

وزارة التعليم و البحث العلمي  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : METALLURGIE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

INFLUENCE DU NICKEL -  
CHROME SUR LA STRUC.  
TURE ET LES PROPRIETES  
MECANIQUES DE LA FONTE  
G.S. (38 - 15)

Proposé Par :  
S.N.V.I

Etudié par :  
MC BOUKHENOUFA  
BOUALEM

Dirigé par :  
MC SALHI Maitre assistant  
M<sup>r</sup>. MAISTROUK Professeur

PROMOTION : JUIN 1987

INFLUENCE DU NICKEL ET DU CHROME  
SUR LA STRUCTURE ET LES PROPRIETES  
MECANIQUES DE LA FONTE A GRAPHITE  
SPHEROIDAL.

AVANT - PROPOS.

Le présent travail a été effectué à la SNVI de Rouiba à l'école nationale polytechnique et à la B.C.L de Beni-Mered.

Avant tout, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur : SALHI, Maitre Assistant Chercheur du Département Mines et Métallurgie, qui a fait le maximum d'effort, pour me permettre d'accomplir ce travail dans de bonnes conditions.

Je tiens à remercier Monsieur *Bouabdellah* de m'avoir honorer en acceptant de présider ce jury je tiens également à remercier les membres du jury qui m'honorent de juger ce modeste travail.

De même, je tiens à remercier vivement Monsieur : GARICI Hacene qui m'a beaucoup aidé dans mes expériences ainsi que tout le personnel du laboratoire de fonderie.

Sans oublier, tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce modeste travail, personnel et les enseignants du département, ainsi que tous mes amis qui m'ont soutenu durant le travail.

## Introduction :

Dans le cadre de la politique l'intégration économique notre pays entreprend plusieurs projets de modification aux seins de ses structures industrielles et entreprises et ceci, dans le but d'éliminer au maximum son indépendance économique et surtout industrielle et faire face, à l'état de crise économique actuel.

Dans ce conteste, la présente étude entre dans le cadre d'une recherche sur l'influence des additions de chrome et de nickel sur la structure et les propriétés mécaniques de la fonte à graphite sphéroïdal et de soumettre nos résultats à la S.N.V.I et ceci dans le but de réaliser des pièces dures tout en éliminant la phase lédéburitique.

Autre avantage, économique, est la substitution des aciers alliés par de la fonte alliée au nickel, chrome.

L'étude se divise en cinq parties :

- 1 - description des techniques d'élaboration de la fonte G.S.
- 2 - techniques expérimentales
- 3 - traitement thermique de graphitisation
- 4 - propriétés mécaniques
- 5- *Etude statistique* .  
conclusion.

CHAPITRE I :

Description des techniques d'élaboration de la fonte G.S.

A - Moulage :

- 1 - confection d'une poche de coulée
- 2 - le moulage en moule non permanent
- 3 - procédé de moulage utilisé
- 4 - matériaux de moulage.

B - Fusion :

- 1 - fonte de base
- 2 - four à arc électrique
- 3 - four à induction
- 4 - coulée
- 5 - transfert de l'alliage liquide
- 6 - analyse de l'échantillon.

C - Influence des éléments d'addition :

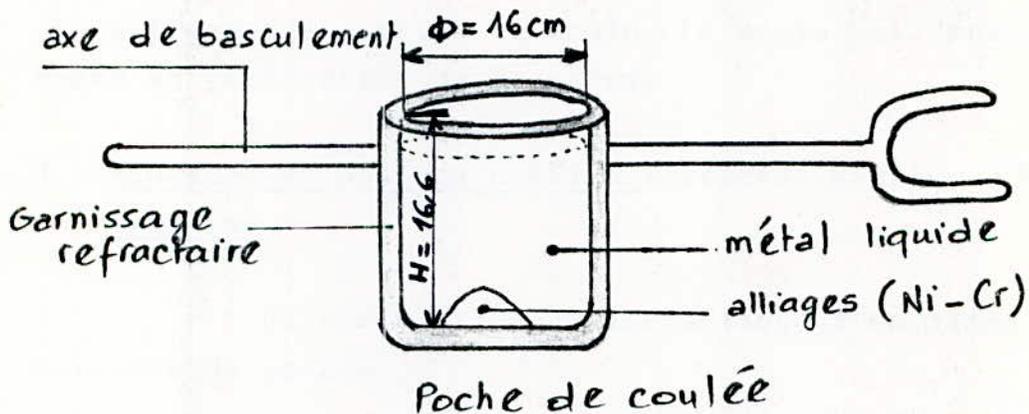
Carbone - Silicium - Phosphore - Manganèse -  
Soufre - Magnésium - Nickel - Chrome.

A - Le moulage : [ 5 ]

1 - Confection d'une poche de coulée :

Une poche de coulée est un récipient dans lequel est transvasé l'alliage du four, pour son transport au poste de coulée, elle est constituée d'une enveloppe de tôle de 4 mm, garnie intérieurement d'un réfractaire, elle porte des axes de rotation pour son basculement lors du transvasement du métal.

Le garnissage réfractaire est un mélange de sable silicieux et de poussière du coke, la capacité de la poche de coulée est de 24 Kg.



2 - Le moulage en moule non permanent :

Un moule non permanent est une structure réalisée avec des matériaux de moulage, composé d'une ou de plusieurs parties et offrant après assemblage, un évidement appelé : empreinte. Cette empreinte correspond à la pièce brute, en tenant compte :

- 0,5 ÷ 1% d'adjuvants facilitant le débourage : noir minéral, qui présente un effet endothermique avec la fonte liquide.

Le moule est réalisé avec du sable siliceux, l'empreinte est faite avec un modèle donnant aux matériaux de moulage la forme de la pièce.

Un système d'attaque permet le remplissage de l'empreinte et un système d'alimentation augmente la compacité de la pièce, qui est composé de masselottes et des cols de liaisons, leur rôle est d'éviter la formation des retassures. Des events ; conduits de faibles sections évacuant l'air de l'empreinte vers la partie supérieure du moule lors du remplissage.

## B/ Fusion [5] - [9]

### 1- Fonte de base :

Pour l'élaboration du refonte à graphite sphéroïdal il est nécessaire d'avoir une basse teneur en manganèse et en éléments d'impureté (soufre et phosphore).

### 2- Circuit d'élaboration de la fonte GSC :

#### a- fours à arc électrique :

La fusion électrique permet d'atteindre la température de 1550 °C, dans des fours constitués par trois électrodes de graphite régies par un système de coulisse automatique.

b- fours à induction :

Les fours à induction ont pour rôle :  
maintien, montée en température et stockage. La température  
maintien est de 1500°C, une capacité de 10 tonnes , et  
une puissance de 3MVA le diamètre du creuset intérieur est de  
l'ordre de 1,23m et une hauteur de 2,1m.

3- Coulée : [5]

La coulée de l'alliage liquide dans le moule se fait  
à une température de 1480 à 1500°C, le temps de remplissage doit  
être le plus court sans créer de turbulence.

Expérimentalement, le temps de remplissage est compris  
entre :

$$1,4 \sqrt{M} \quad \text{et} \quad 1,8 \sqrt{M}$$
$$1,4 \sqrt{M} \leq t \leq 1,8 \sqrt{M}$$

M : masse de l'alliage coulée.

4- Transfert de l'alliage liquide : [5]

Tous les alliages subissent une perte de température  
pendant leur transport du four de fusion aux moules à couler. La  
baisse de température se fait aux étapes suivantes :

- Lors de la coulée du four à induction vers la poche  
de coulée de 2 tonnes.

- Lors de la coulée de la poche de 2 tonnes vers la  
poche de 500 kg qui permet de couler dans le moule.

Ainsi, la baisse de température de la fonte peut atteindre une centaine de degré C, entre le four à induction et le moule et ce, malgré, un minimum de manutention et un préchauffage des poches de coulée.

5 - Analyse de l'échantillon :

L'alliage obtenu est coulé dans un petit moule métallique et refroidi brutalement par trempe à l'eau on obtient ainsi, une petite "médaille" qui est envoyée au laboratoire pour analyse rapide au spectromètre.

Le spectromètre est un appareil qui peut être mis en oeuvre pour l'analyse de matières diverses.

Il permet de doser tous les éléments d'alliages et en toute concentration sauf le carbone.

Les résultats de l'analyse d'une médaille, coulée à partir d'une fonte G.S.C sont :

| C   | Si   | Mn    | S     | P     | Mg    | Ni    | Cr    | Mo    | Cu    | Al    | Pp    |
|-----|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ,66 | 2,53 | 0,213 | 0,009 | 0,028 | 0,055 | 0,051 | 0,041 | 0,001 | 0,028 | 0,013 | 0,000 |

C/ Influence des éléments d'addition : [2] - [3] - [4] - [5] - [9].

Les éléments toujours contrôlés par le fondeur sont :

C - Si - P - Mn et S.

./.

- Le carbone :

C'est un élément graphitisant, la matrice de la fonte G.S.C est hypo ou hyperentectique suivant l'indice de saturation.

$$S_c = \frac{\%C}{\%C_{eq}}$$

Le pourcentage de carbone ne peut être diminué en dessous de 3 à 2,8% C car :

- L'intervalle de solidification augmente, donc il y a diminution de coulabilité et par conséquent augmentation des risques de retassures.

- Le Silicium :

C'est l'élément graphitisant de base, doit être abondant pour éviter la formation de fontes truitées, il diminue considérablement la résilience.

Il durcit la ferrite et augmente la résistance de fonte.

Le silicium accroît la vitesse de solidification du carbone dans l'austénité lors de la formation des sphéroïdes de graphite.

- Le manganèse :

Est un élément antigrahitisant donc carburigène et blanchissant, il est limité à 0,5% le réseau perlitique s'accroît avec le titre en Mn. Le manganèse est une désoxydant de la fonte G.S.C.

- Le phosphore :

Bien que graphitisant, c'est un élément impur il augmente considérablement la coulabilité. Il fragilise les joints des grains et provoque une rupture intergranulaire.

Le phosphore forme des phosphorures qui abaissent la résilience.

- Le soufre :

Le soufre doit être en faible quantité pour ne pas consommer trop de magnésium, et forme des sulfures de magnésium considérés comme inclusions et jouera négativement sur les propriétés mécaniques.

- Le magnésium :

Est un élément blanchissant de la matrice et sphéroïdisant du graphite.

Les difficultés d'introduction du magnésium dans la fonte tiennent à :

- sa densité : 1,74 (g/cm<sup>3</sup>).
- sa tendance à la vaporisation
- son affinité pour l'oxygène, et les fumées et les crasses de MgO qui en résultent après introduction, les pertes en magnésium sont de l'ordre de 0,001 % par minute.

- Le nickel :

Le nickel est un élément gammagène à forte teneur, stabilisateur de l'austénité, il n'agit pas sur les sphéroïdisations, diminue la fragilité de l'austénité il communique une hérédité perlitique à la matrice, il affine les grains.

Dans les fontes, le nickel augmente la plasticité et provoque la séparation du carbone sous forme de graphite en éléments très fins, il permet ainsi, d'obtenir des fontes, faciles à usiner.

- Le chrome :

C'est un bon désoxydant, il durcit la fonte et facilite le forgeage du métal.

La propriété du chrome est d'augmenter considérablement l'élasticité et lui communique une résistance au choc, particulière, mais sa propriété fondamentale est de favoriser la pénétration de trempes;

C'est un élément blanchissant, carburigène et alpha-gène.

Le Chrome est un stabilisateur de l'austénite et des carbures, donc il est blanchissant, il réduit le gonflement de la fonte aux températures élevées, il affine la structure perlitique, on l'utilise dans ce but jusqu'à 1%, sa présence en grande quantité peut avoir un effet blanchissant, et fragilisant.

## II - Techniques expérimentales :

Cette étude a été effectuée sur la fonte G.S.C. Après, élaboration dans un four à induction, le traitement de sphéroidisation à été effectué suivant la méthode classique d'inoculation Mg - Fe - Si.

Les alliages utilisés au nickel - chrome ont été déposés au fond de notre poche de coulée conçue pour 24Kg préalablement chauffée et dans laquelle on a versé la fonte G.S.C à partir de la poche de 2 tonnes.

Les alliages liquides ont été coulés sous forme de barreaux, de micrographie dans des moules en sable synthétique et une médaille destinée à l'analyse spectrale, suivant 7 nuances différents.

