plus fine que la martensite de trempe.

L'état trempé et revenu à haute température est donné par les figures III. 18, 19 et 20. On note la persistance du réseau de carbure de chrome oxydés, avec la formation d'une sous structure de carbure de chrome secondaire en position intra granulaire.

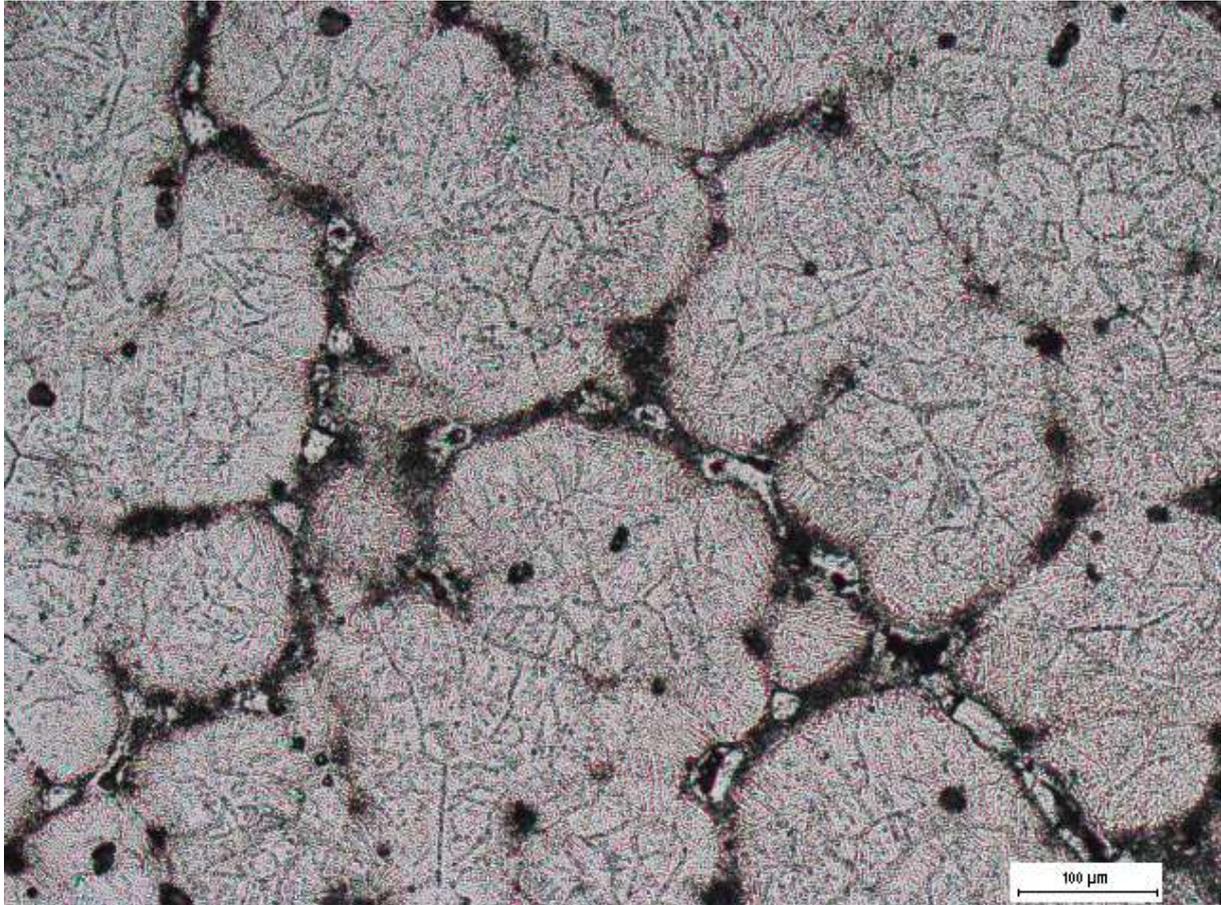


Figure III 18 : détails sur les oxydes et les carbures de chrome situé au joint de grain

