

1ex
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : GENIE MECANIQUE

المدرسة الوطنية المتعمدة للتقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

ÉTUDE DE LA CEMENTATION

SOLIDE DES ACIERS

X C 10 & 12 N C 6

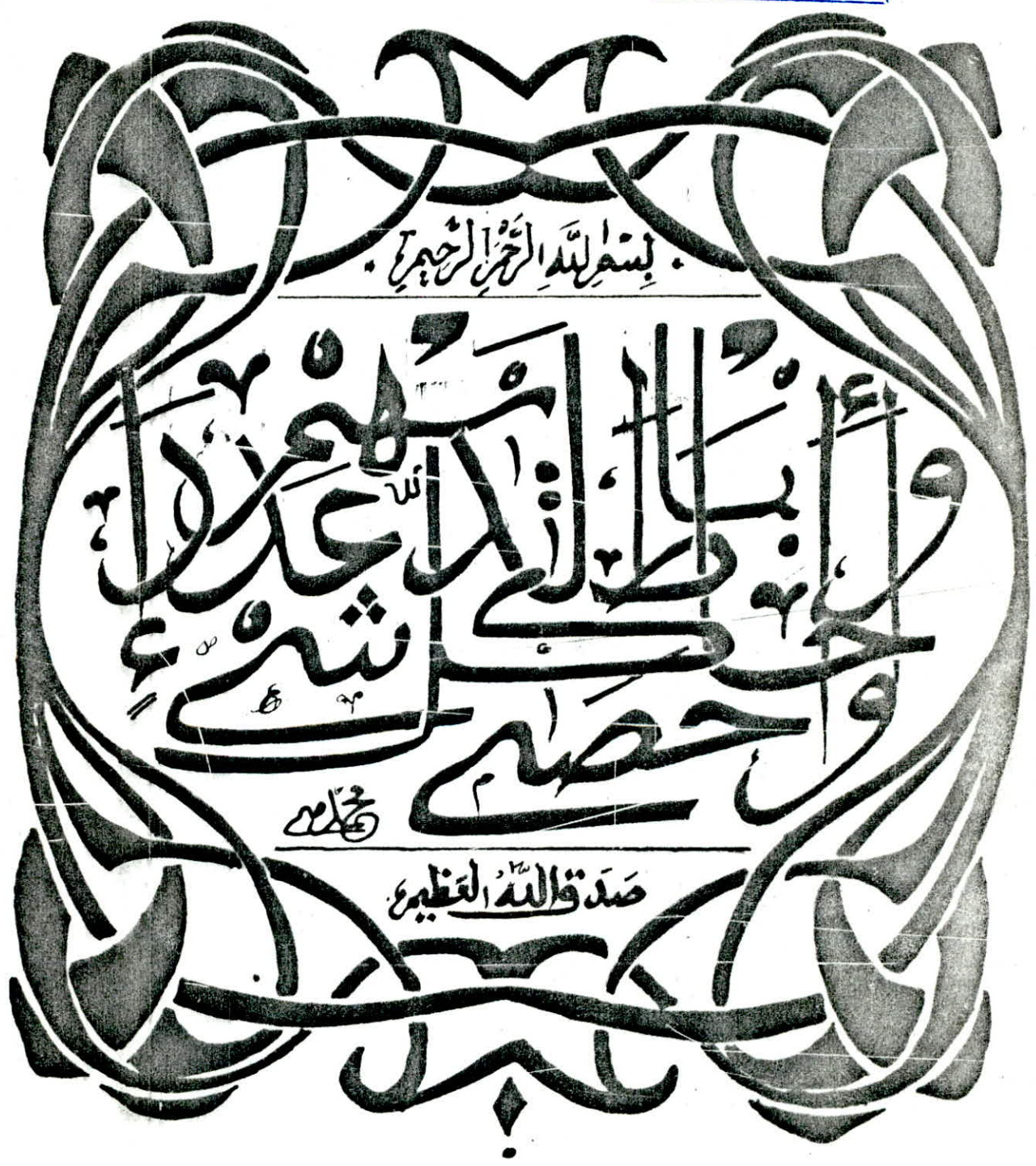
Proposé Par :
Mr. BELHADEF

Etudié par :
Mr. MOKRANI M. Z.

Dirigé par :
Mr. BELHADEF

PROMOTION : Janvier 88





MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique
المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات

وزارة التعليم العالي
المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات

Département de Génie mécanique

فرع : الهندسة الميكانيكية

Promoteur : M^r BELHADEF

الموجه : السيد بالهادف

Elève ingénieur : M^r MOKRANI M^{ed} Zahreddine

تلميذ مهندس : مقراني محمد زهر الدين

الموضوع : دراسة الكربنة الصلبة للفولاذ من طراز

XC 10 و 12NC 6

المخلص :

يتناول هذا الموضوع دراسة مدى تأثير كل من درجة حرارة الكربنة و زمن المكوث و تركيب مادة الكربنة الصلبة على سمك الطبقة المكرنة بالإضافة إلى تقدير تقريبي لمقدار الطاقة المنشطة للكربون.

Sujet : Etude de la cémentation solide des aciers


XC 10 et I2 NC 6

Résumé : Cette étude consiste à l'analyse du mécanisme de la cémentation solide et à la mise en évidence de l'évolution de l'épaisseur de la couche cémentée suivant les variations du temps de maintien, de la température de cémentation et de la composition du ciment, ainsi qu'à l'estimation de l'énergie d'activation du carbone.

Subject : Solid cementation study of

XC 10 and I2 NC 6 steels

Abstract: This work study the solid cementation mechanism of XC 10 and I2 NC 6 steels in order to analyse the evolution of cemented coat thickness in terms of the variation of cementation temperature, holding time and the composition of cement as well as to estimate the activation energy of carbon.



Je dédie ce modeste travail à :

ma mère et mon père qui sont
toujours présents dans mon cœur

mes frères et mes sœurs

ma tante Zohra et mon oncle Houssine

mes belles sœurs

mon beau frère Krimo

mes neveux et ma nièce

tous mes amis et toutes mes amies
et en particulier à ceux et
celles qui m'ont soutenu
dans les moments difficiles



Zahreddine



REMERCIEMENTS

Je remercie beaucoup mon promoteur et mon enseignant Mr I. BELHADEF pour m'avoir guidé et orienté non seulement pour la réalisation de ce projet mais durant ma formation, j'espère qu'il trouvera ici l'expression de ma profonde sympathie.

Je tiens à remercier Mr STRADOMSKI pour les précieux conseils qu'il n'a cessé de m'en faire profiter pour la réalisation de mon travail.

Je remercie tous les enseignants du département de GENIE MECANIQUE ainsi que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma formation.

Je remercie aussi :

- tout le personnel de l'atelier de mécanique pour leur aide et leur gentillesse et leur sympathie.

- Les officiers de l'E.N.I.T.A et en particulier à l'aspirant ZAHER;

- Au secrétariat du département et de la direction de l'école.

Enfin, mes remerciements à mes frères EL-HACHEMI ET NASSER pour leur soutien moral et matériel durant toute ma formation.

Elève ingénieur
MOKRANI Med Zahreddine

S O M M A I R E

Titre	Pages
INTRODUCTION	I
I - GENERALITES :	
I-1- Traitement superficiel.....	3
I-2- Diagramme fer-cémentite.....	3
I-3- Diffusion à l'état solide.....	6
I-4- La cémentation des aciers.....	7
II - LA CEMENTATION SOLIDE :	
2-1- Principe de la cémentation.....	10
2-2- Rôle du carbone.....	10
2-3- Cémentation par l'oxyde de carbone CO.....	11
2-4- Cément solide.....	12
III - PRATIQUE DE LA C/MENTATION :	
3-1- Caisses de cémentation.....	13
3-2- Influence de la température.....	13
3-3- Influence de l'acier.....	14
3-4- Traitements après cémentation.....	15
3-4-1- Traitements des aciers au carbone.....	15
3-4-2- Traitements des aciers spéciaux cémentés.....	17
3-5- Choix des aciers de cémentation.....	17
IV - CEMENTATION DE L'ACIER XC 10 :	
4-1- Acier extra-doux au carbone XC 10.....	19
4-2- Four de cémentation.....	19

4-3- Cémentation	19
4-4- Influence du temps	21
4-5- Influence de la température de cémentation	21
4-6- Influence du ciment	29
4-7- Energie d'activation	29

V - CEMENTATION DE L'ACIER I2 NC 6 :

5-1- Acier nickel-chrome doux I2NC6	32
5-2- Rôle du couple nickel-chrome	32
5-3- Cémentation	33
5-4- Influence du temps de maintien	33
5-5- Influence de la température de cémentation	33
5-6- Influence du ciment	37
5-7- Energie d'activation	37

CONCLUSION	40
------------------	----

ANNEXE

Proposition d'un travail pratique	43
---	----

BIBLIOGRAPHIE	
---------------------	--

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 4.1. : épaisseur de la couche cimentée (en mm) suivant différentes valeurs du temps de maintien pour différentes températures (XC10).....	27
Tableau 4.2 : Epaisseur de la couche cimentée suivant la composition du ciment (XC10)	30
Tableau 5.1 : Epaisseur de la couche cimentée suivant différentes valeurs du temps de maintien pour différentes températures (I2 NC 6)	35
Tableau 5.2 : Epaisseur de la couche cimentée suivant la composition du ciment (I2 NC 6)	38

TABLE DES FIGURES

Fig.I.1 : Diagramme Fe-Fe ₃ C.....	4
Fig.I.2 : Les trois zones de la couche cimentée.....	9
Fig.2 : Superposition de l'équilibre C-CO-CO ₂ et de l'équilibre de dissociation des carbonate alcalino-terreux.....	12
Fig.4.1 : Couche cimentée :défaut de cimentation.....	20
Fig.4.2 : Structure de la couche cimenté(XC IO).....	22
Fig.4.3 : Zone hypereutectoïde de la couche cimentée (XCIO).....	23
Fig.4.4 : Zone eutectoïde de la couche cimentée (XCIO).....	24
Fig.4.5 : Zone hypoeutectoïde de la couche cimentée(XCIO).....	25
Fig.4.6 : Structure au cœur de la pièce cimentée(XCIO).....	26
Fig.4.7 : Variation de l'épaisseur de la couche cimentée (XCIO) en fonction du temps de maintien et de la température.....	28
Fig.4.8 : Cinétique de la diffusion en coordonnées d'Arrhénius-(XCIO)...	31
Fig.5.1 : Structure de la couche cimentée (I2 NC 6).....	34
Fig.5.2 : Variation de l'épaisseur de la couche cimentée (I2NC6) en fonction du temps de maintien et de la température.....	36
Fig.5.3 : Cinétique de la diffusion en coordonnées d'Arrhénius (I2 NC 6).....	39

NOTATIONS ET SYMBOLES UTILISES

- : austénite, phase solide du diagramme Fe-Fe₃C.
- : Ferrite, phase solide du diagramme Fe-Fe₃C.
- Fe₃C : Cémentite.
- c : Concentration en carbone.
- t : temps.
- x : Epaisseur de la couche cémentée.
- D : Coefficient de diffusion.
- D₀ : Facteur de fréquence.
- Q : énergie d'activation.
- R : Constante des gaz (R = 1,987cal/mole.°K)
- T : température de cémentation.

