

UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE NORMALE SUPERIEURE

C.E.R : Physique Chimie

**Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du  
Certificat d'Aptitude Pédagogique de l'Ecole Normale**

**(C.A.P.E.N)**

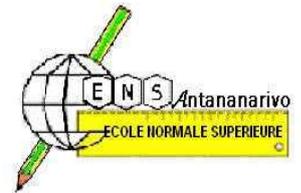
**CONCEPTION ET ELABORATION D'OUTIL  
DIDACTIQUE POUR L'APPRENTISSAGE DE LA  
TREMPE D'ACIER EN CLASSE DE SECONDE**

**Présenté par :**

**ANDRIATSITOHAINA Tolojanahary Henintsoa**

Année universitaire : 2015-2016





ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE

CER : PHYSIQUE CHIMIE

---

**MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDE POUR L'OBTENTION DU  
CERTIFICAT D'APTITUDE PÉDAGOGIQUE  
DE L'ÉCOLE NORMALE (C.A.P.E.N)**

Numéro d'ordre : 401/ PC

**CONCEPTION ET ELABORATION D'OUTIL  
DIDACTIQUE POUR L'APPRENTISSAGE DE LA  
TREMPE D'ACIER EN CLASSE DE SECONDE**

**Présenté par :** ANDRIATSITOHAINA Tolojanahary Henintsoa

**Soutenu le :** 16 Décembre 2016

Membres de jury :

- Président : Docteur RAKOTOBÉ Christiane Professeur Titulaire.
- Juges : Docteur RATOMPOMALALA Harinosy Maître de conférences  
Monsieur RAZAFINDRAKOTO Bako Assistant
- Rapporteur: Docteur RAJAOMANANA Hery Maître de conférences

Année universitaire : 2015-2016

# REMERCIEMENTS

Nous rendons tout d'abord grâce à Dieu, Tout-puissant, pour toutes ses bénédictions qui nous ont permis de mener à bien ce travail. Nous adressons aussi nos sincères remerciements :

A notre Président du jury,

Docteur RAKOTOBE Christiane, Professeur titulaire, qui a bien voulu présider cette soutenance.

A nos Juges,

Docteur RATOMPOMALALA Harinosy Maître de conférences et Monsieur RAZAFINDRAKOTO Bako, Assistant d'avoir accepté de faire partie des membres du jury.

A notre Directeur de mémoire,

Docteur RAJAOMANANA Hery, Maître de conférences, pour ses conseils avisés et qui nous a soutenus tout au long de notre travail. Nous avons apprécié sa disponibilité et sa patience.

Nous remercions également à tous ceux qui, de près ou de loin d'une manière ou d'une autre, ont contribué à la réalisation de ce mémoire, en particuliers :

- Ma famille
- La promotion Miray
- Mes amis
- Et tous les enseignants, personnels et étudiants à l'ENS

## Sommaire

INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES ALLIAGES ET LES ACIERS .....	4
I. ETUDE DES ALLIAGES .....	4
I.1.ETUDE DES ALLIAGES BINAIRES .....	4
I.1.1. Définition.....	4
I.1.2. Propriétés pratiques des alliages.....	4
a)Propriétés physiques des alliages.....	4
b) Propriétés chimiques des alliages.....	9
c)Propriétés mécaniques des alliages.....	9
d) Propriétés de façonnage.....	10
I.1.3. Classification des alliages.....	11
a)Alliages métalliques industriels.....	11
b) Superalliages.....	12
c)Alliages non métalliques.....	12
I.2. QUELQUES EXEMPLES D'ALLIAGES BINAIRES .....	13
I.2.1. Alliages binaires des métaux usuels.....	13
I.2.2. Alliages binaires des métaux précieux.....	17
II.ETUDE DE L'ACIER .....	20
II.1.DEFINITION .....	20
II.1.1. Définition de la trempe.....	20
II.1.2. Définition de l'acier.....	20
II.1.3. Relation entre le diagramme de phase Fe-C et le maille de transformation du réseau.....	21
II.1.4. Fer, fonte, acier.....	22
II.2. CLASSIFICATION .....	27

II.2.1. Classification de la trempe.....	27
a) Trempe martensitique.....	27
b) Trempe bainitique.....	28
c) Trempe austénitique (ou hypertrempe).....	30
II.2.2. Classification de l'acier.....	30
II.2.3. Différentes types de trempe.....	34
a) Trempe à l'eau.....	34
b) Trempe à l'huile.....	34
c) Trempe à l'air.....	35
II.3. FABRICATION DE L'ACIER .....	36
II.3.1. Le principe de fabrication de l'acier .....	36
II.3.2. Les étapes de la fabrication de l'acier .....	37
II.4. ACIER INOXYDABLE.....	39
II.4.1. Définition.....	39
II.4.2. Principales familles.....	39
II.4.3. Classification des aciers inoxydables.....	39
a) Les aciers ferritiques.....	40
b) Les aciers martensitiques.....	40
c) Les aciers austenitiques.....	40
II.4.4. Corrosion des aciers inoxydables.....	41
a) Corrosion des aciers ferritiques.....	41
b) Corrosion des aciers martensitiques.....	41
c) Corrosion des aciers austenitiques.....	41
II.4.5. Précautions d'emploi de l'acier inoxydable.....	42
II.4.6. Entretien de l'acier inoxydable.....	42
II.5. PROPRIÉTÉ CHIMIQUES ET PHYSIQUES DE L'ACIER.....	43
II.6. ESSAIS DES ACIERS : CONNAISSANCE DE L'ACIER EN GÉNÉRAL .....	45

a)Analyse chimique et essais mécaniques.....	45
b) Essais à la forge.....	46
CHAPITRE II : ETUDE DES FABRICATIONS DES ACIERS TREMPES A MADAGASCAR.....	47
INTRODUCTION .....	47
METHODOLOGIE .....	48
LES ETAPES DE LA VISITE D'USINE .....	48
CHAPITRE III : OUTILS DIDACTIQUE POUR L'APPRENTISSAGE DE LA TREMP DE L'ACIER.....	52
I. Cour.....	52
II.FICHE TP .....	58
III.ETAPE DU DIDACTICIEL.....	59

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Diagramme d'équilibre métastable ou à cémentite .....	13
Figure 2 : Refroidissement très lent avec perlite grossière .....	15
Figure 3 : Refroidissement plus rapide avec perlite fine .....	16
Figure 4 : Refroidissement très rapide faisant apparaitre une structure de trempe de l'austénite .....	16
Figure 5 : La forme en aiguille des cristaux de cémentite .....	17
Figure 6 : Diagramme d'équilibre Ag-Au .....	18
Figure 7 : Diagramme d'équilibre Ag-Pt .....	19
Figure 8 : Transformation du réseau durant la trempe .....	20
Figure 9 : Représentation de Fe(a) et Fe(g) sur le diagramme Fe-C .....	21
Figure 10 : Minerai de Fer .....	22
Figure 11 : Coulée de fonte .....	23
Figure 12 : acier .....	25
Figure 13 : Pièce trempé martensitique .....	28
Figure 14 : Pièce trempé bainitique .....	29
Figure 15 : Pièce trempé austénitique .....	30
Figure 16 : Exemple de pièce d'acier au nickel .....	31
Figure 17 : Exemple de pièce d'acier au chrome .....	32
Figure 18 : Exemple d'acier au nickel-chrome .....	32
Figure 19 : Exemple de pièce d'acier au manganèse .....	33
Figure 20 : Soudage en acier à l'étain .....	33
Figure 21 : Le cycle de fabrication de l'acier .....	38
Figure 22 : Acier brulé .....	44

## LISTE DES ABREVIATIONS

Fe(a) : Réseau cubique centré .....	20
Fe(g) : Cristaux cubiques à faces centrées .....	20
Rr : Résistance à la rupture .....	26
Re : Limite élastique .....	26
H: Dureté.....	26
HRC: Dureté de l'acier en cône de diamant.....	60
HRB: Dureté de l'acier en sphère.....	60
Rm : Résistance de matériau.....	60

## INTRODUCTION

L'acier a été découvert très tôt dans l'histoire car sa matière première est abondante (minerai), et qu'il est facile à travailler. L'acier « de base » est de fait peu onéreux.

Matériau par excellence de la révolution industrielle, c'est celui qui a été le plus étudié. Il existe de nos jours de nombreuses nuances aux propriétés très diverses.

De l'oxyde de fer aux fourneaux, l'histoire de l'acier remonte à la nuit des temps. L'homme est parvenu à transformer cette masse qui n'était à ses débuts qu'un agglomérat de métal impur, en un matériau si résistant. L'acier reste encore irremplaçable aujourd'hui dans bien des secteurs : construction, industrie alimentaire, aéronautique. De nos jours, le recyclage des aciers usagés contribue en très grande partie à sa fabrication, et cela dans des proportions croissantes, ce qui n'est pas sans intérêt. Récupérer ferrailles et résidus ferreux est effectivement très facile en utilisant le magnétisme du fer. Plusieurs processus de fabrication de l'acier existent, mais la filière fonte et la filière électrique sont restées longtemps les deux principaux. L'oxygène pur vient jouer un rôle majeur dans les procédés d'élaboration de l'acier. La désignation des aciers dépend de la catégorie concernée, acier allié ou non allié, désignation symbolique ou numérique, caractéristique ou composition chimique.

La fabrication de l'acier est dans une ère de rapides progrès. Les perfectionnements et les découvertes se succèdent sans interruption. La science et la technique en s'unissant ont obtenu des résultats qu'on pouvait à peine pressentir. Les progrès de la métallurgie et les révolutions qu'elle a subies en peu de temps ont transformé tout ce qui la constituait auparavant et ont eu une telle importance, que l'industrie du fer et de l'acier serait plus exactement représentée par Saturne dévorant ses propres enfants que par le dieu Mars (Fridolin Reiser, 1905).

La construction des objets qui exigent une résistance suffisante au choc et à l'usure, de même que la fabrication des pièces de toutes les machines de l'industrie moderne l'emploi de matériaux durs, non cassants et pouvant être soumis à des efforts mécaniques considérables, susceptibles de les amener, sans fracture, à prendre les formes les plus variées : lames, barres, fils, etc.... tout en conservant leur solidité. (H.Pariselle, 1956).

Ces progrès, dus à la science, sont exposés dans des ouvrages techniques remarquables ; mais le plus souvent nous disons l'étude des méthodes à suivre pour obtenir le métal.

Il est cependant très utile d'éclairer avec les lumières de la science les procédés de mise en œuvre des produits métallurgiques, car les branches de cette industrie qui ont fait le plus de progrès sont incontestablement celles qui ont été étudiées scientifiquement. Ce fait peut se passer de preuves. (Fridolin Reiser, 1905)

Pratiquement tous les couteaux sont en acier. Toutefois, une sorte d'acier n'est pas l'autre. L'acier est le matériau qui est constitué en grande partie de l'élément chimique fer (Fe). Le fer est le nom d'atome et d'un acier qui est constitué à 100% de fer et n'est pas adapté pour les applications quotidiennes. Les métaux sont en général de bons conducteurs électriques et thermiques. À l'état pur, ils présentent des caractéristiques mécaniques relativement faibles, raison pour laquelle on les utilise la plupart du temps sous forme d'alliages. La combinaison d'un métal avec un ou plusieurs autres éléments chimiques permet, par exemple, de le rendre plus dur ou plus flexible (caractéristiques mécaniques), d'en modifier les caractéristiques chimiques (résistance à la corrosion, etc.) ou d'en faciliter l'usinage et les traitements menant aux produits finis.

On parle souvent d'alliage pour un mélange de différents métaux. Le nom de l'alliage prend celui du métal principal si la part des autres métaux est très faible. On donne un nom particulier à l'alliage si les différents métaux y sont présents en parts comparables.

L'élaboration de l'acier à outils présente particulièrement de grandes difficultés qu'il faut vaincre pour réussir.

Le problème identifié est la connaissance des aciers en général car les élèves n'étudient pas intégralement l'acier, c'est-à-dire qu'ils n'ont ni cours ni échange concernant l'acier à l'établissement. Ensuite, comment pourrait-on expliquer les alliages utilisés dans la vie quotidienne ?

Notre mémoire a pour but d'introduire les notions de l'acier et les alliages utilisés durant la trempe pour l'élève en classe de seconde.

D'abord comment enseigner aux élèves en classe de seconde l'identification de l'acier et l'alliage utilisé ?

RATIARIMANANJATOVO Narindra (CAPEN,9 mai 2014) dans son mémoire intitulé « **Détermination du taux d'aluminium et de fer dans quelques minéraux de Madagascar** » a étudié la détection de l'acier sur quelques minéraux de Madagascar et ANDRIAMANANTENA Auguste (CAPEN, 1998) dans son **mémoire intitulé « Etude des alliages binaires »** a fait l'étude théorique de l'acier. En considération de ces études, nous allons nous orienter vers le traitement thermique de l'acier et des études pratiques sur l'alliage. C'est ainsi que nous avons choisi le sujet « **Conception et élaboration d'outil didactique pour l'apprentissage de la trempe d'acier en classe de seconde** »

L'introduction de chapitre concernant la trempe aide les élèves à expliquer les alliages utilisés dans la vie quotidienne.

Pour étudier notre problème, et donc valider ou invalider l'hypothèse nous avons conduit des études documentaires. Par la suite, nous avons effectué une visite d'usine de fonderie pour avoir une vision réelle de la trempe et l'alliage utilisé ; et enfin nous avons élaboré une fiche pédagogique pour l'introduction de la notion en classe de seconde.

Notre travail se divise en trois parties. Dans la première partie, nous allons faire des études bibliographiques sur les alliages et les aciers. Pour la seconde partie, nous allons étudier des fabrications des aciers trempés à Madagascar. Dans la troisième partie, nous allons développer quelques outils didactiques pour l'apprentissage de la trempe de l'acier.

# CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES ALLIAGES ET LES ACIERS

## I. ETUDE DES ALLIAGES

### I.1. ETUDE DES ALLIAGES BINAIRES

#### I.1.1. Définition

La plupart des métaux purs en raison de leurs propriétés physiques, chimiques et mécaniques sont difficilement utilisables dans l'industrie. L'addition à un métal pur d'un ou de plusieurs éléments métalliques ou non métalliques peut modifier ses propriétés. Les mélanges ainsi obtenus se nomment alliages métalliques. (Gadeau R, 1960)

Un matériau composite est constitué de deux ou plusieurs matériaux différents et possède des propriétés mécaniques meilleures que celles de chacun de ses constituants. Alliant la légèreté à d'excellentes caractéristiques mécaniques, ce sont des produits d'élection où produit de l'industrie aérospatiale.

Un alliage binaire est un composé formé d'un métal et d'un deuxième élément qui peut être un autre métal ou un élément tel que le carbone.

Un alliage est dit binaire, ternaire, quaternaire suivant qu'il renferme deux, trois ou quatre éléments.

#### I.1.2. Propriétés pratiques des alliages

Les alliages présentent souvent des propriétés différentes voire supérieures à celles des métaux dont ils sont issus : dureté, résistance à la corrosion ou à l'usure supérieures, propriétés magnétique intéressantes. La structure cristalline ainsi que les phases présentes peuvent être identiques ou différentes de celles des alliages préparés par voie métallurgique. (W1)

##### a) Propriétés physiques des alliages

L'étude des propriétés physiques des alliages est intéressante, non seulement parce qu'elle présente un intérêt pratique immédiat.

On peut se proposer d'étudier les variations d'une propriété physique c'est-à-dire la forme, pour un alliage déterminé, en fonction de la température (Fridolin Reiser, 1905)

On peut également étudier les variations des propriétés physiques, à une température déterminée, en fonction de la composition de l'alliage ; les points singuliers de la courbe ainsi obtenue, s'ils existent, indiquent un changement dans la structure de l'alliage (apparition ou

disparition d'un constituant) et font prévoir l'existence de combinaisons et de solutions solides limites. En somme, ces études constituent autant de méthodes d'analyse physique, qui viennent corroborer les résultats fournis par l'analyse thermique. L'étude particulière des propriétés physiques essentielles des alliages va nous montrer l'intérêt de ces recherches.

### a.1. Densité et dilatabilité

Comme dans le cas des métaux, l'écrouissage c'est-à-dire le traitement des métaux conduit à une élévation de la densité ; la trempe a le même effet.

L'étude de la dilatabilité d'un alliage se déduit de l'étude de la variation de la densité avec la température. Si on détermine les variations du coefficient de dilatation à une température déterminée en fonction de la composition de l'alliage, on observe parfois des minima ou des maxima accusés, comme dans le cas des aciers au nickel.

Les propriétés mécaniques de l'acier sont cependant différentes selon sa densité.

La dilatation de l'acier à la chaleur est importante. Il a fallu mettre le métal en fusion pour le fabriquer, par conséquent plus la chaleur sera élevée et plus le métal se rapprochera de l'état liquide car la chaleur est l'un des facteurs de déformation de propriété physique du métal.

Soumis à des variations de température, les dimensions de l'acier peuvent changer. Cela entraîne une dilatation du matériau, c'est-à-dire une augmentation relative de la longueur. Lorsque la température augmente, les dimensions, donc les volumes, croissent mais d'une manière réversible.

Les propriétés de résistance à la traction, le module d'élasticité et la limite d'élasticité diminuent alors que la plasticité augmente. Il est donc nécessaire de maintenir les variations de température dans des limites tolérables. Cela peut se traduire par une augmentation de l'épaisseur des produits.

### a.2. Fusibilité(W2)

La fusibilité des alliages est une propriété intéressante qui intervient dans la fabrication des objets coulés et dans celle des soudures. Si l'on excepte le cas très rare où il existe une combinaison peu fusible, les alliages sont plus fusibles que le moins fusible des métaux et ils fondent fréquemment à une température plus basse que le métal le plus fusible. Ce sont les

alliages correspondant à la composition eutectique c'est-à-dire un point qui présente des mélanges solides en proportions bien déterminées, dont la fusion se fait à température constante.

La soudabilité est la propriété des métaux à s'unir entre eux lorsqu'ils sont portés à leur température de fusion assurant ainsi la continuité de la matière.

Toutefois ce n'est pas une propriété intrinsèque de l'acier. La soudabilité dépend notamment des types d'assemblages, des procédés, des conditions de soudage, des produits d'apport et de la conception de la construction.

Cette union se fait par un apport de matière fondue et déposée liant intimement les deux bords des pièces assembler.

Le soudage des aciers alliés ou revêtus nécessite des moyens adaptés.

### *a.3. Conductivité des alliages*

- **Conductivité électrique** : La conductivité électrique de l'acier est très bonne.

Ainsi cette propriété qu'à l'acier de transmettre l'électricité se trouve utilisé dans les domaines de la construction électrique comme les moteurs ou les résistances.

Cette conductivité électrique est surtout importante quand il s'agit de souder des métaux avec des procédés électriques.

En dehors de ces approches, les structures métalliques d'un bâtiment doivent être raccordées à la terre et n'ont pas de champs électriques propres.

- **Conductivité thermique** : La conductivité thermique de l'acier est très bonne. L'acier est une matière homogène sans présence d'air avec une faible inertie thermique.

L'acier absorbe et transmet rapidement la chaleur. Il permet les échanges froid/chaud. Utilisé en structure, bardage, plancher et couverture il pose le problème de ponts thermiques. Il est nécessaire de lui ajouter une isolation thermique.

Il convient aussi de veiller aux problèmes de condensation qui peuvent être provoqués par le phénomène d'alternance froid/chaud.