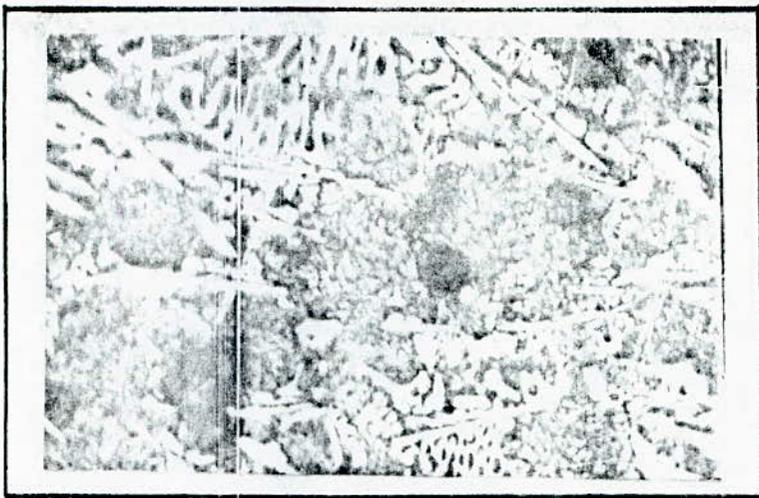
L'analyse des médailles effectuée par le spectromètre a donné les résultats suivants :

- Coulée N° = 1 :

| C    | Si   | Mn    | S     | P     | Mg    | Ni    | Cr    | Mo    | Cu    | Al    | bp    |
|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 3,36 | 2,59 | 0,294 | 0,005 | 0,029 | 0,027 | 1,069 | 0,292 | 0,001 | 0,019 | 0,013 | 0,009 |

### Observations structurales :

Ces observations ont été effectuées par microscopie optique; après polissage préliminaires des échantillons, en brute de coulée, puis attaque chimique au Nital à 4%.



avec attaque au Nital à 4%. (x100)

1,069 % Ni  
0,292 % Cr



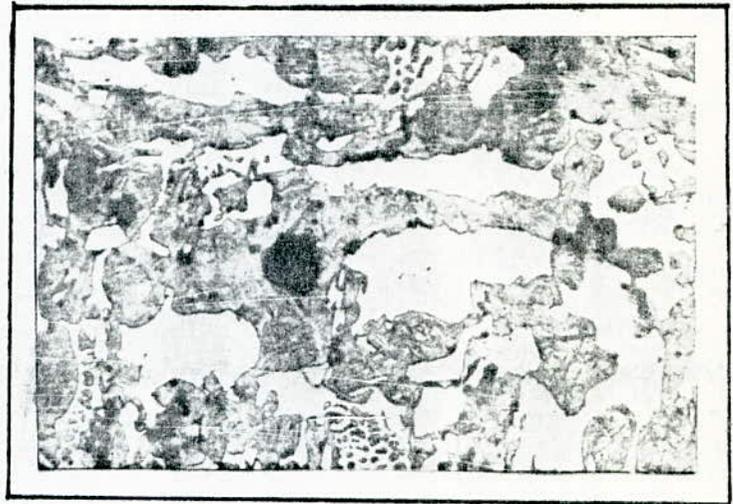
sans attaque. (x100)

Coulée N°2 :

| C    | Si   | Mn    | S     | P            | Mg    | Ni    | Cr    | Mo    | Cu    | Al    | Pb    |
|------|------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 3,38 | 2,56 | 0,304 | 0,005 | <b>0,029</b> | 0,041 | 0,952 | 0,434 | 0,001 | 0,021 | 0,014 | 0,023 |



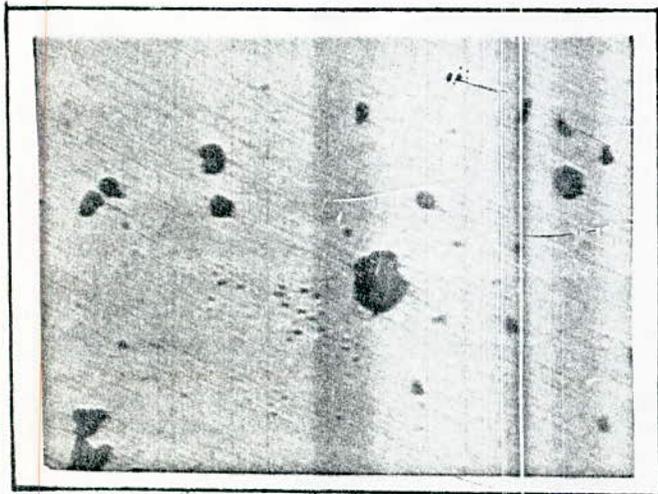
sans attaque (x100)



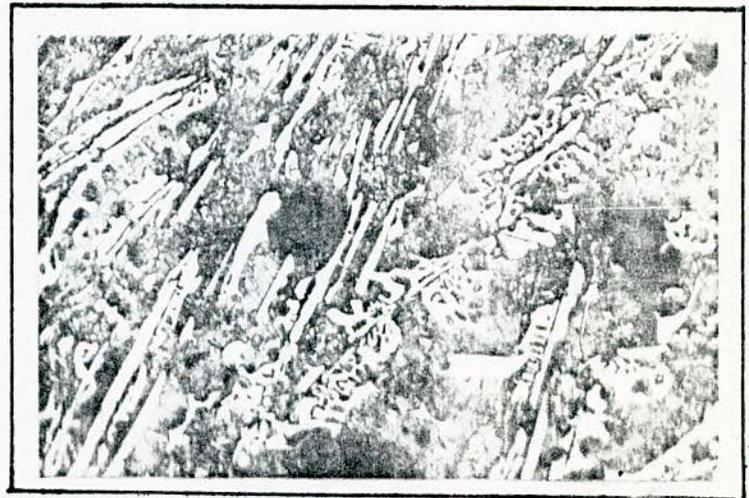
avec attaque au Nital à 4% (x100)

Coulée N°3 :

| C    | Si   | Mn    | S     | P     | Mg    | Ni    | Cr    | Mo    | Cu    | Al    | Pb    |
|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 3,53 | 2,63 | 0,301 | 0,009 | 0,027 | 0,058 | 1,197 | 0,986 | 0,003 | 0,025 | 0,037 | 0,023 |



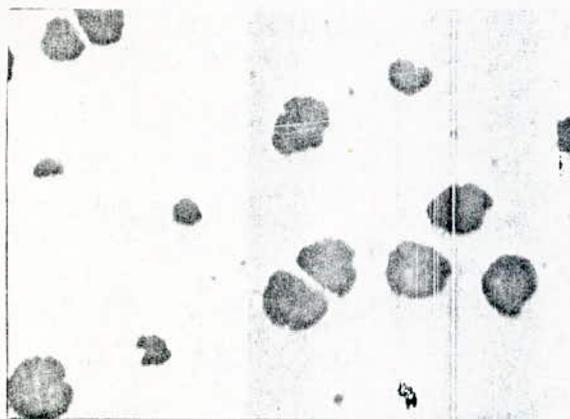
sans attaque (x100)



avec attaque au nital à 4% (x100)

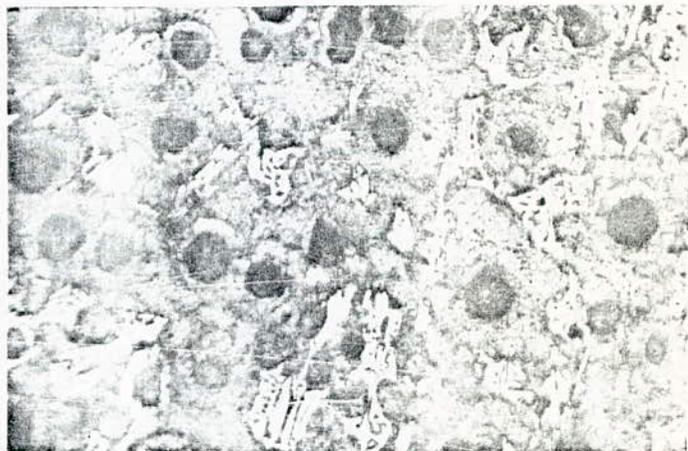
Coulée N°4 :

| C    | Si   | Mn    | S     | P     | Hg    | Ni    | Cr    | Mo    | Cu    | Al    | Pb    |
|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 3,23 | 2,84 | 0,323 | 0,008 | 0,028 | 0,035 | 1,203 | 1,477 | 0,002 | 0,025 | 0,013 | 0,026 |



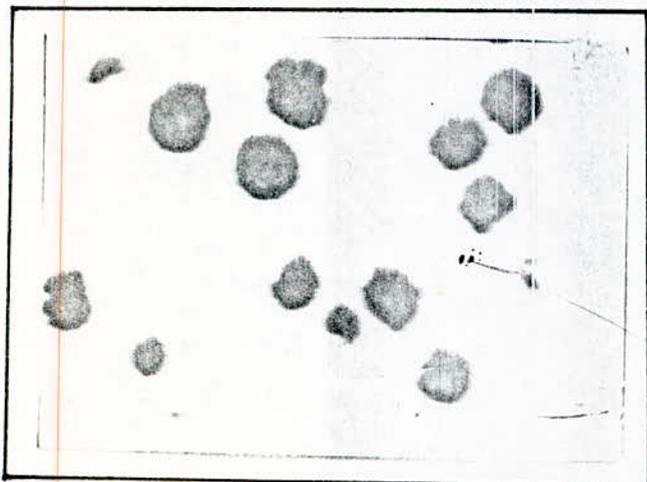
Coulée N°5 :

(x100)



avec attaque au nitral 4%

| C    | Si   | Mn    | S     | P     | Mg    | Ni    | Cr    | Mo    | Cu    | Al    | Pb    |
|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 3,53 | 2,61 | 0,301 | 0,004 | 0,025 | 0,026 | 1,372 | 1,406 | 0,001 | 0,019 | 0,013 | 0,000 |



sans attaque (x100)



avec attaque au nitral 4% (x100)

Coulée N°6 :

| C    | Si   | Mn    | S     | P     | Mg    | Ni    | Cr    | Mo    | Cu    | Al    | Pb    |
|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 3,23 | 2,82 | 0,319 | 0,010 | 0,032 | 0,049 | 2,593 | 1,693 | 0,002 | 0,028 | 0,016 | 0,039 |

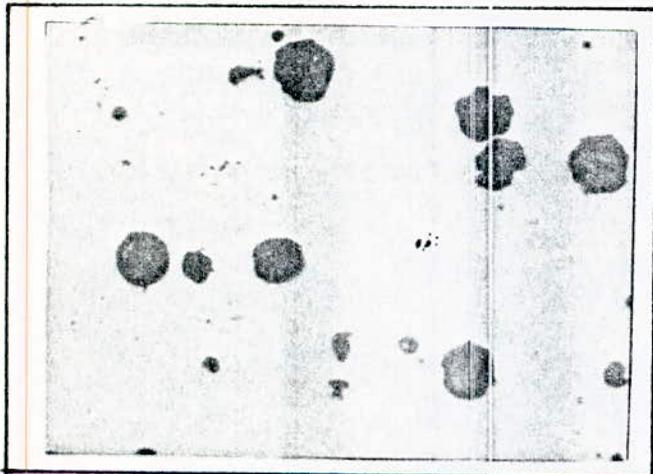


sans attaque (x100)  
Coulée N°7 :

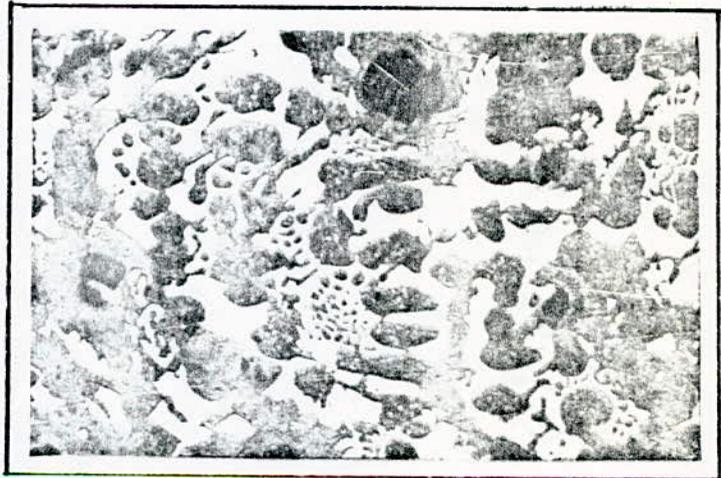


avec attaque au nitral  
à 4% (x100)

| C    | Si   | Mn    | S     | P     | Mg    | Ni    | Cr    | Mo    | Cu    | Al    | Pb    |
|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 3,53 | 2,42 | 0,292 | 0,004 | 0,022 | 0,026 | 0,346 | 0,983 | 0,000 | 0,014 | 0,011 | 0,000 |



sans attaque (x100)



avec attaque au nitral  
à 4% (x100)

INTERPRETATION :

Les figures ont été photographiées toutes au même agrandissement ( x 20) afin de faciliter la comparaison pour un taux en nickel constant , égal à 1 % .

Si % Cr = % 0,292 .

Présence d'une structure perlitique à **63** % , et de grandes plages de lédéburites représentant **32** % , le graphite quand a lui, évalué à 5 % se présente sous forme plus ou moins spheroidale .

Si % Cr = 0,434 % ✓

Présence d'une structure perlitique à **68** % , et de grandes plages de cementites libres **29** % , le graphite parait très fin et occupe un taux de **3** % .

Si % Cr = 0,986 % ✓

Structure perlitique à **66** % et présence de lédéburites et fines lamelles de cementites libres **29** % , le graphite représente **5** % et conserve sa forme spéroïdale .

Pour un taux en chrome constant , égal à 1,5 %

Si % Ni = 1,20 % .

Structure perlitique à **60** % , avec un taux de lédéburite égal à **34** % , le chrome étant un élément blanchissant de la matrice, le graphite devient plus gros et occupe **6** % .

Si  $\% \text{Ni} = 1,372$  .

Présence d'une structure blanche à **70** % de perlite **22** % de carbures et le reste , soit **8** % est constitué par des grains de graphite qui sont plus gros .