INTRODUCTION



La métallurgie recouvre tout un ensemble de processus complexes qui, à partir du minerai, permettent d'atteindre le métal en tant que produit fini.

L'abondance des éléments métalliques a été déterminée à partir d'analyse d'échantillons de minerais prélevés sur toute la surface de la terre. On a pu ainsi établir une composition pondérale de la lithosphère, dont l'épaisseur est estimée à 60 km (CLARKE 1916 et GOLDSCHMIDT 1937) :

- Oxygène	47,5 %	- Calcium	3,5 %
- Silicium	28 %	- Sodium	2,5 %
- Aluminium	8 %	- Potassium	2,5 %
- Fer	5 %	- Magnésium	2 %

Ces 8 éléments totalisent 99 %, le dernier pourcent se répartit comme suit :

- H, Cl, P et Ti : teneurs supérieures à 0,1 % .
- C, N, F, S, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Ba, Zn, et Zr : teneurs comprises entre 0,1 et 0,01 % .

Tous les autres éléments ont des teneurs inférieures à 0,01 % .

L'extraordinaire évolution qu'a subie la métallurgie depuis le début de notre siècle n'a pas manqué d'attirer l'attention de tous ceux qui abordent cette question vitale de la mécanique.

Mais la sidérurgie ne s'est développée que très lentement au cours de son histoire et, bien que les origines en soient lointaines, cette industrie n'a évolué qu'au milieu de tâtonnements, d'erreurs et de conceptions étroites qui ont prévalu durant des siècles.

Actuellement, le nombre d'applications de l'acier est pratiquement illimité. L'essor de l'industrie métallurgique allant de pair avec le progrès de

la sidérurgie, il a fallu faire face à des exigences toujours plus grandes et plus précises : les aciers ordinaires ont été bientôt escortés sur le marché d'une quantité d'aciers spéciaux, destinés à des usages déterminés.

La construction mécanique est concernée par la métallurgie au niveau du choix des matériaux. Ce choix nécessite une connaissance de la structure et des propriétés des métaux et des alliages.

Notre travail consiste à mettre en évidence le mécanisme de la cémentation solide qui est l'un des traitements superficiels appliqués aux aciers ; nous étudierons l'influence de quelques facteurs sur ce procédé afin de connaître parfaitement les principaux éléments de mise au point et de réussite.

I - G E N E R A L I T E S

I - I - Traitement superficiel

Il serait évidemment souhaitable qu'un acier de construction présentât simultanément de hautes caractéristiques de résistance ($R, R_e, H...$) et de hautes caractéristiques de ductilité (A, K), mais ces exigences sont inconciliable avec un métal homogène, puisque, dans ce cas, ces caractéristiques varient en sens inverse.

Le problème posé peut être résolu en partant d'un métal apte à prendre une grande résilience auquel on fera subir un traitement de durcissement superficiel. Ainsi le métal, maintenant hétérogène, comprendra une âme résiliente et une couche superficielle présentant simultanément une grande dureté, une bonne résistance à l'usure et une meilleure résistance à la fatigue.

La cémentation est parmi les procédés qui donnent naissance à cette hétérogénéité par un double traitement successivement chimique (diffusion) puis thermique; le durcissement superficiel résultant est dû à la présence de constituants durs.

I - 2 - Diagramme fer - cémentite

Le diagramme labile fer-cémentite, qui décrit les structures des aciers normalisés et des fontes blanches, s'étend en composition depuis le fer pur jusqu'à la cémentite (Fe_3C) qui contient 6,67 % de carbone en poids.

On distingue, comme dans tout diagramme, les lignes de début de solidification (liquidus), les lignes de fin de solidification (solidus) et les lignes de transformation dans l'état solide; ces différentes lignes divisent le plan température-composition en un certain nombre de domaines à l'intérieur

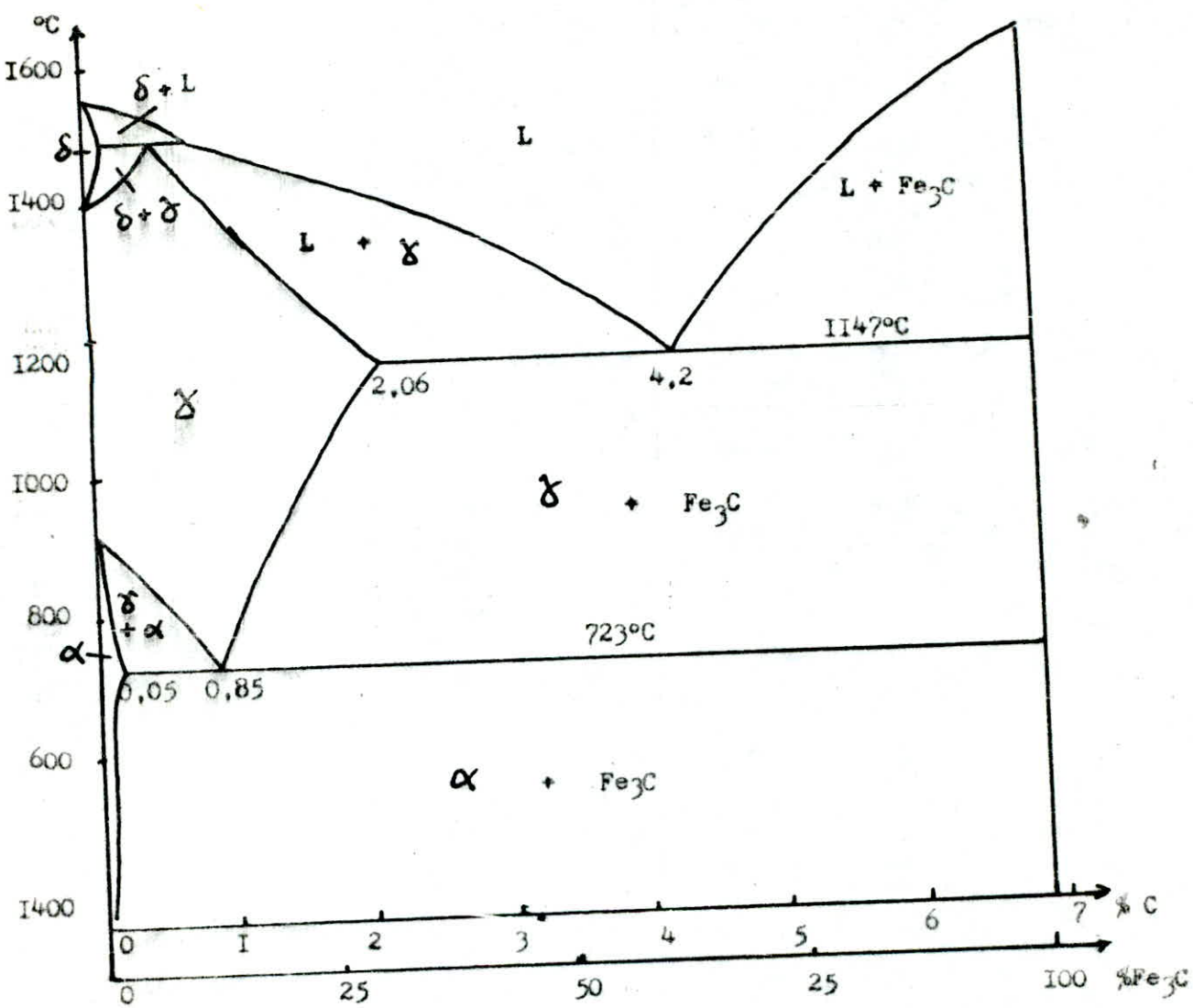


Fig.I.I : Diagramme labile Fe-Fe₃C

desquels sont stables à l'équilibre soit une seule phase, soit un mélange de deux phases; les domaines monophasés liquide (l), ferritique (α) et austénitique (γ) sont limités par des lignes dont aucune n'est horizontale; les domaines biphasés ont des contours qui peuvent comprendre une ou deux lignes horizontales. Les courbes limites de solubilité séparent les domaines monophasés des domaines biphasés. Les phases solides du diagramme labile sont : l'austénite (γ), la ferrite (α), et la cémentite (Fe_3C).

Le diagramme présente trois points invariants : un péritectique, un eutectique et un eutectoïde, ces deux derniers jouent un rôle important dans la structure des fontes et des aciers; le mélange eutectique est appelé lédéburite et l'eutectoïde perlite.

Si l'on augmente la teneur en carbone, la température de transformation s'abaisse jusqu'à ce que, pour une teneur de 0.85 % environ, la température de durcissement complet coïncide avec la température de durcissement initial. C'est cette composition qui porte le nom d'"eutectoïde", et pour laquelle l'acier recuit est constitué en totalité par de la perlite. À l'échauffement il y a passage à l'état de solution solide dans un intervalle de température à peu près nul. au refroidissement le phénomène se reproduit.

Les aciers au carbone dont la composition est inférieure à l'eutectoïde présentent une structure non durcie, qui contient une certaine proportion de ferrite, le reste étant constitué par de la perlite; à mesure que l'on s'éloigne de la composition eutectoïde, la proportion de ferrite augmente et toute la gamme des aciers dont la composition est inférieure à 0,85 % de carbone est désignée par le terme hypoeutectoïde.

Dans cette catégorie se classent donc également les nuances extra-douces qui en dessous de 0,2 % de carbone ne prennent pratiquement pas la trempe.

I - 3 - Diffusion à l'état solide

La diffusion est un déplacement aléatoire d'atomes ou d'ions dans le réseau cristallin, provoqué par l'agitation thermique, dont la longueur égale au moins à une distance interatomique, peut être relativement grande par rapport à cette distance.

La diffusion joue un rôle fondamental dans toutes les étapes de la préparation et de la transformation des métaux, qu'il y ait changement de phase ou non. C'est ainsi qu'elle intervient dans les traitements thermiques, à l'exception des transformations martensitiques.

Dans les alliages non chimiquement homogènes, la diffusion se manifeste à grande échelle par la disparition progressive des gradients de concentration; elle tend à homogénéiser la composition de l'alliage. Ce type de diffusion techniquement le plus important (traitement superficiel thermo-chimique des aciers; exemple : cémentation, nitruration) est dit diffusion chimique.

La cémentation fait intervenir volontairement les mécanismes de diffusion qui se produit grâce aux sauts successifs des atomes d'un site à un site libre voisin à travers le cristal. Dans les solutions solides d'insertion, on admet que l'ion soluté (de faible dimension) migre à travers les interstices du réseau.

L'énergie nécessaire pour vaincre la résistance du réseau doit dans tous les cas être fournie par l'agitation thermique.