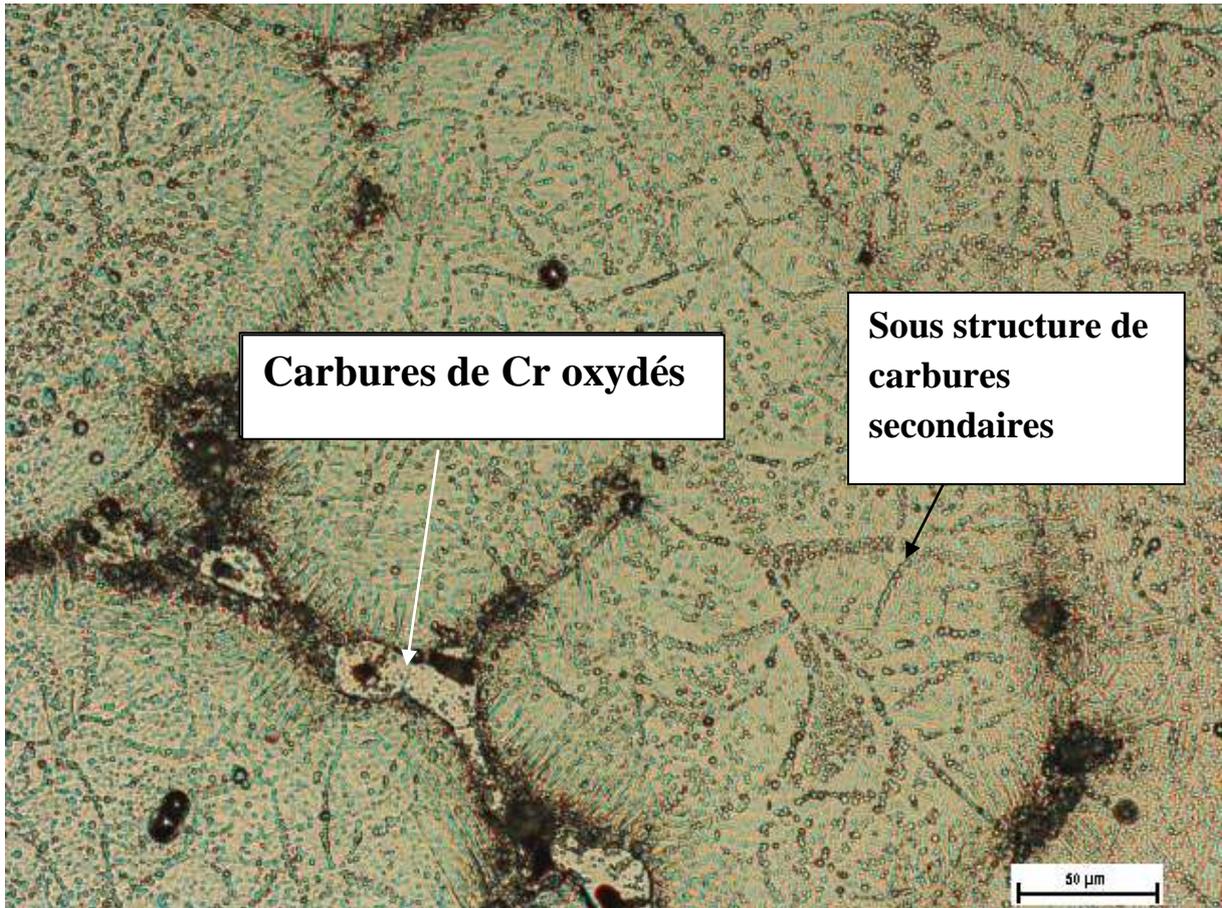


Figure III 19 Détails de la structure après trempe et revenu à haute température. Présence de réseau de carbure oxydés et de sous structure de carbures secondaires



Figure III 20 Détails de la structure après trempe et revenu à haute température. Présence de sous structure de carbures secondaires de forme globulaire.

III 1 4 La dureté :

