

2/75

UNIVERSITE D'ALGER

2 ex

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT MINES ET METALLURGIE

Projet de Fin d'Etudes présenté par Mustapha BENCHIKH

ETUDE DE LA CEMENTATION
INDUSTRIELLE

Sujet proposé :
par SONACOME

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية

— المكتبة —

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHÈQUE

Dirigé :
par M. LECOMTE

-- AVANT PROPOS --

Nous ne saurions présenter cette étude sans exprimer nos remerciements :

- à tous les Professeurs de l'Ecole Nationale Polytechnique qui ont contribué à notre formation, en particulier, Monsieur LECOMTE qui a bien voulu diriger cette étude, lui qui a su si bien nous accueillir chaque fois, et qui nous a toujours largement fait profiter de ses remarques.

- à la Direction de la SO. NA. CO. ME (C. V. I.), qui a bien voulu nous accueillir en tant que stagiaire et qui n'a jamais hésité de mettre à notre disposition les moyens nécessaires pour l'élaboration de ce modeste travail, plus particulièrement à Monsieur FAID, Directeur Technique, pour toute son aide soutenue et son soutien moral.

- à Monsieur BERTHELEMY, Chef du Laboratoire, qui nous a aidé et dont les conseils éclairés ont permis l'achèvement de ce travail.

Et enfin, que tous ceux qui de loin ou de près ont contribué à l'élaboration de cette étude, trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.

-o- S O M M A I R E -o-

INTRODUCTION	Page 1
PREMIERE PARTIE	P.
Etude théorique de la cémentation	P. 3
1 - PRINCIPE	
11 - L'acier	
111 - Le carbone dans l'acier	
112 - Les autres éléments d'alliage	
12 - La structure martensitique	P. 6
2 - PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DE LA CEMENTATION	P. 7
21 - Rôle de la diffusion dans la cémentation	
22 - Rôle particulier du carbone	P. 8
23 - Equilibres chimiques réversibles	P. 9
24 - Réaction de base	
25 - Equilibre de Boudouard	P. 10

26 - Production de C O	P.	11
27 - Réaction chimique en surface	P.	12
28 - Etude de la diffusion	P.	13
281 - Définition		
282 - Coefficient de diffusion	P.	14
283 - Loi générale de la diffusion	P.	
284 - Cémentation dans le cas idéal	P.	15
285 - Première retouche au cas idéal	P.	16
286 - Deuxième retouche au cas idéal	P.	18
287 - Troisième retouche au cas idéal	P.	20
288 - Influence des éléments de substitution sur l'activité et le coefficient de diffusion		22
289 - Influence de la température et de divers facteurs	P.	23
2891 - Variation du coefficient de diffusion avec la température	P.	23

33 - Durée et profondeur de cémentation P. 34

34 - Manutention

35 - Préchauffage

36 - Trempe

37 - Dangers d'emploi des cyanures

4 - CEMENTATION GAZEUSE P. 36

41 - Principe

42 - Mélange gazeux utilisés P. 37

43 - Avantages de la cémentation gazeuse

44 - Suivi de la cémentation gazeuse dans le four MECI

45 - Atmosphères contrôlées P. 38

451 - Généralités sur les atmosphères contrôlées

4511 - Principales réactions en présence
du fer et des aciers P. 39

4512 - Equilibres chimiques et atmosphères contrôlées		
452 - Atmosphère réductrice et carburante par H ₂ et CO		42
4521 - Rôle de l'hydrogène dans la cémentation par C O	P.	43
4522 - Utilisation de la teneur en CO ₂ pour contrôler l'atmosphère	P.	
4523 - Utilisation du point de rosée pour contrôler l'atmosphère	P.	45
4524 - Courbes d'équilibre		
4525 - Carburation et décarburation	P.	46
453 - Atmosphère réactive	P.	47
454 - Comparaison des deux systèmes de production d'atmosphère	P.	48

5 - ACIERS DE CEMENTATION

P 49

51 - Choix

52 - Eléments nuisibles dans les aciers de cémentation

53 - Dimension du grain de l'acier

54 - Nuance d'acier

P. 50

55 - Choix du cycle

P. 51

6 - TRAITEMENTS APRES CEMENTATION

P. 52

61 - Trempe directe

62 - Trempe différée

63 - Double trempe

P. 54

64 - Revenu

65 - Grenailage

66 - Conséquences pratiques

P. 55

7 - STRUCTURES DES COUCHES CEMENTEES	P.	56
8 - CONTRÔLES DES PIÈCES CEMENTEES	P.	57
81 - Définition de l'épaisseur de la couche cimentée		
82 - Machine d'essai de dureté, pour la détermination de la profondeur des couches cimentées		
821 - Dans l'atelier		
822 - Au laboratoire	P.	58
83 - Machine d'essai de dureté pour la détermination de la dureté des pièces cimentées trempées	P.	59
84 - Micrographie : contrôle des structures	P.	60
841 - Contrôle des structures cimentées		
842 - Contrôle des structures cimentées-trempées		59
85 - Conclusion		

9 - QUALITES ET DEFAUTS DES PIECES CEMENTEES	P.	61
91 - Influence de la température		
92 - Influence de l'acier		
93 - Dureté insuffisante	P.	62
931 - Insuffisance de cémentation		
932 - Mauvaise trempe		
94 - Ecaillages, criques, tapures	P.	63
95 - Déformation des pièces cimentées		

TROISIEME PARTIE

Fours de cémentation à la SONACOME	P.	65
1 - FOUR A BAIN DE SEL	P.	66
2 - FOURS VERTICAUX DE CEMENTATION GAZEUSE	P.	69
3 - FOUR A BAC DE TREMPE INCORPORÉ	P.	73
4 - REACTEURS ENDOTHERMIQUES	P.	75
5 - APPAREILLAGES DE CONTROLE DES ATMOSPHERES	P.	78

CONCLUSION GENERALE

P. 81

BIBLIOGRAPHIE

P. 82

oOo

- INTRODUCTION -

Le travail de l'acier et son emploi dans la fabrication de produits de haute résistance à la corrosion et à l'usure ont une importance sans cesse grandissante par suite de la mécanisation continuelle de l'industrie, qui demande sans arrêt des produits de hautes qualités à propriétés mécaniques élevées.

La résistance à l'usure demande une forte dureté superficielle et cette qualité correspond à celle des aciers riches en carbone, dans lesquels, pendant le traitement thermique, des méthodes appropriées permettent de conserver la teneur superficielle en carbone.

La trempe de tels aciers, à partir d'une température élevée convenable, se traduit par un durcissement de toute la masse et, dans certaines applications telles que les engrenages, où l'on demande également une certaine résistance au choc, un tel matériau est trop fragile pour assurer un service satisfaisant.

Le meilleur matériau est celui qui a simultanément une surface dure et un coeur souple ; ce dernier a une résilience qui lui permet de résister aux chocs tandis que la surface a toutes les qualités requises pour bien se comporter vis à vis de l'usure.

.../...

La réalisation de cette exigence fait appel de manière générale au traitement thermo-chimique qui est un enrichissement superficiel de l'acier en tel ou tel élément, par sa diffusion, à partir d'un milieu extérieur porté à une température élevée.

Ceci va permettre de conférer à cette couche superficielle des caractéristiques, mécaniques, physiques ou chimiques particulières.

Voici quelques procédés de traitement thermo-chimique en fonction des éléments employés comme agents d'enrichissement superficiel.

- . cémentation : c'est un enrichissement superficiel en carbone
 - . nitruration : " " " " azote
 - . carbonitruration : " " " " carbone et
" azote.
 - . chromisation : " " " " chrome
 - . boruration : " " " " bore
- etc.....

Nous nous intéresserons qu'à la cémentation au carbone, la plus répandue au point que lorsqu'on parle de cémentation sans autre précision, on entend "cémentation au carbone".

Mais suivant la source de carburation, on distingue trois types de procédés de cémentation :

- . cémentation solide : la plus ancienne.
- . cémentation liquide : dans les bains de sel.
- . cémentation gazeuse : dans les atmosphères contrôlées.

:- PREMIERE PARTIE -:

-o- ETUDE THEORIQUE DE LA CEMENTATION -o-

1 - PRINCIPE :

La cémentation effectuée sur pièce à sa forme quasi 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. Ce traitement métallurgique comprend trois fonctions :

- * Réaction chimique à haute température du milieu ambiant sur la surface de la pièce. avec fixation de carbone.
- * simultanément diffusion du carbone dans les couches superficielles de l'acier qui est à l'état austénitique.
- * traitement thermique consécutif ayant pour effet, par le mécanisme de la trempe de durcir les couches cémentées.

11 - L'acier :

111 - Le carbone dans l'acier :

On connaît deux formes allotropiques du fer α et Le fer γ existe aux températures inférieures à 910°C et supérieures à 1 401°C.