L'équation de Fick pour la diffusion unidirectionnelle en considérant un cylindre d'axe Ox parallèle à la direction de la diffusion, de longueur dx et dont la section a une aire unité; en supposant D indépendant de c , donc de x , on arrive à :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

Dans le sens thermique, le coefficient de diffusion est régi par la loi exponentielle :

$$D = D_0 \exp(-Q/RT)$$

C.Wells et R.F.Mehl ont établi la formule linéaire suivante pour le coefficient de diffusion :

$$D = (0,007 + 0,006 c) \exp(-32000/RT) \quad (\text{cm}^2/\text{s})$$

Par une autre méthode expérimentale comportant la diffusion en régime permanent HARRIS est arrivé à la formule suivante :

$$D = (1 + 2,15 c) 0,7 \cdot 10^{-7} \quad (\text{cm}^2/\text{s})$$

valable pour la température de 927°C

I - 4 - La cémentation des aciers

La cémentation est un processus de saturation en carbone de la couche superficielle de l'acier. On distingue trois modes principaux de la cémentation : solide, liquide et gazeux.

La cémentation a donc pour but de carburer la surface d'un acier de faible teneur en carbone par l'action d'un gaz contenant du carbone (ex. CO, CH₄...) qui se combine avec le fer gamma de la pièce chauffée sous forme de carbure de fer - Fe₃C - que l'on durcit ensuite par trempe.

Le fer gamma est capable de tenir en solution jusqu'à 1,7 % de carbone. La teneur en carbone de la couche cémentée est normalement comprise entre 0,85 et 1,1 %. Pendant tout le temps que la température de l'acier demeure au dessus de l'intervalle critique de transformation, ce carbone est maintenu en solution solide.

Il suffit donc de chauffer la pièce à cémenter en présence du corps ca-

peut se dégager abondamment de carbone : ce corps est appelé cément.

La cémentation est réalisée généralement aux températures supérieures au point A_{c3} , qui rendent stable l'austénite, dissolvant en quantité le carbone. La diffusion du carbone dans l'acier n'est possible que lorsque le carbone se trouve à l'état atomique; ce carbone atomique absorbé par la surface de l'acier diffuse vers l'intérieur du métal avec une énergie d'activation qui atteint 31 à 32 kcal/g.atome.

Un refroidissement lent de la pièce cémentée produit trois zones dans la structure de la couche cémentée :

1° Hypereutectoïde constituée de perlite et de cémentite secondaire formant un réseau suivant l'ancien grain d'austénite (fig.I.2 a).

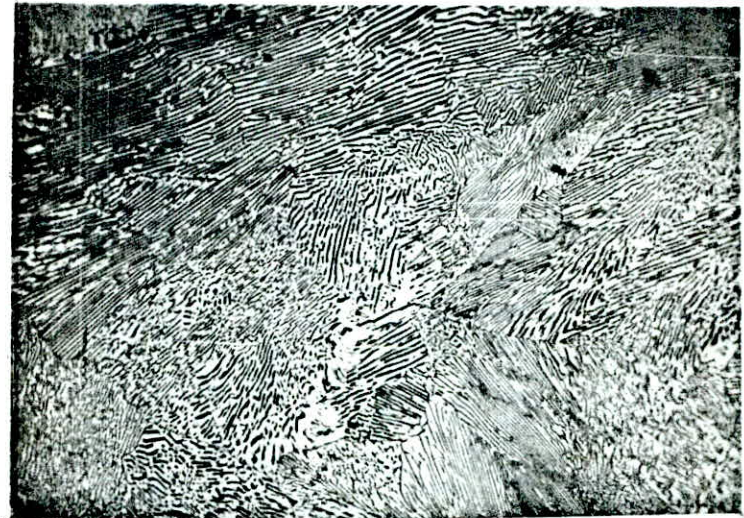
2° Eutectoïde composée de perlite lamellaire (fig.I.2 b).

3° Hypoeutectoïde constituée de perlite et de ferrite (fig.I.2 c). la quantité de ferrite dans cette zone augmente sans cesse à mesure qu'on s'approche du cœur.

a)



b)



c)



fig.I.2: Les trois zones de la couche cimentée (x1200)

II - LA CEMENTATION SOLIDE

2 - I - Principe de la cémentation

La cémentation usuelle effectuée sur pièce à sa forme définitive est une opération métallurgique qui comprend essentiellement l'enrichissement des couches superficielles en carbone dans le but d'améliorer les propriétés d'usage de la pièce par durcissement superficiel; sous sa forme la plus générale ce traitement thermochimique comprend les trois fonctions distinctes suivantes :

- 1°- Réaction chimique à haute température du milieu ambiant sur la surface de la pièce avec fixation du carbone.
- 2°- Simultanément diffusion du carbone dans les couches superficielle de l'acier qui est à l'état austénitique.
- 3°- Traitement thermique consécutif ayant pour objet, par le mécanisme de la trempe, de durcir les couches cémentées.

On conçoit que la diffusion du carbone soit relativement facile, puisque c'est un élément d'insertion.

Le mécanisme de la cémentation, mal connu, dépend du ciment utilisé.

2 - 2 - Rôle du carbone

L'élément d'apport destiné à diffuser dans les couches superficielles de l'acier pour en modifier convenablement les propriétés d'usage doit satisfaire un certain nombre de conditions auxquelles le carbone répond en totalité et qui se résument en :

- a) L'élément doit former avec le fer γ une solution étendue de cristaux mixte d'insertion susceptible par trempe de donner de la martensite.
- b) Cette martensite étant de structure très fragile, un revenu à tempé-

rature modérée 150 à 180°C doit ramener le fer à l'état cubique avec précipitation ultra fine d'une combinaison dure du fer et de l'élément d'addition.

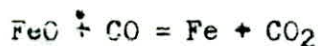
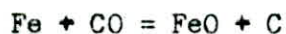
c) L'élément doit avoir une très grande vitesse de diffusion dans la phase gamma d'où élément léger et petit s'insérant dans le réseau cubique à faces centrées et à bonne solubilité dans les cristaux mixtes gamma.

d) Cet élément doit pouvoir être apporté dans les couches superficielles par réaction de composés gazeux pour assurer une action régulière sur la totalité de la surface.

2 - 3 - Cémentation par l'oxyde de carbone CO

En 1901 G. CHARPY a montré que CO donne une cémentation douce de l'acier limitée par l'équilibre réversible, puis en 1909 il a prouvé la nécessité d'une vitesse de circulation gazeuse suffisante à la surface des pièces pour obtenir cette carburation qui avait été mise en doute, l'expérience montre en effet que le gaz carbonique qui se forme à la surface, s'y accumule parce qu'il diffuse mal et limite l'équilibre à une valeur beaucoup plus faible que ne le voudrait la composition moyenne de l'atmosphère.

De plus la réaction : $2 \text{CO} = \text{CO}_2 + \text{C}$ est paresseuse puisque sa probabilité est faible; elle nécessite en effet que deux molécules d'oxyde de carbone viennent simultanément au même point frapper la surface du réseau à moins qu'on la considère comme la résultante de deux réactions successives:



ce qui trouverait sa justification dans l'analogie suivante :

Les métaux Mn et Cr s'oxydent pendant la cémentation de l'acier comme CHARPY l'a mis en évidence.

2 - 4 - Cément solide

Le cément solide est essentiellement constitué de carbone amorphe sous une forme réactive telle que le charbon de bois; il est employé sous forme pulvérisé ou granulé, il est additionné de produits adjuvants dont en particulier, le carbonate de baryum.

On peut porter sur un même diagramme la courbe de dissociation du carbonate alcalino-terreux $\text{BaCO}_3 = \text{BaO} + \text{CO}_2$ et la courbe d'équilibre du carbone et de ses oxydes $\text{CO}_2 + \text{C} = 2 \text{CO}$ (fig.2).

Sur le diagramme de la fig.2, on observe qu'à température inférieure au point d'équilibre E, la pression partielle de CO_2 provenant de l'oxydation du carbone est plus élevée que celle de dissociation du carbonate alcalino-terreux, celui-ci reste inaltéré; dès que la température dépasse le point E on a la dissociation totale du carbonate, puisque sa pression partielle de dissociation est supérieure à la pression partielle du CO_2 dans l'équilibre avec le carbone.

Au chauffage, le point E peut être abaissé par la dilution de CO et CO_2 par l'azote atmosphérique, de sorte que cette réaction de dissociation du carbonate se produit vers 800 à 850°C. Ce dégagement de gaz au sein du cément entraîne un balayage de l'atmosphère préexistante et la dilution de CO par l'azote diminue, condition favorable à la carburation.

Généralement, le cément solide se compose de charbon de bois, de 25 à 40 pourcent du poids du charbon de BaCO_3 et de 3,5 à 5 % de CaCO_3 que l'on ajoute pour prévenir le frittage.

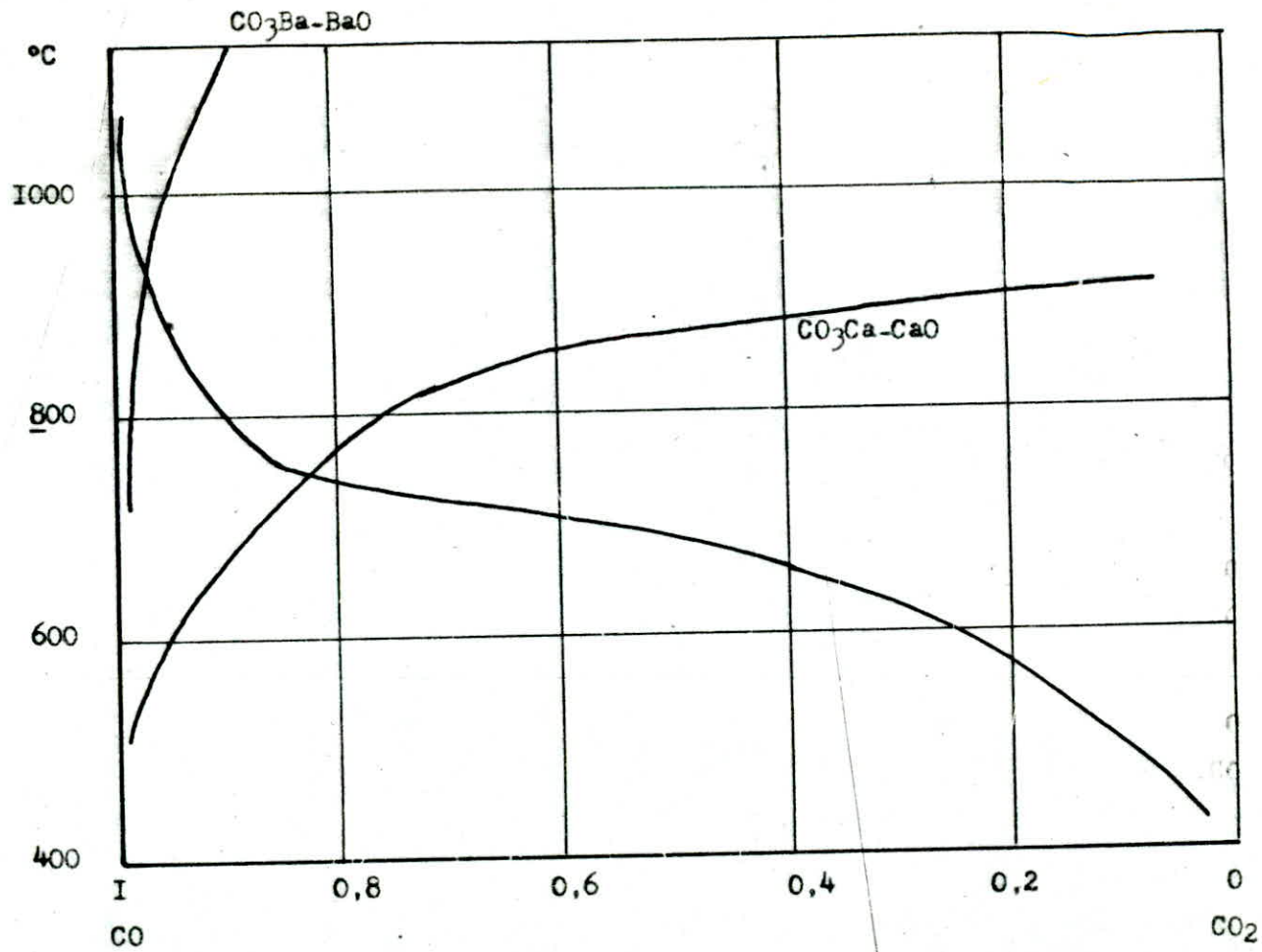


fig 2 : Superposition de l'équilibre C-CO-CO₂ et de l'équilibre de dissociation des carbonates alcalino-terreux.