Dans un autre domaine que celui de la construction, l'acier, par cette propriété, est largement présent dans les appareils de chauffage avec les radiateurs.

- **Conductivité phonique** : La conductivité phonique de l'acier est bonne.

La transmission du son dans l'acier est rapide.

Il est nécessaire de prévoir des dispositifs d'isolation phonique.

#### *a.4. Propriétés plastiques des alliages*

Lorsqu'on veut représenter, par un diagramme, la variation des propriétés mécaniques d'un alliage en fonction de sa composition, il faut s'adresser à une propriété bien définie et mesurable, comme la ténacité'est-à-dire un caractère qui est difficile à détruire. La courbe obtenue peut, comme les courbes relatives aux propriétés physiques, déceler, par des changements brusques d'orientation, des variations dans la constitution de l'alliage. Une telle étude est délicate à faire, car les grandeurs plastiques sont déterminées avec peu de précision. Il est plus intéressant, au point de vue pratique, de rechercher des règles générales, souvent empiriques, qui permettent de prévoir a priori les propriétés mécaniques d'un alliage, connaissant sa structure et les propriétés des métaux composants ; nous indiquerons quelques règles énoncées pour la plupart par MM. Guillet et Portevin, règles relatives à la malléabilité et à la dureté :

- Lorsque l'alliage est formé de métaux purs, si les métaux sont malléables, tous les alliages le sont ; s'ils ne sont pas malléables, aucun alliage ne l'est ; si enfin un seul des métaux est malléable, l'alliage eutectique sera malléable s'il est plus riche en métal malléable ;
- Si les métaux sont miscibles en toutes proportions, étant isomorphes, ils ont des propriétés semblables ; ils sont donc vraisemblablement tous deux malléables ou tous deux non malléables ; les solutions solides ont la même propriété que les métaux constituants.

L'acier a la caractéristique d'être malléable et ductile comme d'autres métaux.

Ces propriétés permettent de transformer le métal, à chaud ou à froid, en feuilles par choc ou pression pour la malléabilité et en fils pour la ductilité.

La malléabilité et la ductilité du métal exprime donc une aptitude à subir une déformation plastique (allongement) sans rupture. On considère qu'un matériau est malléable quand son allongement est supérieur à 35%.

Ces comportements sont étudiés en laboratoire sur des éprouvettes dont les caractéristiques métallurgiques et dimensionnelles sont bien déterminées.

Ce sont principalement ces caractéristiques qui sont utilisées dans les opérations de formage : pliage, cintrage, forgeage, etc.

***Alliages antifrictions*** : Les pièces subissant un frottement, comme les coussinets, les têtes de bielles, les colliers d'excentriques, doivent être construites avec des alliages à la fois durs, résistants, plastiques et non fragiles, qualités en apparence contradictoires. On obtient de tels alliages, dits « antifrictions », en employant un constituant dur (généralement l'antimoine) enrobé dans un constituant plastique (étain et plomb).

#### b) Propriétés chimiques des alliages :

Résistance à l'action des divers produits chimiques et des agents atmosphériques, problème de la corrosion. Les alliages sont en général moins oxydables que les métaux qui les constituent et sont par suite plus résistants aux réactifs chimiques. Ce sont particulièrement les alliages homogènes, c'est-à-dire ceux renfermant des solutions solides, qui résistent le mieux à la corrosion, et ceci est une conséquence de la théorie électrochimique de la corrosion.

Outre cette règle d'homogénéité, grâce à laquelle on peut prévoir la résistance d'un alliage aux agents chimiques, on peut citer une autre règle, dite d'autoprotection, qui permet parfois d'améliorer la résistance de l'alliage à un réactif déterminé : le métal ajouté doit être attaqué par le réactif, le produit de réaction donnant naissance à une pellicule insoluble et adhérente, protégeant le métal et arrêtant l'attaque.

Les aciers inoxydables au chrome, qui ont provoqué une véritable révolution dans l'emploi des aciers, constituent un exemple remarquable d'application des deux règles précédentes ; ils

contiennent en solution solide environ le sixième de leur poids de chrome, métal inattaquable par l'acide nitrique et quantité de réactifs, y compris les agents atmosphériques, par suite d'un phénomène de **passivité** (Au lieu de recourir à un enduit protecteur, c'est le métal qui se défend lui-même par l'effet de l'attaque : il y a passivité)

### c) Propriétés mécaniques des alliages :

Alors que dans le cas des métaux purs c'est la présence d'une phase amorphe qui rend compte du comportement différent d'un cristal unique et d'un agrégat cristallin, dans le cas des alliages métalliques, d'autres circonstances viennent encore accroître la cohésion de l'édifice cristallin et en augmenter la résistance.

En premier lieu, les cristaux du métal étranger (cas des alliages à faible teneur) viennent s'insérer dans le domaine limite de deux cristaux voisins, liant ceux-ci l'un à l'autre à la manière d'une clavette. D'autre part, et ceci correspond principalement au cas des alliages à forte teneur, la forme des cristaux elle-même peut les maintenir accrochés ; dans le cas des alliages à structure dendritique par exemple, les ramifications cristallines s'enchevêtrent comme des branches d'arbre.

Si l'on vient à exercer un effort sur une éprouvette d'alliage, il y a lieu de considérer le rôle des cristaux étrangers qui, à la façon des clavettes, vont verrouiller les uns aux autres les divers plans de glissement. Les efforts vont être transmis au réseau ionique qui se déformera élastiquement, jusqu'à ce que ces efforts soient suffisants pour que ces obstacles entre couches déchirent les plans sur lesquels ils reposent. Si l'on supprime l'effort, les plans rivés par ces impuretés restent dans la position acquise : il y a déformation permanente ; en augmentant l'effort, on arrive à la rupture de l'éprouvette après striction.

Cette explication ne s'applique pas à la rupture fragile (des fontes par exemple) qui, très irrégulière, a toujours lieu sans striction. C'est à Griffith que revient le mérite d'avoir montré que, dans ce cas, la rupture s'explique par la présence constante, sur la surface de l'échantillon, de fissures microscopiques. Au fond de ces failles microscopiques se produit une sorte de concentration des efforts qui y atteignent la valeur théorique de rupture ; le réseau des ions se déchire alors et la faille progresse de proche en proche dans le cristal, jusqu'à atteindre une bande de glissement : il y a rupture. La couche superficielle de métal

amorphe qui pénètre dans les failles du métal joue un rôle de premier plan dans sa résistance aux efforts.

#### d) Propriétés de façonnage

Ces propriétés permettent de réaliser avec l'alliage un objet de forme déterminée par :

- Coulée
- Déformation à chaud, lors du forgeage, du laminage, du matriçage, du tréfilage.
- Déformation à froid, lors du laminage, du tréfilage, de l'emboutissage.
- Usinage à l'aide d'outils coupants, lors du tournage, du fraisage...

Les propriétés de façonnage sont complexes et difficiles à caractériser par des essais. Elles sont uniquement déterminées par l'expérience industrielle.

- Alliages de forges : qui sont suffisamment déformables à chaud pour recevoir la forme voulue par travail à chaud.
- Alliages de fonderies : qui permettent d'obtenir des moulages compacts et homogènes.

La fonderie permet d'obtenir des pièces de forme compliquée de façon économique.

En général, les propriétés des alliages sont très différentes de celles de leurs éléments constitutifs. Par exemple, la résistance mécanique et la résistance à la corrosion d'un alliage peuvent être considérablement supérieures à celles de ses constituants pris séparément. C'est pourquoi on utilise plus fréquemment les métaux alliés que les métaux purs. Cependant, les **propriétés d'un alliage** n'évoluent pas de façon linéaire avec celles des constituants qui le composent. Il est donc difficile de prévoir les caractéristiques d'un alliage à partir des propriétés de ses composants. Ainsi, on détermine expérimentalement les propriétés d'un alliage donné. En général, les alliages ont une température de fusion inférieure à celle de leurs constituants.

### **I.1.3. Classification des alliages** [W2]

#### a) Alliages métalliques industriels

**Ce sont principalement les aciers**, métaux ductiles. **L'acier** le plus simple est un **alliage de fer et de carbone** contenant 2% en masse de carbone. Dans cet alliage, les atomes de carbone se placent dans les interstices du réseau cristallin du fer : les aciers sont des alliages interstitiels. Plus les propriétés demandées à l'alliage sont importantes et particulières, plus sa

formule est complexe. Dans l'acier simple, le fer et le carbone peuvent être alliés à d'autres métaux, dont la nature dépend des propriétés souhaitées. Ces métaux sont le chrome, le manganèse, le molybdène, le nickel, le tungstène et le vanadium. Ces alliages à base d'acier ont une résistance mécanique et une dureté supérieures à celles de l'acier pur. Les aciers sont des matériaux de construction, ils servent également à fabriquer de nombreux outils.

**Les fontes** sont des **alliages de fer et de carbone**, avec un pourcentage pondéral de carbone compris entre 2% et 5%. Elles contiennent également du silicium (jusqu'à 4%) et du manganèse, ainsi que des impuretés. Certaines fontes sont utilisées dans la production de l'acier, d'autres dans l'industrie du bâtiment. Les fontes dites grises sont utilisées dans la fabrication de pièces automobiles

**Les laitons** sont principalement **constitués de cuivre** (majoritaire) et **de zinc** (minoritaire). On les utilise dans les pièces d'horlogerie et dans la robinetterie

**Les bronzes, alliages à base de cuivre et contenant essentiellement de l'étain**, sont utilisés dans la fabrication des cloches et des engrenages.

Dans l'industrie aérospatiale, on utilise de nombreux **alliages légers** aux propriétés spécifiques, dans la conception des fusées par exemple. La légèreté d'un alliage est en général apportée par l'aluminium ou le béryllium. La pénétration des véhicules spatiaux dans l'atmosphère terrestre s'accompagne d'une élévation considérable de la température. Pour résister à ces différences importantes de température et à ces températures extrêmes, on a conçu des alliages très résistants à la chaleur. Ces alliages contiennent des métaux tels que le tantale, le niobium, le tungstène, le cobalt ou le nickel.

Une grande variété d'alliages spécifiques contenant des métaux, tels que le béryllium, le bore, l'hafnium et le zirconium, ont des caractéristiques d'absorption nucléaire particulières : on les utilise dans les centrales nucléaires. Les alliages de niobium-étain sont employés comme supraconducteurs à des températures extrêmement basses (Supraconductivité). Des alliages spéciaux de cuivre, de nickel et de titane, mis au point pour résister aux effets corrosifs de l'eau salée, sont utilisés dans les usines de dessalement. L'industrie aéronautique emploie l'alliage à base de titane contenant 6% d'aluminium en poids et 4% de vanadium en poids. C'est en effet un alliage très léger et de bonne résistance mécanique. L'argent monétaire, l'or de 14 carats et le platine-iridium sont des **alliages précieux**. Les amalgames, alliages du mercure avec un autre métal, sont utilisés en soins dentaires.

### **b) Superalliages**

Ce sont des alliages qui ont une très bonne résistance à la corrosion lorsqu'ils sont soumis à des contraintes mécaniques intenses à température et à pression élevées. Il existe trois familles de **superalliages** : les superalliages à base de fer, qui contiennent de 15 à 20% de chrome ; les superalliages à base de nickel-chrome et les alliages à base de cobalt. Les superalliages sont entre autres utilisés dans les réacteurs chimiques et pétrochimiques et dans les raffineries de pétrole.

### **c) Alliages non métalliques**

On peut obtenir des alliages de céramiques et de métaux : les cermets. Ils combinent les avantages des céramiques: la tenue aux températures élevées, la stabilité, la résistance à l'oxydation — aux propriétés des métaux — ductilité et résistance aux chocs.

## I.2. QUELQUES EXEMPLES D'ALLIAGES BINAIRES

### I.2.1. Alliages binaires des métaux usuels

#### Étude du diagramme fer-carbone

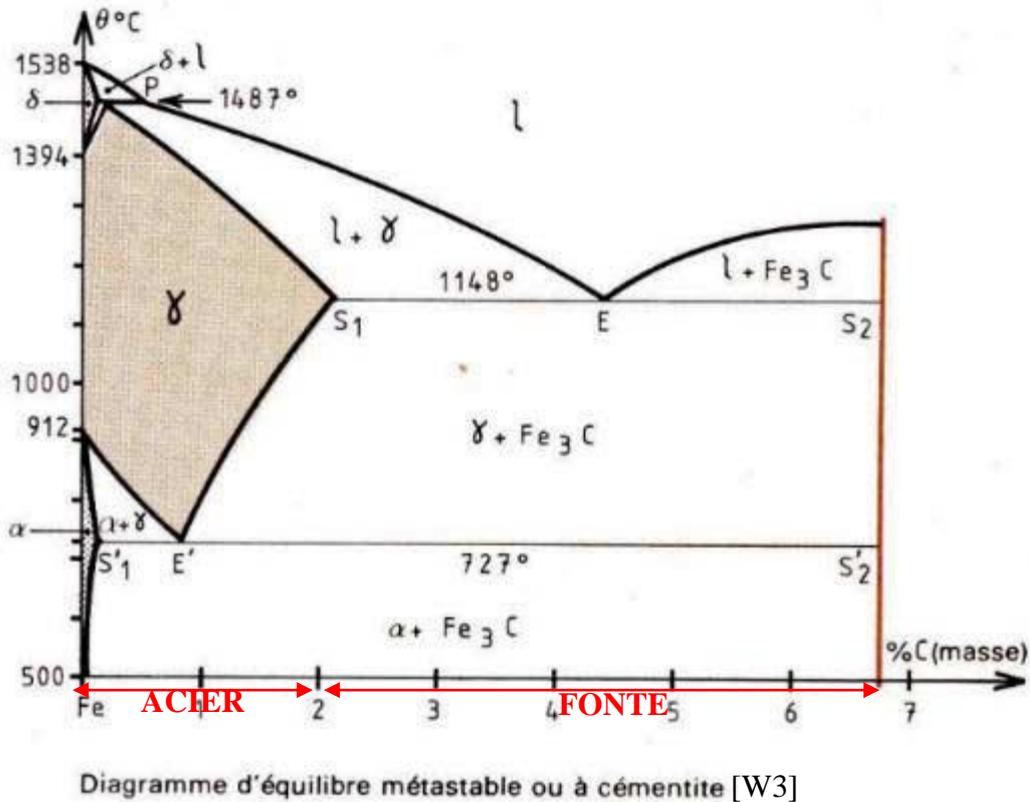


Fig.1 : Diagramme d'équilibre métastable ou à cémentite (W3)

Remarque :  $\alpha, \gamma, \delta$  sont suivant des constituants solide ou liquide de carbone  $\gamma$  a de changement d'état pendant la formation d'une structure des températures bien déterminés

- **Étude de diagramme de phase**
  - $T > 1538^\circ\text{C}$  : présence de phase liquide contenant du carbone.
  - $1394^\circ\text{C} < T < 1538^\circ\text{C}$  ( $0 < C < 0.2\%$ ): Ferrite  $\delta$  (cubique centrée)
  - $1487^\circ\text{C} < T < 1538^\circ\text{C}$  ( $0 < C < 0.5\%$ ) : Liquide + Ferrite  $\delta$
  - $T = 1487^\circ\text{C}$  ( $C = 0.5\%$ ): apparition du premier germe d'austénite ( $\gamma$ ) : c'est-à-dire présence de premier réseau cristallin cubique à face centrée de Fe-C
  - $912^\circ\text{C} < T < 1394^\circ\text{C}$  ( $0 < C < 2.2\%$ ): unique solution solide d'austénite  $\gamma$ .

- $1148^{\circ}\text{C} < T < 1487^{\circ}\text{C}$  ( $0.5 < C < 4.5\%$ ) : Liquide + austénite ( $\gamma$ )
- $T = 1148^{\circ}\text{C}$  ( $C = 4.5\%$ ) point eutectique ; apparition du premier germe de Carbure  $\text{Fe}_3\text{C}$  où cémentite
- $1148^{\circ}\text{C} < T < 1300^{\circ}\text{C}$  ( $4.5 < C < 6.7\%$ ) : Liquide +  $\text{Fe}_3\text{C}$
- $727^{\circ}\text{C} < T < 1148^{\circ}\text{C}$  ( $0.7 < C < 6.7\%$ ) : austénite ( $\gamma$ ) +  $\text{Fe}_3\text{C}$
- $T = 727^{\circ}\text{C}$  ( $0.2 < C < 6.7\%$ ) : présence de trois phases (ferrite  $\alpha$  + austénite  $\gamma$  + Perlite : constituant biphasé de l'acier ; c'est un agrégat formé de 89% de ferrite et 11% de cémentite).
- $727^{\circ}\text{C} < T < 912^{\circ}\text{C}$  ( $0.2 < C < 0.7\%$ ) : présence de deux phases (austénite  $\gamma$  + ferrite  $\alpha$  : réseau cubique centré de Fe-C).
- $500^{\circ}\text{C} < T < 912^{\circ}\text{C}$  ( $0 < C < 0.2\%$ ): Ferrite  $\alpha$  (cubique centrée)

Cémentite : molécule chimique stable ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) composant principal des fontes

- $T < 727^{\circ}\text{C}$  ( $0.2 < C < 6.7\%$ ): présence de deux phases (ferrite  $\alpha$  +  $\text{Fe}_3\text{C}$ ).

- **Les transformations**

Le diagramme Fer-carbone contient trois réactions isothermes caractérisées par des paliers : **Eutectique à  $1148^{\circ}\text{C}$**  ( $C = 4.5\%$ ): c'est le point d'intersection des deux courbes de solubilité ; il marque la température minimale d'existence du liquide

**Eutectoïde à  $727^{\circ}\text{C}$**  ( $C = 0.7\%$ ). C'est le point de transformation au chauffage de la perlite en austénite. Au-dessus de  $727^{\circ}\text{C}$ , la perlite n'existe plus

**Péritectique à  $1487^{\circ}\text{C}$**  ( $C = 0.5\%$ ), mais d'importance négligeable de point de vue industrielle.

- **Constituants des aciers à la température ambiante [W3]**

La nature des constituants dépend de la teneur en carbone; on distingue:

$C < 0,85\%$ : aciers hypoeutectoïdes, constitués de ferrite  $\alpha$  et de perlite ( $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ )

$C = 0,85\%$ : acier eutectoïde, constitué de perlite;

$C > 0,85\%$ : aciers hypereutectoïdes, constitués de cémentite ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) et de perlite.

Les caractéristiques mécaniques des aciers dépendent de la nature et des proportions des constituants.

- **Constituants des fontes blanches à la température ambiante [W3]**

Selon la teneur en carbone, on distingue:

$C < 4,3\%$ : fontes hypoeutectiques, constituées de lédéburite et de perlite;

$C = 4,3\%$ : fonte eutectique, constituée de lédéburite;

$C > 4,3\%$ : fontes hypereutectiques, constituées de lédéburite et de cémentite.

- **Conclusion**

L'eutectique tout aussi bien que l'eutectoïde sont des alliages particuliers se comportant comme un corps pur, leur transition de phase se fait donc à température constante. La différence entre les deux est que pour l'eutectique les deux phases en question sont l'une solide, l'autre liquide, alors que pour l'eutectoïde il s'agit de deux phases solides

**Observations microscopiques :**

➤ Fonte hypoeutectique

La structure de la fonte, sur laquelle on peut voir les dendrites d'austénite transformées en perlite ; le reste est de la lédéburite transformée.

Des traitements thermiques (chauffage et refroidissement lent) de la fonte permettent de décomposer le carbure de fer en nodules fins de graphite, ce qui rend la fonte plus apte au façonnage.