Dans l'intervalle de températures comprises entre 1 401 et 1 539°C, le fer α est désigné souvent par la lettre δ . le fer α a un réseau cubique centré, jusqu'à 768°C (point de curie) de fer α est magnétique. Le fer α ne dissout presque pas le carbone ; à 723°C la solubilité maximale du carbone dans le fer α est de 0,025%. La solution solide d'insertion du carbone dans le fer α s'appelle ferrite.

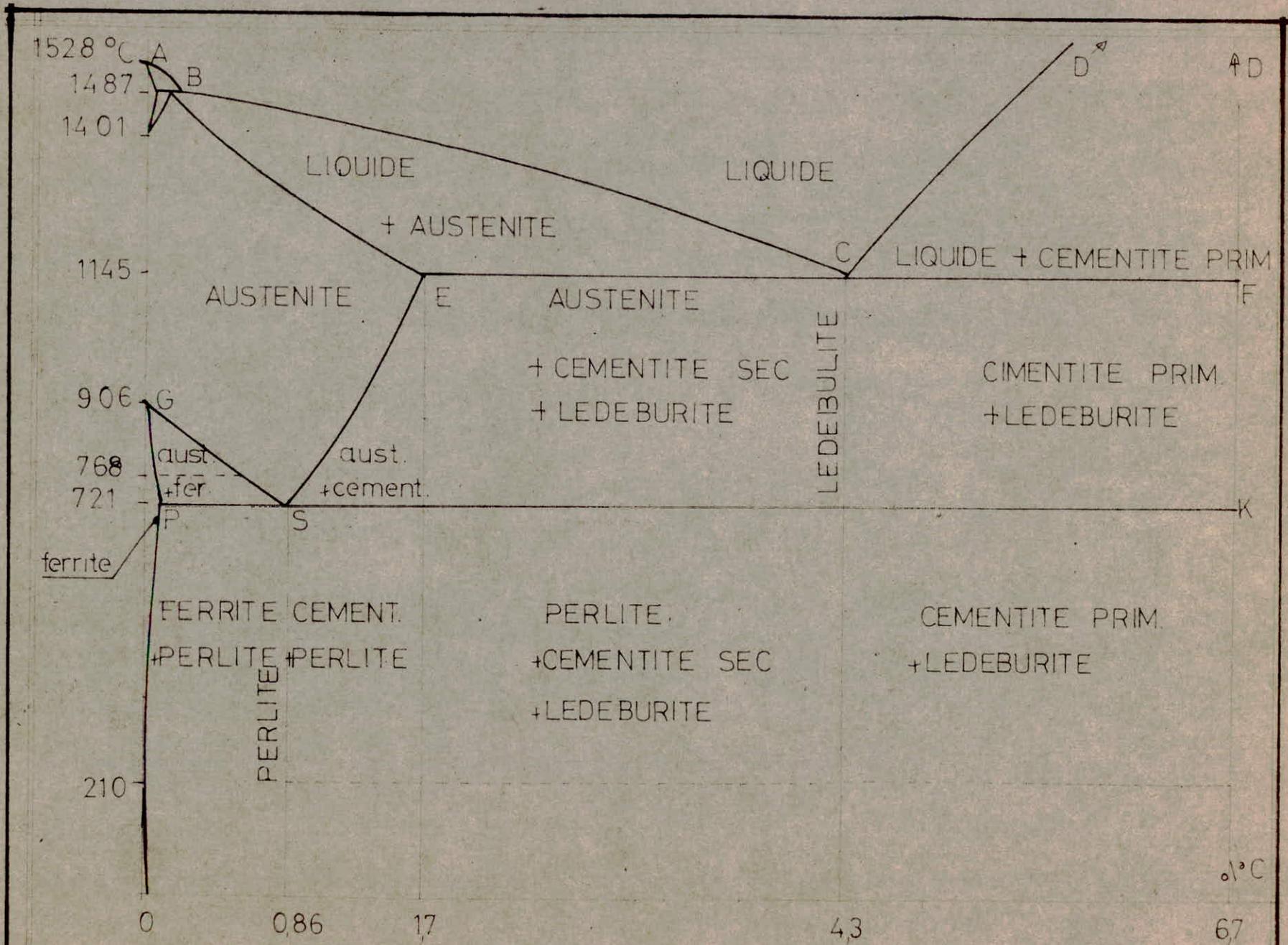


DIAGRAMME FER-CEMENTITE

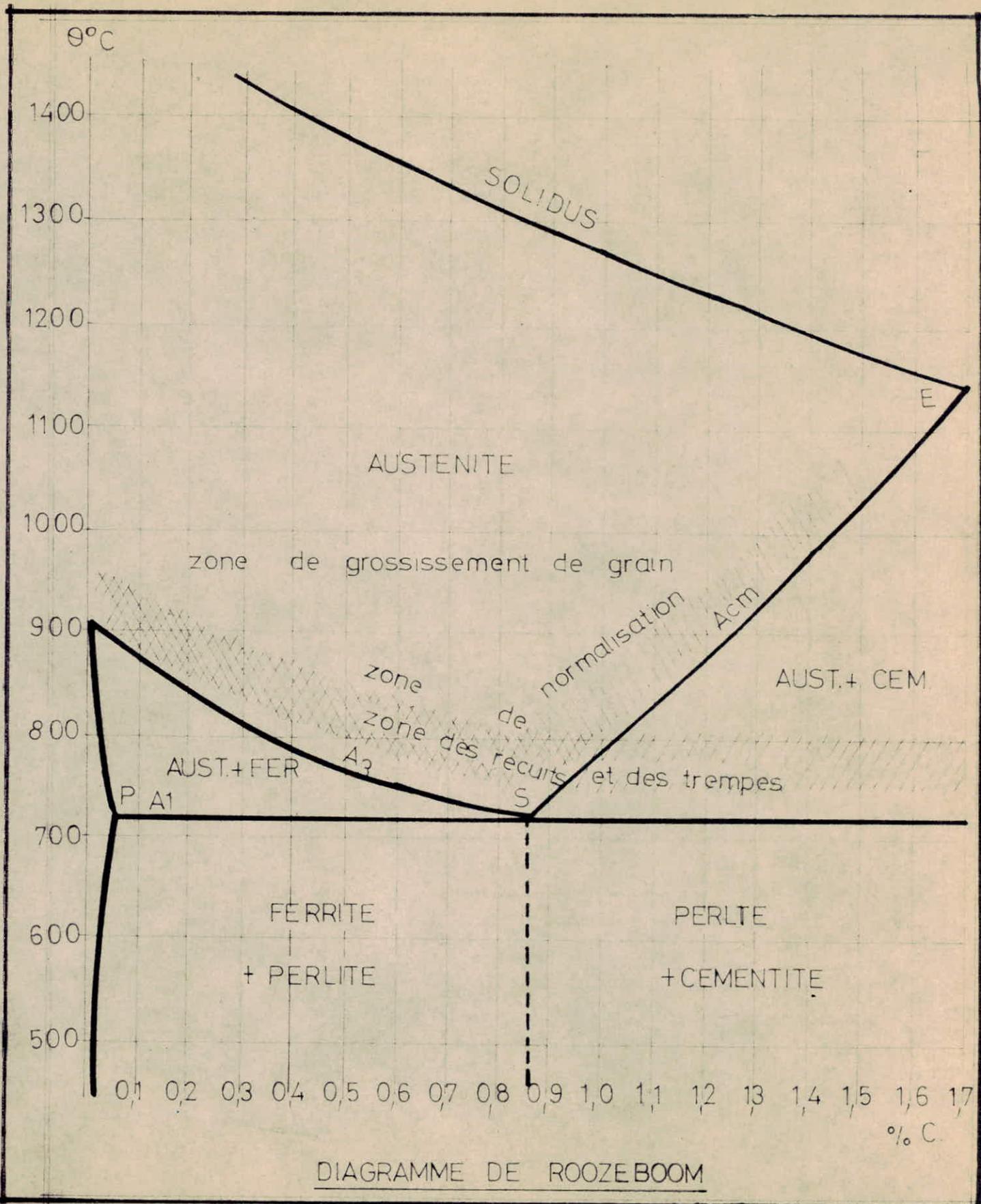


DIAGRAMME DE ROOZEBOOM

Le fer γ existe à partir de 910°C dont le réseau cristallin est cubique à faces centrées. Le fer γ est faiblement magnétique (paramagnétique). La solubilité du carbone dans le fer γ à 1 130°C atteint 2 %. La solution solide d'insertion du carbone dans le fer γ porte le nom d'austénite qui est très plastique mais dont la résistance à la rupture est faible.