3 - P R A T I Q U E D E L A C E M E N T A T I O N

3 - 1 - Caisses de cémentation

Le type de récipient employé pour la cémentation et la façon dont les pièces sont disposées dans le ciment à l'intérieur de la caisse sont à considérer.

L'idéal est de pouvoir utiliser des caisses calorisées ou en métal spécial inoxydable à chaud, ne produisant pas de calamine et n'absorbant pas ou très peu de carbone.

Les dimensions des caisses doivent être en rapport avec l'importance des pièces à cémenter, en prévoyant un vide suffisant pour tasser le ciment nécessaire.

Pour régulariser la chauffe des caisses de cémentation, il y a intérêt à les munir de pieds, permettant aux gaz de circuler et de chauffer par-dessous.

Il faut éviter d'employer des caisses fissurées, pour empêcher les gaz de s'échapper. Les fissures peuvent amener l'introduction d'oxygène dans les caisses de cémentation.

3 - 2 - Influence de la température

La cémentation est réalisée généralement aux températures supérieures au point A_{c3} , qui rendent stable l'austénite, dissolvant en quantité le carbone.

Un principe important doit être considéré : la température de cémentation doit être maintenue la plus constante possible. Elle peut varier entre 850 et 1000°C suivant la nature de l'acier.

Il faut tenir compte que les pièces longues et mal soutenues se déforment d'autant plus au chauffage que la température est plus élevée. Ainsi il est recommandé de maintenir comme limite, pour tous les aciers de cémentation, les

températures de 875 à 930°C, et cela dans un triple but :

- 1° Eviter l'appauvrissement trop rapide du ciment;
- 2° faciliter la régénération, en évitant un séjour à température élevée;
- 3° Diminuer les risques de déformation des pièces.

Il faut noter aussi qu'il est indispensable de maintenir un chauffage régulier en tout point de la chambre.

3 -3 - Influence de l'acier

Il faut considérer avant tout l'influence de la composition chimique et de l'homogénéité du métal. Ce facteur agit sur la vitesse de pénétration du carbone.

Cette influence est prépondérante et s'exerce sur trois facteurs importants :

- 1° Vitesse de pénétration du carbone;
- 2° Dureté de la surface carburée;
- 3° Résistance interne du métal non cémenté.

Certains éléments d'alliage agissent d'une façon sensible sur la vitesse de pénétration du carbone au cours de l'opération de cémentation. Il est donc de première importance de connaître la nature exacte de l'acier employé et cela non seulement en fonction de l'épaisseur carburée à atteindre, mais aussi suivant l'usage des pièces.

A épaisseur égale, la zone carburée effective, c'est à dire hypereutectoïde, peut dans certaines conditions défectueuses de cémentation, être toute superficielle, donc de mauvaise qualité.

Il faut aussi signaler qu'il y a toujours intérêt à chauffer plus modérément les aciers spéciaux de cémentation que les aciers au carbone, soit de 875 à 900°C.

3 - 4 - Traitements après cémentation

Le traitement des aciers après cémentation se différencie des autres classes d'acier, dans ce sens qu'il faut tenir compte que l'opération de cémentation est pour toute la pièce un chauffage prolongé à haute température; or, une telle opération est préjudiciable au métal, en raison de la cristallisation grossière qu'elle développe.

Il faut aussi toujours se rappeler qu'une pièce cémentée est composée de deux aciers au carbone très différents :

- 1° L'âme de la pièce demeure de l'acier extra-doux;
- 2° La couche cémentée est un acier très carburé.

C'est ce qui nécessite un traitement thermique particulier des aciers cémentés et qui tiendra compte de cette hétérogénéité.

3-4-I- Traitement des aciers au carbone

Trempe directe : cette opération consiste à tremper les pièces directement en sortant de cémentation. On laisse refroidir un moment dans la caisse pour éviter l'oxydation et de façon à effectuer la trempe entre 820 et 850°C.

Une telle opération est mauvaise et ne peut convenir que très rarement pour des pièces sur lesquelles on ne vise qu'une grande résistance à l'usure et qui ne risquent pas de rupture ni d'écaillage.

Un acier cémenté, ainsi traité, présente une texture où il n'y a pas de régénération ni de la partie cémentée ni du noyau extra-doux, l'adhérence de ces deux parties l'une sur l'autre est mauvaise du fait que la transition entre elles est trop brusque.

Nous remarquons que cette opération est rapide et qu'elle produit une bonne dureté superficielle, mais il est préférable de laisser refroidir la

pièce dans la caisse de cémentation et la réchauffer ensuite pour les traitements de régénération et de durcissement, lorsque il s'agit de pièces de sécurité.

la texture présente alors entre la couche cimentée et l'âme une zone dégradée, passant insensiblement par toutes les teneurs en carbone.

Double trempe: Généralement, après refroidissement dans la caisse de cémentation, la pièce subit une double trempe; ce double traitement est nécessaire parce que la pièce est en somme constituée de deux aciers superposés: âme en acier extra-doux et couche extérieure en acier dur.

a) Trempe de régénération de l'âme.- Le métal ayant été chauffé longtemps vers 930°C est à gros grains, donc fragile; on le soumet à un recuit de régénération (chauffage rapide aux environs de $A_3 + 50$) suivi généralement d'une trempe à l'eau.

b) Trempe de durcissement de la couche cimentée.- L'opération précédente a eu pour but de tremper convenablement l'intérieur du métal qui est pauvre en carbone. Le point A_3 relatif à la couche cimentée est à environ 725°C ; la trempe à 925°C conduit donc à un métal hypertrempe; de plus cette couche a été surchauffée, et sa structure est grossière. Une trempe à l'eau à 800°C améliore la couche cimentée; le chauffage avant trempe provoque un léger revenu à l'intérieur; l'acier possède ainsi une grande dureté superficielle et l'âme conserve une résilience élevée.

On ne pratique généralement pas de revenu ultérieur, sauf parfois à basse température pour diminuer les contraintes résiduelles propres.

Tel est le principe de la double trempe qui est en réalité une régénération, suivie d'une trempe de durcissement de la couche cimentée.

Ce traitement est le meilleur et on l'applique avantageusement à toutes pièces de sécurité.

3-4-2- Traitement des aciers spéciaux cémentés

Les pièces en aciers spéciaux cémentés (généralement nickel-chrome doux ou chrome-molybdène) ont une résistance plus élevée que les pièces en acier ordinaire au carbone pour cémentation.

Le traitement thermique consiste généralement en une seule trempe à l'huile, vers 750°C. La trempe unique est possible parce que les points supérieurs de transformation de l'intérieur et de la zone carburée sont plus rapprochés; en effet, la teneur en carbone de la perlite est abaissée et la couche externe correspond à un acier nettement hypereutectoïde. La trempe unique donne la constitution convenable à la couche cémentée et entraîne une transformation bainitique pour le cœur.

3 - 5 - Choix des aciers de cémentation

Toute pièce mécanique subit en service un ensemble de contraintes statiques et dynamiques dont les plus simples sont :

La traction, la compression, la flexion et la torsion.

Pour répondre à cette situation, la pièce mécanique doit posséder des propriétés adaptées aux conditions d'usage, par exemple : haute limite d'élasticité ou grande dureté, ou bien encore endurance à la fatigue élevée.

Ces caractéristiques mécaniques particulières sont obtenues par :

- Les propriétés de l'acier choisi;
- Le ou les traitements thermiques qui permettent de créer dans l'acier considéré les structures métallurgiques propices.

Les aciers à utiliser en construction mécanique sont répartis en deux normes principales :

- La norme A 35-551.
- La norme A 35-552.

et des normes affiliées ou complémentaires.

La norme A 35-55I concerne les aciers qui sont actuellement au nombre de 15 répartis en six familles et sont destinés à être cémentés :

- Aciers au carbone : XC 10 , XC 12 , XC 18.
- Aciers au manganèse-chrome : 16 MC 5 , 20 MC 5.
- Aciers au chrome-molybdène : 18 CD 4.
- Aciers au nickel-chrome : 10 NC 6 , 12 NC 6 , 16 NC 6 , 20 NC 6 ,
- Aciers au nickel-chrome-molybdène : 20 NCD 2 , 18 NCD 6.
- Aciers au bore, manganèse-bore, nickel-chrome-molybdène-bore :
21 B 3 , 20 MB 5 , 19 NCDB 2.

4 - CEMENTATION DE L'ACIER XC 10

4 - I - Acier extra-doux au carbone XC 10

Cet acier est surtout destiné à la cémentation et employé pour pièces soumises à une grande usure, mais non à de gros efforts de fatigue.

Sa composition chimique moyenne est :

Carbone.....	0,06 à 0,15 %
Manganèse.....	0,40 à 0,60 %
Silicium.....	< 0,30 %
Soufre.....	< 0,04 %
Phosphore.....	< 0,04 %

4 - Four de cémentation

La cémentation a été réalisée dans un four électrique à température réglable et maintenue constante grâce à une commande électrique liée à un thermo-couple donnant les valeurs de la température sur un cadran gradué en degrés celsius.

Les résistances chauffantes du four sont disposées suivant un montage en étoile, c'est un four triphasé 380 volts - 38 ampères.

4 - 3 - Cémentation

La cémentation a été effectuée dans des caisses en acier inoxydable posés dans le four sur des appuis permettant la circulation de l'air chaud en dessous des caisses.

Le ciment est composé de charbon de bois granulé, les dimensions des grains varient entre 3 et 10 millimètres; ce ciment est additionné de 30 % en masse de carbonate de baryum ($BaCO_3$) qui a pour rôle de compenser les fuites de gaz.

4 - 4 - Influence du temps

Le temps de maintien en température de cémentation est l'un des facteurs les plus importants de la cémentation; l'expérience montre que l'épaisseur de la couche cémentée est très influencée par ce facteur.

En effet, nous constatons qu'à mesure que le temps augmente la couche cémentée augmente en épaisseur.