Les fontes présentent un aspect blanc à la cassure. Le carbone qu'elles contiennent est combiné au fer sous forme de carbure (cémentite). Contrairement aux fontes grises, elles sont obtenues à partir de minerai de fer pauvre en silicium et riche en manganèse.

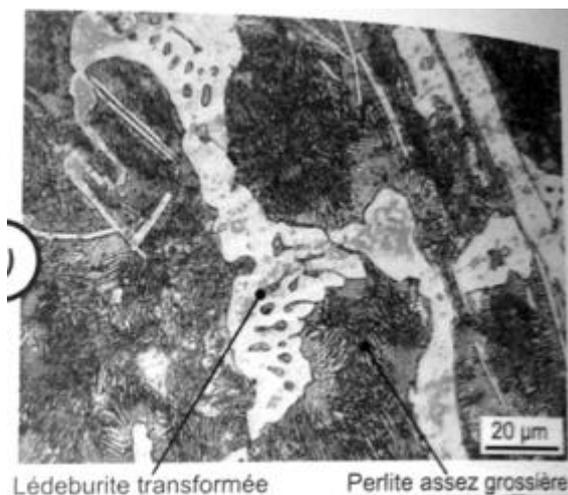


Fig.2 refroidissement très lent avec perlite grossière (W4)

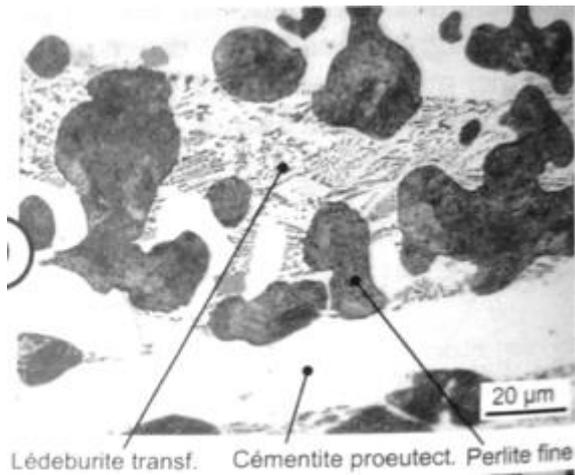


Fig.3 refroidissement plus rapide avec perlite fine (W4)

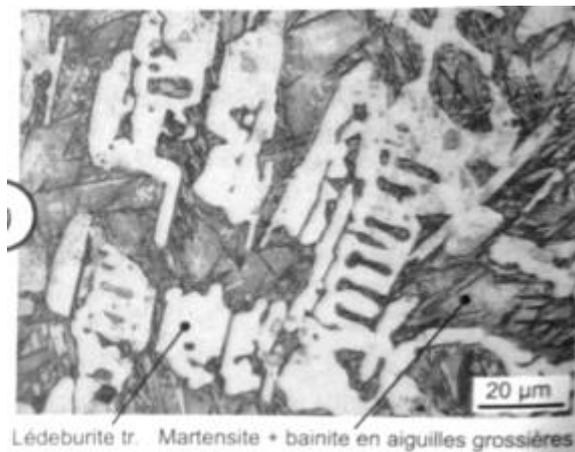


Fig.4 refroidissement très rapide faisant apparaitre une structure de trempe de l'austénite (W4)

➤ La fonte eutectique

La fonte eutectique est formée de Lédéburite. La Lédéburite est constituée de perlite (zones grises) et de cémentite (zones blanches) ; elle correspond à l'eutectique Fer-Cémentite

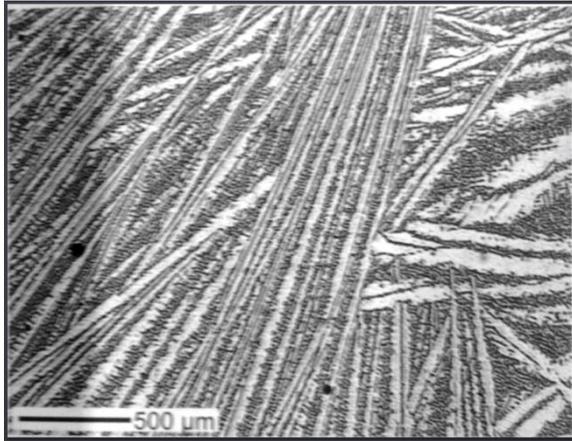


Fig.5 La forme en aiguille des cristaux de cémentites (W4)

➤ La fonte hypereutectique

Dans le cas d'une fonte hypereutectique, il se forme d'abord des plaquettes de cémentite, puis de la lédéburite. La structure globulaire de l'austénite eutectique se conserve lors de la transformation austénite vers le perlite

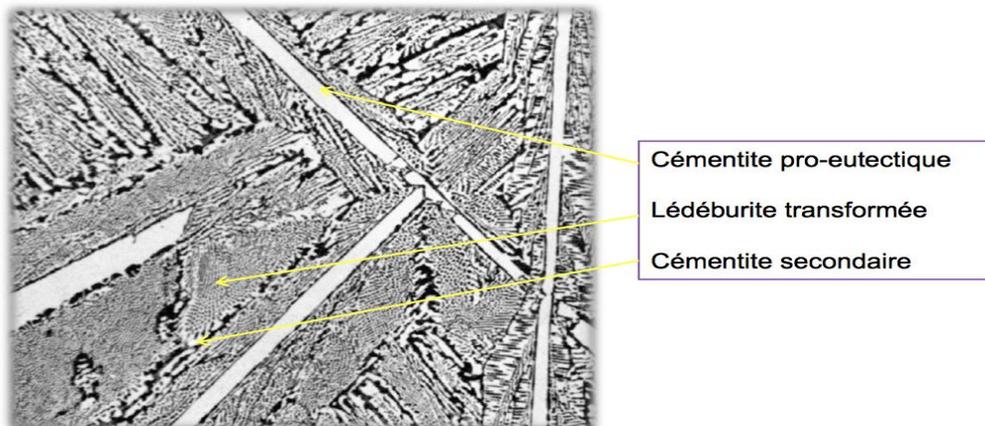


Fig.6 Structure d'un cémentite et de lédéburite transformée

**1.2.2. Alliages binaires des métaux précieux**

**Alliage binaire Argent-Or**

L'argent et l'or sont solubles à l'état solide en toutes proportions. Le solidus et le liquidus sont connus à  $\pm 4$  °C et l'intervalle entre les deux courbes est très étroit (inférieur à  $2$  °C  $\pm$   $0,3$  °C), en bon accord avec les prédictions thermodynamiques.

De nombreuses propriétés physiques ont été étudiées pour ces alliages ; certaines d'entre elles présentent des discontinuités pour les pourcentages correspondant à  $Ag_3Au$ ,  $Ag_3Au_2$  et

AgAu<sub>3</sub>. Mais contrairement à ce qui a été proposé autrefois, aucune phase ordonnée n'a été trouvée pour ces compositions ni pour AgAu.

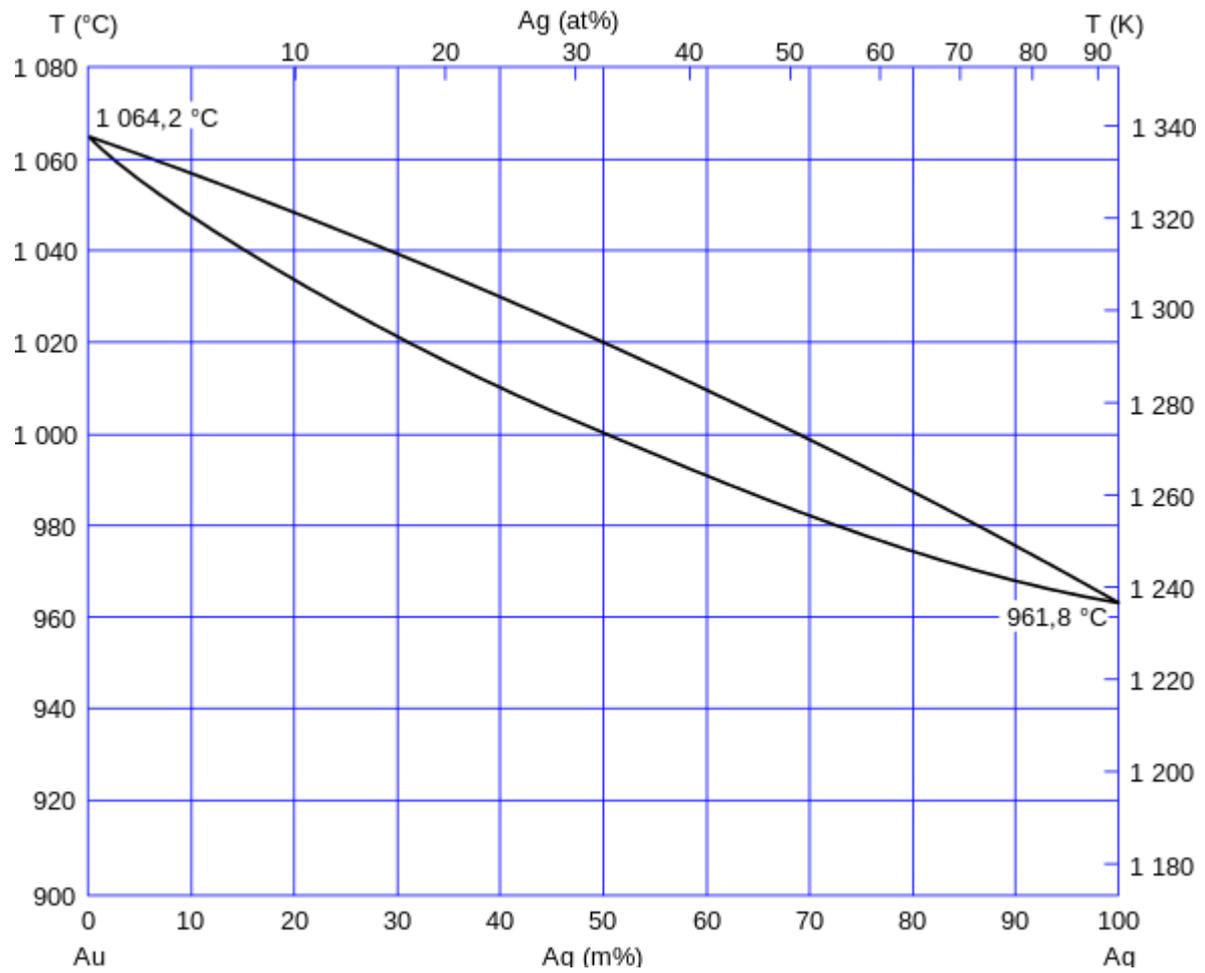


Fig.6 Diagramme d'équilibre Ag-Au[W5]

## Alliage binaire Argent-Platine

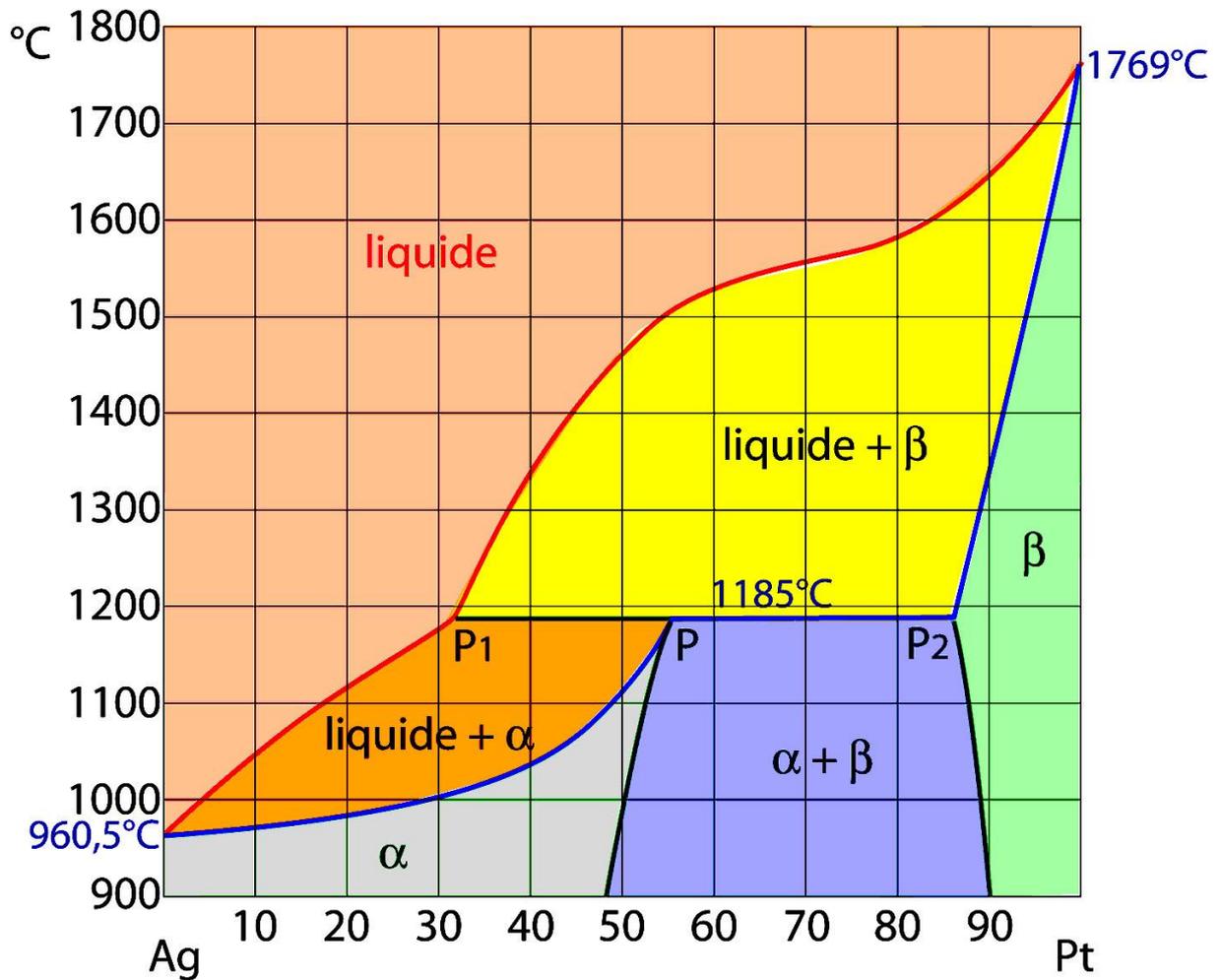


Fig.7 Diagramme d'équilibre Ag-Pt [W6]

### Conclusion

Les diagrammes d'équilibre binaires restent relativement simples à interpréter. Ils peuvent parfois combiner de nombreuses transformations à l'état liquide comme à l'état solide. Il convient de dissocier ces différentes transformations pour comprendre l'évolution des phases présentes.

## II. ETUDE DE L'ACIER

### II.1.DÉFINITION

#### II.1.1. Définition de la trempe

**La trempe** est le procédé de base du durcissement de l'acier par traitement thermique. C'est l'étape cruciale dans la fabrication des lames de nos couteaux. Connue depuis l'antiquité, cette opération reste une technique élaborée dès plus délicate, au point de vue technologique. (W7)

#### II.1.2. Définition de l'acier

**Les aciers** sont des alliages à base de fer qui titrent moins de 2% de carbone, contrairement aux fontes qui en contiennent plus de 2%.

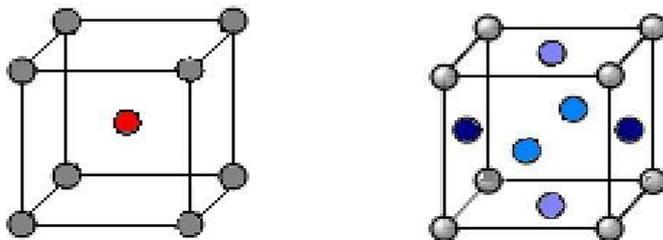


Fig.8 Transformation du réseau durant la trempe [W7]

#### **Fe(a) : Réseau cubique centré.**

1 atome de fer sur chaque sommet du cube (en gris) + 1 atome au centre du cube (En rouge). Cet atome central est primordial car il interdit toute inclusion d'éléments étrangers dans cette structure. (Les atomes de carbone ne peuvent pas entrer à l'intérieur de ce réseau cubique)

#### **Fe(g) : Cristaux cubiques à faces centrées**

1 atome de fer sur chaque sommet du cube (en gris) + 1 atome au centre de chaque face du cube (en violet ou bleu), soit un total de 14 atomes par cube.

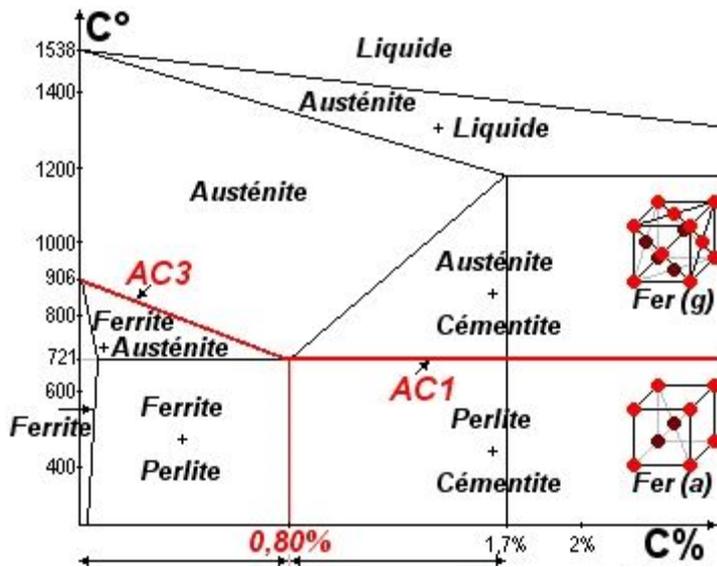


Fig.9 : Représentation de Fe(a) et Fe(g) sur le diagramme Fe-C [W8]

La trempe fait partie de refroidissement plus ou moins rapide après une austénitisation :

- austénitisation ( $Ac_3 + 50^\circ C$ )
- attendre que la transformation  $\alpha \rightarrow \gamma$  soit terminée
- refroidissement jusqu'à la température ambiante

### II.1.3. Relation entre le diagramme de phase Fe-C et la maille de transformation du réseau

En chauffant l'acier, le réseau FERRITE [Fe(a)] se transforme en AUSTENITE [(Fe(g))]. L'austénite (g) ne possède pas d'atome de fer au centre du cube contrairement à la ferrite (a). Ceci est très important car ce vide dans cette structure permet aux atomes de carbone de migrer à l'intérieur du réseau cubique de l'austénite (Fer g) alors que ceci est impossible dans le cas de la ferrite (Fer a). La transformation de la ferrite en austénite se réalisera à une température dite "d'Austénitisation" supérieure à la ligne AC3-AC1 du diagramme. Il faut maintenir l'acier au moins 30 min à température d'Austénitisation pour obtenir une transformation austénite complète. Lorsque la ferrite se transforme en austénite, les atomes de carbone vont se placer en solution solide dans la structure cristalline austénitique.

Lorsque l'acier se refroidit lentement, l'austénite se transforme de nouveau en ferrite ; par contre si ce refroidissement est rapide les atomes de carbone dissous à l'intérieur du réseau cubique de l'austénite n'auront pas le temps de migrer à l'extérieur de cette structure cubique formant une structure appelée "Martensite".