La solubilité du carbone dans le fer γ est nettement plus élevée que celle du fer α . Il en est ainsi parce que les interstices du fer γ sont plus grands que ceux du fer α .

Avec le carbone, le fer forme également une combinaison chimique le carbure de fer Fe_3C , qu'on appelle cémentite. La teneur de la cémentite en carbone est de 6,67 %, ses propriétés caractéristiques sont la dureté élevée et une très faible plasticité.

Nous représentons ci-joint le diagramme fer-carbone (cémentite) qui traduit la composition des phases et la structure des alliages dont la concentration varie du fer pur à la cémentite (voir fig. n° 1 et 2).

112 - Les autres éléments d'alliage :

Ils sont ajoutés pour la plupart en substitution dans le réseau du fer et ils donnent à l'acier, non pas des propriétés mécaniques spéciales mais des possibilités de traitements thermiques accrues. Par exemple en augmentant la stabilité de l'austénite, les éléments d'alliage dissous dans celle-ci améliore la trempabilité de l'acier.

12 - La structure martensitique :

Les phases en présence, à l'équilibre thermodynamique, ont exception faite de la cémentite des caractéristiques mécaniques de dureté et de charge de rupture assez faibles. Mais entre autres des possibilités importantes de déformation plastiques.

La cémentite étant un carbure, est une phase dure et fragile. Par un refroidissement brutal de l'austénite, on obtient un état hors d'équilibre, cette nouvelle phase étant appelée martensite.

Ses caractéristiques mécaniques sont, dureté et charge de rupture élevée, allongement et résilience très faible. L'avantage d'une structure à haute résistance est une grande limite élastique et une bonne résistance à l'usure, mais l'inconvénient est une résilience faible et des possibilités de rupture du type fragile pour de très faibles sollicitations de déformation.

L'idée est donc venue d'obtenir un matériau dur en surface et résilient à coeur ; cela étant obtenu par traitements thermo-chimiques faisant apparaître un gradient en carbone depuis la surface vers le coeur, suivi d'un refroidissement brutal qui a pour but de transformer l'austénite superficiellement riche en carbone, en martensite.

2 - PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DE LA CEMENTATION :

21 - Rôle de la diffusion dans la cémentation :

La migration du carbone dans l'acier pendant la cémentation est un processus de diffusion solide normal. Mais la complexité des conditions techniques de l'opération de cémentation rend difficile l'analyse mathématique du processus, sauf dans des cas simples auxquels les équations de la diffusion peuvent être appliquées.

C'est par l'étude de la cémentation gazeuse que l'analyse du phénomène a pu être poussée. Ces études ont permis de montrer que la surface du métal agit de façon catalytique sur le gaz, ce dernier lui abandonnant du carbone atomique, pouvant être soit absorbé par l'acier, soit transformé en carbone élémentaire qui donne une suie graphitique entravant au contraire la cémentation.

La vitesse de cémentation sera ainsi fonction, d'une part, du potentiel ou de l'activité du carbone à la surface (qui dépend lui même du gaz et de l'action qu'exerce sur lui la surface) et d'autre part, du coefficient de diffusion du carbone dans le métal, ce coefficient étant lui même fonction, en première approximation, de la température et variant peu avec la composition du métal.

L'absorption du carbone à la surface de l'acier fait apparaître une différence de concentration de cet élément entre la surface et le coeur.

Comme le carbone est en solution dans le fer γ , il diffuse à l'intérieur vers les zones de concentration plus faible et continue à diffuser tant que la composition ne s'est pas uniformisée.

Le degré d'approche de cette uniformité est fonction non seulement de la vitesse de diffusion du carbone dans le fer et du temps de séjour en température, mais aussi de la vitesse d'absorption du carbone par la surface de l'acier.

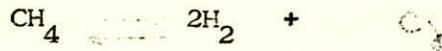
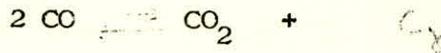
22 - Rôle particulier du carbone :

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.

- . L'élément doit donner avec le fer une solution étendue de cristaux mixtes susceptibles par trempe de donner de la martensite.
- . Cette martensite étant de structure très fragile, un revenu à température modérée 150° - 200°c doit ramener le fer à l'état cubique avec précipitation ultrafine d'une combinaison dure de fer et de l'élément d'addition.
- . L'élément doit avoir une grande vitesse de diffusion dans la phase γ , d'où élément léger et petit s'insérant dans le réseau C.F.C. et à bonne solubilité dans les cristaux mixtes.
- . 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.

23 - Equilibres chimiques réversibles :

Les composés gazeux les plus simples susceptibles d'apporter du carbone sont le CO et le CH₄ ; l'un et l'autre donnant avec l'auténite des équilibres réversibles.

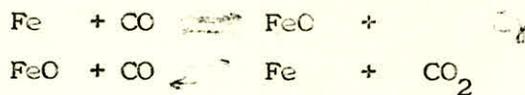


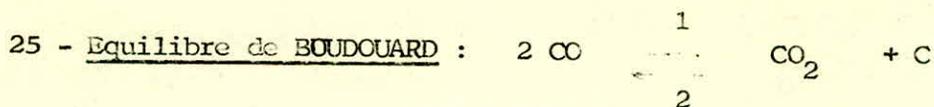
24 - Réaction de base :

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 : $\text{CO} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{C}_\gamma$ est lente 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 gamma à moins qu'on la considère comme le résultat des deux réactions successives :





BOUDOUARD a montré qu'à toute température entre 400° c et 1 000° c il s'établit un équilibre caractérisé par l'existence, en présence de carbone d'un mélange de CO et de CO₂ d'une composition bien déterminée sous une pression donnée : seul CO₂ existe au-dessus de 400°c et au-delà de 1000° c seul CO est stable (voir courbe).

La courbe I indique la composition du mélange à l'équilibre en fonction de la température sous la pression atmosphérique. La réaction 2 étant endothermique, la formation de l'oxyde de carbone est favorisée par une élévation de température comme l'indique le diagramme.

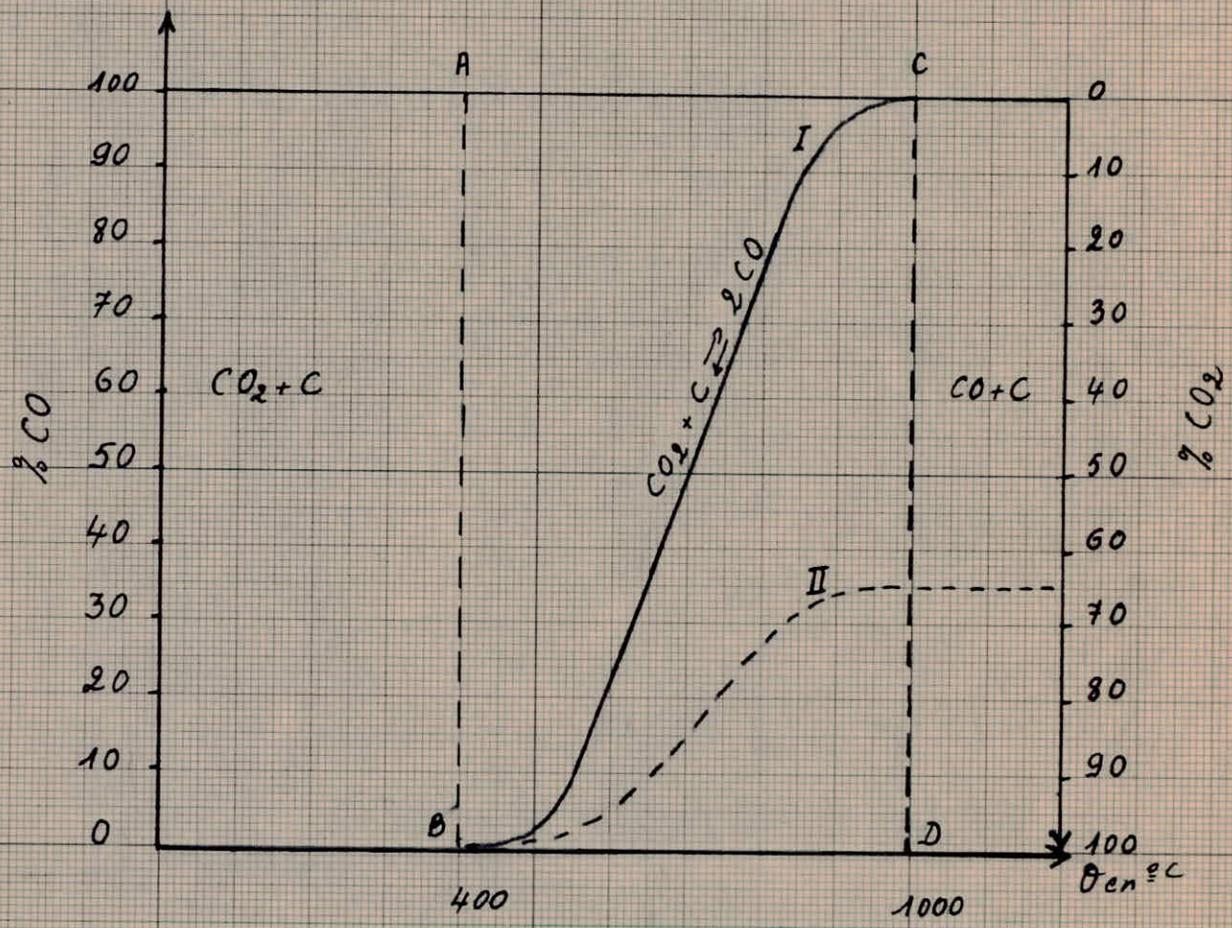
La courbe II relative à une pression réduite montre qu'une baisse de pression favorise la formation de l'oxyde de carbone.