Pour des temps de maintien différents en une même température, nous obtenons des épaisseurs différentes; la (fig.4-2) nous montre la structure de la couche cémentée obtenue pour la température de cémentation de 930°C et pour un temps de maintien de 3 heures (fig.4-2 a) où on obtient une couche à peine carburée, irrégulière et de très faible épaisseur; par contre pour un temps de maintien de 8 heures (fig.4-2 b) nous remarquons aisément une belle couche carburée où nous pouvons distinguer les différentes zones :

- La zone hypereutectoïde (fig.4-3), constituée de perlite et de cémentite secondaire formant un réseau suivant l'ancien grain d'austénite.
- La zone eutectoïde (fig.4-4) composée de perlite lamellaire.
- La zone hypoeutectoïde (fig.4-5) constituée de perlite et de ferrite.

La quantité de ferrite dans cette dernière zone ne cesse d'augmenter à mesure qu'on s'approche du cœur (fig.4-6).

Le tableau 4-I donne les résultats obtenus pour différents temps de maintien et températures.

La (fig.4-7) matérialise l'évolution de l'épaisseur en fonction du temps et de la température.

4 - 5 - influence de la température de cémentation

La température de cémentation est un autre facteur très important aussi

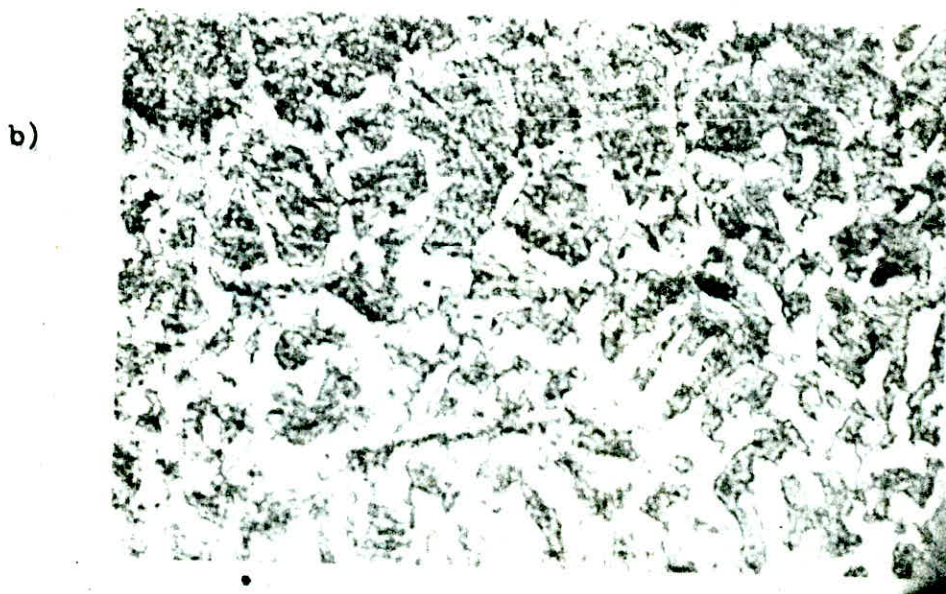
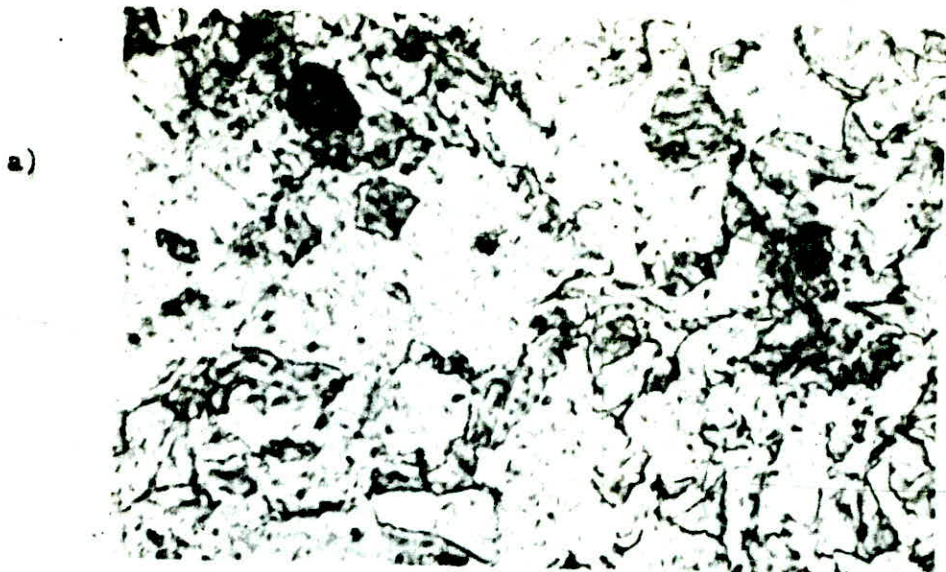


fig.4-2 : a) structure de la couche cimentée pour l'acier XC 10
($t = 3^h$, $T = 930^{\circ}\text{C}$, $\times 500$)
b) couche cimentée pour le même acier
($t = 8^h$, $T = 930^{\circ}\text{C}$, $\times 1100$)

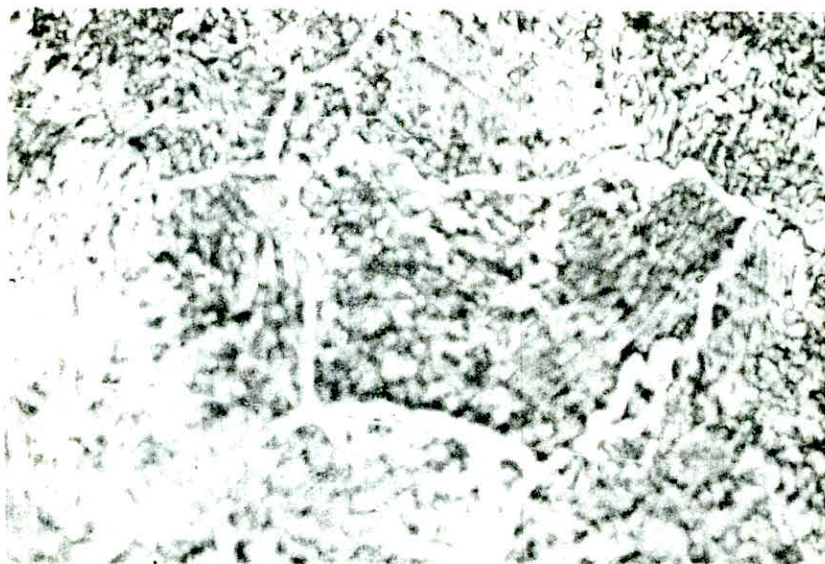


fig.4-3 : Zone hypereutectoïde de la couche
cémentée (acier XC 10 , x 500)

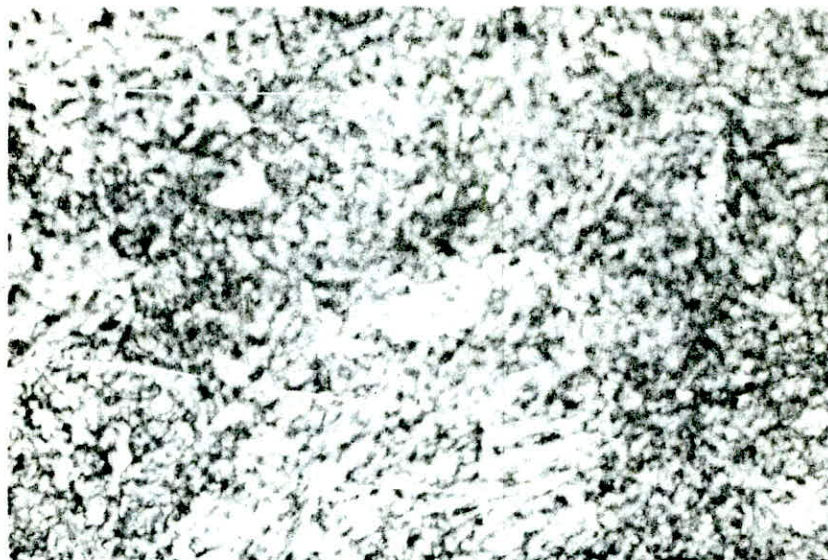


fig.4-4 : Zone eutectoïde de la couche cémentée
(acier XC 10 , x 500)

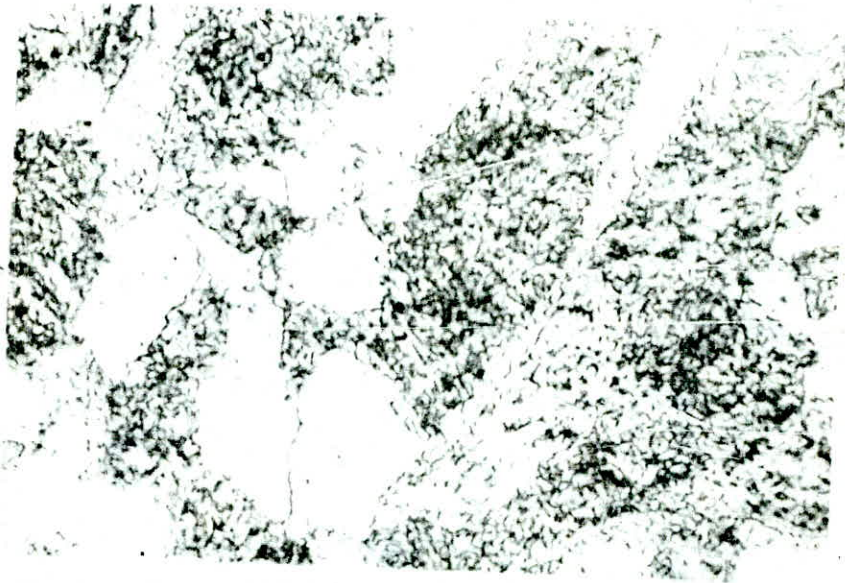


fig.4-5 : Zone hypoeutectoïde de la couche cémentée
(acier XC 10 , x 500)

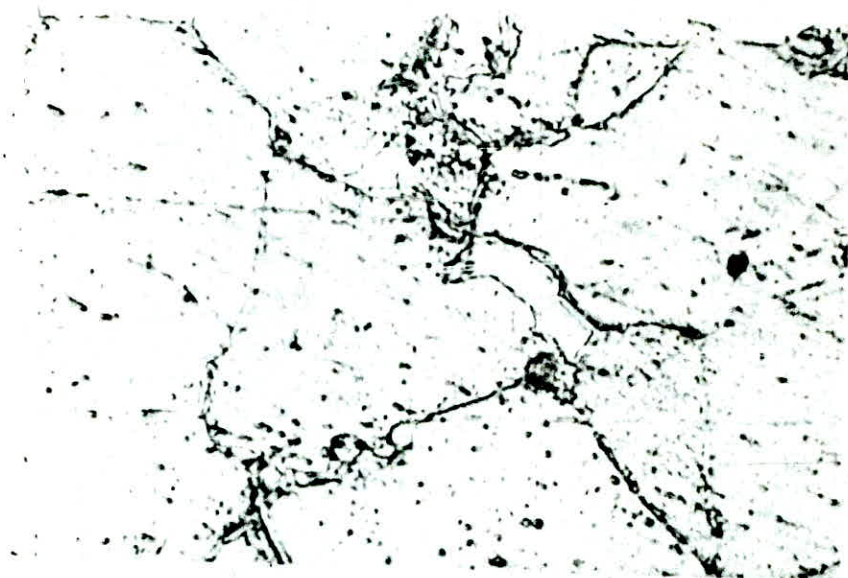


fig.4-6 : structure au cœur de la pièce cémentée.
(acier XC 10 , x 500)

T(°C) \ t (h)	3	6	8
800	0,254	0,462	0,527
900	0,532	0,764	0,896
930	0,867	1,387	1,695

Tableau 4-I : épaisseur de la couche cémentée en millimètre suivant différents temps de maintien pour différentes températures de cémentation (acier XC 10).