En conclusion, la trempe est destinée à donner à l'acier une microstructure très dure appelée la "MARTENSITE». Au moment de la trempe, les atomes de carbone ne seront plus en mesure de rester dans la structure cubique centrée. Par conséquent, n'ayant pas le temps de diffuser dans la structure pour reformer de la ferrite, ils vont former de la "Martensite». La "Martensite" est en fait de la "Ferrite" dont la maille cristalline est déformée pour laisser de la place aux atomes de carbone qui sont en solution. (Dissous dans la structure cubique du fer)

#### **II.1.4. Fer, fonte, acier**

Le fer, obtenu par décarburation de la fonte au four à puddler, est malléable et résiste bien à la traction. Il va donc remplacer le bois dans les charpentes ou les planchers.

➤ Fer : minerai de fer



Fig.10 Minerai de Fer [W9]

#### **a) Qu'est-ce qu'une fonte?**

Le terme «fonte» désigne une famille d'alliages ferreux dont les propriétés sont fort diverses. Fondamentalement, les fontes se solidifient en un alliage hétérogène dont la structure métallurgique est toujours formée de plus d'un constituant. Quant à leur composition chimique, ses éléments de base sont, outre le fer, le carbone et le silicium.

➤ Fonte : Coulée de fonte



Fig.11 Coulée de fonte [W9]

**b) Popularité des fontes**

Longtemps perçues comme des matériaux de moindre qualité, les fontes ont mérité, depuis les 50 dernières années, une plus grande considération. Et pour cause, la catégorisation et la normalisation des fontes leur ont apporté des améliorations qui en font aujourd'hui un matériau de choix, devenu irremplaçable à plusieurs égards.

**c) Les fontes sont-elles équivalentes aux aciers?**

La réponse est non. Si les fontes et les aciers sont constitués tous deux de fer et de carbone, les fontes contiennent 2.5% de carbone comparativement à 5 % pour l'acier.

L'acier, obtenu par un affinage particulier, est plus homogène que le fer, et sa résistance à la traction est deux fois plus grande, trois fois pour l'acier fondu. Dans tous les cas où l'allégement des structures est nécessaire, l'acier prend, à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, peu à peu la place du fer.

L'assemblage des éléments en métal, difficile à réaliser avec le fer forgé, a pu être industrialisé, au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, par le rivetage à chaud des tôles et des cornières laminées ; cette technique sera remplacée, un siècle plus tard, par celle de la soudure.

d) Les détails qui suivent aident à mieux connaître les fontes.

**Quels sont les avantages distinctifs des fontes?**

1. Les fontes peuvent être coulées à des températures inférieures à celles requises pour les aciers.
2. La fonte liquide est plus fluide que l'acier, ce qui permet de lui donner des formes complexes et variées.
3. Les fontes sont moins sujettes que les aciers à des défauts de coulée.

**Comment choisir le bon type de fonte?**

La sélection d'une fonte doit d'abord se faire en fonction de ses propriétés, sa composition chimique n'étant souvent qu'accessoire.

Il peut être tentant, si l'on ne connaît pas les principes régissant les propriétés des fontes, d'accorder une importance exagérée à leur composition chimique. Mais il vaut mieux se montrer prudent dans ce domaine car certains éléments d'alliage peuvent avoir des effets négatifs importants, par exemple altérer la structure métallurgique en favorisant la présence de composés intermétalliques indésirables

· **Fontes grises ( $2.5\% < \%C < 4\%$  avec  $1\% < \%Si < 3\%$ ):**

Elles sont souvent utilisées pour les bâtis des machines ou équipements soumis aux vibrations.

· **Fontes blanches**

Les fontes blanches sont des fontes dont la teneur de silice est inférieure à 1% et refroidies rapidement. Elles sont très dures et fragiles, utilisables comme matériaux résistant à l'usure sans grande ductilité (rouleaux des laminoirs).

### · Fontes malléables

Ces fontes malléables sont utilisées pour fabriquer des bielles, des engrenages de transmission, des raccords de tuyauterie.

### · Fontes à graphite sphéroïdal

Elles sont utilisées pour fabriquer des vannes, des carters de pompes, des vilebrequins, des engrenages et autres pièces de machines

L'acier, obtenu par un affinage particulier, est plus homogène que le fer, et sa résistance à la traction est deux fois plus grande, trois fois pour l'acier fondu. Dans tous les cas où l'allégement des structures est nécessaire, l'acier prend, à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, peu à peu la place du fer.

#### ➤ Acier



Fig.12 Acier [W10]

L'assemblage des éléments en métal, difficile à réaliser avec le fer forgé, a pu être industrialisé, au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, par le rivetage à chaud des tôles et des cornières laminées ; cette technique sera remplacée, un siècle plus tard, par celle de la soudure.

### · Les aciers à faible teneur de carbone (%C < 0.25%):

On les trouve dans diverses applications : Les poutres, les profilés, les cornières, carrosserie de voitures, toiture d'un stade, boites de conserve, grillage métallique.

### · Les aciers à moyenne teneur de carbone (0.25% à 0.6% de C):

Ces aciers sont utilisés dans la fabrication de : vilebrequins, engrenages, roue, voies ferrés, et autres pièces de structures qui nécessitent de grandes résistances et ductilité.

· **Les aciers à forte teneur de carbone (0.6% à 1.4% de C):**

Ils sont utilisés dans la fabrication d'outils de coupe, des lames de scies et de matrices.

· **Les aciers inoxydables considérés comme fortement alliés (12-30 % de Cr).**

Les aciers inoxydables, ou « inox », sont des aciers à haute teneur en chrome (supérieure à 10 %);

e) **Conclusion** [W11]

On a des différences entre fer, acier, fonte selon leur teneur ou bien le pourcentage en carbone :

- Le FER industriel, pourcentage de carbone inférieure à 0.05%. On ne parle plus de fer mais d'acier à très bas taux de carbone.
- Les ACIERS d'usage courant, pourcentage de carbone allant de 0.05 à 2%
- Les FONTES, pourcentage de carbone allant de 2.5 à 5%

L'augmentation du pourcentage carbone dans les aciers, **augmente** :

- La DURETE (H)
- La résistance à la RUPTURE (Rr)
- La LIMITE ELASTIQUE (Re)
- La résistance à la CORROSION
- La résistance à l'USURE
- La TREMPABILITE (mise en solution du carbone, formation de CARBURES)

Mais **diminue** :

- La MALLEABILITE (PLASTICITE-DUCTILITE)
- La résistance aux chocs (RESILIENCE)
- La soudabilité

D'où la nécessité de choisir un acier plus ou moins carburé selon que l'on désire réaliser :

- Résistance à l'usure : acier DUR (fort % carbone)
- Chaudronnerie ou emboutissage : acier DOUX (faible % carbone)

## II.2. CLASSIFICATION

### II.2.1. Classification de la trempe

#### a) La trempe martensitique :

Cette trempe consiste à porter la pièce en solution solide austénitique puis à la refroidir de telle sorte qu'elle subisse un changement total de phase accompagné d'un accroissement sensible de la dureté (qui sera fonction de la teneur en carbone)

**Le refroidissement peut être continu** jusqu'à une température inférieure à **MF** c'est-à-dire température à laquelle la transformation de l'austénite en martensite est pratiquement complète au refroidissement. Le refroidissement doit être assez rapide pour éviter les zones de transformation perlitiques et bainitiques de l'austénite.

C'est ce traitement qui est généralement désigné comme TREMPE sans autres précisions.

**Martensite** : Solution solide d'insertion en saturation de carbone dans la maille du fer. On la désigne par solution solide du fait que la structure cubique centrée du fer est déformée.

**Le refroidissement peut être discontinu** (trempe différée, étagée ou encore interrompue), le refroidissement s'opère en deux temps avec maintien isotherme par palier entre ces deux phases de refroidissement. Il convient d'éviter tout début de transformation de l'austénite au cours de ce palier dont la température sera fixée en fonction des indications fournies par les courbes de refroidissement continu de l'acier en cause.

Cette température est supérieure environ de 20 à 30°C par rapport à **MS** (température à laquelle la transformation d'austénite en Martensite commence au refroidissement).

La durée de maintien doit être suffisante pour atteindre au plus près l'équilibre thermique de la pièce.

On refroidit ensuite dans des conditions telles que la transformation martensitique soit aussi complète que possible (il reste en fait toujours un peu d'austénite résiduelle)

Ce refroidissement discontinu présente l'avantage de provoquer la formation de martensite dans l'ensemble de la pièce amenée à une température homogène très voisine de **MS** (limitation de risques de tapures et de déformations)

Les pièces indiquée dans la figure 13 ci-dessous viennent de l'opération de la trempe martensitique (produit finale du trempage martensitique)



Fig.13 Pièce trempé martensitique [W12]

### b) Trempe bainitique :

Transition entre Perlite et Martensite (transformation bainitique).

Le but de cette trempe est d'obtenir une structure à prédominance de bainite mais avec présence de martensite en proportion variable.

Le chauffage se fait dans les mêmes conditions que précédemment.

Le refroidissement peut prendre deux allures :

- Un refroidissement puis un maintien à température constante dans le domaine bainitique, puis refroidissement quelconque jusqu'à la température ambiante.

- Un refroidissement ralenti par la traversée.

### **Pièce trempé bainitique :**



Fig14 Pièce trempé bainitique[W13]

### **Transformation bainitique :**

La bainite se forme dans les aciers au cours de transformations isothermes à des températures inférieures à celles qui correspondent au domaine perlitique. On admet que le mécanisme de la transformation et de la germination de la bainite se fait par le fer  $\alpha$ .

Cette ferrite se formerait par un cisaillement du réseau de l'austénite accompagné d'une diffusion à courte distance permettant une redistribution du carbone. Les cristaux de ferrite se développent dans la matrice austénitique suivant des directions préférentielles bien définies qui sont celles des plans octaédriques du réseau CFC.

Les structures bainitiques très fines sont très recherchées pour leurs propriétés mécaniques, la bainite des aciers présente une résistance mécanique excellente, alliée à une bonne ductilité.

### **c) La trempe austénitique (ouhypertrempe) :**

Ce traitement a pour but de maintenir l'austénite jusqu'à la température ambiante, aucune transformation ne se produisant durant le refroidissement. Ceci implique que le point  $M_S$  soit rejeté au-dessous de la température ambiante grâce à l'action des teneurs élevées en éléments d'alliages.



Fig15 Pièce trempée austénitique [W14]

## **II.2.2. Classification de l'acier** [W15]

### a) Aciers ordinaires

Ce sont des aciers standards qui sont parfois improprement appelés aciers au carbone

### b) Aciers alliés ou spéciaux

Un alliage à base d'acier est considéré comme fortement allié si l'un des éléments qui le compose représente plus de 5% du mélange. Dans le cas contraire, on dit qu'il est faiblement allié. Les alliages à base d'acier possèdent des caractéristiques spécifiques selon le ou les composant(s) qui sont ajoutés : nickel, chrome, manganèse ou étain.

#### **b.1. Aciers au nickel**

L'ajout d'une faible dose de nickel à l'acier améliore sa faculté à prendre la trempe. C'est par exemple le cas pour les pièces épaisses. Avec une forte teneur en nickel, c'est la résistance de l'alliage à la corrosion qui est améliorée. Dans des proportions pouvant atteindre 50% (ferro-nickel), le nickel favorise la tenue à la corrosion dans des milieux très agressifs et certaines de ses propriétés changent comme la dilatation et le magnétisme. Un type très particulier d'alliage regroupant l'acier et le nickel est le maraging (17% à 20% de nickel).



Fig16 Exemple de pièce d'acier au nickel [W16]

### **b.2.Aciers au chrome**

Le chrome augmente la résistance à la rupture par la formation de carbures durs, mais apporte aussi une certaine fragilité. Jusqu'à 4% de chrome, l'alliage peut être utilisé comme aciers à outils ou à roulements. A plus forte teneur, ils sont employés dans la coutellerie fine et l'outillage de découpe. Si l'acier contient entre 10% et 20% de chrome, il devient inoxydable aux agents corrosifs et aux oxydants industriels. Pour une teneur de chrome égale à un quart, il devient réfractaire et peut donc entrer dans la composition de certains fours par exemple

Les aciers réfractaires sont destinés à résister à la corrosion à chaud (températures supérieures à 450-550 °C), dans des milieux agressifs tels que: atmosphères oxydantes, sulfurantes, nitrurantes, hydrogénantes; métaux et sels fondus; combustibles, etc. La température de fonctionnement élevée nécessite, de plus, une bonne tenue mécanique à chaud, en particulier une bonne résistance au fluage. La plupart de ces aciers réfractaires sont des aciers inoxydables dont les propriétés sont améliorées par des additions de Molybdène, Titane, Niobium, etc.



Fig 17 Exemple de pièce d'acier au chrome [W17]

### **b.3. Aciers au nickel-chrome**

Ce sont les plus importants des aciers spéciaux par leurs multiples applications. Ils combinent à la fois les avantages du chrome et du nickel. On distingue les aciers perlitiques (6% nickel/2% chrome au maximum) très employés en construction mécanique et les aciers austénitiques qui possèdent une charge en nickel et en chrome plus importante et qui constituent les aciers [inoxydables](#) (chrome 18%, 8% nickel) et certains [aciers réfractaires](#).



Fig18 Exemple d'acier au nickel-chrome[W18]

### **b.4. Autres aciers alliés**

#### **Les aciers au manganèse**

Ils possèdent une bonne résistance à l'usure et peuvent donc être employés dans des ouvrages destinés à durer tels que des rails de chemins de fer ou des pointes d'aiguillages, par exemple.



Fig19 Exemple de pièce d'acier au manganèse [W19]

### - Les aciers à l'étain

Cet alliage a pendant longtemps été surnommé "fer blanc" du fait de sa couleur. L'association d'acier et d'étain donne à l'alliage une bonne dureté, ainsi qu'une grande résistance à la corrosion. Ces caractéristiques ainsi que son coût relativement faible, sa non-toxicité et son apparence plaisante font du fer blanc le principal métal employé dans la fabrication de conditionnements pour l'industrie agroalimentaire et en particulier dans celle de canettes.

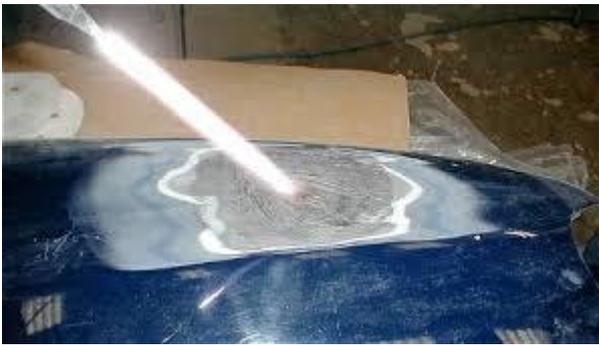


Fig20 Soudage en acier à l'étain [W20]

### II.2.3. Différentes types de trempe [W21]

#### a) Trempe à l'eau

Cette méthode fut longtemps la plus utilisée pour la trempe des lames de couteaux ; l'eau des ruisseaux était captée par les coutelleries afin de réaliser les opérations de trempe. Avec l'arrivée des aciers high-tech d'aujourd'hui l'opération de trempe sont devenue beaucoup plus critique ; la trempe à l'huile est de plus en plus utilisée. L'eau possède un pouvoir calorifique élevé ce qui produit une trempe agressive pouvant produire des « TAPURES où CASSURES ». Un autre phénomène négatif est celui de la "CALEFACTION" car très complexe, non reproductible et donc un phénomène difficilement maîtrisable. Lorsque qu'une pièce à une température élevée ( $>1000^{\circ}\text{C}$ ) est plongée dans de l'eau, celle-ci est vaporisée au contact de la pièce en formant une gaine de vapeur qui ralentit son refroidissement ; c'est la "Caléfaction". Les avantages de la trempe à l'eau est son faible coût et c'est une technique non dangereuse contrairement à la trempe à l'huile (Les huiles chaudes sont inflammable). Dans

certain cas, l'eau froide génère un refroidissement trop rapide produisant des contraintes internes préjudiciables. Dans ce cas on peut utiliser de l'eau chaude. Pour éviter le phénomène de caléfaction on peut revêtir la pièce d'un revêtement. Cette opération s'appelle le "Potéyage».

#### b) Trempe à l'huile

La méthode de trempe à l'huile peut aller du simple bac au dispositif entièrement automatisé. La plupart du temps, la température optimale de l'huile de trempe se situe entre 50 et 90°C. Il faut vérifier que le processus de trempe n'augmente pas la température de l'huile à une température voisine du point d'éclair de l'huile (Température à laquelle une substance s'enflamme spontanément en présence d'oxygène). Une bonne agitation du bain de trempe doit maintenir la température du bain, à moins de 50°C du point d'éclair de l'huile. Des essais de trempe montrent qu'on atteint la vitesse de refroidissement maximale quand la température de l'huile se situe entre 50 et 90°C. Pour obtenir un durcissement uniforme et des résultats constants, il faut que l'huile circule durant la trempe. L'agitation de l'huile a pour effet de distribuer uniformément la chaleur dans le bac et de réduire le risque d'inflammation et d'incendie en empêchant la formation d'une couche d'huile chaude en surface. Pour un bac muni d'un bon circuit de refroidissement, on conseille d'utiliser un à deux gallons d'huile par livre d'acier trempé à l'heure. Dans certains cas de températures d'austénitisation très élevées (1150-1200°C), l'utilisation de bain d'huile à 150-175°C est conseillée pour la trempe. Pour la trempe industrielle on emploie des huiles minérales spécialement conçues pour cet effet. La gamme des huiles de trempe présente des caractéristiques de rendement couvrant tous les types de trempe. Selon la viscosité de l'huile, la vitesse de trempe varie de 9 à 25 secondes avec des vitesses de refroidissement optimales entre 96°C et 50°C par seconde. Les huiles utilisées pour la trempe industrielle sont fabriquées à partir d'huiles paraffiniques de haute qualité, peu volatiles et avec un point éclair élevé (200-260°C).

#### c) Trempe à l'air

Dans le cas d'une trempe à l'air atmosphérique on ne peut pas tremper les aciers alliés modernes d'aujourd'hui. On a recourt à de l'air pressurisé pour augmenter la vitesse de refroidissement, mais si l'acier a une température supérieure à 900°C, le fer commence à l'état liquide pour favoriser l'alliage ! Pour éviter ce phénomène d'oxydation on a recourt au "**GAZ PULSE**" généralement de l'argon ou de l'azote qui sont inertes. Dans la trempe à l'huile, les

pièces trempées doivent subir des opérations de lavage et l'huile doit être filtrée, puis recyclée. Ces opérations ont un coût industriel. Il a été mis au point dernièrement, une technologie de trempe d'avant garde, à l'azote pressurisé et à température variable ; L'azote pulsé est d'abord projeté à température ambiante puis réfrigéré par de l'azote liquide ; En variant pression, vitesse et température de l'azote gazeux projeté sur les pièces d'acier à tremper, on arrive parfaitement à obtenir des vitesses de refroidissement supérieures à la vitesse CRITIQUE de trempe. Si les phénomènes physiques liés à la trempe sont bien connus les diverses solutions technologiques modernes de ces techniques innovantes sont maintenues secrètes.

**TAPURE** : Fissuration du métal due aux contrainte d'origine thermique ; elle peut apparaître au chauffage des pièces ou au refroidissement durant la trempe.