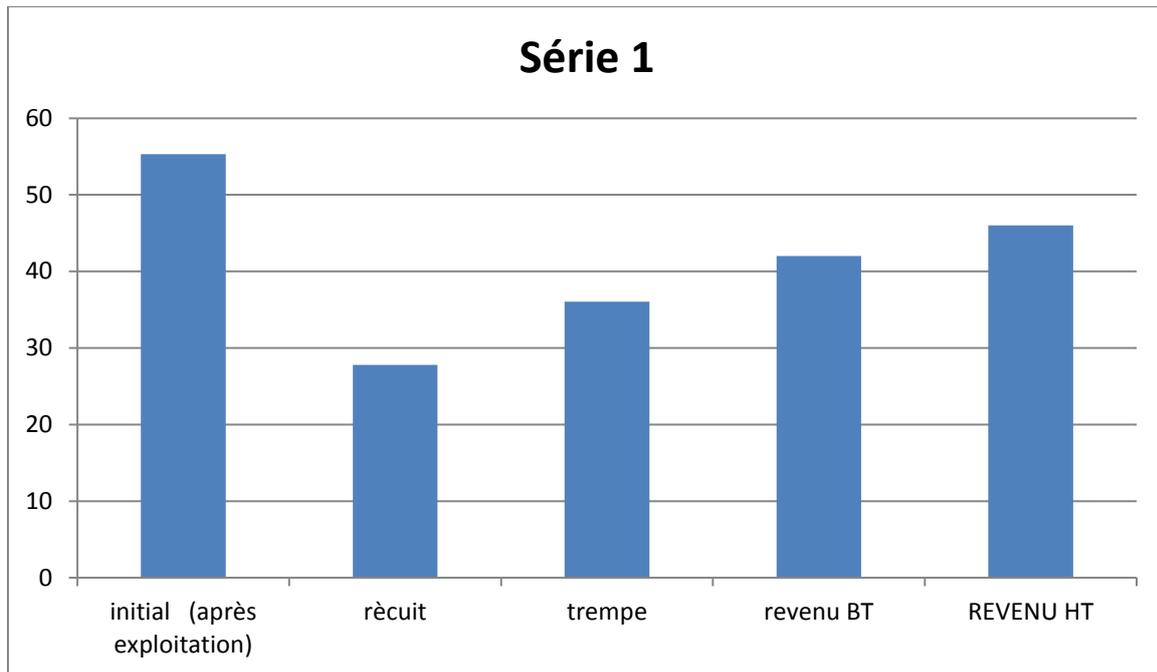


Figure III 21 L'histogrammes comparatifs de la dureté HRC de différents états de l'acier.

La figure III 20 montre les histogrammes comparatifs de la dureté HRC des différents états de l'acier. Les valeurs enregistrées restent en deçà des valeurs recherchées du fait de la fragilisation de la structure

Bibliographie

- [1] Guy Murry, 2004, Aide Mémoire Métallurgie, Dunod, Paris
- [2]..... À. Cornet, F. Hlawka, 2010, Métallurgie Mécanique, Ellipses, France
- [3]..... Technique d'ingénieur, M300, 2011
- [4]..... Technique d'ingénieur, M1126, 2011
- [5]..... M.T. Leger, P. Detrez. Les aspects métallurgiques du traitement thermique des aciers. Notice CTIF (1976), P 31, 38, 42, 43, 56 , 76
- [6]..... M. Wiest, E.Kassa, W.Davas, J.C.O Nielsen and H.Ossberger :assessment of methods for calculating contact pressure in wheel-rail/switch contact.wear
- [7]..... . Collette, C. Crussard, A. Kohn, J. Plateau, G. Pomey, M. Weisz : Contribution à l'étude des transformations des austénites à 12 % Mn. Revue de Métallurgie LIV : 6,433-481, 1957
- [8]..... . Collette, C. Crussard, A. Kohn, J. Plateau, G. Pomey, M. Weisz : Contribution à l'étude des transformations des austénites à 12 % Mn. Revue de Métallurgie LIV : 6,433-481, 1957
- [9]..... Austénitiques au Manganèse. Aciérie de Paris et d'Outreau, 1967
- [10]..... G. Collette, C. Crussard, A. Kohn, J. Plateau, G. Pomey, M. Weisz : Contribution à L'étude des transformations des austénites à 12 % Mn. Revue de Métallurgie LIV : 6,433-481, 1957
- [11]..... F. Montheillet : Métallurgie en mise en forme. Article M 600, Techniques de l'Ingénieur, Paris, 1996
- [12]..... E. Bayraktar, F. A. Khalid, C. Levailant : Deformation and fracture behaviour of high manganese austenitic steel. Journal of Materials Processing Technology : 147, 145-154, 2004
- [13]..... Taotsung shun, C.M.Wan and J.G. Byrne : A study of work hardening in austenitic Fe-Mn-C and Fe-Mn-C-Al alloys. Acta Materialia : 12, 3407-3412,1992

[14]..... Yaping Lu, Bevis Hutchinson, Dmitri A. Molodov, Gu'nter Gottstein : Effect of deformation and annealing on the formation and reversion of ϵ -martensite in an Fe–Mn–C alloy. Acta Materialia : 58, 3079–3090, 2010

Liste des figures :

Figure I.1 traitement thermique.....	7
Figure I 2. Diagramme de transformation isotherme d'un acier 35CrMo4.....	9
Figure I.3: Évolutions, en fonction du temps, de la température, de la dilatation en peau et à cœur.....	10
Figure I.4 les distorsions subies par un cylindre arbré au cours d'un maintien à haute température, à l'état austénitique.....	11
Figure I.5. Evolutions de l'usure d'un matériel.....	21
Figure I.6 Abrasion.....	22
Figure. I.7 mâchoire de concassage de la nuance Hadfield.....	24
Figure I.8. Domaine de composition optimale selon les équations (I.1) et (I.2) des aciers Hadfield.....	26
Figure I.9. Diagramme d'équilibre des aciers à 13% Mn	27
Figure I.10. Effet de la vitesse de déformation, entre 10^{-4} et 2 s^{-1} , sur la courbe contrainte-déformation à 20°C d'un acier Hadfield corroyé	29
Figure II.1 :une image d'un concasseur.....	32
Figure. II.2. : une image présente un marteau de concassage a mâchoire.....	34
Figure II.3. l'opération de découpage.....	39
Figure II 4: L'opération de polissage.....	40
Figure II.5. L'observation microscopique.....	41
Figure II 6. le Duromètre utilisé.....	42
Figure II.7: Dispositif utilisé pour l'usure par frottement.....	43