La courbe I caractéristique de l'équilibre $\text{CO}_2 + \text{C} \rightleftharpoons 2 \text{ CO}$ divise pratiquement l'espace : % CO - - , en 3 domaines :
 L'une à droite de CD correspond aux températures supérieures à 1 000 ° C auxquelles seul CO (en présence de carbone) est stable.
 Celui-ci entre 400 et 1 000° c où coexistent CO et CO₂ selon une composition bien déterminée à chaque température et celui à gauche de AB au-dessous de 400° où seul l'anhydride carbonique est stable et où par conséquent, l'oxyde de carbone ne devrait pas exister.

Pratiquement on constate :

- . En présence de carbone et au-dessus de 1 000° , la transformation de CO₂ en CO est rapidement totale.

Equilibre de Boudouard



Courbe I : Equilibre réalisé au départ d'oxygène

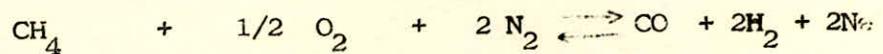
Courbe II : Equilibre obtenu à partir de l'air

- . Il est facile de "figer" les équilibres obtenus à haute température par une trempe, l'oxyde de carbone n'ayant qu'une faible tendance à se transformer en CO₂.
- . Alors que l'oxyde de carbone ne devrait pas exister au-dessus de 400° c, CO est en fait parfaitement stable à la température ordinaire par suite d'inertie. On dit qu'il est à l'état métastable, de faux équilibre.

L'existence de ces faux équilibres est très importante puisqu'elle permet de maintenir à la température ordinaire des produits qui ne devraient normalement exister qu'à haute température.

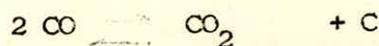
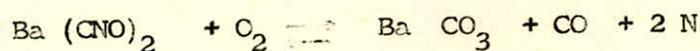
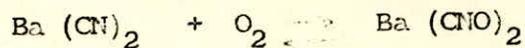
26 - Production de CO :

261 - Craquage de CH₄ en présence d'air :



262 - Craquage d'un hydrocarbure lourd :

263 - Dans les bains de sels fondus :



L'oxygène étant produit en insufflant de l'air dans le bain fondu.

27 - Réaction chimique en surface : $C_{\text{gaz}} \rightleftharpoons C_x$

Il y a à chaque instant équilibre entre la quantité de carbone apportée en surface par la réaction chimique du gaz et la quantité qui diffuse de la surface vers l'intérieur du métal. A température, pression et composition gazeuse **constantes**, la vitesse de réaction est à chaque instant, proportionnelle à l'écart entre la concentration actuelle $C_{x=0}$ des cristaux mixtes en surface et la concentration finale d'équilibre C_e ; d'autre part, la quantité qui diffuse est proportionnelle au gradient de composition chimique en surface $\left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_{x=0}$ et au coefficient de diffusion D par définition. On a donc l'égalité :

$$K (C_e - C_{x=0}) = - D \cdot \left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_{x=0}$$

On voit de suite que dans la cémentation, l'apport de carbone en surface, aussi bien que l'existence d'un gradient chimique

$\frac{\partial C}{\partial x}$ impliquent une composition gazeuse beaucoup plus car-

burante que celle qui serait en équilibre avec la composition désirée dans les couches superficielles de la pièce d'acier.

Les équilibres chimiques permettent donc de définir le sens dans lequel il convient de modifier une composition chimique selon le but à atteindre.

28 - Etude de la diffusion.

281 - Définition :

Dès 1815 PARROT a constaté que les gaz se mélangent toujours quelles que soient les précautions prises pour éviter toute agitation mécanique, et toute convection.

Cette action de mélange ou d'interpénétration sans agitation mécanique, ni convection, constitue le phénomène de diffusion. Ce même phénomène dans un corps cristallin est déterminé par l'aptitude des atomes de changer leurs positions d'équilibre au sein du réseau cristallin.

Dans les alliages, la diffusion ne peut avoir lieu que lorsque l'élément diffusant forme avec le métal de base une solution solide.

La cause principale de la diffusion dans les solutions solides est la tendance à l'égalisation de la concentration dans tout le volume.

La concentration de l'élément diffusant à la surface est déterminé par l'activité du milieu ambiant qui assure l'afflux des atomes de cet élément vers la surface et par la vitesse de diffusion qui provoque l'évacuation de ces atomes en profondeur dans le métal.

La profondeur de pénétration est fonction de la température et de la durée de saturation, ainsi que de la concentration de l'élément diffusant à la surface.

282 - Coefficient de diffusion.

Si d est la densité de l'acier, c , la concentration en carbone, la masse de carbone par unité de volume est $c \cdot d$; soit en un point $\frac{\partial c}{\partial x}$ le gradient de concentration et ds un élément de surface normal à ce gradient.

La masse de carbone dq qui passe à travers cette surface dans le temps dt en se dirigeant vers les basses teneurs en carbone est proportionnelle à ces trois grandeurs.

C'est la 1ère loi de FICK :

$$dq = - D \cdot d \cdot ds \cdot \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right) \cdot dt \quad (1)$$

D : est par définition le coefficient de diffusion

en cm^2/s

si q est la quantité de carbone qui diffuse par unité de temps et de section, on peut écrire.

$$q = - D \cdot d \cdot \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (1 \text{ bis})$$

283 - Loi générale de la diffusion.

Considérons la diffusion par tranches planes parallèles selon l'axe ox ; le flux entrant dans l'élément de volume dx, dy, dz est :

$$- D \cdot d \cdot \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right) \cdot dy \cdot dz \cdot dt$$

Le flux sortant est :

$$\left[D \cdot d \cdot \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(D \cdot d \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \right) \cdot dx \right] dz dy dt$$

L'augmentation de la masse de carbone contenue dans cet élément de volume est égale à la différence entre ce qui entre et ce qui sort, c'est à dire égale à :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D \cdot d \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \right) \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt.$$

D'autre part cette augmentation peut par définition s'écrire

$$d \cdot \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt.$$

En égalant ces deux expressions on a :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (2)$$

Dans la mesure où D peut être considéré indépendant de C, cette équation peut s'écrire :

$$\text{2ème loi de FICK : } \frac{\partial c}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (3)$$

C'est l'équation aux dérivées partielles de la chaleur due à Fourier.

204 - Cémentation dans le cas idéal.

Dans le cas le plus simple, on suppose que le coefficient de diffusion D est indépendant de la concentration c en carbone et que la concentration finale C_f d'équilibre chimique avec le milieu ambiant est atteinte instantanément en surface, dès le début de la cémentation à température constante.

Dans le régime transitoire, la solution de l'équation aux dérivées partielles satisfaisant aux conditions aux limites est :

$$y = 1 - G(u) \quad (4)$$

avec :

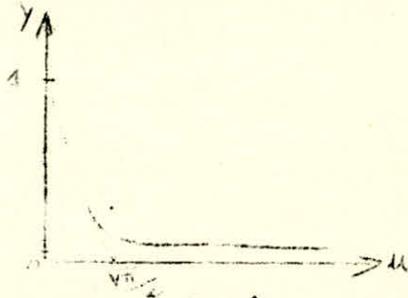
$$y = \frac{c - c_i}{c_f - c_i} \quad ; \quad u = \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \quad ; \quad G(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-u^2} du$$

c_i : concentration initiale en carbone de l'acier

u : solution de Cauchy

$G(u)$: fonction de Gauss.

. Courbe réduite : on déduit de ce qui précède.



* courbe réduite exprimant la relation entre la concentration carbone et la profondeur *

que pour de mêmes valeurs C_f et C_i , on retrouve la même concentration en carbone C pour des profondeurs x proportionnelle à \sqrt{t} .

On en déduit que la profondeur de cémentation, quelle que soit sa définition, croît comme la racine carrée de la durée de l'opération.