### II.3. FABRICATION DE L'ACIER [W27]

#### **II.3.1. Le principe de fabrication de l'acier**

Pour fabriquer de l'acier, il faut du minerai de fer, du [charbon](#), de la [chaux](#) et des ferro-alliages : [aluminium](#), [chrome](#), [manganèse](#), [silicium](#), [titane](#), [vanadium](#)... Ces derniers confèrent à l'acier des caractéristiques particulières adaptées à ses divers usages : architecture, ameublement, machines-outils, conditionnements alimentaires, etc. La fabrication nécessite aussi beaucoup d'eau pour le refroidissement des installations, la température de fusion dépassant 1.500 °C.

L'[acier](#) peut être confectionné dans deux types d'usines : dans un haut fourneau, à partir du minerai de fer et de coke (du carbone presque pur extrait du charbon), ou dans un four électrique, à partir d'acier de récupération (acier de [recyclage](#)).

Le charbon fournit le coke servant de [combustible](#) aux hauts-fourneaux où le minerai est fondu. Le [métal](#) liquide qui en sort est la fonte. Celle-ci est dirigée vers l'aciérie dans des wagons, appelés « poches-tonneaux », capables de maintenir sa température plus de 48 heures durant. Arrivée à destination, la fonte est mélangée à de la ferraille dans une grosse marmite, ou convertisseur. Le tout est oxygéné pendant 15 minutes, délai au bout duquel on obtient l'acier de base.

C'est à ce stade qu'est concoctée la préparation finale en dosant de façon précise les ferro-alliages. De nombreux prélèvements sont effectués et analysés tout au long du processus, jusqu'à l'obtention de l'acier désiré. On procède ensuite à la coulée continue (dans une lingotière) qui consiste à solidifier le métal sous la forme d'une longue bande.

Pour finir, la bande est découpée au chalumeau afin d'obtenir des brames : parallépipèdes épais de 20 centimètres, larges de 1,50 mètre et longs d'une dizaine de mètres. Pesant environ 25 tonnes, chaque brame sera laminée et formée en bobine.

### **II.3.2. Les étapes de la fabrication de l'acier** [W 27]

1. La formation de la fonte : le minerai de fer et le coke sont introduits dans le haut fourneau par le haut, la chaleur provoquant la [combustion](#) du coke et l'élimination des éléments chimiques contaminants. Le fer se charge ensuite de carbone au cours de sa descente et se transforme en fonte, qu'il faut alors séparer d'un mélange de [déchets](#) appelé laitier.
2. La conversion de la fonte en acier : la fonte en fusion est ensuite versée sur de la ferraille dans un convertisseur à oxygène où de l'oxygène est insufflé pour éliminer le carbone sous forme de CO<sub>2</sub>.
3. L'affinage : l'acier obtenu est affiné en ajoutant des éléments ([nickel](#), chrome...) pour former différents alliages et modifier les propriétés mécaniques de l'acier en fonction des besoins.
4. La coulée : l'acier est refroidi progressivement jusqu'à solidification.
5. Le laminage : l'acier est à nouveau monté à température pour le rendre malléable. Il est ensuite aplati dans des [laminaires](#) et la forme voulue lui est donnée.

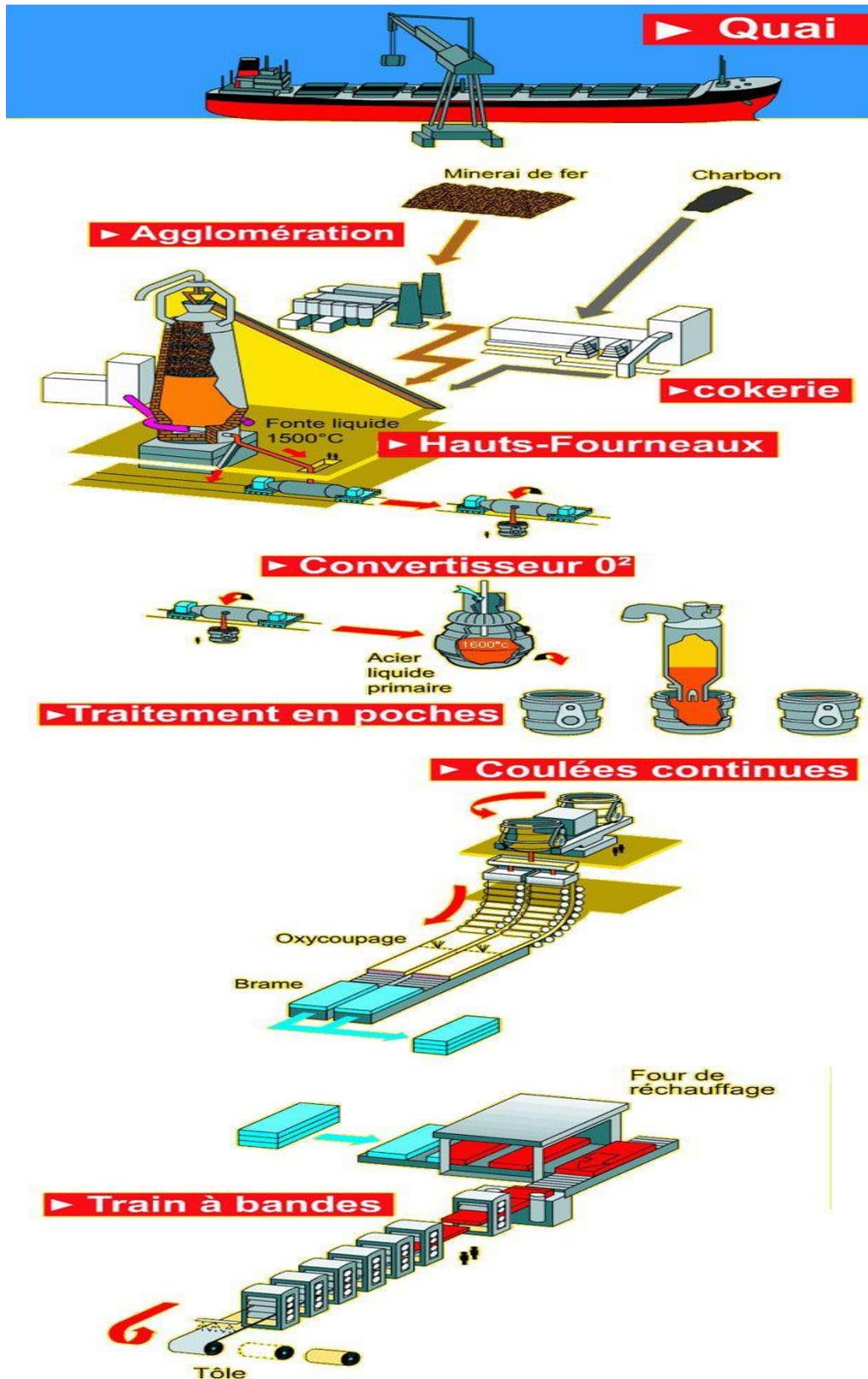


Fig21 PROCESSUS DE FABRICATION DE L'ACIER [W27]

## II.4. ACIER INOXYDABLE [W28]

### II.4.1. Définition

Les aciers inoxydables sont des alliages de fer comportant de chrome (supérieure à 10.5%) et de carbone (inférieure à 1.2%) nécessaires pour garantir la formation d'une couche de surface auto-régénérant (couche passive) qui apporte la résistance à la corrosion.

Les aciers inoxydables sont employés dans la fabrication des tuyaux, des réservoirs des raffineries de pétrole, des avions, des capsules spatiales, des ustensiles de cuisine (l'acier inoxydable n'altère pas la nourriture et se nettoie facilement).

### II.4.2. Principales familles

**Austénitique** :fer-chrome-nickel, carbone inférieure à 0.1%, amagnétique à l'état de livraison ; supérieure à 65% de l'utilisation d'acier inoxydable.(Structure cubique face centrée)

**Ferritique** :fer-chrome, carbone inférieure à 0.1%, magnétique. (Structure cubique centrée « cc »)

**Martensitique** :fer-chrome, carbone supérieure à 0.1%, magnétique et apte à la trempe(structure quadratique)

**Duplex** :fer-chrome-nickel, structure mixte austénitique-ferritique, magnétique.

### II.4.3.Classification des aciers inoxydables

On peut classer les aciers inoxydables d'après la structure cristalline qu'ils prennent après un traitement bien déterminé. Il existe 3 familles d'aciers inoxydables :

- **Les aciers ferritiques**(structure cubique centrée « cc »)
- **Les aciers martensitiques** (structure quadratique)
- **Les aciers austénitiques** (structure cubique face centrée).

### a) Les aciers ferritiques

Ces aciers ne prennent pas la trempe. Ils sont appelés ferritiques parce que leur structure cristalline est la même que celle du fer à température ambiante.

Ils possèdent une teneur en carbone très faible (de l'ordre de 0,07% de carbone). La teneur en chrome est comprise entre 11 et 29%. Ils ne contiennent pas de nickel.

Les aciers ferritiques sont magnétiques à température ambiante. Ils sont moyennement ductiles.

### b) Les aciers martensitiques

Ces aciers peuvent prendre la trempe et sont susceptibles de donner des caractéristiques mécaniques variées suivant la teneur en carbone et le traitement thermique (trempe, revenu, recuit). Ils ont une très bonne trempabilité en général.

Toutefois, il faut noter que l'accroissement de caractéristiques par la trempe et le revenu est inévitablement associé à une augmentation de la sensibilité à la corrosion.

Les aciers martensitiques sont en général moins résistants à la corrosion que les aciers ferritiques. Les aciers martensitiques les plus courants ont une teneur en chrome de 13% et des teneurs en carbone supérieures à 0,08%.

Exemple d'utilisation : lames de couteaux de cuisine.

### c) Les aciers austénitiques

1/ Les austénitiques au chrome-nickel 304 (18% de chrome et 8% de nickel) *dénommés 1.4301 (ou 304 norme US)*. **Ils sont très résistants à la corrosion** grâce à la présence du chrome. Ils sont aussi très ductiles. Ces aciers ont une structure cubique à faces centrées à température ambiante. Cette structure est amagnétique et peut être conservée à température ambiante grâce à des éléments d'alliage appropriés dont le plus connu est le nickel.

2/ Les austénitiques au chrome-nickel-molybdène (18% de chrome, 10% de nickel et 2% de molybdène) *dénommés 1.4404 (ou 316 norme US)*, pour les milieux les plus agressifs.

#### **II.4.4. Corrosion des aciers inoxydables**

Considérer l'acier inoxydable comme un matériau unique est une erreur grave, si on généralise improprement les propriétés d'une nuance particulière. Outre les grandes familles d'aciers inoxydables, le traitement de finition est un facteur déterminant de la résistance à la corrosion.

##### **a) Corrosion des aciers ferritiques**

Ces aciers ont en général une meilleure résistance à la corrosion que les aciers martensitiques. Ils se comportent de manière satisfaisante dans la plupart des cas de corrosion atmosphérique. En atmosphère agressive (notamment en présence de chlorures) le risque principal est la corrosion par piqûres ou crevasses.

##### **b) Corrosion des aciers martensitiques**

A l'exception des aciers martensitiques au nickel riche en chrome, ces aciers sont les moins résistants des aciers inoxydables et ils ne donnent satisfaction que dans les milieux peu agressifs.

##### **c) Corrosion des aciers austénitiques**

Ces aciers constituent la famille des aciers inoxydables la plus connue. Ils ne sont pas attirés par l'aimant. Ils sont moins sujets à la fragilisation que les aciers ferritiques.

#### **II.4.5. Précautions d'emploi de l'acier inoxydable**

L'inox ne subit pas de corrosion galvanique au contact des autres matériaux métalliques tels que le zinc, le cuivre, l'aluminium et l'acier galvanisé.

En revanche, le contact inox-acier non protégé n'est admis que pour les clous de fixation. Le contact des aciers inoxydables avec d'autres matériaux métalliques peut entraîner la dégradation rapide de ceux-ci par effet de couplage galvanique (pile).

En effet, le métal le moins noble sera plus ou moins corrodé par ces phénomènes électrochimiques, (faiblement attaqué si la différence de potentiel entre l'inox et l'autre métal est petite, importante si la différence de potentiel est importante).

Plus la surface de l'inox est importante, plus il y aura corrosion de l'autre matériau métallique plus électronégatif (l'inox est un des métaux industriels les plus électropositifs).

L'inox n'est pas sensible au contact des mortiers de ciment, de chaux ou de plâtre. Il peut se marier sans aucun inconvénient avec toutes les essences de bois et tous les panneaux de particules.

**Précaution sur chantier :** Il faut impérativement veiller à ce que l'inox ne reçoive pas de projections acides lors des nettoyages de chantier.

De plus tout travail de meulage avec risque de projection de limaille est à proscrire à proximité du matériel en inox.

#### **II.4.6. Entretien de l'acier inoxydable**

Les produits inox nécessitent impérativement un entretien régulier.

La fréquence de nettoyage est de :

- 6 à 12 mois en milieu non agressif
- 3 à 6 mois en milieu agressif (air marin, atmosphère urbaine ou industrielle, projection de sels suite au sablage des routes verglacées, etc.)

Si la couche protectrice est abîmée localement à la suite d'un endommagement accidentel, elle se reconstitue seule en milieu non agressif.

Le lavage au savon et à l'eau est généralement suffisant pour maintenir un bel aspect aux inox. Dans tous les cas, le lavage doit être suivi d'un rinçage abondant à l'eau claire.

L'utilisation de tampons métalliques (paille de fer), brosses dures et laines métalliques, brosses nylon, sur les polis brillant ou miroir et d'une manière générale les tampons et poudres abrasives (même très fines) **doit être proscrite**. Tout contact avec des dérivés chlorés ou fluorés est à éviter.

On peut aussi utilement employer des nettoyeurs haute pression avec ou sans produits lessiviels. On veillera au maintien de la propreté des surfaces, surtout si des travaux doivent

encore être effectué sur le site ou à proximité immédiate avec risque de projection de particules métalliques.

## II.5. PROPRIETE CHIMIQUES ET PHYSIQUES DE L'ACIER

Nous ferons remarquer qu'à haute température, ce métal absorbe du carbone lorsqu'il est en contact avec des substances qui peuvent lui en céder, tandis qu'il en perd et qu'il absorbe de l'oxygène lorsqu'il se trouve au milieu d'une atmosphère oxydante.

L'acier brûlé est celui qui a été chauffé à trop haute température (supérieure à 900°C) dans ces dernières conditions. Il a perdu, en partie ou en totalité, son carbone jusqu'à une profondeur plus ou moins grande au-dessous de la surface, et on reconnaît pendant le chauffage que cette altération se produit à ce que le métal lance des étincelles. Généralement, il a absorbé de l'oxygène, et les éléments voisins de la surface qui se sont oxydés ont été fondus, ce qui diminue la cohésion de cette partie de la pièce. C'est ce qui explique pourquoi lorsqu'on forge ou lorsqu'on lamine l'acier brûlé, les bords se gercent ou même la rupture complète se produit. (**Gadeau R, 1958**)



Fig22 : Acier brûlé [W29]

L'acier dénaturé est celui qui a plus ou moins perdu ses propriétés antérieures et, par conséquent, sa dureté. Cette altération résulte d'un chauffage trop prolongé à la température normale avec excès d'air, ou d'une série de chauffes trop nombreuses. Il y a eu perte de carbone et absorption d'oxygène.

L'acier brûlé et l'acier dénaturé ont le grain gros. Le premier est très fragile et si l'altération est très grande, on peut même le pulvériser à froid dans un mortier. Dans le second, la fragilité

n'est pas aussi grande parce qu'elle est contrebalancée, en partie, par la ténacité et la ductilité résultant de sa composition plus rapprochée du fer.

Les différents aciers ne sont pas exposés au même degré à être brûlés ou dénaturés. Ils sont prédisposés à être brûlés lorsqu'ils contiennent des corps oxydables dont les produits de l'oxydation sont fusibles ; tandis que la tendance à être dénaturé est développée simplement par la présence d'éléments avides d'oxygène. Cela explique pourquoi les aciers fondus, plus chargés de ces éléments que les aciers puddlés ou affinés au bas foyer, sont plus difficiles à bien chauffer. (W30)

Les aciers au tungstène et au chrome ont une très grande tendance à se dénaturer ; des chauffes trop nombreuses leur font perdre toutes leurs qualités, et cela d'autant plus rapidement que la proportion de tungstène ou de chrome est plus grande. Cela provient certainement de la rapidité avec laquelle ces deux métaux s'oxydent en se transformant en acide tungstique et en acide chromique, surtout lorsque la chauffe est oxydante.

Il est vrai toutefois que l'acier naturel le plus pur qui est de l'acier au carbone, peut se dénaturer et perdre son carbone parce que l'oxygène pénètre à travers ses pores pendant qu'ils sont ouverts par la chaleur (ce fait a été découvert par Sainte-Claire Deville) ; mais, dans ce cas, l'acide carbonique résultant de l'oxydation s'échappe et par conséquent n'altère pas la cohésion du métal. Il n'en est pas de même des produits oxydés du silicium et du manganèse qui commencent à prendre naissance à une température relativement basse et qui restent dans le métal en altérant ses propriétés. L'altération atteint son maximum lorsqu'ils arrivent à être fondus comme cela se produit vraisemblablement dans l'acier brûlé.

## **II.6. ESSAIS DES ACIERS : CONNAISSANCE DE L'ACIER EN GENERAL**

### **a) Analyse chimique et essais mécaniques(B3)**

Pour connaître la qualité d'un acier, il semble naturel au premier d'abord, d'en faire l'analyse chimique, parce que ce métal peut contenir, en même temps que du carbone, un certain nombre d'autres corps qui exercent de l'influence sur ses propriétés.

On voit donc que la connaissance de l'influence exercée sur les qualités de l'acier par les corps qu'il peut contenir, est encore dans la période de développement, et que par conséquent l'analyse chimique, indispensable pour guider les fabricants d'acier, est encore très insuffisante pour permettre d'apprécier la qualité du métal.

Il faut ajouter que la qualité dépend aussi des conditions physiques que remplit plus ou moins bien le métal, par exemple de son homogénéité et de sa continuité, qualités qui résultent du mode de fabrication et de la température à laquelle le métal a pris naissance. Il est vraisemblable aussi que les gaz qui existent dans l'acier, quoique les analyses n'en fassent pas mention, ont une certaine influence.

Les pièces faites avec de l'acier à outils sont ordinairement utilisées à l'état trempé, et par conséquent les essais mécaniques exécutés sur cet acier non trempé ne peuvent guère renseigner sur ses qualités utiles. Au contraire, ces mêmes essais sont très intéressants lorsqu'on les applique à des aciers destinés aux constructions, parce qu'on emploie cette sorte de métal sans le tremper et parce que l'on utilise surtout ses propriétés mécaniques. Toutefois, il est indispensable de savoir exactement dans quelles conditions les essais ont été faits, sinon on est exposé à commettre des erreurs.