Figure II.8. Le four utilisé pour les traitements thermique.....	43
Figure II 9 cycle de traitement thermique.....	43
Figure III.1. Vue d'ensemble de la pièce endommagée au cours de l'exploitation.....	44
Figure.III.2. macrofissure ayant entraîné la rupture	45
Figure.III.3. Macro défaut de fonderie (cavité).....	45
Figure.III.4 Micrographie de la surface polie de l'échantillon de départ,sans attaque chimique.Présence de pores et d'inclusion non métallique	47
Figure.III.5. détails d'une inclusion non métallique :forme de tréfle ,probablement un oxysulfure.....	48
Figure.III.6 détails de défauts sur la surface polie et non attaquée de l'échantillon :inclusion d'oxydes	49
Figure III.7 microstructure à l'état initial (sans traitement thermique)	50
Figure III.8. Microstructure à l'état initial (sans traitement thermique.....	50
Figure III.9. Microstructure de l'acier à l'état Recuit	51
Figure.III.10. Microstructure de l'acier à l'état Recuit	52
Figure.III.11. Microstructure sous différents grossissements illustrant la dispersion des fins précipités de carbures de chrome dans la matrice ferritique	53
Figure.III.12 TREMPE	54
Figure III 13 a et b Microstructures de l'acier trempé (présence d'un réseau d'oxydes complexes	55
Figure III.14 Détails de la structure martensitique.....	56
Figure III.15. structure obtenue après trempe et revenu a basse temperature.....	57
Figure III.16 Détails du reseau fragilisé	58
Figure III 17 détails de la martensite de revenu.....	59
Figure III 18 : détails sur les oxydes et les carbures de chrome situé au joint de grain.....	61

Figure III 19 Détails de la structure après trempe et revenu à haute température. Présence de réseau de carbure oxydés et de sous structure de carbures secondaires.....61

Figure III 20 Détails de la structure après trempe et revenu à haute température. Présence de sous structure de carbures secondaires de forme globulaire.....62

Figure III 21 L’histogrammes comparatifs de la dureté HRC de différents états de l’acier.....63

Liste des tableaux

Tableau I 1 Les différentes classes d’aciers1

Tableau I 2 Les limites des teneurs en éléments d’alliage.....1

Tableau I.3 : Composition chimique type de l’acier Hadfield.....26

Tableau I.4Propriétés physiques de l’acier Hadfield [13].....28

Tableau I.5.Ordre de grandeur des propriétés de traction d’un acier Hadfield (Dureté Brinell 170-220).....28

Tableau II.1.Composition chimique de l’acier expérimentée.....37

Tableau III.1.la composition chimique de la pièce endommagée.....46

Conclusion

1- Les premières investigations ont montré que l'acier proposé pour la confection des marteaux de concasseur est un acier à 12,34%Cr et 0,38%C et non un acier au Mn, comme il a été indiqué sur la fiche technique.

2- Les analyses métallographiques de cet acier, après rupture prématurée ont révèlent ce qui suit :

a/ La structure contient un réseau de carbures de chrome développé selon les joints de grains pouvant être la cause d'une rupture fragile brutale.

b/ L'existence d'un réseau d'oxydes complexes au niveau des joints de grains, altère encore plus les caractéristiques mécaniques de cet acier.

c/ L'analyse métallographique a également révélé un élargissement des joints de grains suite à la ségrégation du Cr et d'autres impuretés.

Ce qui constitue le chemin de prédilection pour la propagation de la fissure.

3- Les mesures de dureté HRC ont montré des valeurs en deçà des valeurs recherchées même après traitements thermiques du fait de la fragilisation de la structure

Recommandations pratiques :

1/ Une révision complète de la gamme de fabrication de cet acier par coulée, en évitant les risques de contamination lors de l'introduction des ferroalliages

2/ Une attention particulière doit être accordée à l'homogénéisation du bain et au mode de coulée de cet acier. Un système de masselotte pourrait réduire sensiblement la teneur en oxydes.

3/ Une optimisation des paramètres de traitements thermiques ($T\gamma$, T_m , V_r) pourrait assurer les caractéristiques mécaniques recherchées.

Cette nuance peut être facilement remplacée par une nuance au Mn, proche des aciers Hadfield (0,85%C et 9 à 12%Mn) pour confection des marteaux de concassage de ce type.