Dans la pratique, on s'éloigne du cas idéal précédent et que les hypothèses simplificatrices qui ont été faites ne sont pas valables en toutes rigueurs. D'où des modifications à la formule du cas idéal, pour une représentation plus conforme à la réalité.

295 - 1ère retouche au cas idéal : Variations de la concentration en surface.

On admet qu'à chaque instant, il y a équilibre entre le carbone apporté en surface par réaction chimique du gaz et le carbone qui diffuse à travers cette surface, en se dirigeant vers l'intérieur.

Il est aussi raisonnable d'admettre que l'apport de carbone par réaction chimique superficielle est proportionnel à l'écart entre la concentration d'équilibre et la concentration actuelle $C_{x=0}$ on a donc à chaque instant l'égalité :

$$K \cdot (C_p - C_{x=0}) = -D \cdot \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right)_{x=0} \quad (5)$$

où K est la constante de vitesse de réaction chimique à pression et températures fixes. La solution de l'équation aux dérivées partielles satisfaisant à l'équation (5), et aux nouvelles

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = D \cdot \left(\frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} \right) \quad (6)$$

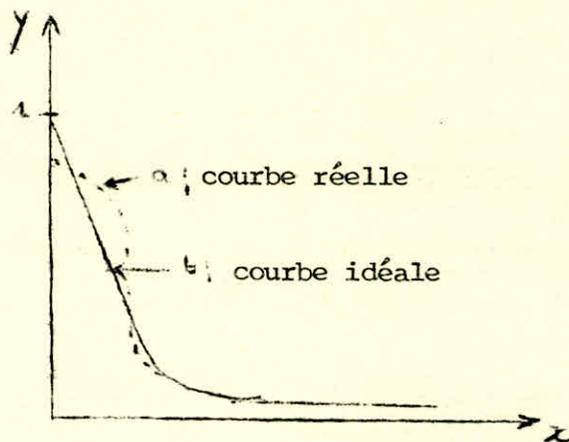
(où D est encore supposé indépendant de c) conditions aux limites, a été donnée par J. E. DORN, J. T. GIER et NF. WARD.

$$Y = 1 - G(u) - \left[1 - G(v) \right] \cdot e^{-(v^2 - u^2)} \quad (7)$$

avec

$$v = u + \frac{k \sqrt{t}}{\sqrt{D}}$$

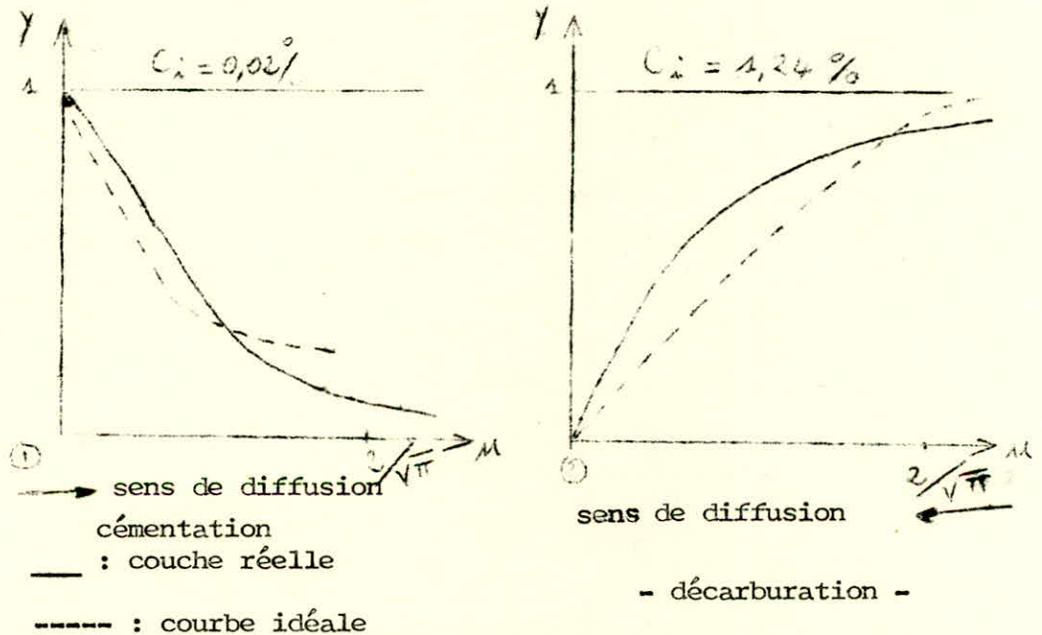
La solution (7), diffère du cas idéal par l'adjonction d'un terme correctif.



* Différence entre courbe réelle et courbe idéale de cémentation*

286 - 2ème retouche au cas idéal : Variation du coefficient de diffusion D avec la concentration C.

Dans les essais de cémentation, la courbe expérimentale correspond à une valeur de y , plus élevée pour les faibles valeurs de x , c'est à dire les hauts carbonés, et plus basse que les couches profondes, c'est à dire les bas carbonés (fig. 1.) que ne le voudrait la courbe idéale.



Dans les essais de décarburation d'un échantillon extradur (fig. 2.), les valeurs de y sont plus basses pour les couches profondes et les hautes concentrations en carbone et inversement, sont plus hautes pour les basses concentrations que ne le voudrait la courbe idéale.

- C. WELLS et R.F. MEHL ont établi la formule linéaire suivante pour le coefficient de diffusion.

$$D = (0,07 + 0,06 \cdot C) \cdot e^{-32000/RT}$$

en cm^2/s

T : température absolue, maintenue constante.

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

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

Valable pour une température de 927°c ou 1 200°K.

Le tableau suivant donne la comparaison des valeurs de coefficient de diffusion, déterminées par des deux formules à la température de 927°c

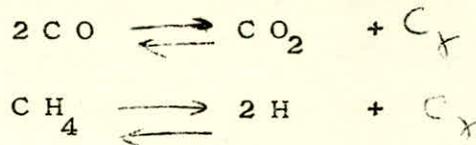
- Coefficient de diffusion du carbone en fonction de la concentration C.

C %	Harris	Wells et Mehl
0	$0,7 \cdot 10^{-7}$	$1,05 \cdot 10^{-7}$
0,7	$1,75 \cdot 10^{-7}$	$1,68 \cdot 10^{-7}$
1	$2,2 \cdot 10^{-7}$	$1,95 \cdot 10^{-7}$

On voit que le carbone passant de 0 à 1, le coefficient de diffusion est sensiblement doublé d'après les données de Wells et Mehl, alors que d'après Harris, il serait triplé.

287 - 3^e retouche au cas idéal : Intervention de l'activité :

L'activité a est définie comme la qualité devant se substituer à la concentration C pour que les lois idéales des gaz parfaits s'appliquent aux solutions réelles. En particulier l'activité a même valeur dans les phases en équilibre. Il en résulte que l'activité du carbone dans l'austénite peut se déduire des équilibres gazeux :



C'est ce qu'a fait R.P. Smith :

Exemple : soit l'équilibre $\text{CH}_4 \rightleftharpoons 2 \text{H}_2 + \text{C}_\gamma$

à température constante, soit a , l'activité du carbone à la concentration C , dans la phase austénite ; soit r_1 le rapport

$$r_1 = \frac{P_{\text{CH}_4}}{P_{\text{H}_2}^2}$$

La constante d'équilibre à la température considérée est $k = \frac{r_1}{a}$. Le graphite a été pris comme état de référence pour définir les activités ; c'est-à-dire $a = 1$ pour l'équilibre des cristaux mixtes gamma avec le graphite, soit

r_2 le rapport $\frac{P_{\text{CH}_4}}{P_{\text{H}_2}^2}$ relatif à l'atmosphère gazeuse en équilibre à la fois avec le graphite pur et avec les cristaux mixtes en équilibre avec le graphite ou $a : k = r_2$

La constante d'équilibre se trouve ainsi définie et, à chaque concentration C de l'austénite, on peut faire correspondre une composition gazeuse et par suite une valeur de γ_1 et calculer une valeur $a = \frac{1}{2} \sqrt{\gamma_1}$