#### **b) Essais à la forge**

Cet essai permet de faire l'étude de l'acier pratiquement. On prend un échantillon d'un acier. On le forge ou on le lamine en barre d'une section quelconque, par exemple un carré de 15 à 20 millimètres d'épaisseur, puis à partir d'une de ses extrémités, on fait à froid ou à chaud tout autour de la barre neuf encoches espacées de 15 millimètres. On met dans un feu de charbon le bout ainsi préparé. Dès qu'on voit apparaître des étincelles provenant de la partie qui est dans le feu, ce qui indique qu'elle brûle, on plonge la barre tout entière dans l'eau, on l'y maintient jusqu'à complet refroidissement puis on la sèche avec soin. La température de cette barre au moment où on la plonge dans l'eau n'est pas uniforme ; elle va en diminuant à partir de l'extrémité brûlée, de sorte que les différentes sections de la barre subissent la trempe à des températures différentes. (Pariselle H, 1956)

On essaie ensuite à la lime, et on obtient, en général, les résultats suivants. Le bout brûlé est très dur ; entre la première et la deuxième encoche la dureté est moindre puis elle va en

augmentant jusqu'à un maximum vers le milieu de la partie de la barre où les encoches ont été faites. Au-delà de cette section, qui est plus dure que les voisines et presque aussi dure que la partie brûlée, la dureté va en diminuant à mesure qu'on s'éloigne du bout chauffé, et atteint enfin celle de l'acier non trempé. La section où se trouve ce maximum est celle qui a été trempée à bonne température. Après on constate que la barre dans un étau de manière à ne laisser dépasser que la partie limitée par la première encoche et, d'un coup de marteau appliqué obliquement, on casse la barre au niveau de cette encoche. On fait ensuite la même opération pour casser de même les morceaux suivants. On constate que le premier se casse très facilement et que la ténacité augmente à mesure qu'on s'en éloigne. Le dernier morceau a parfois une ténacité plus grande que la même barre non trempée.

Ces expériences démontrent simplement le domaine de la dureté de l'acier et la connaissance de quelque notion de température si on trempe l'acier. (Gadeau, 1959)

## **CHAPITRE II : ETUDE DE LA FABRICATIONS D'ACIERS TREMPES A MADAGASCAR**

### **I. INTRODUCTION**

Le peuplement de Madagascar intervient à une époque où la technologie de production du fer est déjà établie dans différentes parties du monde. L'étude sur place des vestiges liés à la métallurgie du fer (mines, ateliers de réduction, fourneau, forge) permettrait de mieux comprendre les différentes influences culturelles et retracer l'histoire de la sidérurgie malagasy.

Les premiers rails furent posés à Anivorano le 1<sup>er</sup> Avril 1901. Les chemins de fers malagasy viennent d'écrire la première page de son histoire. Le 28 Février 1944, une société ferroviaire fut mise en place afin de desservir les réseaux Nord et Sud. Cette société fut dénommée REGIE GENERALE DES CHEMINS DE FER D'OUTRE MER. La société ferroviaire fut déléguée le 26 Décembre 1950 à un organisme à caractère individuel et commercial. L'année suivante le 1<sup>er</sup> janvier 1951, la société change de nom. Elle devient alors la REGIE DES CHEMINS DE FER DE MADAGASCAR (RCFM). Au courant de l'année 1974, l'état malagasy nationalise la société ferroviaire, et la dote de statut d'entreprise public à caractère commercial. Le 6 mai 1982, l'entreprise devient une société d'état à part entière. La société ferroviaire malagasy devient le RESEAU NATIONAL DES CHEMINS DE FER MALAGASY (RNCFM).

Dans les années 90, le chemin de fer n'est plus entretenu, les matériels moteurs et remorqués ne sont plus fonctionnels et ne sont pas renouvelés. L'état malagasy décide de privatiser le RNCFM. Le 10 octobre 2002 un opérateur privé appartenant au groupe « BOLLORÉ » du nom de « COMAZAR » prend en gestion l'exploitation, les infrastructures et le patrimoine du chemin de fer malagasy selon la convention de concession de gestion d'exploitation du réseau nord et Le RNCFM devient « MADARAIL ou MADAGASCAR RAILWAYS »

La société MADARAIL adapte en interne leurs propres pièces de rechanges nécessaires à leur activité (roues, vilebrequins, etc.). Le dépôt principal de Soarano est composé de 13 ateliers (infrastructures techniques, peintures, injections, bogies pneumatiques, essieux, etc.). Ils prennent également les commandes de certains de leurs clients, qui désirent confectionner ou modifier des pièces spéciales (alésage, tournage, fraisage, etc.). Ils traitent leurs requêtes en fonction de la disponibilité de leurs ateliers et de la faisabilité technique.

## II. OBJECTIFS

Dans le but de renforcement de connaissances, nous avons effectué des visites à la société Madarail; c'est une société de fonderie qui fait toute opération sur la fonte, cette société a été créée par les français durant la colonisation pour fabriquer de pièce de base de train (semelle de frein et lame des ressorts).

Ces observations pratiques nous aiderons, lors de l'introduction des différentes notions dans le secondaire, à l'explication des connaissances acquises lors des études théoriques. Par ailleurs la visite d'usine, suscitera l'intérêt des élèves sur le thème étudié, satisfera ses curiosités et renforcera ses connaissances acquises en classe, lors des études théoriques.

## III. RESULTATS

Les différentes étapes de fabrication de l'acier sont indiquées dans les paragraphes ci-dessous :

### III.1 Opération

La société Madarail traite leurs requêtes en fonction de la disponibilité des ateliers et de la faisabilité technique. La première opération est le coulage. Pour conduire cette opération, les matériels cités ci-dessous sont utilisés.

Coulage (fabrication de semelle de frein)

### Matériel utilisés

- Cubilot
- Poche
- Piquet
- Porte bouchon
- Moule

**Nom de l'opération :** fonte de la 2<sup>ème</sup> fusion car on utilise une matière première qui vient de minerai de fer qu'on appelle « coke » ; mais ce n'est pas un minerai de fer pur puisque la fonte de ce minerai est appelée fonte de la 1<sup>ère</sup> fusion.

### Opération :

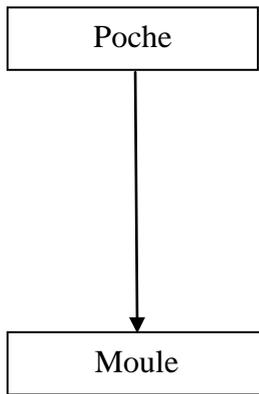
- On verse 7 tonne 200 de coke dans un cubilot pour fabriquer 510 nombres de semelle de frein. La température à l'intérieur de cubilot, plus précisément dans le cuve est 1300°C, et dans la zone de Suchet est 1600°C car le cubilot se divise en deux partie : audessus il y a le cuve et en bas la zone de Suchet.
- Après 20min, on ouvre la couverture de la zone de Suchet et le produit coule immédiatement vers le support appelé « poche ».
- Le coulage dans une poche permet de fabriquer trois(03) semelles de frein qui pèse 13kg chacune.
- Par la suite, on verse liquide contenu dans une poche dans un moule constitué à partir de sable.

L'opération dure 4heures, depuis le minerai decoke pure jusqu'à l'emplacement dans une moule

On remplit les moules, et on attend 12h en moyenne pour la formation de cette pièce, par refroidissement, dans une moule.

Une représentation synthétique de cette différente opération est indiquée sur la figure suivante





Nouveaux produits :  
**Semelle de frein**



Source de figure : auteur

### III.2 Trempe de l'acier(fabrication de lame à ressort)

On emploie un produit laminé pour la fabrication de lame à ressort

- La pièce laminée va être courbée sur l'étai pour avoir la forme d'un ressort
- Elle est mise dans le four à 1450°C
- Ensuite on met la pièce dans un bain d'huile, c'est la trempe à l'huile, et on obtient une lame de ressort.

Ces différentes étapes sont illustrées sur la figure suivante :



Source : auteur

## CHAPITRE III : OUTILS DIDACTIQUE POUR L'APPRENTISSAGE DE LA TREMPE DE L'ACIER

Ce chapitre a pour objectif de concevoir une fiche pédagogique pour l'apprentissage de la trempe dans la classe de seconde. Elle parle de la méthode de conduite de la trempe, de ses différents paramètres ainsi que les propriétés de l'acier produit.

### I. COURS SUR LA TREMPE

Date :

Matière : Physique

Classe : Seconde

Durée : 1h 30 min

**Objectif général** : L'élève doit être capable d'expliquer théoriquement le déroulement de la trempe d'acier

**Objectifs spécifiques** : L'élève doit être capable de :

- Définir ce qu'on appelle alliage
- Décrire les techniques qui permettent d'obtenir cet alliage
- Décrire les propriétés physiques d'un alliage suivant les paramètres de traitement.

**Pré-requis** : Différentes notions indiquées ci-dessous sont nécessaires à la compréhension du cours:

- la température de fusion de quelques aciers  
Exemple : Fer :  $\Theta_{\text{fusion}} = 1535^{\circ}\text{C}$   
Aluminium :  $\Theta_{\text{fusion}} = 660^{\circ}\text{C}$
- la différence entre fer et acier. Exemple : Le fer est l'un des éléments dans un tableau périodique ; l'acier est la fusion de deux éléments du tableau comme le fer et le carbone autrement dit c'est un alliage
- la notion de molécule. Exemple : Une molécule est un assemblage d'atomes identiques ou différents liés par des liaisons covalentes.

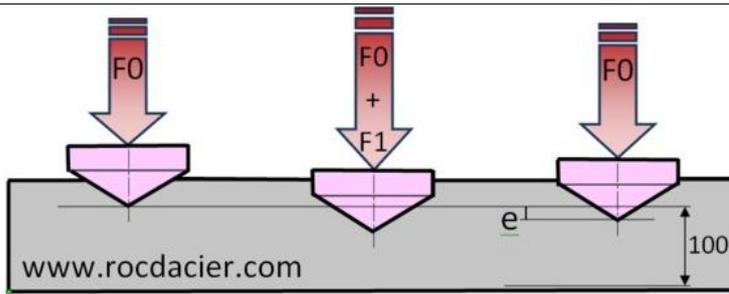
**Matériel didactique** : Ordinateur (Logiciel flash 8)

Durée	Contenues	Stratégie
2 min	I. <u>Définition</u> <b>La trempe</b> est le procédé de base du durcissement de l'acier	Le Professeur parle d'une opération simple concernant la

2 min	<p>par traitement thermique.</p> <p>II. <u>Les traitements thermiques des aciers</u></p> <p>a) <u>Rôle</u></p>	trempe <u>Ex</u> : la fabrication de nos couteaux
5min	<p>Le <b>traitement thermique</b> d'une pièce consiste à déterminer les paramètres thermiques pendant la trempe.</p> <p>b) <u>Les éléments de traitements thermiques</u></p> <p>Un traitement thermique consiste à jouer sur trois éléments :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- la température</li> <li>- le temps</li> <li>- et le milieu de séjour durant le maintien en température (neutre ou réactif)</li> </ul> <p>Lors de trois phases différentes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- la montée en température</li> <li>- le maintien à température</li> <li>- et le refroidissement.</li> </ul>	
7min	<p>c) <u>Les caractéristiques de l'acier qui résultent de ou influencent l'effet d'un traitement thermique</u></p> <p>Il faut bien sûr prendre en compte avant tout, la composition chimique, les dimensions et la géométrie de la pièce traitée.</p> <p>Sans rentrer dans les détails, il faut noter qu'un acier peut présenter plusieurs types de structures cristallines liées :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- aux phases</li> <li>- aux types de précipités</li> <li>- à l'organisation entre ces deux éléments.</li> </ul>	Il faut expliquer que les traitements thermiques des aciers possèdent des phases (solide, solide+liquide, liquide,...) avant d'arriver au produit final

10 min	<p>d) <u>Caractéristiques de mise en œuvre</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● ductilité (capacité de déformation) : il désigne la capacité d'un matériau à se déformer plastiquement sans se rompre.</li> <li>● résilience, ou ténacité (résistance au choc) : c'est la capacité d'un matériau à résister à la propagation d'une fissure ; cela s'oppose à la fragilité</li> <li>● résistance (limite d'élasticité, résistance à la traction) : une pièce a été conçue avec des dimensions données (longueur, largeur, hauteur, diamètre,...) ; ces dimensions sont assorties de tolérances, c'est-à-dire d'un écart acceptables par rapport à ces dimension ; plus une tolérance est serrée (plus sa valeur est faible), la tolérance doit donc correspondre à une fonction de la pièce</li> <li>● dureté : il se mesure à la résistance d'un matériau</li> </ul> <p><b>III. <u>Principe de la trempe</u></b></p> <p>Si on a forgé une lame, des tensions internes très importantes subsistent dans le métal.</p>	
10 min	<p>Dans ce cas, avant de tremper la lame, il faut enlever ces tensions pour éviter que la lame ne 'gondole' lors de la trempe.</p> <p>Pour cela, porter la lame au rouge 'cerise', puis, la laisser refroidir dans un matériau qui ralentit le refroidissement comme par exemple du sable fin très sec, de la vermiculite (isolant employé dans la construction de maison), de la laine de verre, de la chaux, des cendres de la forge ou autre (qui</p>	

<p>20 min</p>	<p>résistent à la chaleur).</p> <p>Laisser refroidir entre 12 et 24 heures</p> <p>Quand la lame est chauffée, elle émet de la lumière contrairement au revenu où c'est la lumière extérieure qui permet de voir la couleur.</p> <p>Donc :</p> <p><u>Pour tremper</u> : se mettre dans un endroit assez sombre, pour bien voir la couleur du métal.</p> <p><u>Pour faire un revenu</u> : se mettre à la lumière du jour pour bien voir la couleur</p> <p><b>IV. <u>Essai de dureté Rockwell</u></b></p> <p><u>Rockwell</u> : C'est une échelle de mesure pour quantifier la dureté d'un couteau</p> <p><u>L'essai de dureté ROCKWELL</u> consiste à faire pénétrer, en deux temps, dans la couche superficielle de la pièce à essayer, un pénétrateur qui peut être <b><u>un cône ou une bille</u></b> et mesurer l'accroissement rémanent de la profondeur de pénétration. Cet essai permet une lecture directe mais ne convient pas aux pièces moulées ou à gros grains.</p> <p>Il existe plusieurs <b>essais de dureté ROCKWELL</b>, les plus courants sont l'<b>essai ROCKWELL HRC</b> et l'<b>essai ROCKWELL HRB</b> :</p> <p>L'<b>essai ROCKWELL HRC</b> se réalise avec un cône de diamant d'angle de 120° et un arrondi de 0,002mm. La charge à appliquer est de 1373N</p>	<p>- Le professeur explique que l'opération finale de la trempe n'est pas forcément dans l'eau mais ça dépend de l'utilisation de cette pièce. Si on a besoin de pièce flexible comme le ressort on trempe dans l'huile ; et si on a besoin de pièce rigide comme la lame de couteau on trempe dans l'eau où à la lumière</p>
---------------	---	---



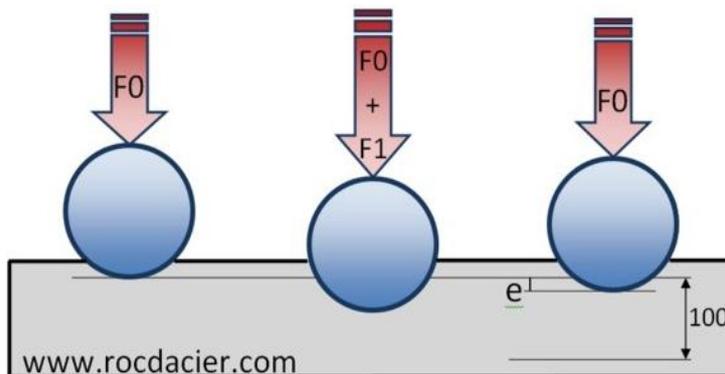
Essai de dureté Rockwell de type HRC

- *Calcul de dureté Rockwell HRC*

$$\text{HRC} = \frac{100 - (e_2 - e_0)}{0.002}$$

Avec :  $e = e_2 - e_0$  et  $e_2$  et  $e_0$  en mm

L'essai **ROCKWELL HRB** se réalise avec une bille en acier trempé. La charge appliquée est de 883 N.



- *Calcul de dureté Rockwell HRB*

$$\text{HRB} = \frac{130 - (e_2 - e_0)}{0.002}$$

- Le Professeur explique qu'on peut faire une autre méthode pour connaître la trempe sans raison de la température

Le professeur va expliquer que la dureté HRC et HRB est une unité de mesure de la modification de l'acier durant le trempage

15 min	<b><u>V. RESULTATS DES ESSAIS DE DURETE</u></b>				
	<b><u>ROCKWELL</u></b>				
	Eprouvette	Trempe à l'eau	Trempe à l'huile		Refroidissement à température ambiante
	Marron	HRC : 66 67 66 67 68 } 66,8 soit $R_m > 2140 \text{ MPa}$	HRC : 44 44 43 44 47 } 44,4 Soit $R_m = 1450 \text{ MPa}$		HRC : 27,0
Bleu	HRC : 55 52 52 54 52 } 52,6 soit $R_m = 1835 \text{ MPa}$	HRB : 88 87 88 90 88 } 88,2 soit $R_m = 605 \text{ MPa}$	HRB : 82,6		
Vert	HRC : 62 66 64 66 65 } 64,6 soit $R_m > 2140 \text{ MPa}$	HRC : 44 40 41 41 45 } 42,2 soit $R_m = 1380 \text{ MPa}$	HRC : 22,0		

- Le Professeur explique aux élèves que l'origine de ce résultat est d'après l'expérience qui a fait par la société Rocardier en Europe

- Le Professeur doit également expliquer l'utilisation de ce tableau

Durée	Contenues	Stratégie
15 min	<p><b><u>INTERPRETATION DES RESULTATS</u></b></p> <p>On remarque que lorsque l'on effectue une trempe à l'huile, l'acier est moins dur que lorsque l'on effectue une trempe à l'eau sur la même nuance où bien même procédure. Ceci est du au fait que l'huile, à cause de sa viscosité, créer une sorte « d'enveloppe » autour de l'échantillon, empêchant la diffusion rapide de la chaleur répartie dans celui-ci. Tandis que pour l'eau, sa viscosité étant moins importante que pour l'huile, la chaleur de l'échantillon s'évacue plus facilement donc la chute de</p>	

	<p>température de l'échantillon est plus brutale.</p> <p>D'autres facteurs que la viscosité interviennent sur les résultats.</p> <p>On en déduit donc qu'il y a formation de plus de martensite dans le cas d'une trempe à l'eau que dans le cas d'une trempe à l'huile. D'où une dureté plus grande pour les aciers trempés à l'eau que à l'huile.</p> <p><b><u>Conclusion :</u></b></p> <p>Un acier trempé à l'eau sera plus dur que le même acier trempé à l'huile qui sera lui-même plus dur que s'il avait été refroidit à l'air.</p>	
--	--	--

## II. FICHE DE TP

Classe : Seconde

### OBJECTIFS DU TP

L'élève doit être capable de déduire la valeur de la dureté HRC ou HRB qui se trouve durant le cour pour connaître la nature de la trempe

### PRE-REQUIS

- Savoir manipuler l'ordinateur. Ex : l'ouverture de logiciel ; fermeture du programme
- Suivre la démarche théorique dans la leçon. Ex : choix du matériaux avec la résistance, puis remplissage du tableau et le calcul de la dureté
- Savoir ce qu'on appelle la résistance de matériaux

MATERIEL DIDACTIQUE : Ordinateur avec le logiciel « flash 8 »

### DEROULEMENT DU TP

- Trouver l'icône « Macromedia flash 8 » sur le bureau et ouvrir cette logiciel.
- Trouver sur le titre de résistance le travail effectué lors de l'opération s'il s'agit de « Résistance de matériau HRC ou HRB »
- Choisir la valeur de la résistance de matériau ( $R_m$ ) en employant l'onglet  pour faire le choix et appuyer sur OK pour la validation.
- Il y a 5 pyramides de différente couleur qui se situe après la validation de cette valeur et on fait le choix parmi les 5 pyramides.
- Cliquer sur le premier pénétrateur en forme de flèche qui se trouve sur le banc de Rockwell puis sur le second pour avoir la variation de l'épaisseur ( $e_2 - e_1$ ) et appuyer sur OK.
- Compléter la case du tableau en fonction de la flèche en dessus

Même raisonnement pour le remplissage des autres cases

## QUESTION

Compléter le tableau ci-dessous

Quelle catégorie de trempe s'agit-il pour chacun de ces résultats ?

e (mm)					
Dureté HRC					

e (mm)					
Dureté HRB					

Conclure ?