Si  $\% \text{Ni} = 2,593$  .

Structure blanche , les carbures occupent les joints des cellules et représente **32** % , le graphite de forme sphéroïdale représente **5** % , de nombreuses lamelles de cémentite très fines parcourent la surface .

Pour un taux en (  $\text{Ni} = 0,346$  %  
(  $\text{Cr} = 0,983$  %

Présence d'une structure blanche , perlitique à **75** % et présence de ledeburite qui représente **19** % , le graphite occupe **6** % de la surface .

#### CONCLUSION :

Les structures observées au microscope , nous montrent de grandes plages de ledeburites , et aucune trace de ferrite à cause du chrome qui est un élément blanchissant , et antiferritisant .

On peut constater aussi , qu'à partir d'une teneur en chrome supérieure à 1 % , le graphite devient plus gros .

Pour un taux en nickel supérieur à celui du chrome , le nickel est perlitisant .

Si le pourcentage en Nickel est égal à celui en chrome , le nickel est graphitisant.

Et si , par contre , le pourcentage en nickel est inférieur à celui du chrome , le chrome est blanchissant en la matrice .

- Traitement de graphitisation : [6] - [11] - [14]

Les fontes sont constituées par une matrice, dans laquelle se trouvent toujours des particules de graphite ou de carbures en proportion parfois importante.

La matrice qui peut être ferritique, perlitique, austénitique martensitique etc... est modifiable par traitements thermiques compte tenu de la composition chimique, suivant : trempe, revenu, recuit...

Il convient toutefois, de souligner le rôle important joué par le graphite ou les carbures au cours des transformations de la matrice des fontes :

- Le graphite et les carbures sont des réserves de carbone qui permettent à la matrice de se saturer par dissolution et diffusion en tendant vers l'état stable ou instable en fonction de la vitesse de refroidissement et la teneur en silicium.

Cela permet de dire que les matrices des fontes se transforment par traitements thermiques et la teneur en carbone varierait en fonction de la température.

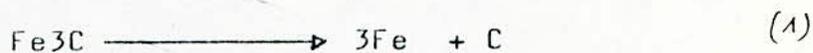
En outre, pourvu qu'ils ne soient pas excessivement stabilisés par des éléments carburigènes (Cr, V, Mn, Mo, etc...), les carbures peuvent se décomposer avec libération de graphite (graphitisation) au cours de maintiens de plusieurs heures à une température supérieure à AC3, le plus fréquemment (850 ÷ 1000°C).

./.

Enfin, les carbures rendent les fontes plus fragiles aux chocs, ce qui exclut généralement les traitements trop brusques, tels que les trempes à l'eau.

## 2- Décomposition et mise en solution des carbures entectiques :

Le recuit graphitisant est un traitement thermique d'adoucissement et de malléabilisation qui décompose les carbures libres suivant la réaction :



a) Le carbone résultant de cette décomposition précipite à l'état de graphite, du fait de l'évolution naturelle du système métastable vers la forme stable.

b) Les carbures qui se décomposent, ne sont pas dans les fontes industrielles, exclusivement de la cémentite  $\text{Fe}_3\text{C}$ , mais contiennent des éléments graphitisants et carburigènes qui diminuent ou augmentent leur stabilité ou leur résistance à la graphitisation.

Certains carbures, notamment dans les fontes au chrome sont pratiquement indécomposables.

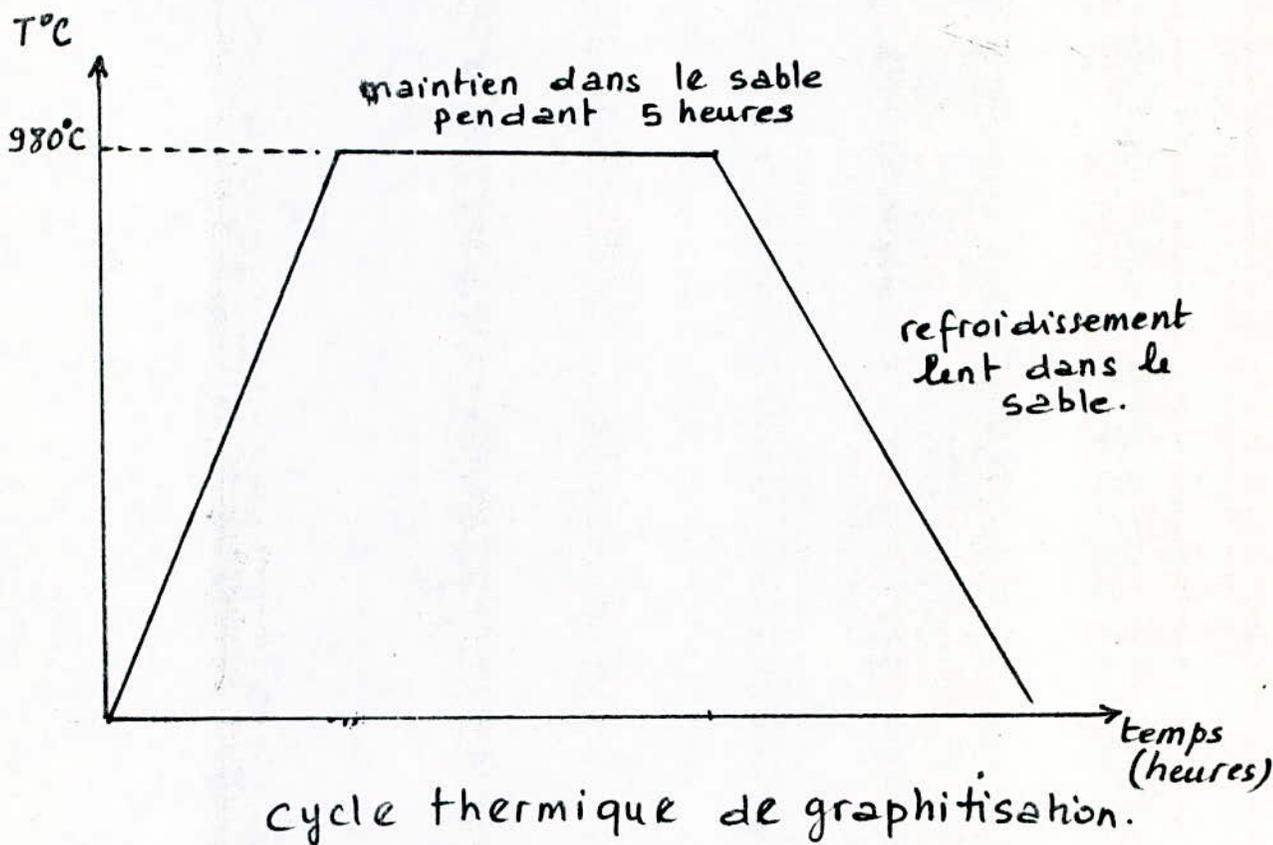
c) La réaction (1) engendre une expansion due à la différence de masse volumique entre le graphite ( $2,2\text{g/cm}^3$ ) et la matrice où les carbures ( $7,8\text{g/cm}^3$ ).

## 3- Graphitisation des carbures :

Les carbures libres se décomposent généralement au dessus de  $AC_3$  et le graphite se dépose sur les particules préexistantes. A cet égard, la vitesse de chauffage et de refroidissement sont indifférentes.

La température du palier est usuellement comprise entre ( $850 \div 1000^\circ C$ ), dans notre cas  $980^\circ C$  et une durée de maintien de 5 heures dans le sable.

En présence d'éléments carburigènes, la graphitisation est considérablement ralentie.



Observations structurales:

- Coulée N° 1:



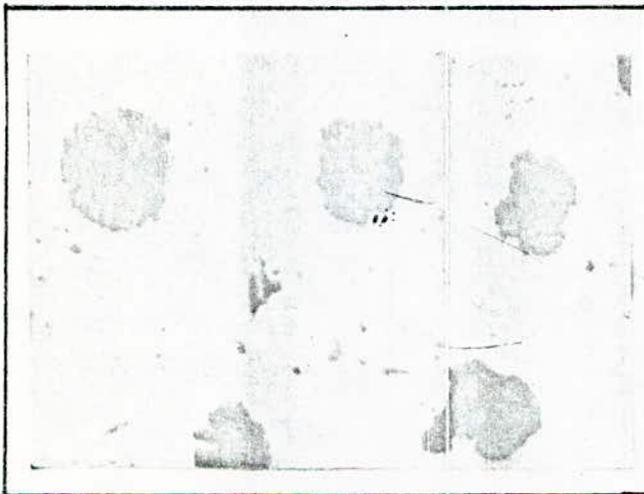
sans attaque (x120)



avec attaque au nital à 4% (x120)

1,069 % Ni  
0,292 % Cr

- Coulée N° 2:



sans attaque (x120)



avec attaque au nital 4% (x120)

Ni = 0,952%  
Cr = 0,434%

- Coulee N° 3 :



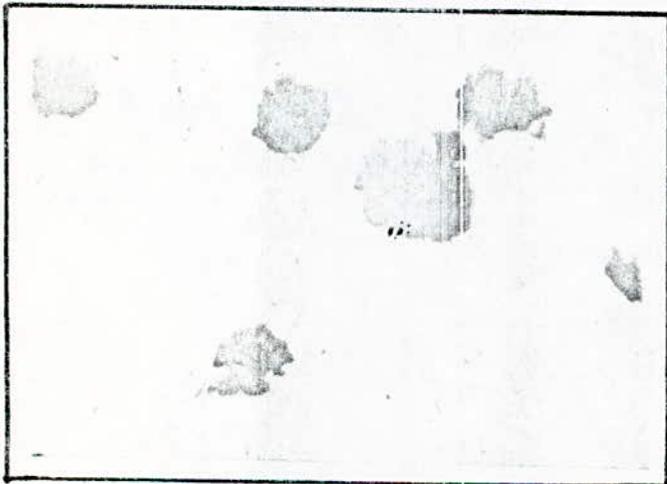
sans attaque (x20)



avec attaque au nital  
à 4% (x20)

Ni = 1,197 %  
Cr = 0,986 %

- Coulee N° 4 :



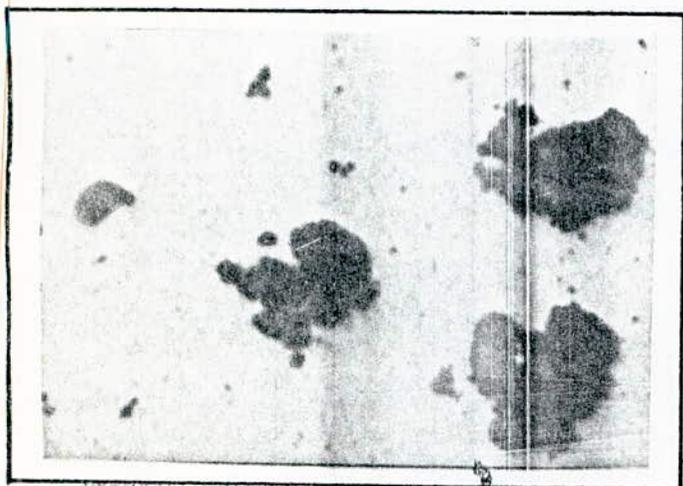
sans attaque (x20)



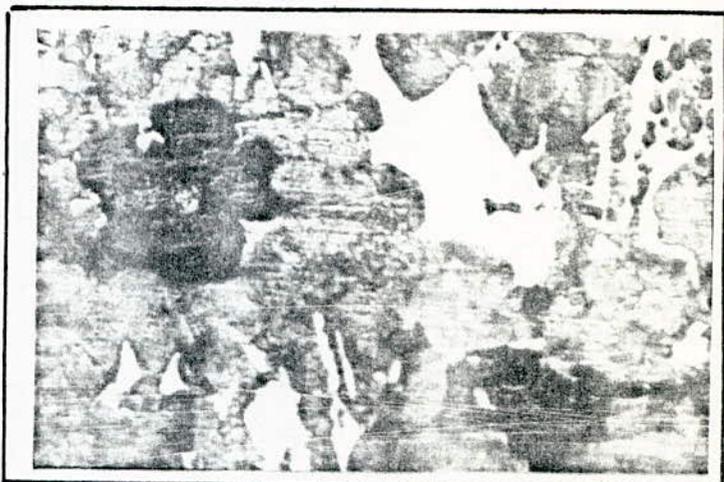
avec attaque au nital 4%  
(x20)

Ni = 1,203 %  
Cr = 1,477 %

- Coulée N° 5 :



sans attaque (x20)



avec attaque au nitral 4% (x20)

Ni = 1,372 %  
Cr = 1,406 %

- Coulée N° 6 :



sans attaque (x20)



avec attaque au nitral 4% (x20)

Ni = 2,593 %  
Cr = 1,693 %

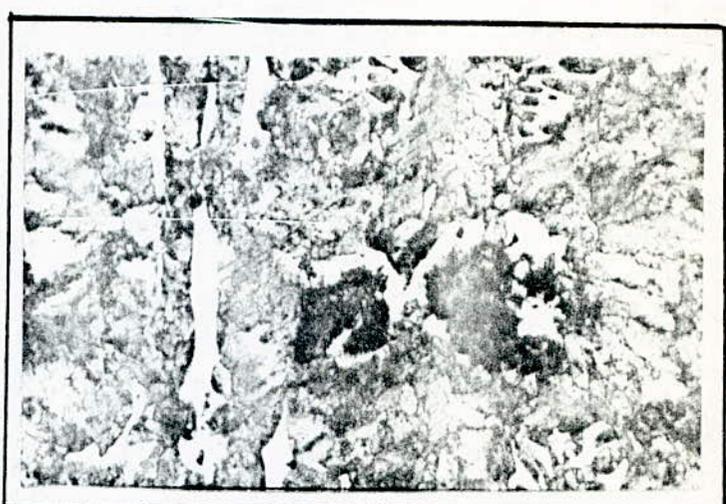
- Coulée N° 7 :

Ni = 0,346 %

Cr = 0,983 %



sans attaque (x20)



avec attaque au nitel 4%  
(x120)

- INTERPRETATION /

Après traitement thermique de graphitisation, si l'on maintient le taux de nickel constant, égal à 1% et on fait varier le pourcentage en chrome, on constate que :

Si % Cr = 0,292

structure ferrito-perlitique à **36%** de ferrite et **48%** de perlite, la lédéburite a été totalement décomposée lors du traitement de graphitisation, le graphite occupe un taux de **16%** et de forme irrégulière les oréoles de ferrite entourent le graphite.