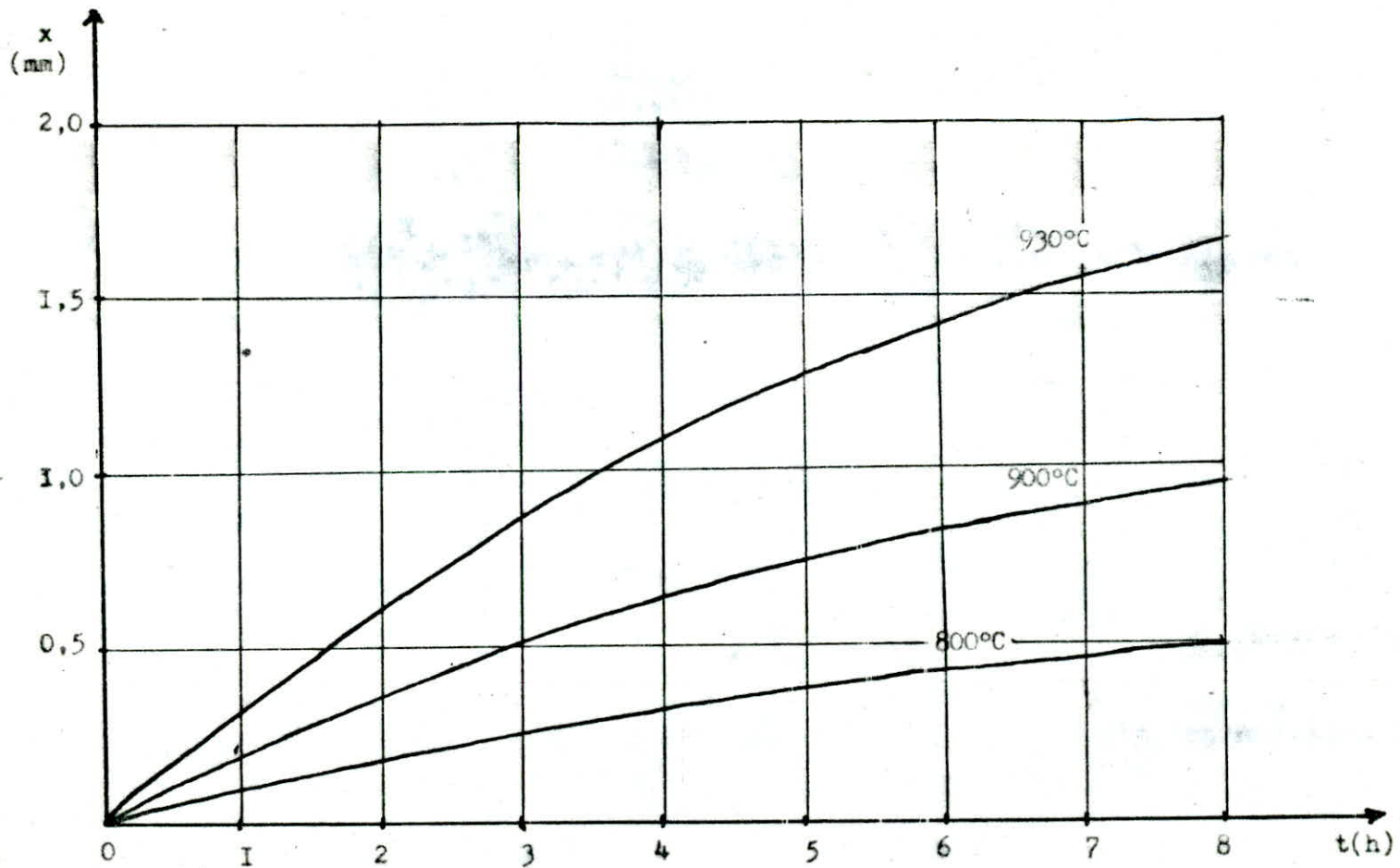


fig.4-7: variation de l'épaisseur de la couche cimentée en fonction du temps de maintien et de la température de cémentation. (Acier XC 10)

puisqu'elle influe beaucoup sur la vitesse de diffusion du carbone dans le métal et sur la structure du métal.

En effet, nous avons constaté que, pour un même temps de maintien, l'épaisseur de la couche cémentée augmente à mesure que la température de cémentation augmente (fig.4-7).

Cependant nous conseillons de limiter la température de cémentation pour les raisons citées au paragraphe 3-2.

4 - 6 - Influence du ciment

La composition du ciment influe beaucoup sur les résultats de cémentation. Différents essais ont été effectués et ont mené aux résultats réunis dans le tableau 4-2.

Ces essais ont été réalisés avec des ciments de charbon de bois composés de grains ($3,5 < \phi_{\text{mm}} < 10$), additionné à 30 % de BaCO_3 , de charbon de bois granulé pur et de charbon de bois pur en poudre.

Les résultats obtenus reflètent le rôle prépondérant de la grosseur du grain du ciment ainsi que l'importance des produits activants tel que le carbonate de baryum.

4 - 7 - Energie d'activation

L'énergie d'activation Q de la diffusion caractérise l'énergie de liaison interatomique dans le réseau cristallin; plus la valeur de Q est grande plus l'énergie nécessaire, pour qu'un atome passe dans le réseau d'un état d'équilibre à un autre, est grande. L'excès d'énergie nécessaire pour cette transition est fournie à l'atome par ses voisins avec lesquels il échange en permanence de l'énergie cinétique.

	Charbon de bois granulé + 30 % de BaCO ₃	Charbon de bois granulé pur	Charbon de bois pulvérisé pur
x (mm)	1,695	1,023	0,534

Tableau 4-2 : Epaisseur de la couche cimentée suivant
la composition du ciment après une cément-
tation de 8^h à la température 930°C.

Pour la détermination de la valeur de l'énergie d'activation du carbone dans le cas de la cémentation, nous appliquerons la loi d'Arrhénius et qui stipule que le coefficient de diffusion varie suivant la température.

En règle générale, la vérification de cette loi constitue un critère de qualité des résultats expérimentaux; on porte graphiquement le logarithme de $\frac{x^2}{t}$ en fonction de l'inverse de la température absolue, les points expérimentaux doivent s'aligner suivant une droite dont la pente est égale au rapport $(-Q/(2,3 R))$ d'où on tire la valeur de Q .

La figure 4-8 représente la cinétique de la diffusion en coordonnées d'Arrhénius; les trois droites (1), (2) et (3) sont obtenues pour des temps de maintien respectivement 3^h, 6^h et 8^h.

La droite (1) nous donne : $Q = 41130$ cal/mole.

La droite (2) nous donne : $Q = 37474$ cal/mole.

La droite (3) nous donne : $Q = 34732$ cal/mole.

Ce qui nous donne en moyenne : $Q = 37778$ cal/mole.

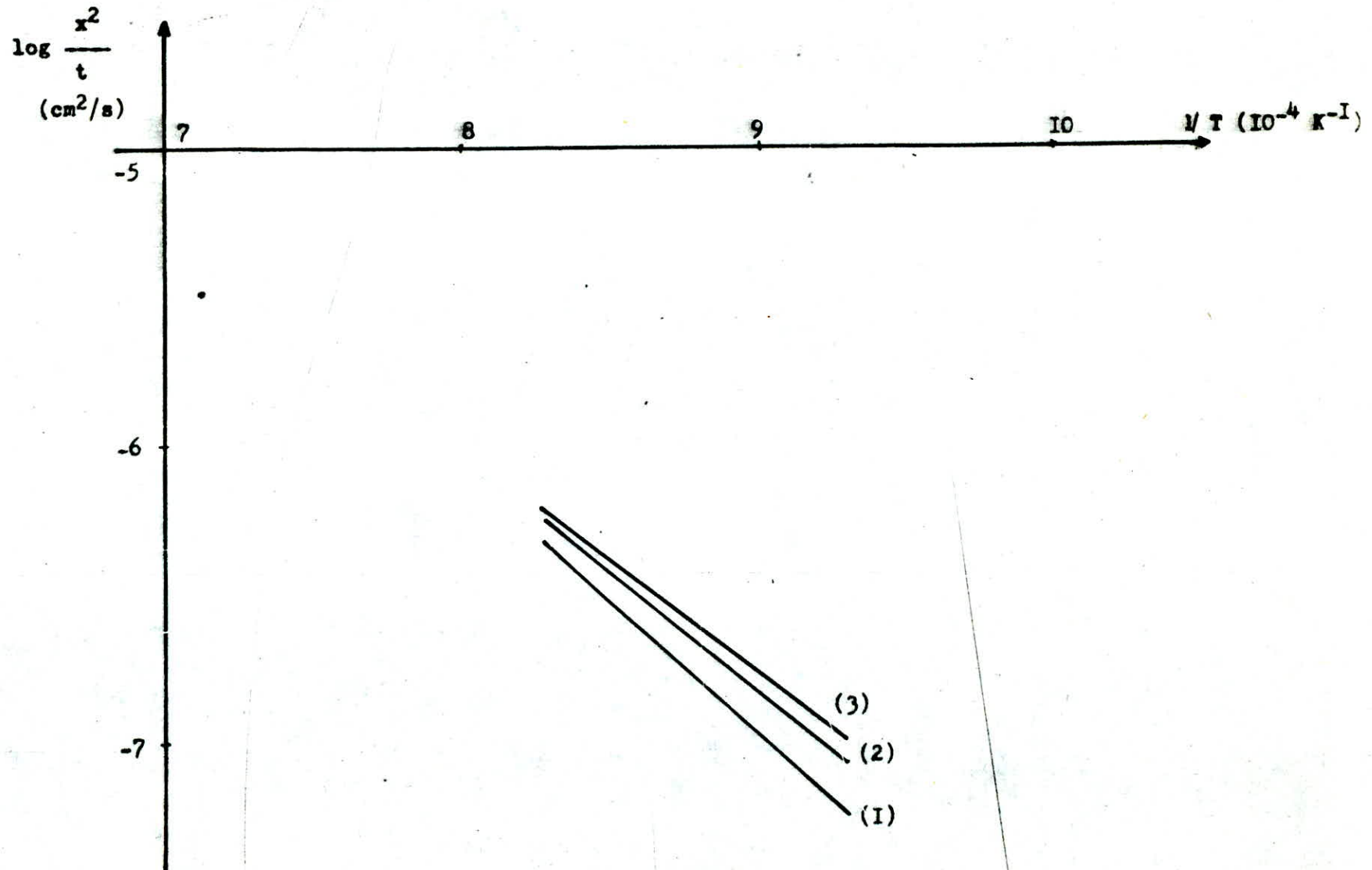


fig 4-8 : diagramme de la cinétique de la diffusion en coordonnées d'Arrhénius. (acier XC 10)

5 - CEMENTATION DE L'ACIER I2 NC 6

5 - I - Acier nickel-chrome doux I2 NC 6

Cet acier est destiné à la cémentation, en remplacement de l'acier à 2% de nickel après l'interdiction des teneurs supérieures à 1,6 % de nickel.