### III. ETAPE DU DIDACTICIEL

- Ouverture du logiciel

ESSAI DE DURETE DE ROCKWELL HRC Rm > 2140 MPa OK

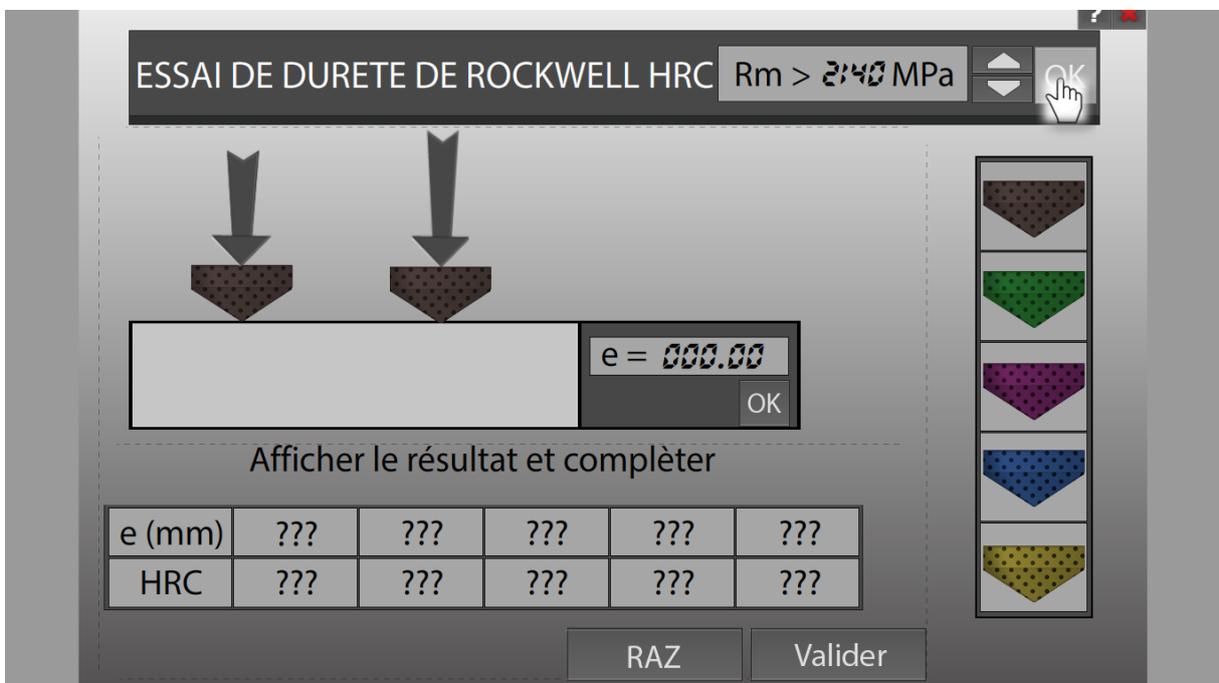
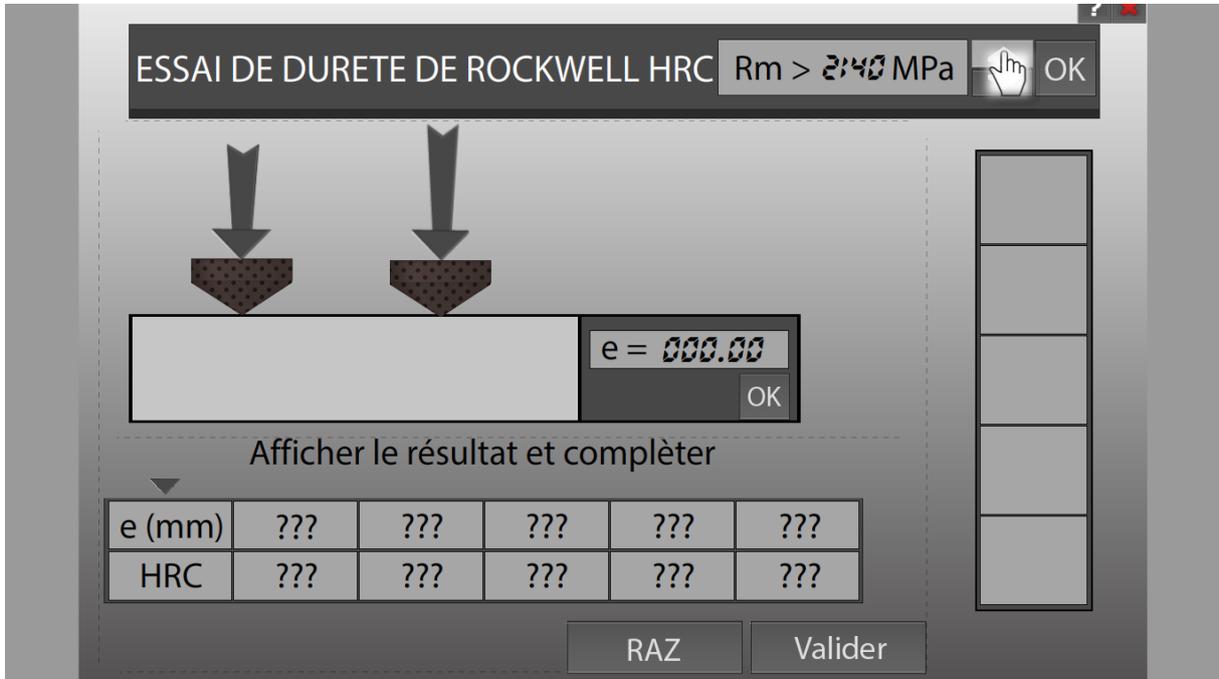
e = 000.00 OK

Afficher le résultat et compléter

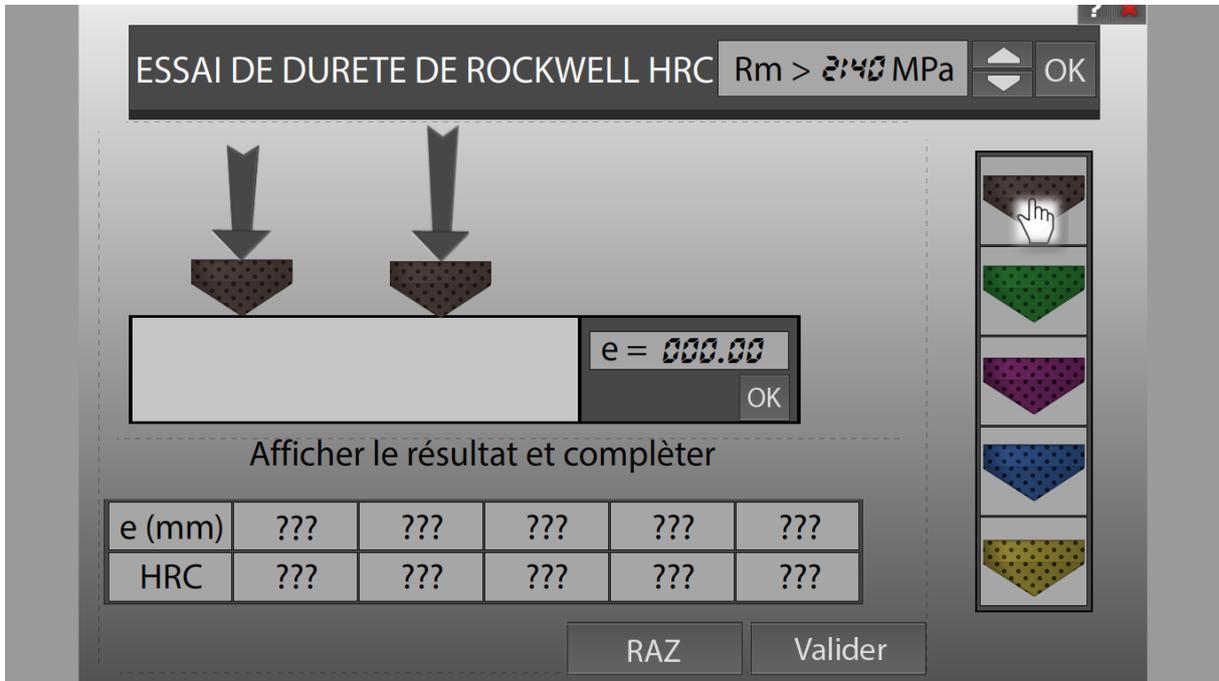
e (mm)	???	???	???	???	???
HRC	???	???	???	???	???

RAZ Valider

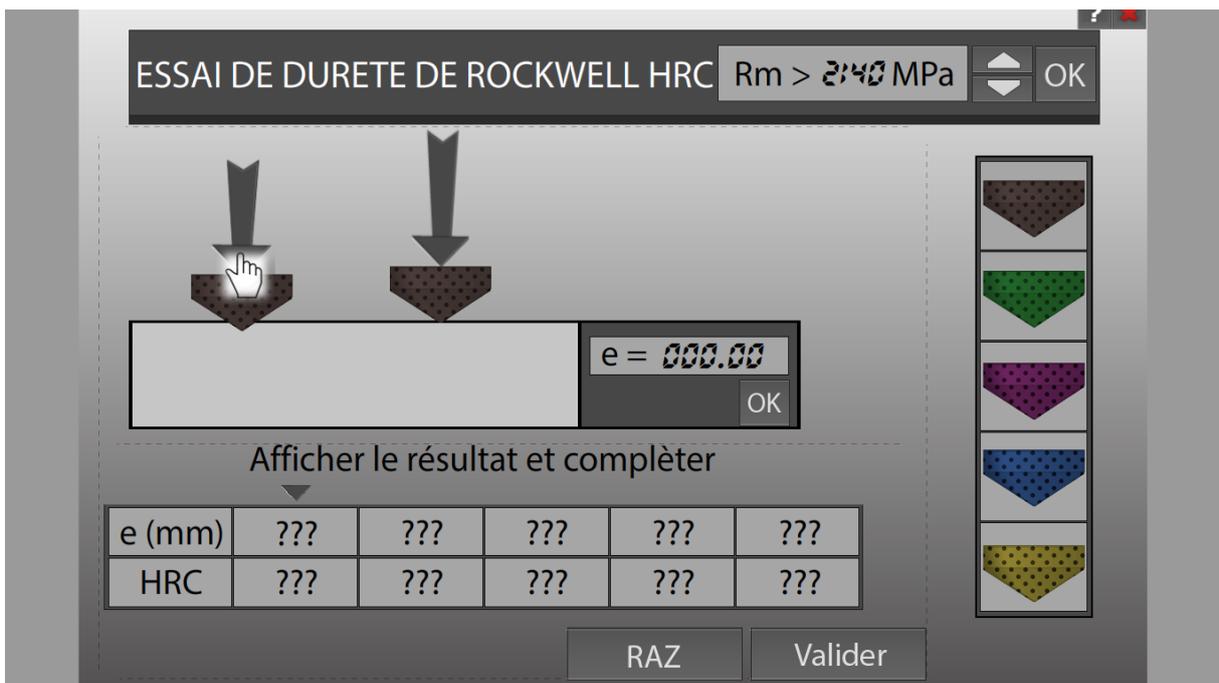
- Choix de la résistance de matériau Rm



- Insertion de materiaux



- Appuyer sur le premier pénétrateur



- Ensuite appuyer sur le second pénétrateur

ESSAI DE DURETE DE ROCKWELL HRC Rm > 2140 MPa OK

e = 000.00 OK

Afficher le résultat et compléter

e (mm)	???	???	???	???	???
HRC	???	???	???	???	???

RAZ Valider

ESSAI DE DURETE DE ROCKWELL HRC Rm > 2140 MPa OK

e = 99.860 OK

Afficher le résultat et compléter

e (mm)	???	???	???	???	???
HRC	???	???	???	???	???

RAZ Valider

- remplissage d'une case

ESSAI DE DURETE DE ROCKWELL HRC Rm > 2140 MPa OK

e = 99.868 OK

Afficher le résultat et compléter

e (mm)	99.968	???	???	???	???
HRC	66	???	???	???	???

RAZ Valider

- Même raisonnement pour le remplissage des autres cases

ESSAI DE DURETE DE ROCKWELL HRC Rm > 2140 MPa OK

e = 99.866 OK

Afficher le résultat et compléter

e (mm)	99.868	99.866	???	???	???
HRC	66	67	???	???	???

RAZ Valider

- remplissage des cases du tableau

ESSAI DE DURETE DE ROCKWELL HRC Rm > 2140 MPa OK

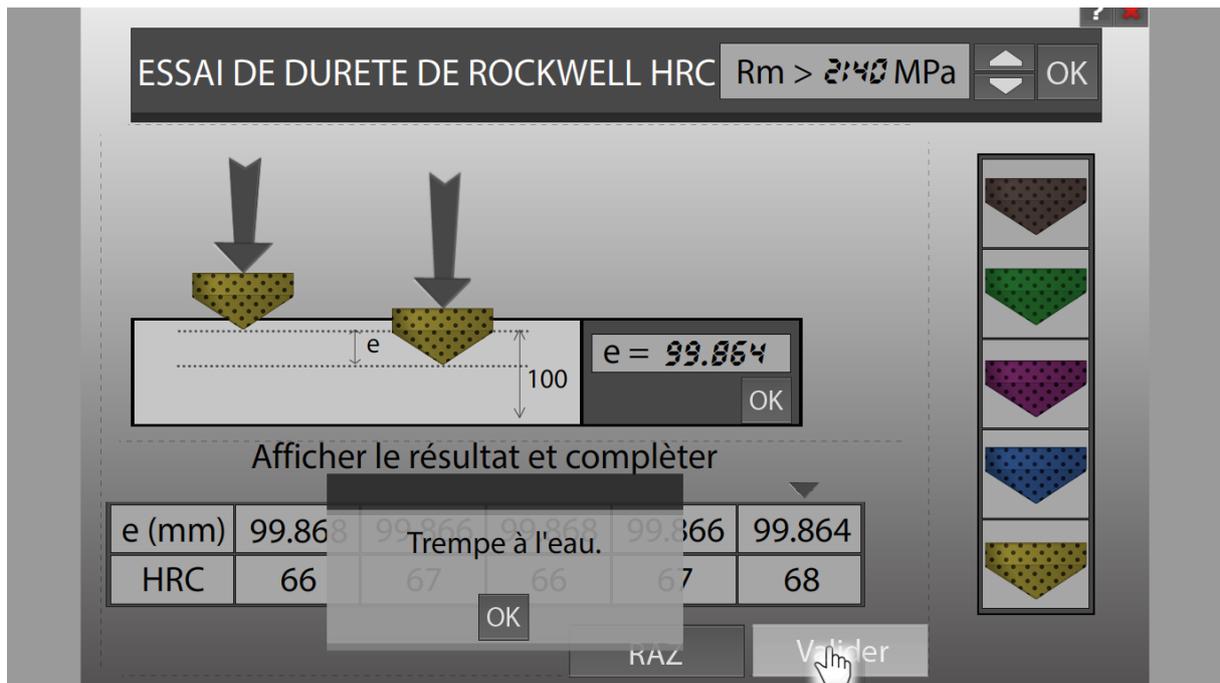
e = 99.864 OK

Afficher le résultat et compléter

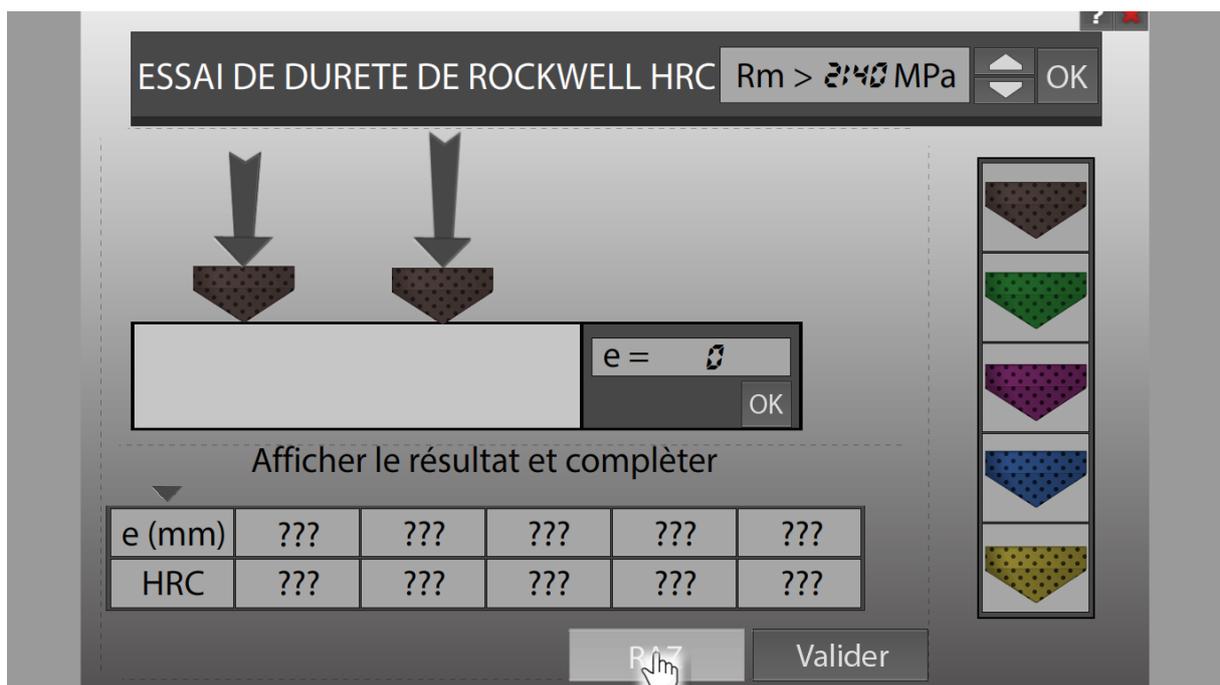
e (mm)	99.868	99.866	99.868	99.866	99.864
HRC	66	67	66	67	68