Si % Cr = 0,434.

structure ferrito-perlitique à **16 %** de ferrite et **70%** de perlite, pas de traces de cementite, le graphite est sphéroïdal et occupe **14%** de la surface il est entouré d'oréole, de ferrite, et présente un volume plus conséquent.

Si % Cr = 0,986.

structure perlitique à **68 %**, présence de traces de ferrite représentant **2%**, la cementite n'a pas été totalement décomposée, puisqu'il persiste toujours environ **15%** de lamelles fines, le graphite se présente sous forme déchiqueté sur une proportion de **15%** / à chrome constant, égal à 1,5 % on a

Si % Ni = 1,20

structure perlitique à **69,5 %** et **1%** de ferrite, de fines lamelles de cementites existent toujours et représente **16,5 %**, de graphite présente une forme déchiquetée.

SI % Ni = 1,372 %

structure à **72,5%** perlitique avec traces de cementites libre recouvrant **10 %**, aucune trace de ferrite. Le graphite est déchiqueté et est plus gros, il représente **17 %**.

Si % Ni = 2,593.

grandes traces de ledeburites (30%) avec structure perlitique à 63%, pas de traces de ferrite. le graphite est irrégulier, il occupe 40 %.

Pour une teneur en Ni = 0,346 %

Cr = 0,983 %

on a une structure perlitique à 79%, presence de ferrite occupant 6 % et de fine lames de cementite libre 9% , le graphite de forme déchiqueté occupe 8 %.

EN CONCLUSION.

Après traitement thermique de graphitisation, il apparaît très clair que la ledeburite se décompose facilement pour un taux en chrome inférieur à 0,5 %, mais ce pourcentage dépassé, il en devient impossible (refroidissement dans le sable) la structure qui paraît être, la plus importante est celle où le % Ni=1%  
% Cr=0,5%

CHAPITRE IV.

- CARACTERISTIQUES MECANIQUES :

A - Essais de Traction :

- 1- principe de l'essai de traction
- 2- éprouvettes utilisées
- 3- schéma de principe
- 4- résultats
- 5- interprétation

B - Essais de résilience :

- 1- définition
- 2- principe de l'essai
- 3- schéma de principe
- 4- résultats
- 5- interprétations

C - Essai de duretés :

- 1- définition
- 2- essai Rockwell
- 3- schéma de principe
- 4- résultats
- 5- interprétations.

CARACTERISTIQUES MECANQUES.

A/ Essai de traction :

C'est le plus important des essais mécaniques pour l'ensemble caractéristiques qu'il fournit.

C'est un essai destructif qui se pratique sur éprouvette.

Les conditions expérimentales de l'essai se réfèrent à la norme NF A03.151.

1- Principe :

L'essai consiste à exercer un effort de traction progressif sur une éprouvette portant deux repères.

Au moyen d'un dispositif d'enregistrement, on détermine les allongements en fonction de la charge appliquée.

L'essai est poussé jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

2- Eprouvettes utilisées :

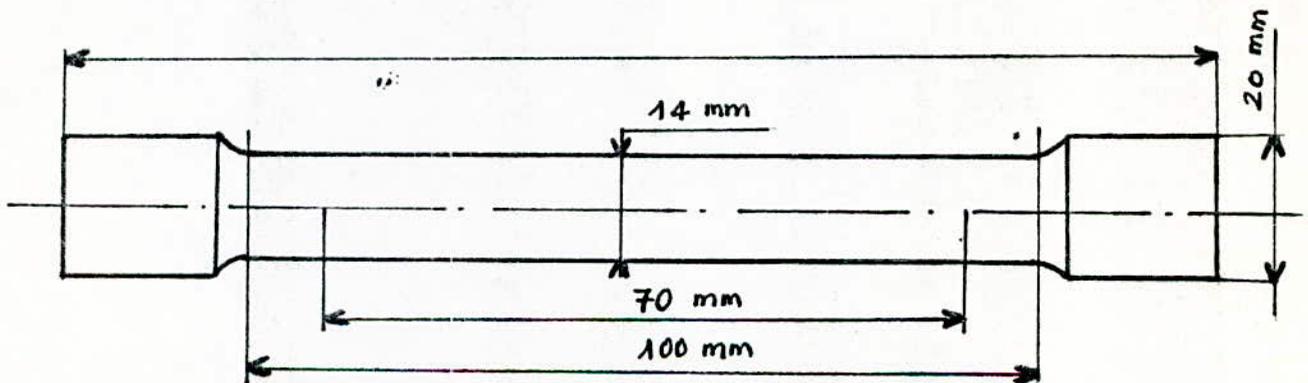
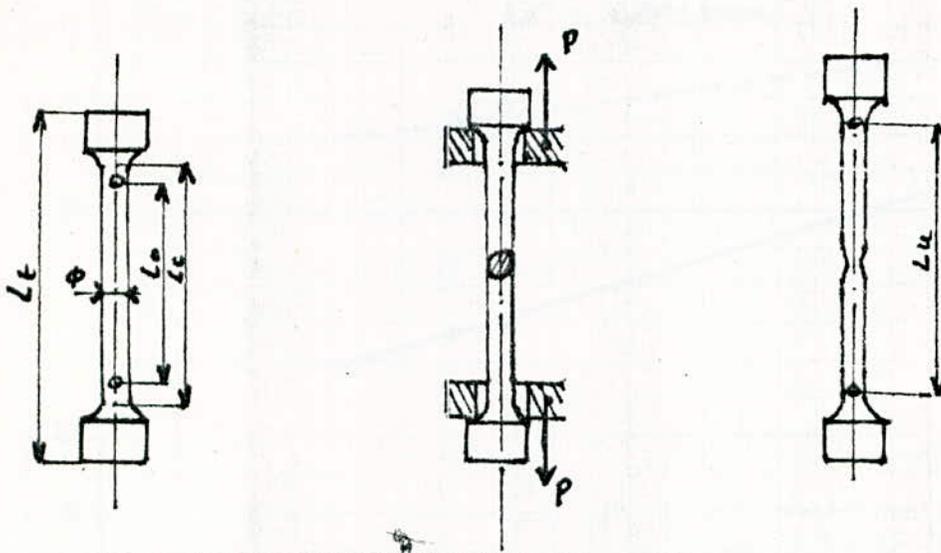


schéma de Principe :



$L_0$  = Longueur initiale entre repères.

$L_c$  = Longueur de la partie calibrée.

$L_t$  = Longueur totale.

$L_u$  = Longueur ultime entre repères après ruptures.

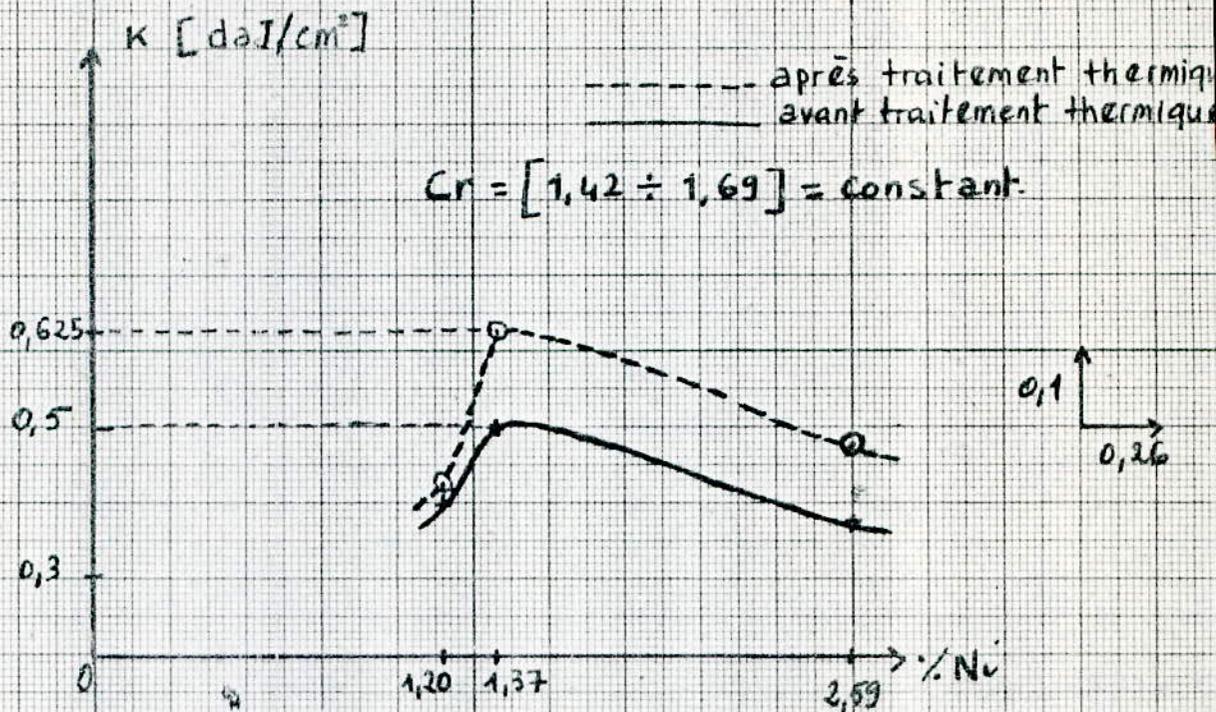
Résultats des essais de traction :

|                             |             |        |        |        |        |        |        |
|-----------------------------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| nuances                     | Ni = 1,069% | 0,952% | 1,197% | 1,203% | 1,372% | 2,953% | 0,346% |
|                             | Cr = 0,293% | 0,434% | 0,986% | 1,477% | 1,406% | 1,693% | 0,983% |
| $R_T$ (dan/mm)<br>avant T.T | 2 4,2       | 2 6,0  | 3 4,1  | 3 3,6  | 3 4,0  | 5 4,5  | 5 3,0  |
| $R_T$ (dan/mm)<br>après T.T | 5 3,2       | 5 9,2  | 5 9,8  | 6 2,0  | 6 4,0  | 6 9,6  | 5 9,0  |

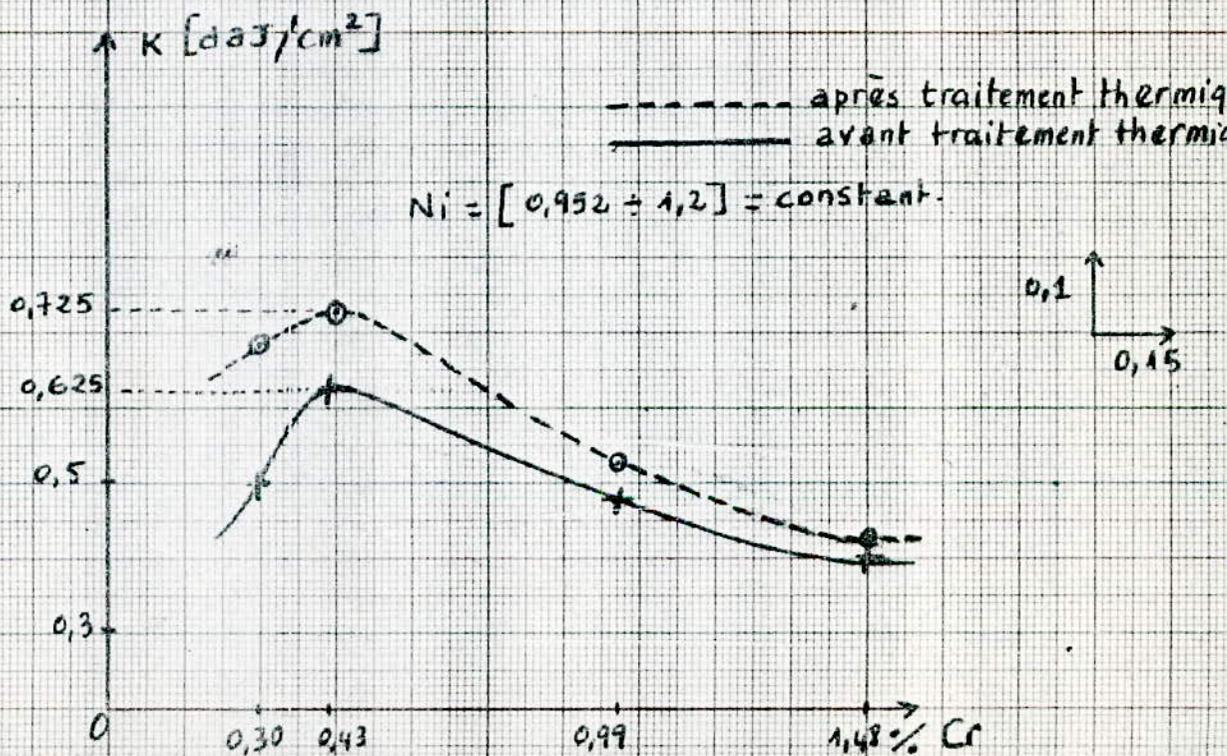
Résultats des essais de résilience

|                               |      |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Distances                     | % Ni | 1,069 | 0,952 | 1,197 | 1,203 | 1,372 | 2,593 | 0,346 |
|                               | % Cr | 0,292 | 0,434 | 0,986 | 1,477 | 1,416 | 1,693 | 0,983 |
| $\frac{W}{Cm^2}$<br>avant T.T |      | 0,5   | 0,625 | 0,475 | 0,4   | 0,5   | 0,375 | 0,350 |
| $\frac{W}{cm^2}$              |      | 0,68  | 0,725 | 0,525 | 0,42  | 0,625 | 0,475 | 0,525 |

Courbes :



variation de la résilience en fonction du pourcentage en nickel, à chrome constant.



variation de la résilience en fonction du pourcentage en chrome, à nickel constant.