Sa composition chimique est :

Carbone.....	0,10 à 0,15 %
Manganèse.....	0,60 à 0,90 %
Nickel.....	1,20 à 1,60 %
Chrome.....	0,90 à 1,25 %
Silicium.....	0,20 à 0,40 %
Soufre.....	0,04 %
Phosphore.....	0,04 %

Cet acier convient pour pièces exigeant une bonne limite élastique, soumises à des efforts alternés, surface résistante à l'usure.

5-- 2 - Rôle du couple nickel-chrome

On combine généralement le nickel et le chrome comme addition dans les acier au carbone. Le nickel augmente la résilience et le chrome la dureté; il est possible ainsi de conjuguer dans le même acier une haute résilience avec une résistance élevée.

Les aciers doux nickel-chrome après cémentation possèdent une limite élastique et une résistance plus grande que les aciers de cémentation au carbone. De plus, il présentent la particularité de produire une bonne dureté avec une résistance particulière à l'usure par une simple trempe à l'huile. Ces aciers sont excellents pour les pièces cémentées de forme compliquée craignant les déformations ou réclamant une âme particulièrement résistante.

5 - 3 - Cémentation

La cémentation a été effectuée avec un ciment constitué de 70 % de charbon de bois granulé additionné de 30 % de carbonate de baryum.

Les essais ont été effectués pour différents temps de maintien et différentes températures de cémentation afin d'observer l'influence de l'un et de l'autre.

5 - 4 - Influence du temps de maintien

L'influence de ce facteur est prépondérante et se manifeste d'une manière plus accentuée que dans le cas des aciers au carbone; en effet pour une même épaisseur de la couche cimentée cet acier demande plus de temps.

La figure 5-2 représente la variation de l'épaisseur de la couche cimentée suivant la variation du temps de maintien et pour différentes températures de cémentation; nous distinguons clairement que l'épaisseur de la couche cimentée augmente à mesure que le temps de maintien augmente.

5 - 5 - Influence de la température de cémentation

La température de cémentation joue un très grand rôle dans ce procédé; en effet, la qualité de la couche cimentée en dépend étroitement, alors il faut limiter les températures et les maintenir constantes autant que possible afin d'éviter les conséquences que ça peut engendrer.

Le tableau 5-I donne une idée sur l'épaisseur de la couche cimentée pour différentes températures.

La figure 5-2 nous permet de constater l'évolution de l'épaisseur de la couche cimentée en fonction du temps de maintien pour les différentes températures.

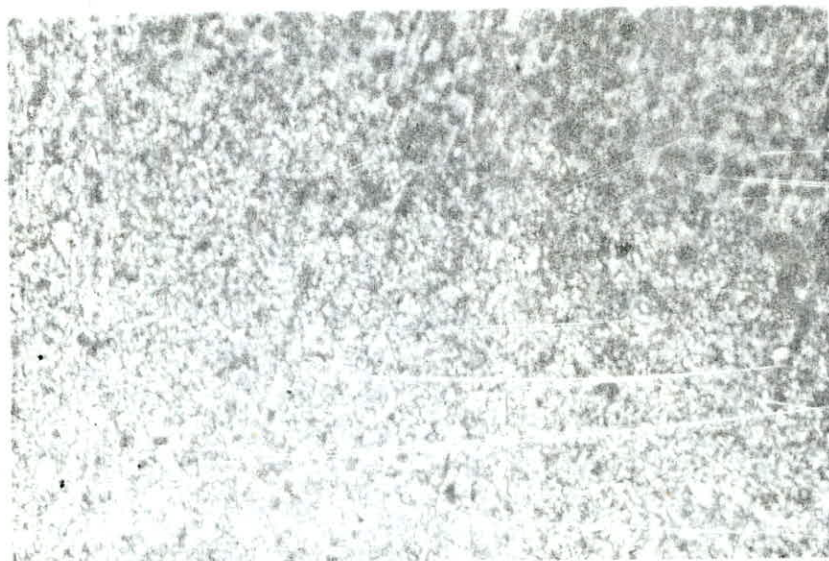


fig.5-I : structure de la couche cimentée
de l'acier I2 NC 6

$T(^{\circ}\text{C}) \backslash t \text{ (h)}$	3	6	8
800	0,16	0,28	0,47
900	0,35	0,47	0,58
930	0,56	0,96	1,16

Tableau 5-I : Epaisseur de la couche cimentée en milli-
mètre suivant différents temps de maintien
pour différentes températures de cémentation
(acier I2 NC 6)

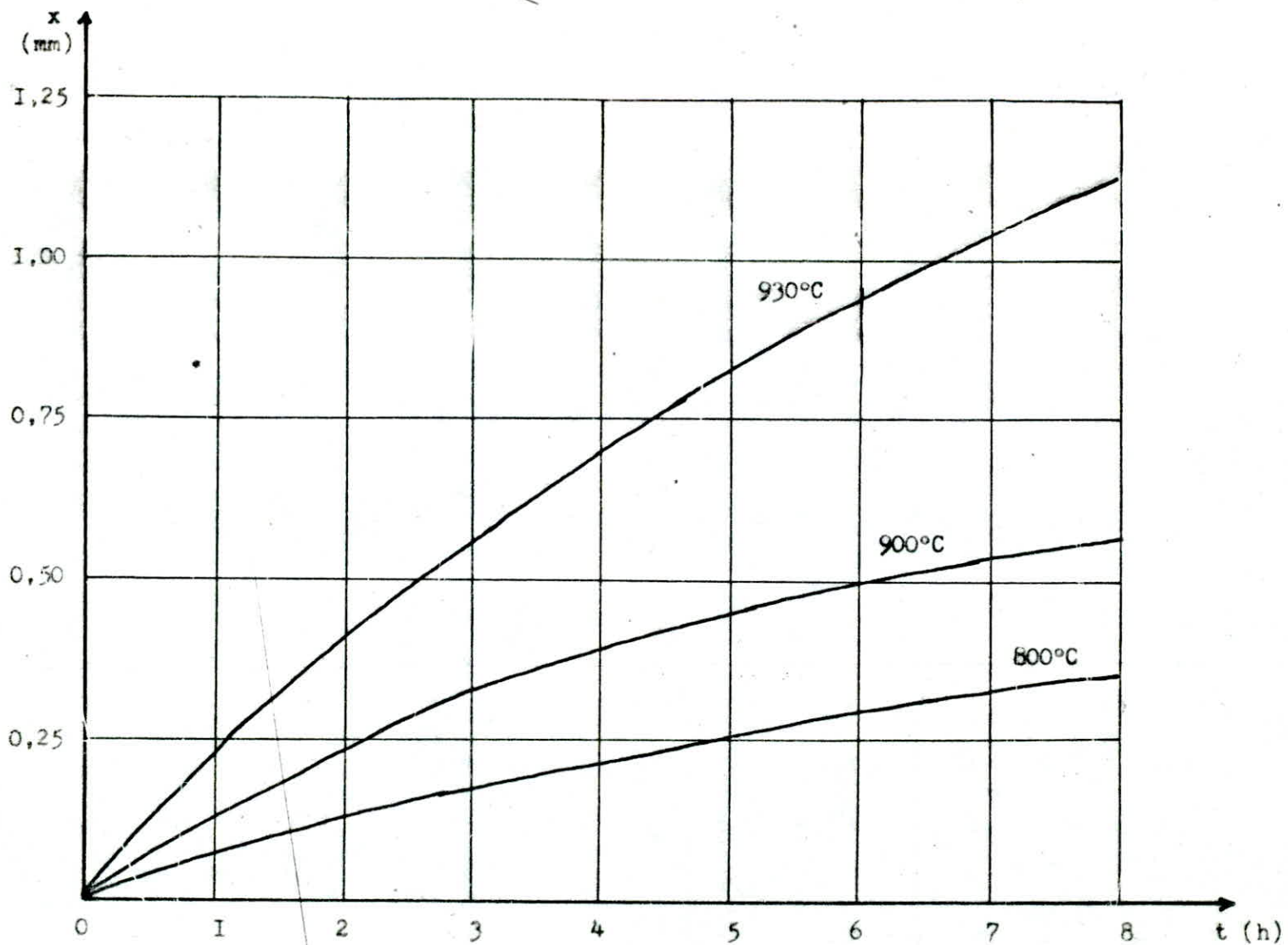


fig. Variation de l'épaisseur de la couche cimentée en fonction du temps de maintien et de la température de cimentation (acier 12 NC 6)

5 - 5 - Influence du ciment

La composition du ciment joue le même rôle que dans le cas des aciers au carbone, de telle sorte que grâce à sa granulométrie et l'addition de produit adjuvant il peut accélérer la cémentation et l'approfondir.

Le tableau 5-2 illustre l'influence de la composition sur l'épaisseur de la couche cimentée.

5 - 6 - Energie d'activation

La figure 5-3 représente la cinétique de la diffusion en coordonnées de Arrhénius; les droites (1), (2) et (3) sont obtenues pour des temps de maintien respectivement 3^h, 6^h et 8^h.

La droite (1) nous donne : $Q = 50055$ cal/mole.

La droite (2) nous donne : $Q = 35646$ cal/mole.

La droite (3) nous donne : $Q = 43644$ cal/mole.

Ce qui nous donne en moyenne : $Q = 43115$ cal/mole.