- calcul du coefficient de diffusion d'après le coefficient d'activité. R.F. Mehl, admet que c'est l'activité, plutôt que la concentration en carbone qui règle la diffusion. Dans cette hypothèse la 1ère loi de Fick, peut s'écrire :

$$q = -D_1 \cdot d \left(\frac{\partial a}{\partial x} \right)$$

où D_1 , serait par définition la constante de diffusion relative à l'activité a, et serait constant dans toute l'étendue des concentrations en carbone dans le cas de l'austénite où seule la concentration en carbone serait variable d'un point à un autre et où, par définition du coefficient d'activité γ , ou a :

$$a = \gamma \cdot C$$

on en déduit :

$$q = -D_1 \cdot d \cdot \left(\gamma + C \cdot \frac{\partial \gamma}{\partial C} \right) \frac{\partial C}{\partial x}$$

or en identifiant avec l'équation (1 bis) où D est ce coefficient de diffusion relatif à la concentration C, et que l'on sait être une fonction de C, ou a :

$$D = D_1 \left(\gamma + C \frac{\partial \gamma}{\partial C} \right)$$

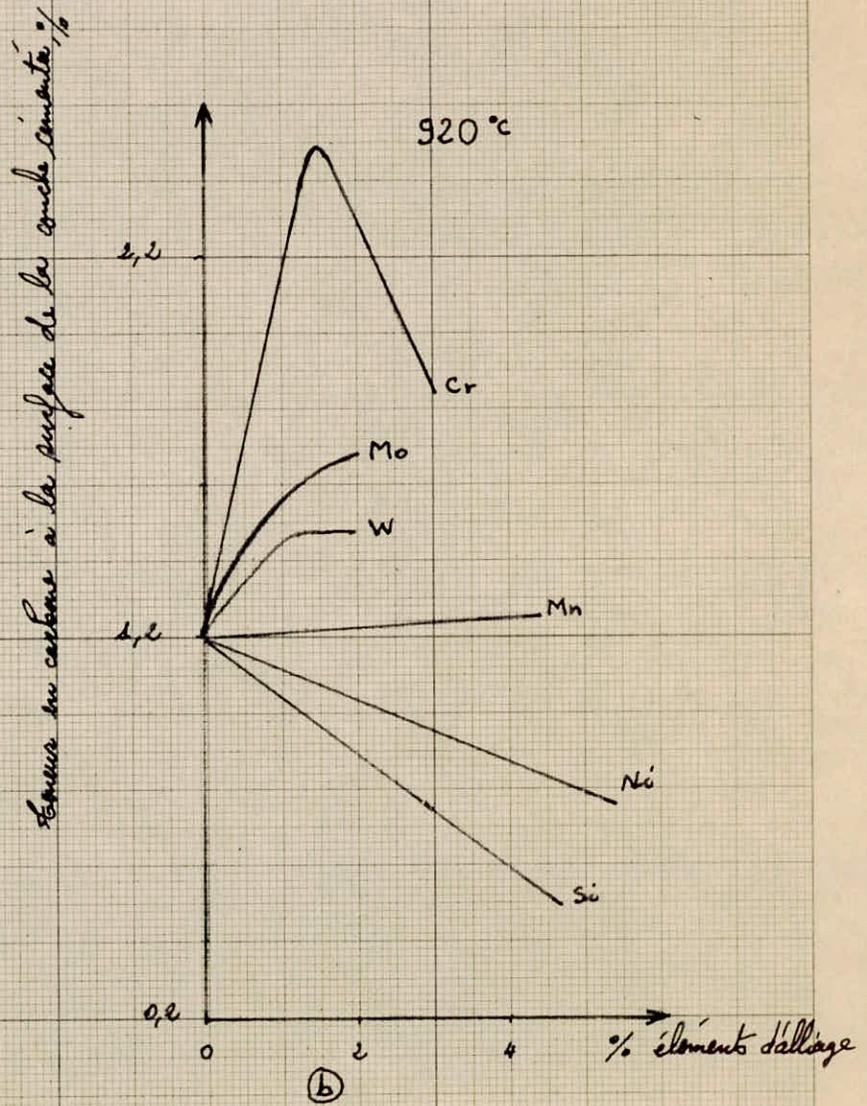
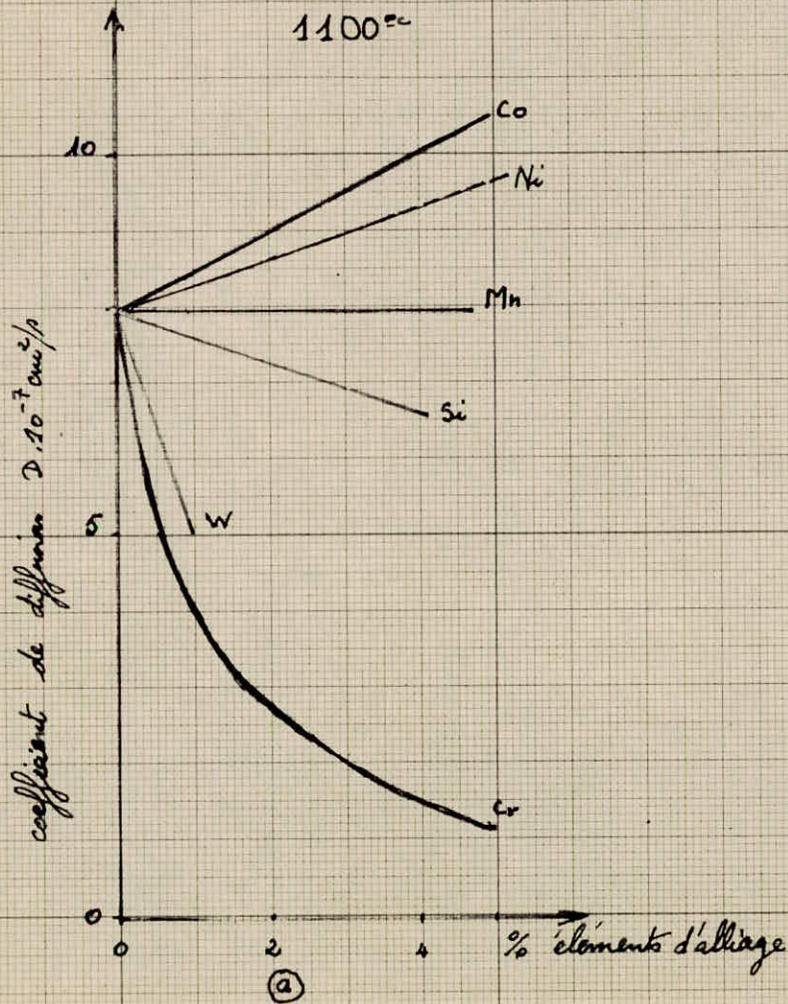
238 - Influence des éléments de substitution sur l'activité et le coefficient de diffusion :

Pour une austénite de concentration donnée en carbone C, l'activité a, et par suite le coefficient d'activité dépendent des concentrations des autres éléments de la solution solide.

D'après Darken :

4 % de silicium doublent le coefficient d'activité alors que le coefficient de diffusion est abaissé d'un tiers, et qu'inversement 6 % du manganèse réduisent le coefficient d'activité d'un cinquième en agissant peu sur le coefficient de diffusion. D'après le même auteur, le molybdène (6 %) abaisserait le coefficient d'activité du carbone d'une manière un peu plus énergique que le manganèse, alors que le cobalt (4 %) resterait sans effet.

D'après Wells et Mehl, le manganèse et le nickel aux teneurs usuelles des aciers spéciaux de cémentation n'ont pas d'effet marqué sur la vitesse de diffusion, mais par contre, aux teneurs très élevées, accroîtraient le coefficient de diffusion.



- (a) influence de éléments d'alliage sur le coefficient de diffusion du carbone dans l'austénite
(D'après Blanter)
- (b) concentration du carbone à la surface de la couche cémentée.
(D'après Schrader et Houdremont)

2329 - Influence de la température et de divers facteurs :

2391 - Variation du coefficient de diffusion avec la température :

Wells et Mehl ont montré que le coefficient de diffusion croît très vite avec la température . On voit sur le tableau suivant :

C %	800	850	925	1 000	1 100
0,10			1,1	2,1	7,7
0,34	0,31		1,4	2,8	9,2
0,70	0,4	0,6	1,6	3,1	10,0
1			2,1	4,6	14,0

- coefficient de diffusion (cm^2/s). 10^7

L'expérience montre que, si pour un acier donné, on porte en ordonnée $\log D$ et en abscisse $1/T$ inverse de la température absolue T , les points s'alignent très bien. Bien que, dans l'exemple choisi, D se rapporte à la diffusion du carbone dans l'acier, Mehl a montré que cette règle est très générale quel que soit l'élément diffusant et le métal solvant. D'où l'expression du coefficient de diffusion :

$$D = A \cdot e^{-\frac{Q}{RT}}$$

A et Q/R sont indépendants de la température.

R : constante des gaz parfaits, prise égale à $2 \text{ cal/}^\circ\text{C}$

Q : Cal/atome-gramme : chaleur d'activation de la diffusion .

C'est l'énergie nécessaire pour qu'un atome de carbone puisse sauter d'une position d'équilibre à l'une des positions d'équilibre voisine.