Interprétation :

Le graphe de variation de la résilience en fonction du taux de nickel à chrome constant égal à 1,5 % nous montre que la résilience est améliorée par traitement thermique de graphitisation puisqu'on constate une évolution de cette dernière qui atteint son maximum à environ (1,5 % Ni et 1,5 % Cr) évaluée à 0,625 daj/cm<sup>2</sup>.

La courbe de variation de la résilience en fonction du taux de chrome, à nickel constant, égal à 1 %, atteint sa plus grande valeur à  $k = 0,725$  daj/cm<sup>2</sup> pour une composition évaluée à 1 % en Ni et 0,5 % Cr.

Donc, en conclusion, la résilience la plus adéquate est celle où le matériau est plus tenace et par conséquent pour une teneur en nickel égale à 1 % et 0,5 % de chrome et ceci est d'autant plus important du point de vue économique.

C - Duretés :

1- Définition :

La dureté d'un matériau est la résistance qu'il présente à la pénétration par un autre corps.

Les essais de dureté consistent à imprimer un pénétrateur dans le matériau et à déduire la dureté des dimensions de l'empreinte et de la charge appliquée.

2- Essai Rockwell :

Se basant sur le fait que l'essai à la bille de Brinell n'est pas applicable à la mesure de dureté élevées, en raison même des limites de possibilité de la bille, qui s'écrase au dessus de HB = 550, une intéressante machine d'essais physiques est imaginée par Rockwell et ceci, sous faible charge.

Elle présente les caractéristiques suivantes :

./.

Pénétrateur : cône diamant (120°) - bille  $\varnothing \frac{1}{16} - \frac{1}{8}$

Charge : suivant le pénétrateur

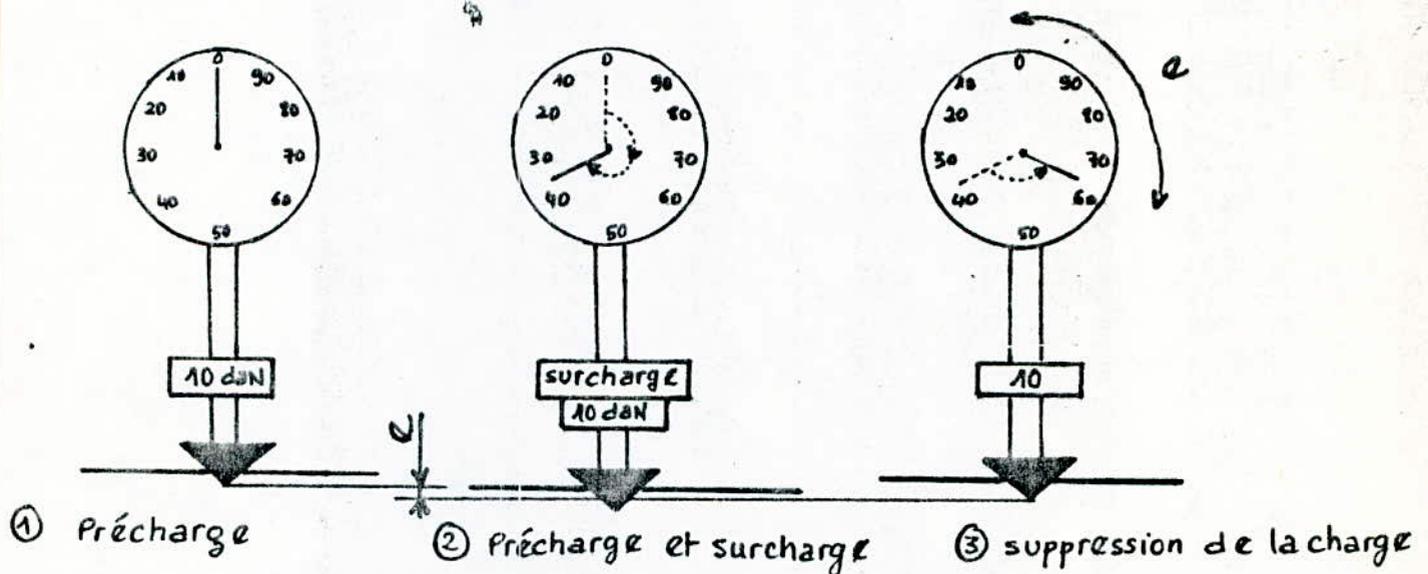
Mesure : profondeur de l'empreinte  $e$  en microns.

Calcul : il existe différentes échelles Rockwell suivant la charge et le pénétrateur utilisé.

$$\text{HRC et HRA} = 100 - \frac{e}{2}$$

$$\text{HRB et F} = 130 - \frac{e}{2}$$

3- Schéma de principe :



- Résultats des duretés en brute de coulée :

Nous avons pris des duretés, de la surface jusqu'au coeur, tout les 2mm et ceci dans le but de constater l'évolution de cette dureté en fonction de la profondeur.

Résultats des essais de dureté :

Mesures HRC

Machine utilisée : JAPONNAISE

Marque : SHIMADZU

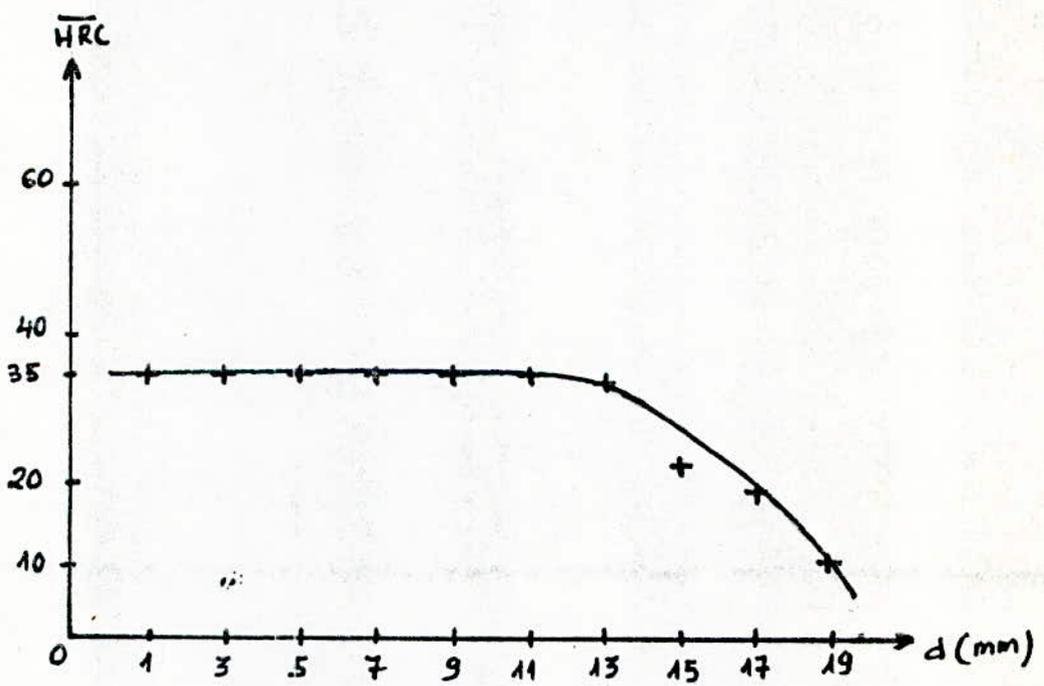
Les valeurs annoncées correspondent à la moyenne de 3 mesures par point.

Eprouvette N°1 :

Ni = 1,069%

Cr = 0,292%

|            |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Profondeur | 1  | 3  | 5  | 7  | 9  | 11 | 13 | 15 | 17 | 19 |
| HRC        | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 34 | 21 | 18 | 10 |



variation de la dureté en fonction de la profondeur

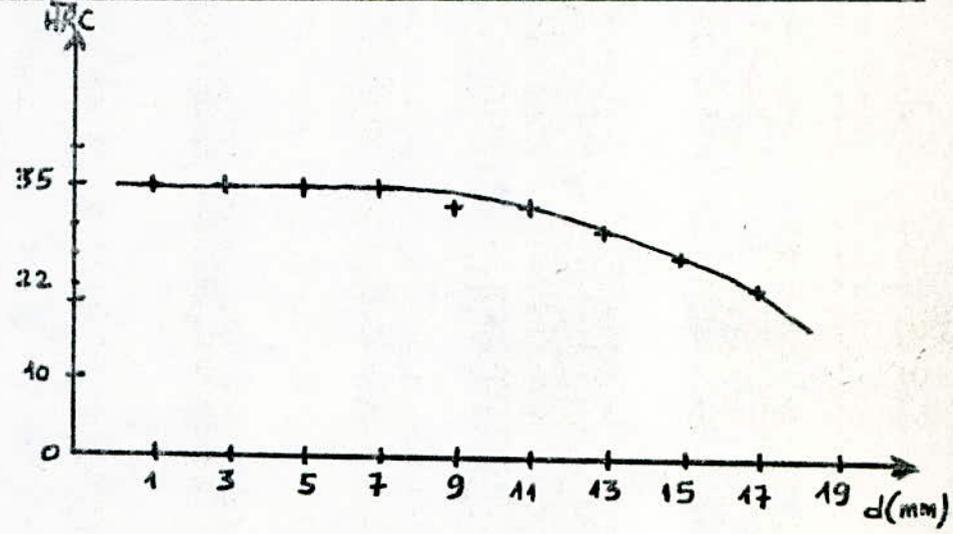
Eprouvette N°2 :

Ni = 0,952%

Cr = 0,434%

|                 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Profondeur (mm) | 1  | 3  | 5  | 7  | 9  | 11 | 13 | 15 | 17 | 19 |
| HRC             | 35 | 35 | 35 | 35 | 33 | 33 | 30 | 26 | 26 | 22 |

Variation de la dureté en fonction de la profondeur



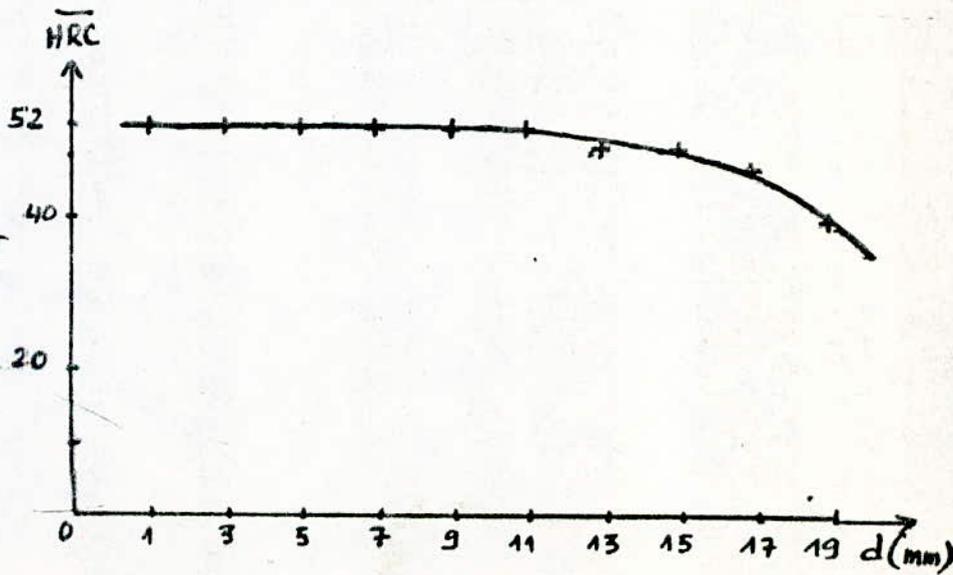
Eprouvette N°3 :