	Charbon de bois granulé + 30 % BaCO ₃	Charbon de bois granulé pur	Charbon de bois pulvérisé pur
x (mm)	1,16	0,83	0,32

Tableau 5-2 : Epaisseur de la couche cimentée suivant la composition du ciment (t=8^h , T = 930°C)

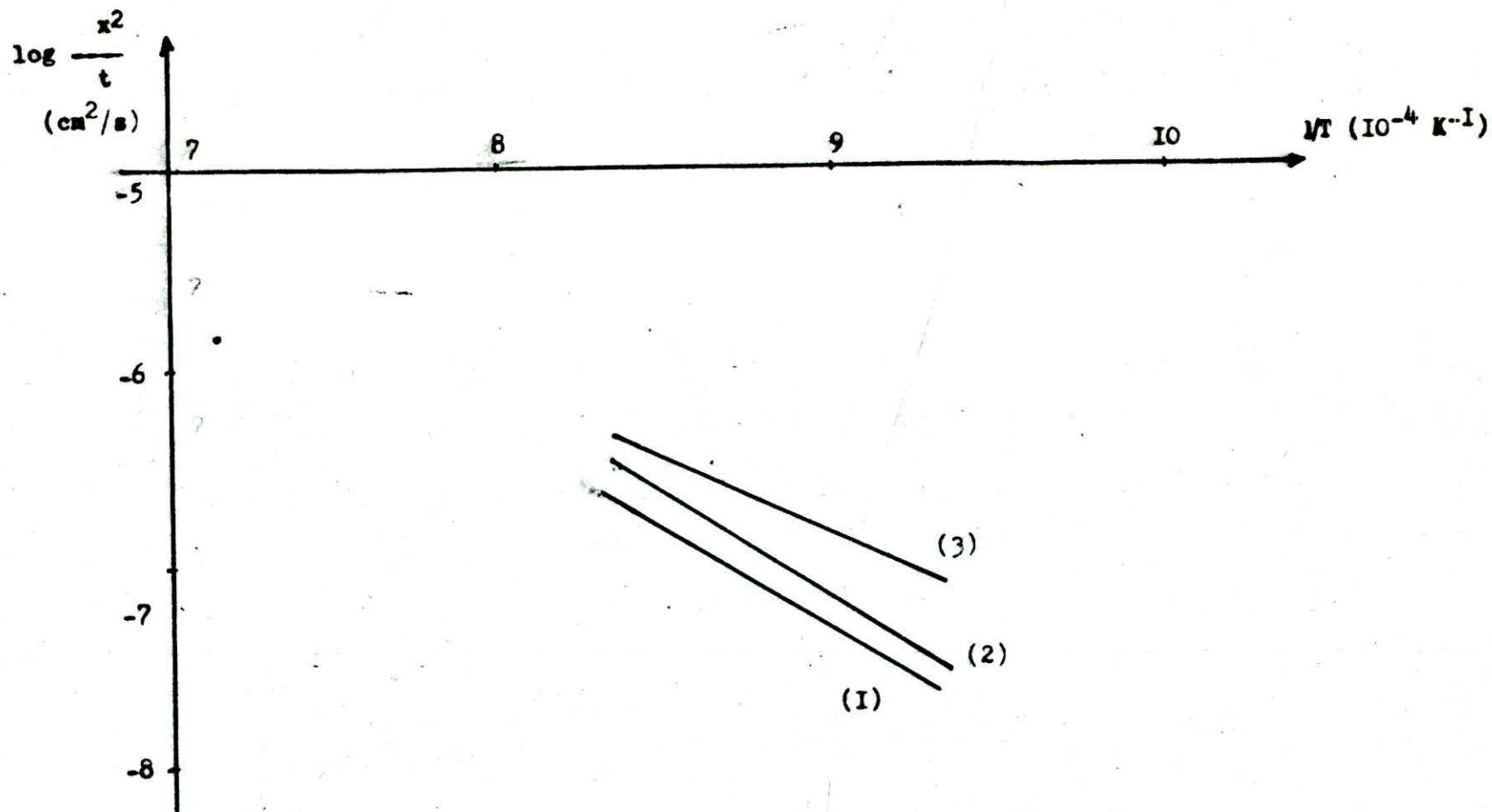


fig 5-3 : cinétique de la diffusion en coordonnées
d'Arrhénius. (acier I2 NC 6)

C O N C L U S I O N

A travers cette étude , nous avons pu estimer expérimentalement l'évolution de l'épaisseur de la couche cémentée suivant les variations de la températures de cémentation, le temps de maintien et la composition du ciment pour les aciers XC 10 et I2 NC 6.

Les diagrammes des figures (4-7), (5-2) et les tableaux (4-2), (5-2) aideraient à choisir les conditions optimales de la cémentation solide pour ces aciers; à ce propos nous conseillons de limiter la température de cémentation en évitant le chauffage excessif, de limiter le temps de maintien afin d'éviter le séjour prolongé ainsi qu'il est souhaitable de rajouter au ciment 3,5 à 5 % de carbonate de calcium pour éviter le frittage (fig. 4-1).

Les traitements thermiques après cémentation sont indispensables et doivent être menés correctement pour avoir les meilleurs résultats, sachant que l'on obtient après une double trempe à l'eau pour l'acier XC 10 une dureté de la couche cémentée égale à environ 65 HRC ; pour l'acier I2 NC 6 et après une trempe à l'huile, la dureté de la couche superficielle atteint 60 HRC.

La cémentation solide est un traitement superficielle qui est assez efficace, néanmoins ce procédé peut engendrer des défauts dans les pièces cémentées telsquel'écaillage, présence de points doux ainsi que des déformations du métal.

Pour terminer, nous rappelons que ce procédé se recommande pour les pièces soumises à des chocs ou à des effets d'entailles et pour lesquelles on cherche un cœur très résilient, il s'applique au cas où les déformations sont peu à craindre.

Phases en présence pendant la cémentation :

- Couche cémentée.....
- Cœur.....

Température de cémentation θ : $A_{c\theta}$ θ

Élément diffusant..... C

Transformation isotherme du cœur au

cours du refroidissement..... $A_{r\theta}$

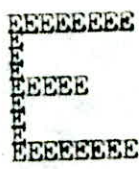
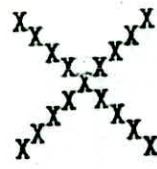
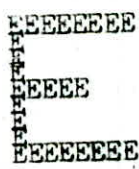
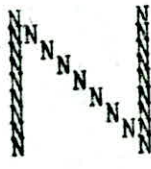
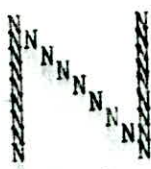
Transformation de la surface au cours

du refroidissement..... $A_{r\theta}$

Structure à cœur Bainite inférieure à bas C

Structure en surface Martensite au C

Désignation du procédé Cémentation profonde
classique et trempé.



PROPOSITION D'UN TRAVAIL PRATIQUE :

LA CEMENTATION SOLIDE

I - But

La cémentation est un processus de saturation en carbone de la couche superficielle de l'acier; son but principal est l'obtention d'une surface dure et résistante à l'usure par enrichissement de la couche superficielle en carbone jusqu'à la concentration de 0,8 à 1,2 % et par trempe ultérieure suivie d'un revenu à basse température. Ce procédé accroît également la limite de fatigue.

II - Mécanisme de la cémentation

La diffusion du carbone dans l'acier n'est possible que lorsque le carbone se trouve à l'état atomique.

Dans la cémentation solide, le carbone atomique est obtenu comme suit : La caisse de cémentation contient de l'air dont l'oxygène réagit à température élevée avec le charbon pour produire de l'oxyde de carbone CO.

En présence de fer l'oxyde de carbone se dissocie :



Le carbone ainsi obtenu est atomique au moment de sa formation et alors il diffuse dans le métal qui est à l'état austénitique.

L'addition des carbonate rend le ciment beaucoup plus actif et enrichit l'atmosphère carburante en oxyde decarbone :



III - Traitement thermique après cémentation

Généralement, la pièce subit une double trempe.

a) Trempe de régénération de l'âme - Le métal ayant été chauffé longtemps (6 à 12 heures) vers 930°C est à gros grains, donc fragile; on le soumet à un recuit de régénération (chauffage rapide aux environs de $A_3 + 50^\circ\text{C} \sim 925^\circ\text{C}$), suivi généralement d'une trempe à l'eau.

b) Trempe de durcissement de la couche cémentée - Une trempe à l'eau à $A_1 + 50^\circ\text{C} (\sim 800^\circ\text{C})$ améliore la couche cémentée. On ne pratique pas de revenu ultérieur, sauf de détente pour diminuer les contraintes propres résiduelles.

Traitement thermique des aciers alliés - ce traitement consiste en une seule trempe à l'huile vers 750°C.

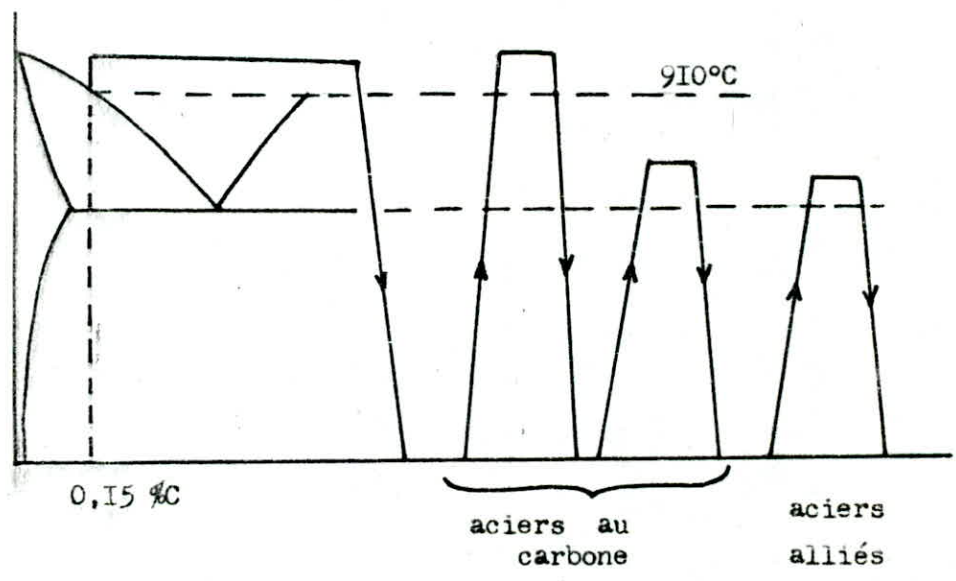


Schéma du traitement thermique après cémentation

IV - Matériel utilisé

- Un four électrique.
- Quatre caisses en acier inoxydable.
- Acier de faible teneur en carbone.
- Charbon de bois granulé.
- Carbonate de baryum, carbonate de calcium.
- Une paire de gants en amiante.
- Une balance.

V - Manipulation

- préparer le ciment : 60 % charbon de bois + 35 % BaCO_3 + 5 % CaCO_3 .
- Etaler une couche de ciment de deux centimètres d'épaisseur dans trois caisses; dans la caisse N° 4 mettre du charbon pur.
- Mettre un échantillon d'acier dans chaque caisse et refaire l'opération numéro deux.
- Mettre les couvercles sur les caisses.
- Introduire les caisses dans le four couvercle en bas et reposant sur des appuis afin de permettre la circulation de l'air chaud par en dessous.
- Verrouiller le four.
- Régler la température à 930°C et mettre le four en marche.
- Compter le temps de maintien dès que la température 930°C est atteinte.
- R ressortir la caisse N° 1 après 3^h de maintien et la laisser se refroidir dans un endroit aéré.
- Refaire la même chose que précédemment pour la caisse N° 2 après 6^h de maintien dans le four.
- Après 8^h de maintien, retirer les caisses N° 3 et N° 4.

BIBLIOGRAPHIE

La pratique des traitements thermiques des métaux industriels.

G. de SMET

Métallographie et traitements thermiques des métaux.

I. LAKHTINE

Métallurgie générale.

J. BENARD

Métallurgie, Alliages métalliques; (tome I).

C. CHAUSSIN

TECHNIQUES DE L'INGENIEUR (M 4).