D'après les mêmes auteurs, A croît à peu près linéairement avec la concentration en carbone suivant la formule :

$$A = 0,07 + 0,06 \cdot C \quad (\text{cm}^2/\text{s})$$

En négligeant les variations de Q (33 000 à 31000 cal/atome-gramme) ce qui donne une précision dépassant $\pm 10 \%$, on peut prendre la formule :

$$D = (0,07 + 0,06 \cdot C) \cdot e^{-(32\ 000/RT)}$$

2892 - Influence de l'azote sur la diffusion du carbone :

La diffusion de l'azote dans l'auténite se produit par un mécanisme, en tous points analogues à celui du carbone ; l'azote dont le \varnothing atomique ($1,3 \overset{\circ}{\text{Å}}$) est légèrement inférieur à celui du carbone ($1,54 \overset{\circ}{\text{Å}}$), est également un élément d'insertion. Les constantes de diffusion sont d'après Bauer

$$\begin{array}{l} \text{N}_2 \left\{ \begin{array}{l} A = 1,07 \\ Q = 34\ 000 \end{array} \right. \quad \text{et} \quad \left\{ \begin{array}{l} A = 0,49 \\ Q = 36\ 000 \end{array} \right. \text{C} \end{array}$$

L'expérience industrielle montre la carbonituration des aciers mi-durs à 850°C, progresse deux fois plus vite que la cémentation des mêmes aciers par le carbone seul ; et qu'il faut le même temps de cémentation pour la même profondeur en cémentant par le carbone seul à 900°C, qu'en faisant une carbonituration à 850°C, puisque dans les deux cas le coefficient de diffusion est $0,38 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$.

Il est remarquable de voir que l'azote a sur la vitesse de diffusion du carbone une action plus grande que la carbone lui-même.

2393 - Dimensions des grains :

Wells et Mehl ont montré que la dimension des grains d'austénite n'influe pas sensiblement sur le coefficient de diffusion du carbone, leurs résultats sont donnés dans le tableau suivant :

% C		
	0,54	0,7
20 à 40 grains par cm ²	0,31	0,35
1 000 à 2 500 grains par cm ²	0,36	0,38

* coefficient de diffusion à 800°C en $\text{cm}^2/\text{s} \cdot 10^7$

La grosseur de grains n'intervenant pas dans le processus de la diffusion du carbone (ou de l'azote), ce sont les considérations de surchauffe et de caractéristiques mécaniques après trempe qui imposent le choix d'aciers à grains fins dans la cémentation.

2 - Influence de la température et du temps de maintien.

291 - Sur l'acier :

Les grains d'austénite apparaissent lorsque la transformation de la perlite en austénite prend fin. Au moment de la naissance, le grain d'austénite est très petit et il croît rapidement avec le prolongement de son séjour à la température de sa naissance, et surtout lorsque la température s'élève.

La température à laquelle le carbone diffuse dans le réseau du fer est $\rightarrow AC_3$; celle-ci étant limitée par la grosseur du grain austénitique. La durée de cémentation est aussi limitée par le fait que l'acier, en présence d'une atmosphère même très cémentante, présente une limite d'absorption du carbone et qu'en aucun cas la couche superficielle ne pourra dépasser une teneur supérieure à 1,3 - 1,4 % de carbone.

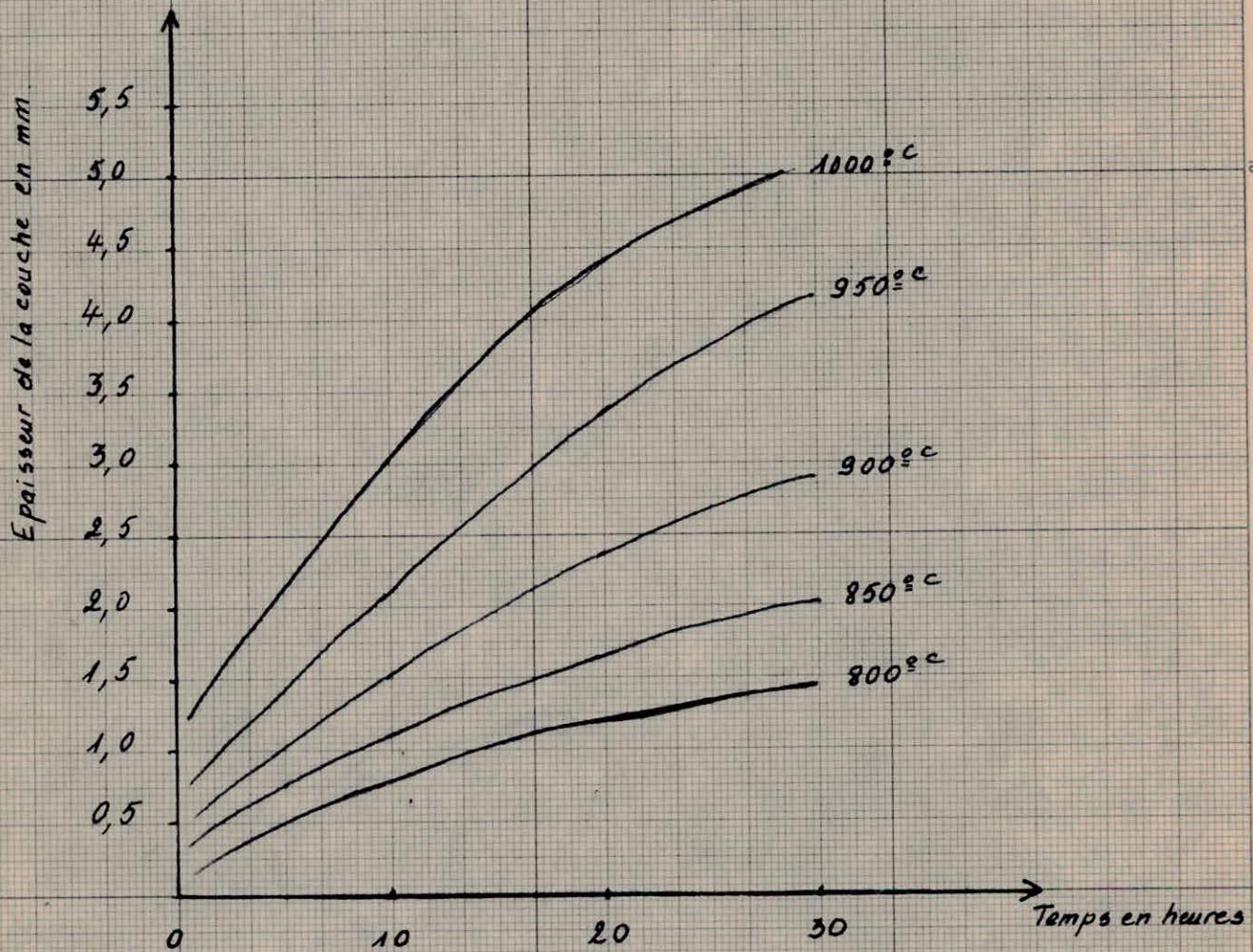
292 - Au cours d'une cémentation.

L'épaisseur de la couche cémentée e , en fonction de la durée du phénomène pour une température considérée est le plus souvent déterminée par la relation parabolique

$$e = k\sqrt{t}$$

On en déduit qu'avec le temps, l'augmentation de l'épaisseur de la couche ne cesse de diminuer. Il en est ainsi par suite de la diminution dans le temps du gradient de concentration entre les secteurs voisins quelconques.

Influence de la température et de la durée de
cémentation sur l'épaisseur de la couche cémentée
(acier XC 10)



DEUXIEME PARTIE

MISE EN OEUVRE PRATIQUE

DIFFERENTS PROCEDES DE CEMENTATION

1 - BUT DE LA CEMENTATION :

Le but principal de la cémentation 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 1,1% et par trempe ultérieure. Ce procédé accroît également la limite de fatigue et il est appliqué aux aciers à faible teneur en carbone titrant de 0,1 à 0,2 % de carbone.