Ni = 1,197%

Cr = 0,986%

|                 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Profondeur (mm) | 1  | 3  | 5  | 7  | 9  | 11 | 13 | 15 | 17 | 19 |
| HRC             | 52 | 52 | 52 | 52 | 52 | 52 | 50 | 50 | 48 | 40 |

Variation de la dureté en fonction de la profondeur



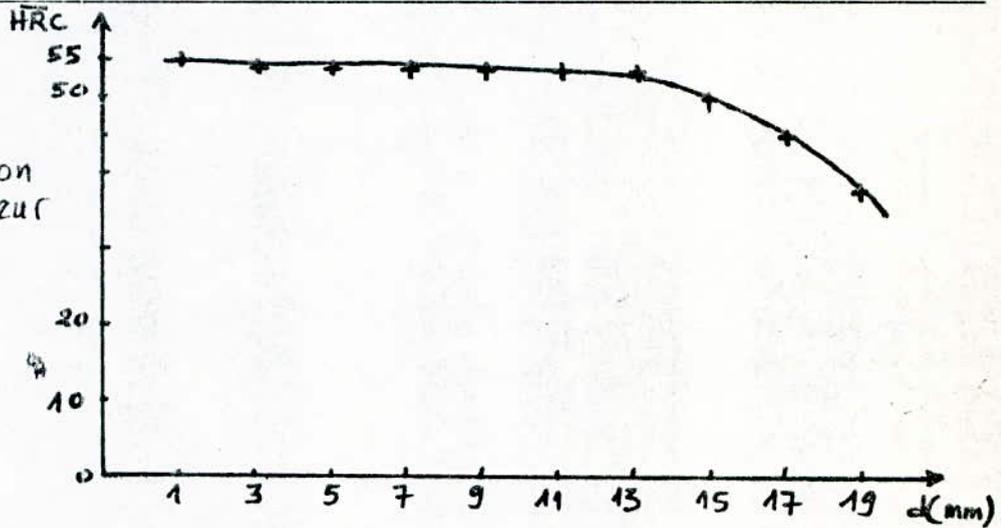
Eprouvette N°4 :

Ni = 1,203%

Cr = 1,477%

|                 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Profondeur (mm) | 1  | 3  | 5  | 7  | 9  | 11 | 13 | 15 | 17 | 19 |
| HRC             | 55 | 54 | 54 | 54 | 54 | 54 | 54 | 50 | 45 | 38 |

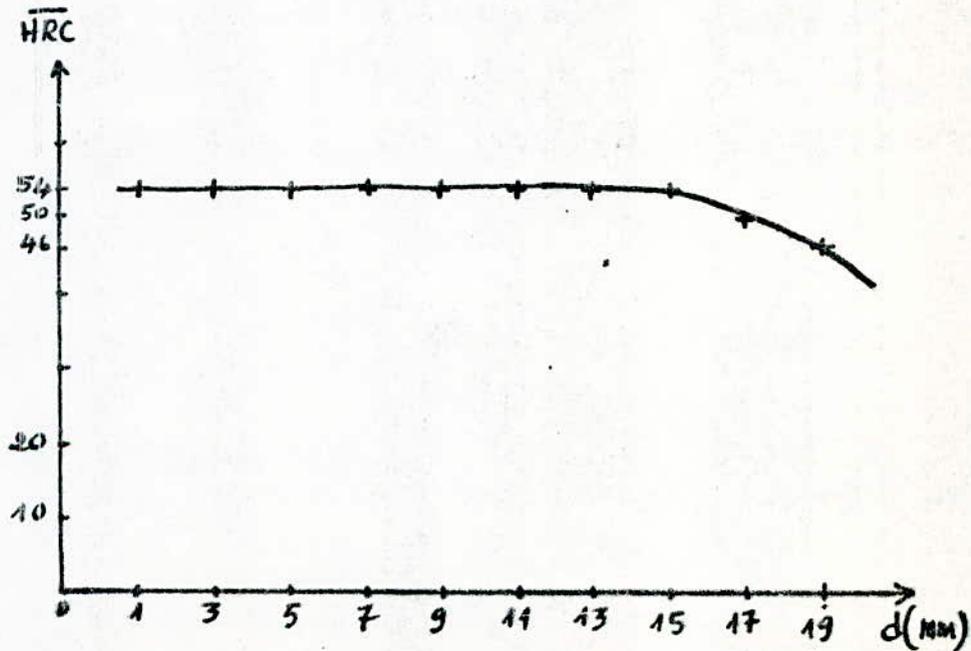
variation de la dureté en fonction de la profondeur



Eprouvette N°5 :

|                 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Profondeur (mm) | 1  | 3  | 5  | 7  | 9  | 11 | 13 | 15 | 17 | 19 |
| HRC             | 54 | 54 | 54 | 54 | 54 | 54 | 54 | 54 | 50 | 46 |

variation de la dureté en fonction de la profondeur



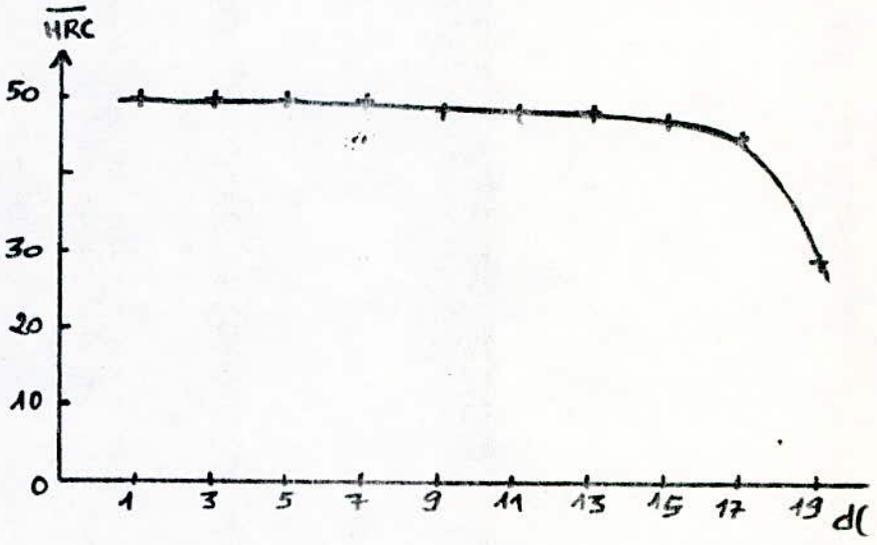
Eprouvette N°6 :

Ni = 2,593%

Cr = 1,693%

|                 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Profondeur (mm) | 1  | 3  | 5  | 7  | 9  | 11 | 13 | 15 | 17 | 19 |
| HRC             | 50 | 50 | 50 | 50 | 49 | 49 | 49 | 48 | 46 | 30 |

Variation de la dureté en fonction de la profondeur



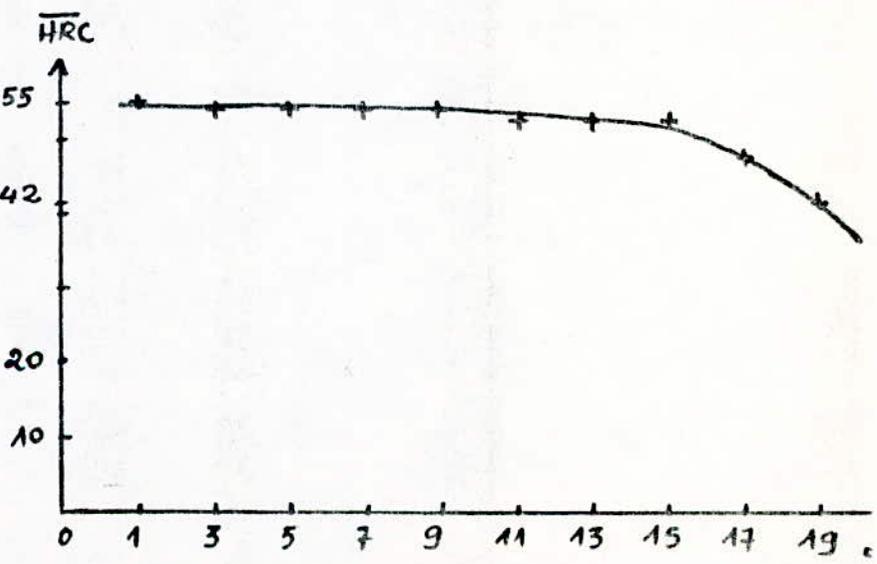
Eprouvette N°7 :

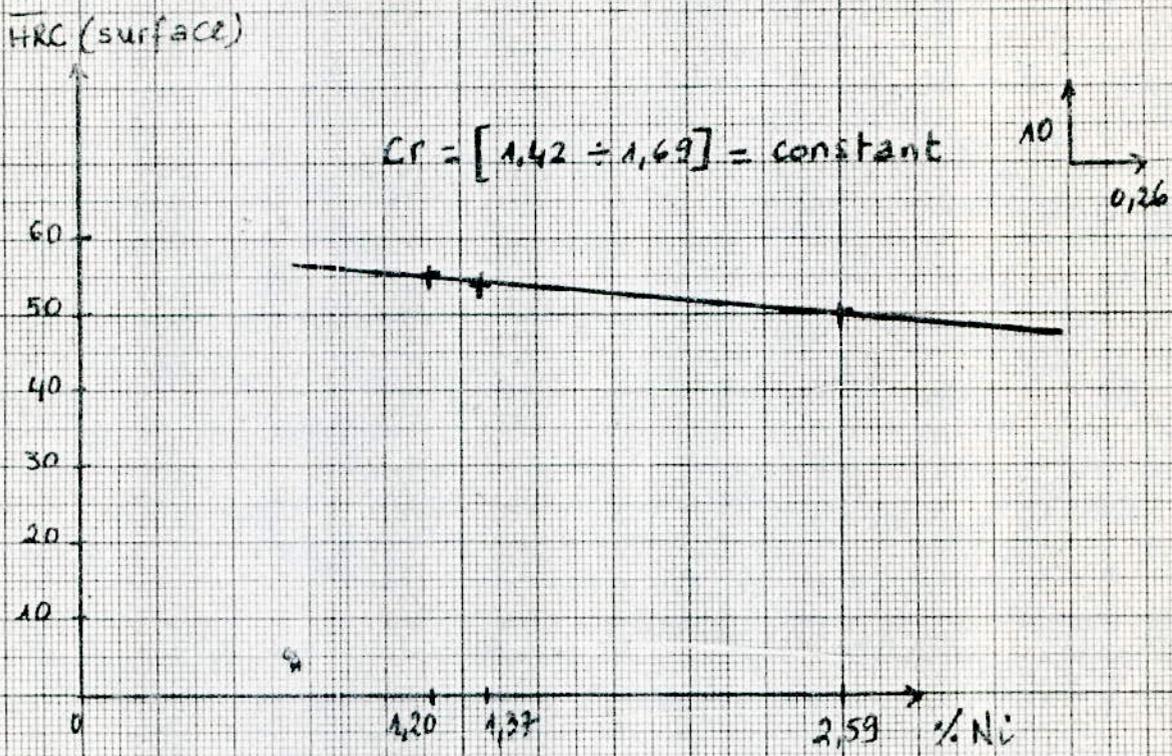
Ni = 0,346%

Cr = 0,983%

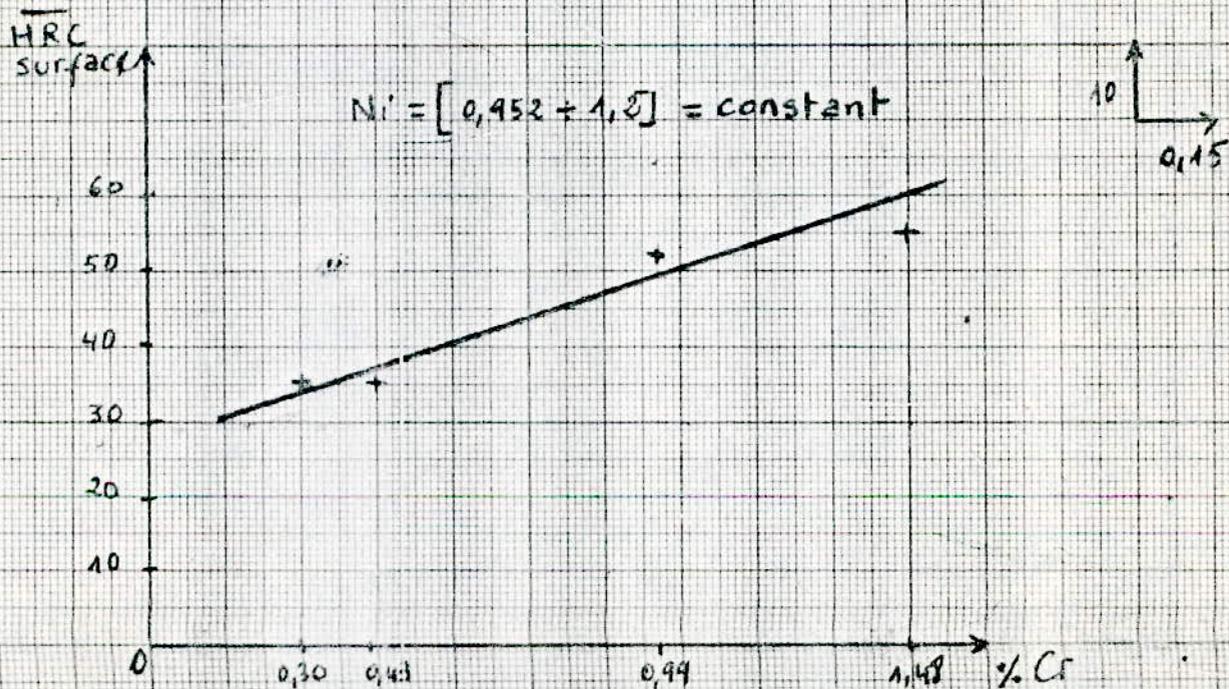
|                 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Profondeur (mm) | 1  | 3  | 5  | 7  | 9  | 11 | 13 | 15 | 17 | 19 |
| HRC             | 55 | 54 | 54 | 54 | 54 | 52 | 52 | 52 | 48 | 42 |

Variation de la dureté en fonction de la profondeur





Variation de la dureté en fonction du pourcentage en nickel, à chrome constant.