RAZ Valider

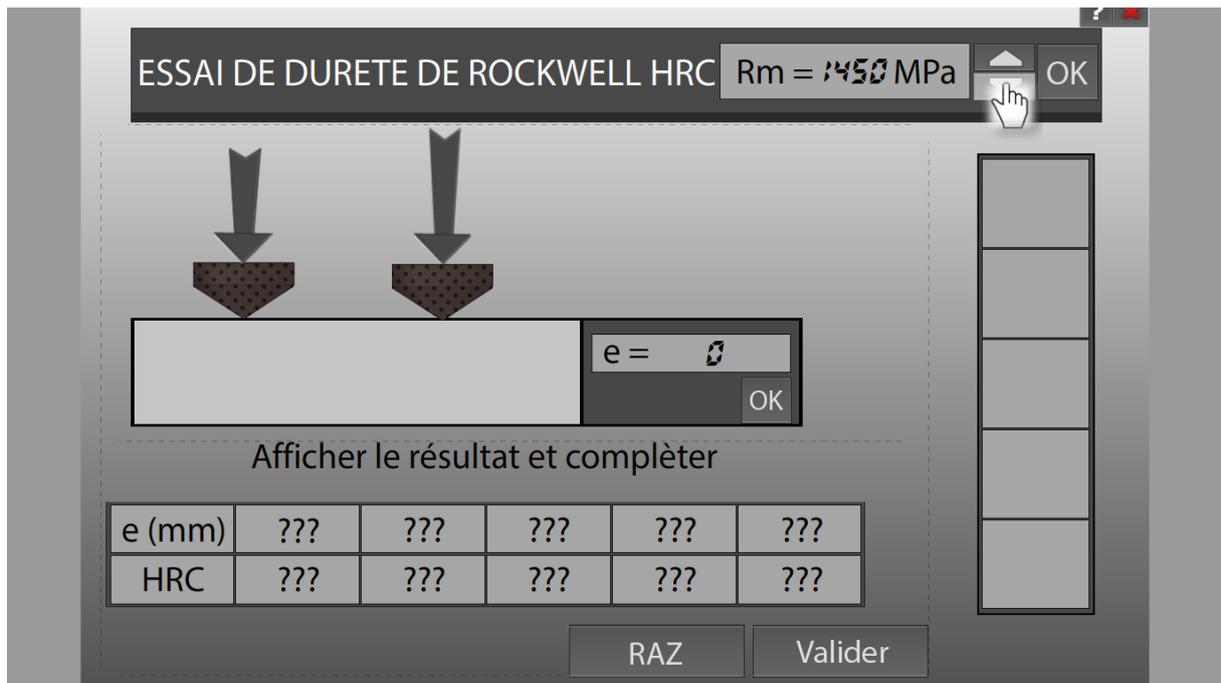
- Appuyer sur valider pour connaitre la nature de ce trempe



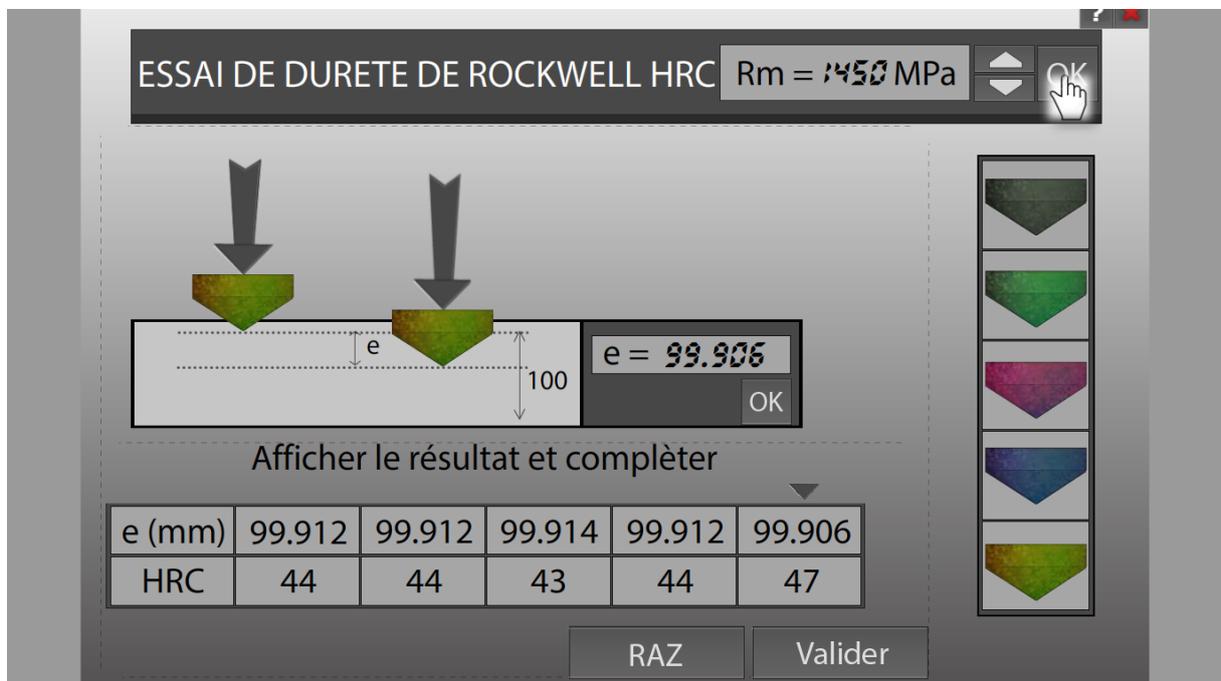
- Il faut remettre la valeur à zéro (RAZ) pour continuer aux autres résistances Rm (Rm=1450MPa)



- Choisir la résistance de matériau (Rm=1450MPa)



- Même démarche comme précédent



ESSAI DE DURETE DE ROCKWELL HRC Rm = 1450 MPa OK

e = 99.906 OK

Afficher le résultat et compléter

e (mm)	99.912	99.912	99.912	99.912	99.906
HRC	44	44	43	44	47

OK RAZ Valider

- ESSAI DE DURETE DE ROCKWELL HRB

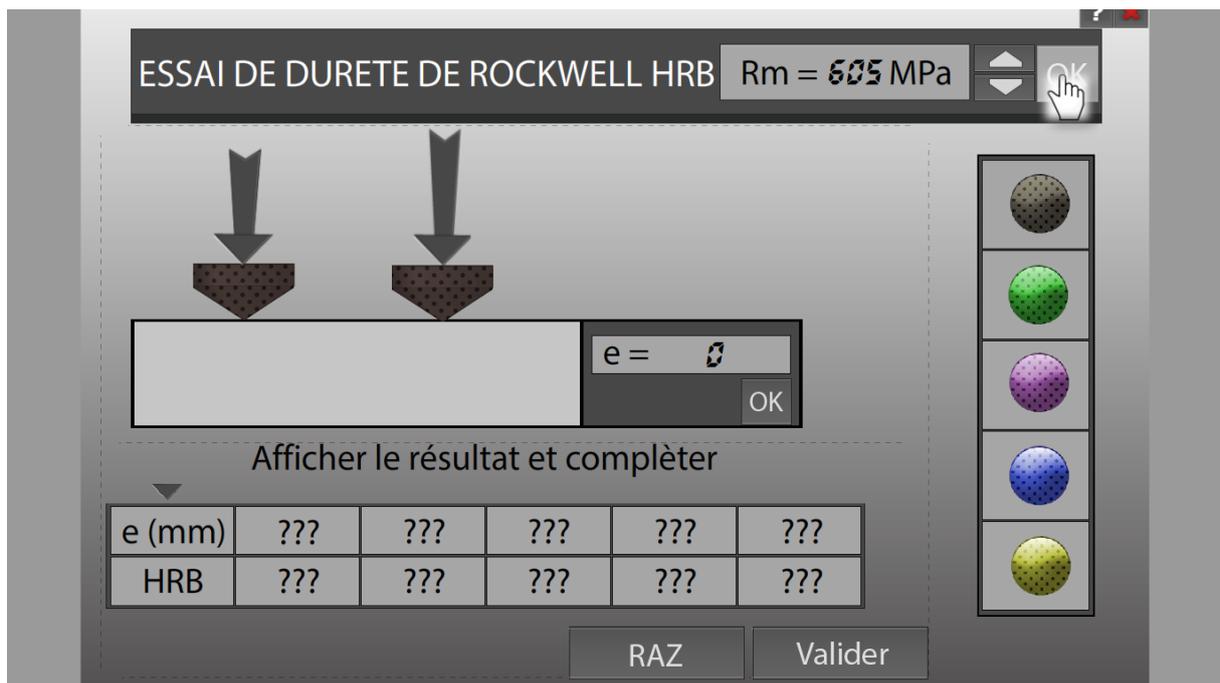
ESSAI DE DURETE DE ROCKWELL HRB Rm = 605 MPa OK

e = 0 OK

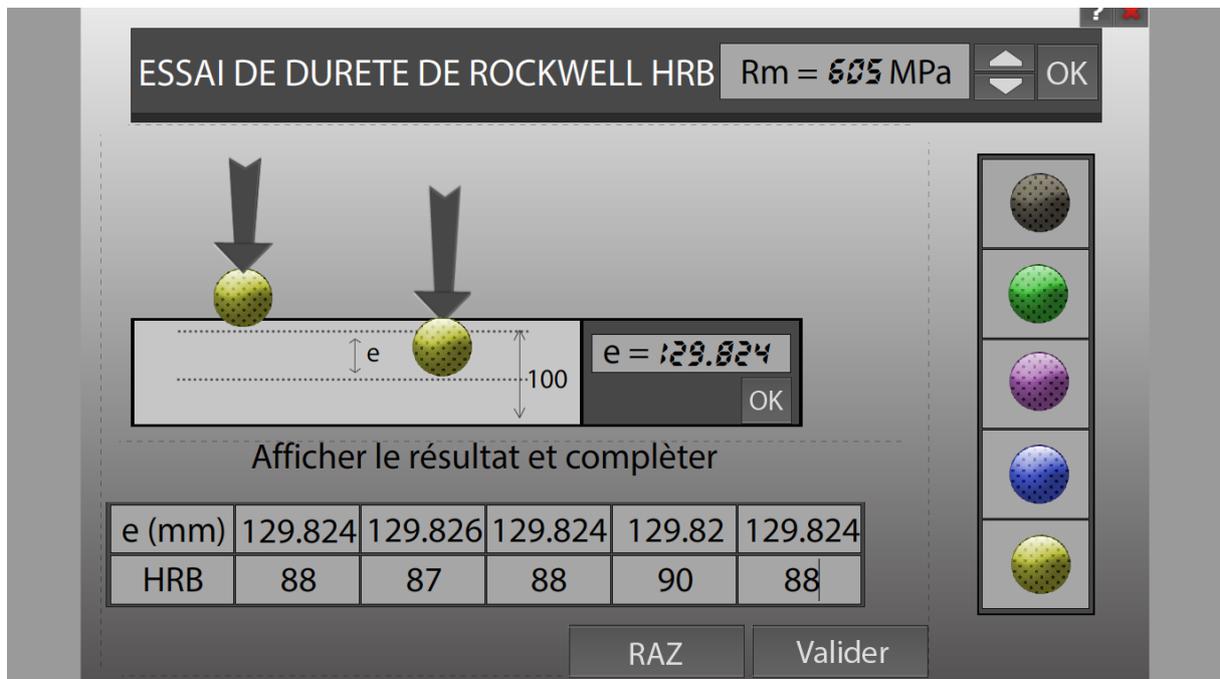
Afficher le résultat et compléter

e (mm)	???	???	???	???	???
HRB	???	???	???	???	???

RAZ Valider



- Complètement du tableau comme précédent



- Valider les résultats pour l'essai de dureté de Rockwell HRB

ESSAI DE DURETE DE ROCKWELL HRB Rm = 605 MPa OK

e = 129.824 OK

Afficher le résultat et compléter

e (mm)	129.824	129.826	130.834	129.82	129.824
HRB	88	87	88	90	88

OK RAZ Valider

Trempe à l'huile.

## CONCLUSION

Dans la vie courante, nous sommes entourés de divers objets en métal s'agissant de bijoux, de différents ustensiles ou simplement de blocs métalliques.

L'acier est un alliage de fer et de carbone, dans lequel la teneur en carbone varie normalement. Suivant les étapes de production, les atomes de carbone se logent dans les interstices plus ou moins larges du réseau cristallin du fer, ce qui provoque des décompositions plus ou moins homogènes de cette structure métallique.

Les aciers restent privilégiés dans presque tous les domaines d'application technique : équipements publics (rails, signalisation), bâtiment (armatures, charpentes, ferronnerie, quincaillerie), moyens de transport, composants mécaniques (visserie, ressorts, câbles, roulements, engrenages), outillage de frappe (marteaux, burins, matrices) et de coupe (fraises, forets, porte-plaquette). Les aciers sont aussi très présents dans des produits destinés au grand public (meubles, ustensiles de cuisine).

La trempe consiste à chauffer le métal à une température où le carbone se dissout dans la matière, puis, à refroidir rapidement pour garder cette structure à température ambiante. Tout le jeu de la trempe consiste à obtenir un mélange des deux types de cristaux dans le métal et de garder cette structure à température normale. Dans la pratique, les pièces sont jetées dans un bain d'huile ou bien d'eau. Il est également possible d'utiliser des solutions aqueuses de polymères pour le trempage.

Les études pratiques que nous avons menées montrent par le biais d'observations auprès de l'usine de fonderie de la Société MADARAIL les applications pratiques des études théoriques que nous avons effectuées. En effet, ces observations ont montré les conditions réelles du processus de fabrication d'une pièce en acier depuis le minerai de fer, la coke, jusqu'à l'obtention d'une pièce et le processus de trempe.

Dans le dernier chapitre de notre étude nous avons pu élaborer une fiche pédagogique pour l'introduction de la trempe d'acier. Il y a de nombreuses utilisations de l'acier trempé dans la vie quotidienne et le cours de la trempe d'acier montre, entre autre, les propriétés des pièces en acier.

Après l'enseignement théorique, les élèves, en classe de seconde, feront une application des connaissances acquises à travers le didacticiel élaboré. Une application réelle n'a pas pu être proposée du fait de la difficulté de réalisation tant sur l'existence de matériel au niveau des lycées que sur les conditions sécuritaires requises, lors de manipulation de matériels à très haute température. Une visite d'unité de fonderie industrielle comme le cas de MADARAIL, ou artisanale peut aider les élèves à assimiler les notions théoriques et susciter leur intérêt pour l'étude de la trempe de l'acier.

Ce mémoire est loin d'être parfait, les études pour l'introduction des différentes notions relatives aux alliages, dans les classes secondaires, pourraient être approfondies sur d'autres types de métaux ou avec d'autres méthodologies.

## BIBLIOGRAPHIE

- Fridolin, R. (1905). *Théorie et Pratique de la trempe de l'acier*. Paris (France) : Hatier
- Pariselle, H. (1956). *Cours de Chimie II Métaux. 120*, Boulevard Saint-Germain, Paris 6<sup>e</sup> (France) : Masson et C<sup>ie</sup>, Editeurs
- Gadeau, R. (1958). *L'aluminium*. Paris-V<sup>e</sup> (France) : Librairie Armand Colin
- Gadeau, R. (1959). *Métaux non ferreux*. Paris-V<sup>e</sup> (France) : Librairie Armand Colin
- Gadeau, R. (1960). *Métaux nouveaux et Métaux rares*. Paris-V<sup>e</sup> (France) : Librairie Armand Colin
- Andriamanantena, A. (1996). *Etude des Alliages binaires* (Mémoire du CAPEN, ENS, Université d'Antananarivo, Madagascar)
- Ratiarimananjatovo, N. (2014). *Détermination du taux d'aluminium et de fer dans quelques minéraux de Madagascar* (Mémoire du CAPEN, ENS, Université d'Antananarivo, Madagascar)

## WEBOGRAPHIE

- Charles Brico. (2006). *Trempe de l'acier*. Tirer dans <http://fabriquersoncout.11vm-serv.net/Trempe%20de%20l'acier.htm>, consulté le 3 juillet 2015
- Futura- Science. (2010). *La Fabrication de l'acier*. Tirer dans <http://www.futura-sciences.com/magazines/matiere/infos/gr/d/matiere-fabrication-acier-835/>, consulté le 3 juillet 2015
- Bricoleur du Dimanche. (2006). *L'acier*. Tirer dans <http://www.bricoleurdudimanche.com/fiches-materiaux/metaux/l-acier.html>, consulté le 14 juillet 2015
- Claude Divoux. (1999). *Alliages binaires*. Tirer dans [http://c.divoux.free.fr/phyapp/chimie/cours\\_alliages\\_binaires.pdf](http://c.divoux.free.fr/phyapp/chimie/cours_alliages_binaires.pdf), consulté le 16 juillet 2015
- Intelligence artificielle (IA) et les systèmes experts. (2006). *Diagramme de phase Cu-Zn*. Tirer dans <http://docinsa.insa-lyon.fr/these/2002/assouli/Annexe1.pdf>, consulté le 21 aout 2015
- Henri Poupee, (2015). *Architecture (Matériaux et techniques) - Fer et fonte*. Tirer dans <http://www.universalis.fr/encyclopedie/architecture-materiaux-et-techniques-fer-et-fonte/>, consulté le 29 aout 2015
-

Sami. (2012). *Cour sur les aciers*. Tirer dans <http://www.rocdacier.com/ressource.n.272/cours-sur-les-aciers-.html>, consulté le 31 aout 2015

CNUCED .(2009) .*Différentes types d'acier* .Tirer dans [http://www.unctad.info/en/Infocomm/Metals\\_Minerals/IronSteel/Secteurs-dutilisation/Les-differents-types-dacier-/](http://www.unctad.info/en/Infocomm/Metals_Minerals/IronSteel/Secteurs-dutilisation/Les-differents-types-dacier-/), consulté le 16 septembre 2015

[Rocdacier](http://www.rocdacier.com).(2010).*Essai de dureté - Brinell - Vickers –Rockwell*. Tirer dans <http://www.rocdacier.com>, consulté le 22 février 2016

GerardHeutte.(2006).*Livre pratique du forgeron*. Tirer dans <http://ftpforge.chez-alice.fr/LivrepratiqueduforgeroncoutelierparGerardHeutte.pdf> , consulté le 22 février 2016

Catherine Richard. (2010). *Essai des Matériaux*. Tirer dans <http://www.aitq.com/pdf/actes/2010/CatherineRichard.pdf>, consulté le 20 juillet 2015

Rocdacier.(2010).*Cour sur les alliages* <http://www.rocdacier.com/ressource.n.273/cours-sur-les-alliages-presentation-varietes-et-proprietes-.html>, consulté le 10 aout 2015

Michel Bramat.(2004).*Les fontes blanches*. Tirer dans [www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/techniques-du-batiment-connaître-les-matériaux-de-la-construction-43804210/les-fontes-tba1064/les-fontes-blanches-s/10062114.html](http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/techniques-du-batiment-connaître-les-matériaux-de-la-construction-43804210/les-fontes-tba1064/les-fontes-blanches-s/10062114.html), consulté le 21 novembre 2016



Auteur: ANDRIATSITOHAINA Tolojanahary Henintsoa

Adresse: Andrononobe, Ambohitrarahaba, Antananarivo

Téléphone: 033 75 623 95 ; 034 09 394 36

Nombres de pages: 67

Nombre de figures: 22

Directeur de mémoire: Dr RAJAOMANANA Hery

### RESUME

Ce mémoire a pour but d'insérer la notion de la trempe d'acier dans le programme de mécanique en classe de seconde.

Les études théoriques, ainsi que la visite de la société MADARAIL, présentées dans le mémoire, permettent d'avoir une meilleure connaissance des alliages, leurs propriétés ainsi que leur processus de fabrication.

Une Fiche pédagogique et une fiche de travaux pratiques, pour l'introduction des notions sur l'alliage et la trempe, ont été élaborées ainsi qu'un didacticiel conçu avec logiciel Macromédia flash 8.

Les résultats obtenus lors de l'élaboration de ce mémoire permettront aux élèves de définir la notion d'alliage, décrire les techniques qui permettent d'obtenir cet alliage ainsi que ses propriétés physiques.

Le mémoire peut être utilisé à profit par toutes personnes travaillant dans le domaine de la fonderie, leur permettant de mieux comprendre les techniques et processus de fabrication, les structures et les propriétés des alliages.

**Mot clé :** métallurgie, Fer-carbone, structure cristalline, cubique centré, cubique à face centré, acier, fonte, phase