In Variation de la dureté en fonction du pourcentage en chrome, à nickel constant.

INTERPRETATION :

La mesure des duretés HRC en fonction de la profondeur nous montre de manière très claire, que la dureté diminue de la surface au coeur, ce qui l'implique, une diminution de la quantité de perlite, qui est le constituant le plus dur, dans la structure et ceci du fait que la quantité de micro-porosités dans la structure diminue au cours du refroidissement, ce qui aboutit à une texture plus dense et donc plus résistante à la déformation.

En outre, des duretés ont été prise à la surface de chaque nuance, afin de constater l'évolution de HRC en fonction du taux de Nickel, à chrome constant, égal à 1,5% et on a constaté que la dureté diminuait au fur et à mesure que le pourcentage en nickel augmentait et ceci est, du fait que, pour une teneur en chrome supérieure à 1%, il devient blanchissant et par conséquent diminuait la dureté.

Par contre, la variation de dureté HRC (surface) en fonction du taux de chrome, à nickel constant, égal à 1% implique une croissance de la dureté car, le chrome durcit la fonte s'il est utilisé jusqu'à 1%.

C H A P I T R E V.

Etude Statistique.

L'étude statistique envisagée consiste à évaluer les différents taux de graphite, cementite, perlite et ferrite en fonction des taux de Nickel, à chrome constant et en fonction du pourcentage de chrome, en maintenant le Nickel constant, et ce avant et après traitement de graphitisation.

Ceci est d'autant plus important, puisque il permet de constater l'évolution des taux de graphite, cementite, perlite et ferrite en fonction des faibles additions envisagées.

Résultats :

1 - Brute de coulée :

| NUANCE      | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|
| GRAPHITE %  | 5 %  | 3 %  | 5 %  | 6 %  | 8 %  | 5 %  | 6 %  |
| CEMENTITE % | 32 % | 29 % | 29 % | 34 % | 22 % | 32 % | 19 % |
| PERLITE %   | 63 % | 68 % | 66 % | 60 % | 70 % | 63 % | 75 % |
| FERRITE %   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

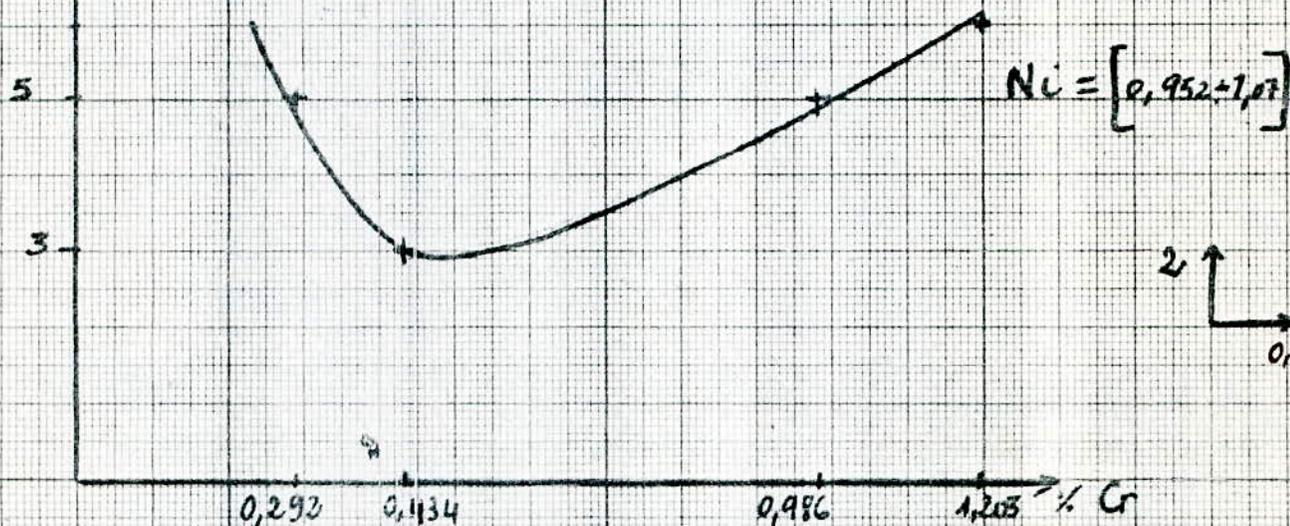
2 - Après Graphitisation :

| NUANCE    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5      | 6    | 7    |
|-----------|------|------|------|------|--------|------|------|
| GRAPHITE  | 16 % | 14 % | 15 % | 15 % | 17 %   | 7 %  | 8 %  |
| CEMENTITE | 2 %  | 0 %  | 15 % | 16 % | 10 %   | 30 % | 9 %  |
| PERLITE   | 48 % | 70 % | 68 % | 68 % | 72,5 % | 63 % | 79 % |
| FERRITE   | 36 % | 16 % | 2 %  | 1 %  | 0,5 %  | 0 %  | 6 %  |

N.B. Le taux, constitue une moyenne de 4 valeurs pour chaque nuance.

### Etude statistique du taux de graphite (brute de coulée)

% Graphite



variation du taux de graphite en fonction  
du taux de chrome, à nickel constant.

% Graphite

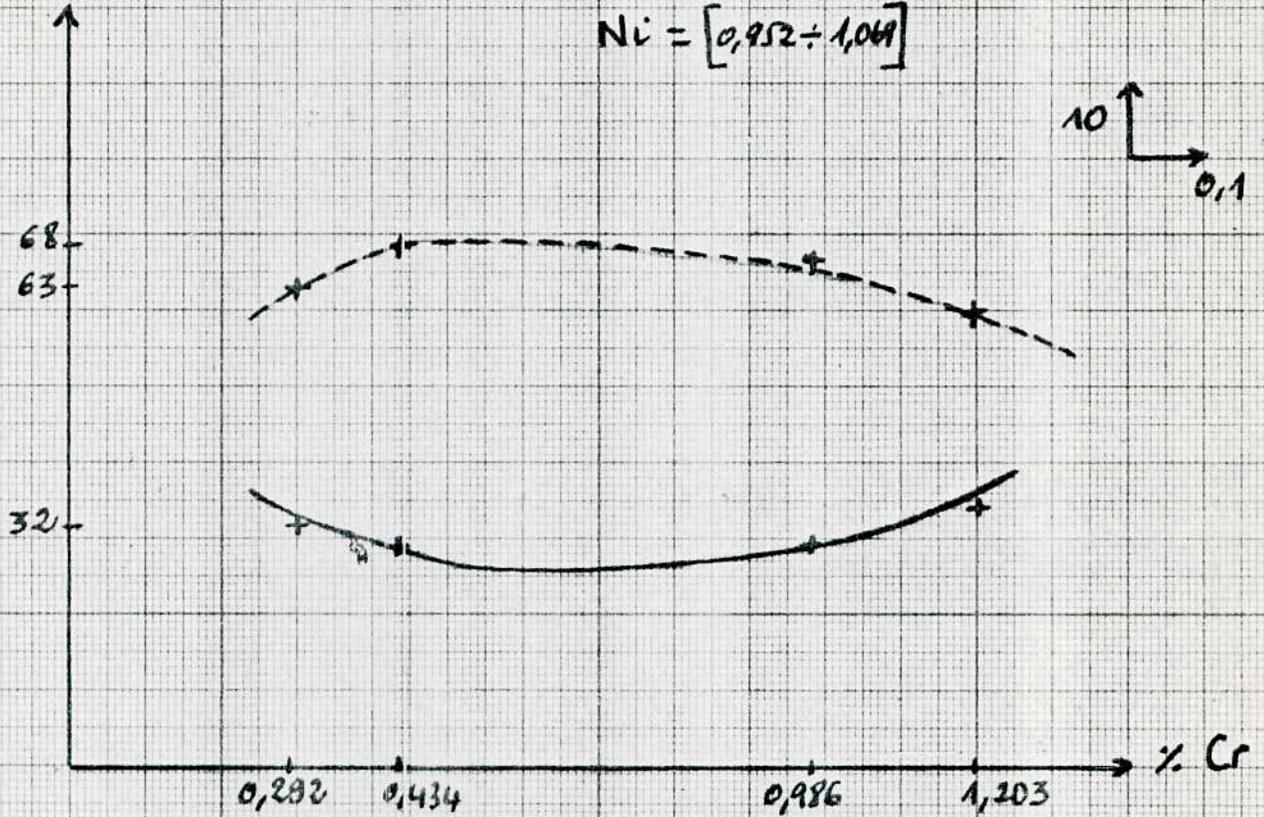


variation du taux de graphite en fonction du  
taux de nickel, à chrome constant.

variation du taux de perlite et de cémentite en fonction du taux de chrome, à nickel constant

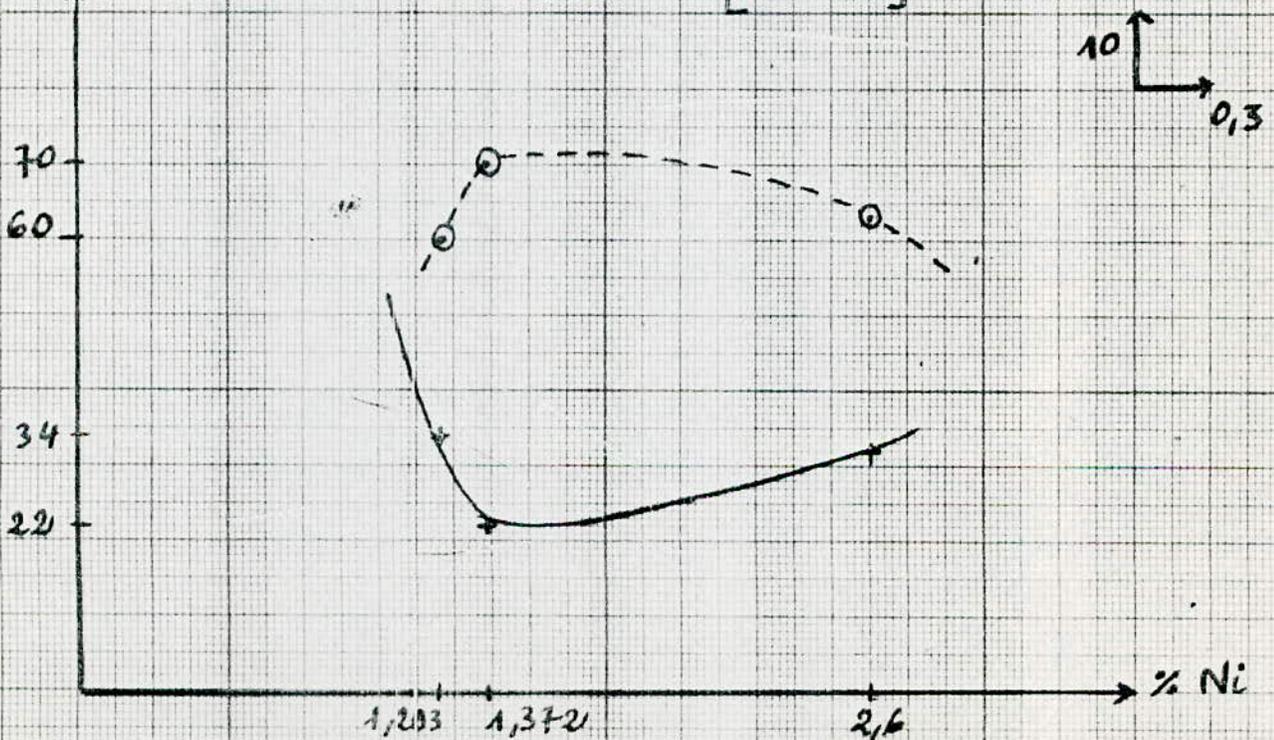
% Perlite -----  
% Cémentite -----

$Ni = [0,952 \div 1,069]$



% Perlite -----  
% Cémentite -----

$Cr = [1,42 \div 1,69]$



variation du taux de perlite et de cémentite en fonction du taux de nickel à chrome constant

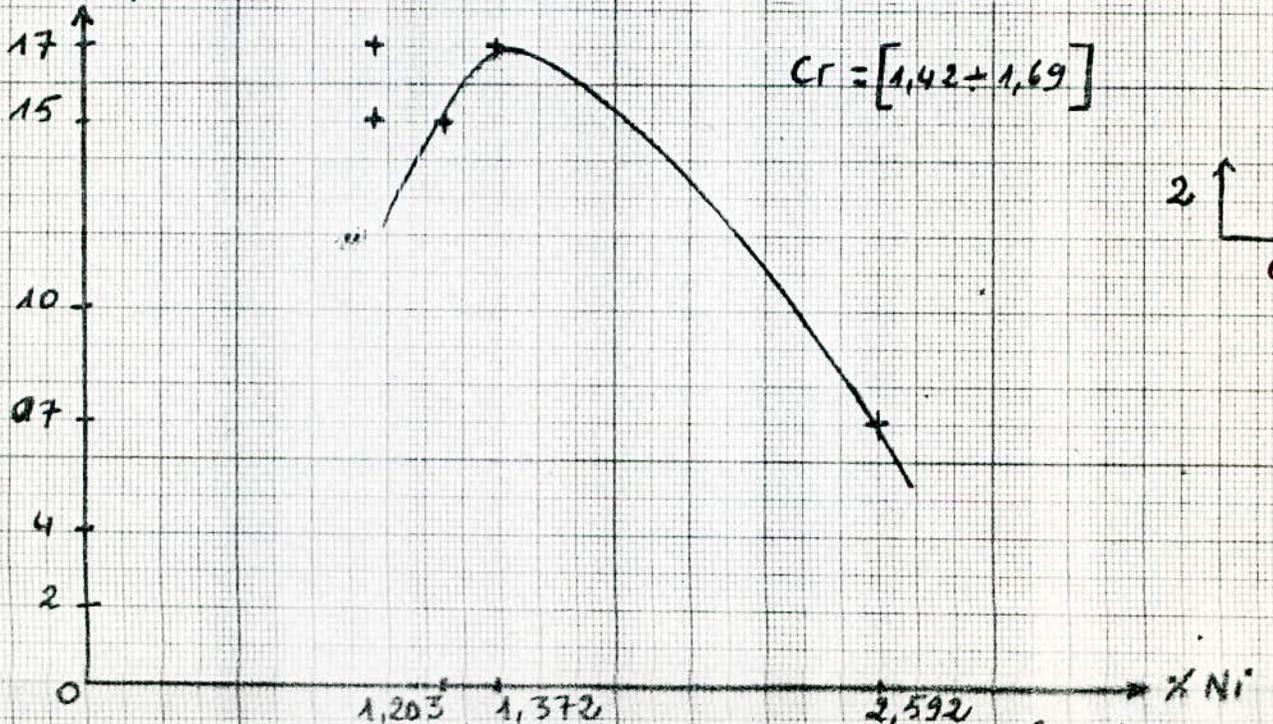
Etude statistique du taux de graphite après traitement de graphitisation

% Graphite



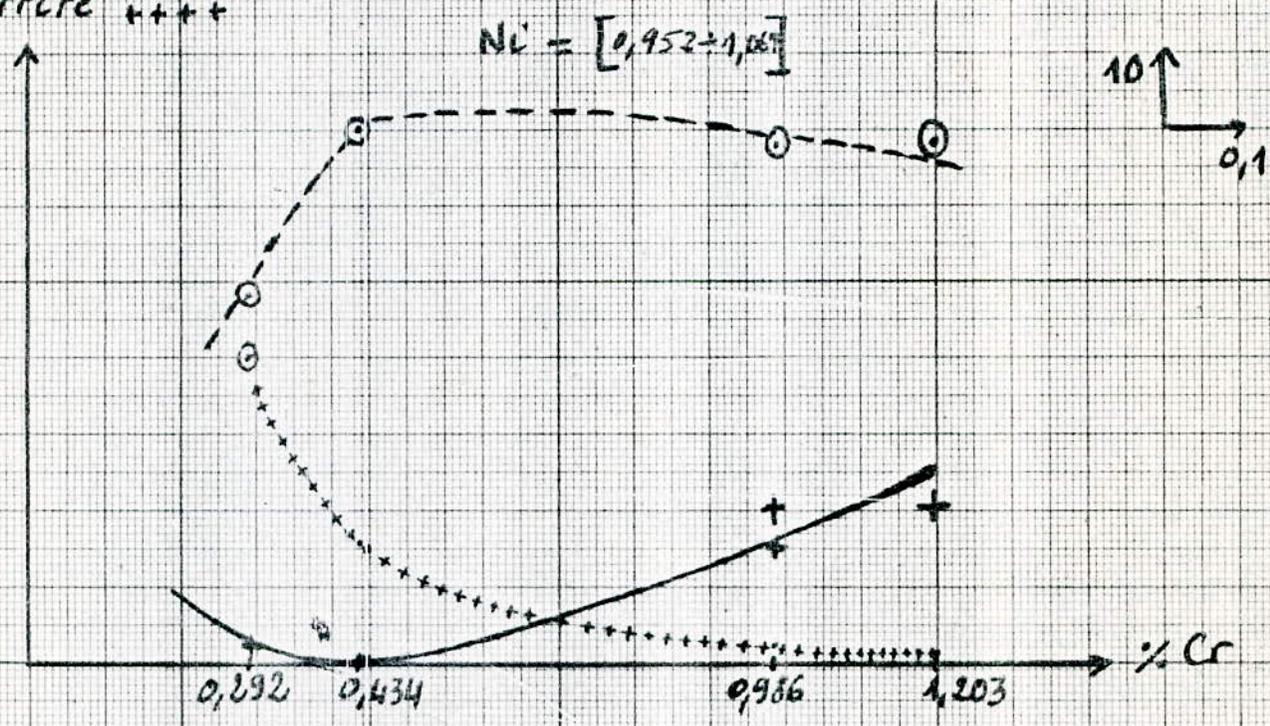
variation du taux de graphite en fonction du taux de chrome, à nickel constant.

% Graphite



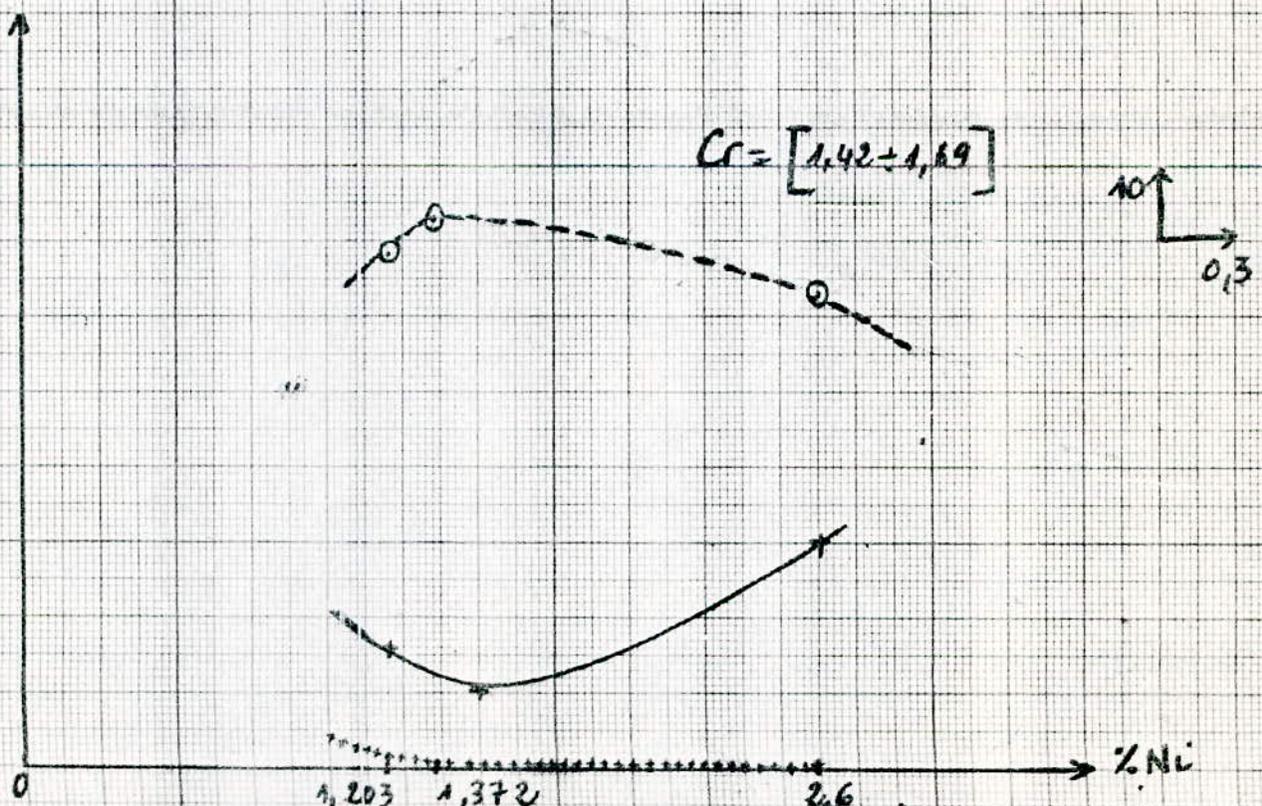
variation du taux de graphite en fonction du taux de nickel, à chrome constant.

% Perlite ----  
 % Cementite ———  
 % ferrite +++++



% Perlite ----  
 % Cementite ———  
 % ferrite +++++

Variation du taux de perlite, Cementite et ferrite en fonction du taux de chrome, à nickel constant.



variation du taux de perlite, Cementite et ferrite en fonction du taux de nickel, à chrome constant.

Interprétation :

Les courbes de variation des taux de graphite, cementite, perlite en fonction de celui du chrome, à nickel constant égal à 1% montre que si :

% cr < 0,5%

Il apparait une diminution du taux de graphite qui passe de 5% pour 0,292% en chrome à 3% dans le cas de 0,434% Cr. Cette diminution, engendre, une baisse du taux de cementite et par conséquent, le taux de graphite baisse.

% Cr > 0,5%

Augmentation du taux de graphite qui engendre de grande plage de cementite, ce qui implique une baisse de la teneur en perlite; le métal devient fragile.

à chrome constant, égal à 1,5% ; si :

% Ni < 1,5%

Augmentation du taux de graphite engendrant un blanchissement de la matrice, le taux de perlite est croissant.

% Ni > 1,5%

Baisse du taux de graphite, augmentation du taux de cementite et diminution de perlite.

Conclusion

A teneur en chrome inférieure à 0,5%, le nickel est perlitisant, si le pourcentage en chrome est supérieure à 0,5% le chrome devient blanchissant.

Après traitement de graphitisation :

Ni 1% et Cr : variable

% Cr < 0,5%

Diminution du taux de graphite qui implique une baisse du pourcentage de cémentite donc augmentation de perlite, il ya aussi apparition de ferrite qui provient de la décomposition de l'austénité, et qui diminue en teneur à cause de l'effet blanchissant du chrome.

% Cr > 0,5%

Accroissement du taux de graphite ~~et~~ cémentite ~~et~~ diminution de la perlite et de la ferrite, le chrome est blanchissant et il est impossible de décomposer la lédeburite dans le cas d'un refroidissement dans le sable.

% Cr = 0,434%, pas de traces de cémentite, structure ferrito-perlitique

Cr=1,5 et Ni variable :

% Ni < 1,5%

La teneur en graphite est importante et le taux en cémentite diminue ce qui engendre une augmentation de perlite présence de traces de ferrite.

Le chrome est durassant.

% Ni > 1,5 %

diminution du taux de graphite, présence de cémentite, diminution du taux de perlite la ferrite se trouve a l'état de traces. L'effet blanchissant du chrome prédomine.

CONCLUSION :

Cette étude a permis de donner une idée générale sur les structures et les propriétés mécaniques de la fonte G.S.C., dans le cas de faibles additions de Nickel-chrome qui tendent à élever ces propriétés mécaniques à condition que le taux de Nickel soit égal à 1 % et celui du Chrome à 0,5 %, et ce qui est bon du point- de vue économique.

Il est aussi souhaitable que cette étude soit complétée par d'autres et de voir l'influence de la vitesse de refroidissement sur ces structures.

B I B L I O G R A P H I E.

|      |                                      |                          |
|------|--------------------------------------|--------------------------|
| 1 -  | Métaux usuels                        | A. ROST                  |
| 2 -  | Métallurgie Tome 2 alliages ferreux. | J. Barralis<br>G. Maeder |
| 3 -  | Nouveau traité de chimie minérale    | P. Pascal                |
| 4 -  | Métallurgie de fonderie              | M. Geier                 |
| 5 -  | Précis de fonderie                   | G. Facy<br>M. Pompidou   |
| 6 -  | Techniques de l'ingénieur            | M.                       |
| 7 -  | Traitements thermiques des métaux    | G. de SMET               |
| 8 -  | Métallurgie                          | Chaussin et Hilly        |
| 9 -  | Projet de fin d'étude                | A. JOUCDAR               |
| 10 - | Revue de métallurgie n°1             | 1979                     |
| 11 - | Revue de traitement thermique n°199  | Mars 1986                |
| 12 - | Hommes et fonderie                   | Decembre 1977            |
| 13 - | Fonderie 381                         | Aout - Sept 1978         |
| 14 - | Traitements thermiques (cours        | M. SALHI.                |