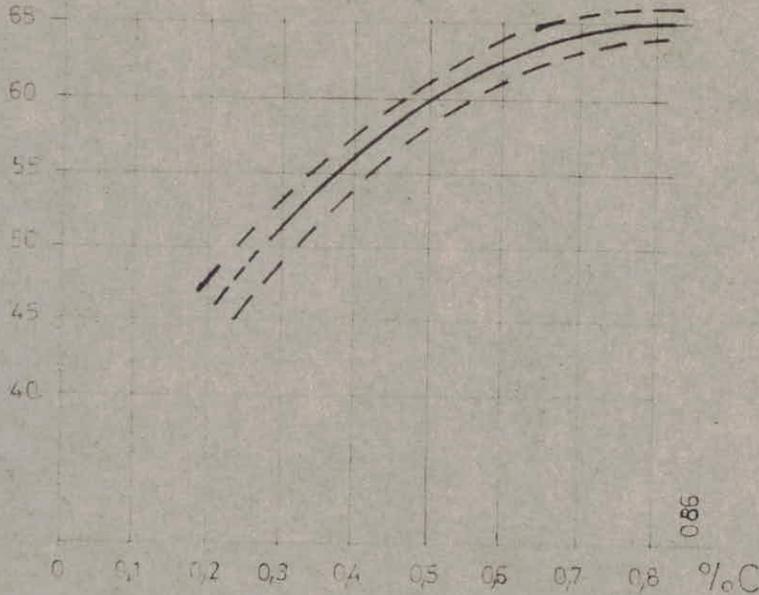
La cémentation est toujours suivie de trempe parce que la dureté de la martensite dépend de sa teneur en carbone (voir courbe 1) et que d'autre par, tous les paramètres étant égaux par ailleurs (teneur en éléments d'alliage, conditions de trempe ...); la trempabilité est fonction de la teneur en carbone. Ces deux procédés confèrent à la surface une dureté élevée, donc une bonne résistance à l'usure et permettent de créer (en se rappelant que la martensite a une densité légèrement inférieure que le composant qui lui donne naissance) un système de contraintes favorables à l'amélioration de la tenue en fatigue de la pièce.

11 - Conditions de traitement :

La surface des pièces doit être soigneusement préparée, elle sera très propre, dégraissée et ne présentera aucune trace d'oxydation.

Les pièces sont minutieusement chargées pour, à la fois éviter les déformations en cours de cémentation et assurer l'accès des fluides sur toutes la surface libre des pièces.

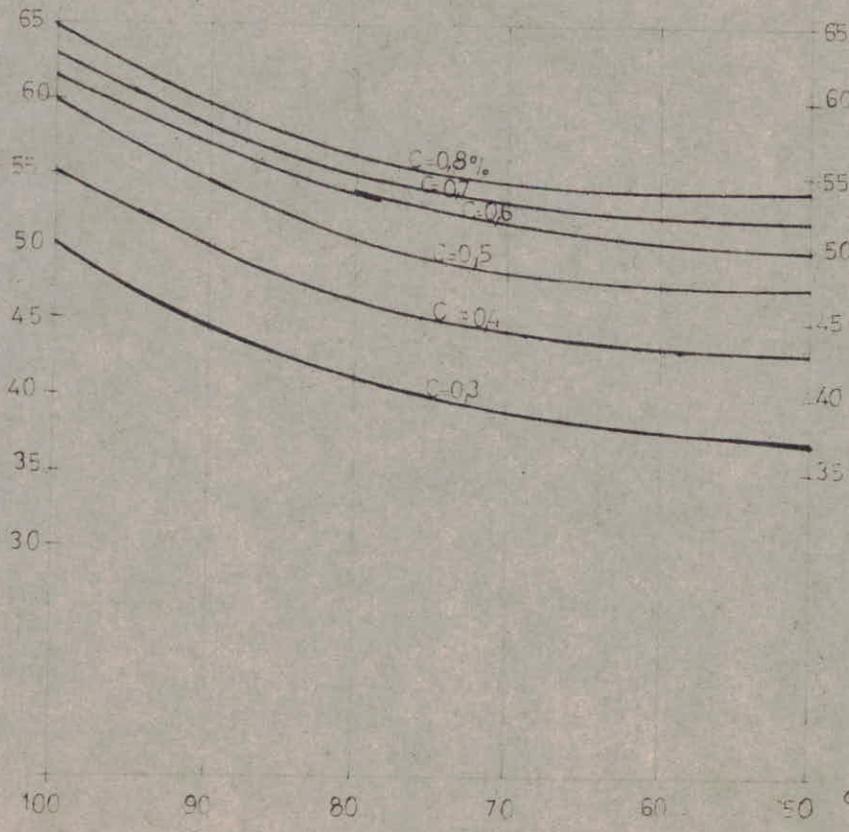
HRC



- durete de la martensite en fonction de la teneur en carbone des aciers.

A

HRC



- duretes moyennes des aciers pour differentes teneurs en C le % de martensite.

B

Les pièces sont isolées les unes des autres par des montages avec Vés, couteaux, entretoises, étudiés pour assurer à la fois une bonne densité de chargement et une bonne circulation des fluides autour des pièces, mais aussi pour éviter toute déformation au cours du chauffage ou au cours de la trempe, dans la mesure où l'afflux de liquide sur la pièce est cause de déformation.

C'est ainsi par exemple, que les pièces de révolution (pignons par exemple) sont tenues suivant leur axe vertical ; les pièces longues (arbres) sont généralement pendues.

12 - Réserves de cémentation :

Il est souvent nécessaire de protéger partiellement certaines parties d'une pièce à cémenter, et cela, soit pour permettre un usinage ultérieur, ou favoriser le redressage, ou encore pour que l'organe cémenté soit moins fragile dans certaines sections faibles après trempe. La tenacité est ainsi augmentée dans toutes les zones non cémentées.

Pour cela il existe plusieurs façons de protéger les parties que l'on ne veut pas cémenter :

- Pâte anti-cémentation
- Protection par ouvrage électrolytique
- Protection par surépaisseur d'usinage

La méthode de protection la plus sûre, la plus recommandable pour une sécurité parfaite, consiste à laisser une surépaisseur suffisante sur les endroits à protéger. Il est clair que cette surépaisseur doit être plus importante que la profondeur de cémentation que l'on se propose d'atteindre.

On cimente alors sans précaution spéciale et par usinage on élimine les zones carburées en surépaisseur avant de procéder à l'opération de trempe. Ainsi toutes les surfaces surusinées seront dépourvues de cémentation et présenteront les propriétés d'un acier doux.

2 - CEMENTATION SOLIDE.

Les pièces sont chauffées dans des boîtes métalliques, en présence d'un produit appelé ciment qui peut être pulvérulent ou pâteux. Cet élément est du charbon de bois avec comme activateurs du carbonate de baryum $BaCO_3$ et du carbonate de sodium $Na_2 CO_3$ à raison de 10 à 40 % du poids de charbon.

A la température de traitement, vers $925^{\circ}C$, le ciment se décompose et libère un mélange gazeux qui cède du carbone à la surface de l'acier.

Ce procédé, le plus ancien, n'est pas utilisé à la SO. NA. CO. ME (CV. I) dans la mesure où cette technique est dépassée actuellement et où les inconvénients ne manquent pas.

. L'homogénéité de température dans les caisses est plus ou moins bonne, et en tout cas obtenue, au bout d'un temps assez long, car le ciment est un isolant thermique.

. Le traitement n'est pas très régulier, car le ciment s'épuise rapidement au contact des pièces et n'est pas renouvelé.

. Le prix de revient est élevé car on chauffe, en même temps que les pièces, un poids mort constitué par le ciment et les caisses.

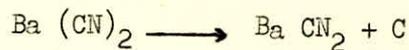
Par contre cette méthode n'exige pas de personnel qualifié, ni de fours spécialisés.

3 - CÉMENTATION EN BAIN DE SEL

31 - Principe.

Les pièces sont immergées dans un bain de sel fondu à la température choisie pour la réaction chimique et la diffusion. L'agent de carburation est le groupe CN provenant des cyanures alcalins.

Pour la carburation profonde à haute température (vers 880°C à 900°C) et la cémentation profondeur des aciers extra-doux (ou alliés) de cémentation, la fonction cyanure est associée aux ions alcalino-terreux, pour donner une réaction globale du type.



où le C, ou bien entre en solution solide dans l'austénite ou bien réduit le carbonate en donnant CO, agent gazeux de carburation.

Après réaction chimique et diffusion, la pièce d'acier est trempée.

L'intérêt de la cémentation en bain de sel est de permettre un chauffage homogène et une action chimique régulière.

Le suivi de l'opération se fait par des témoins de charge.

Exemple de pièces traitées : boulonneries, petites pièces, leviers ... à une température de 850°C on peut obtenir sur l'acier doux une pénétration de 0,25 mm en 30 mn

32 - Composition des bains de sel.

Dans tous les cas, il convient de limiter la concentration en cyanure pour éviter sa décomposition trop rapide qui donnerait des résultats,

irréguliers et la concentration doit être entretenue par des additions de cyanure alcalin fréquentes et en faible quantité.

La dilution doit être obtenue avec des sels stables et fusibles. On fait appel aux carbonates et aux chlorures ; les premiers sont recherchés dans la cémentation profonde au carbone à température élevée et les derniers se recommandent par leur effet décapant. La fusibilité est recherchée pour faciliter la fusion du bain sans surchauffe locale ; la fluidité est recherchée pour diminuer la quantité de sel entraînée par les pièces, ce qui est une gêne pour la trempe et un facteur non négligeable de prix de revient.

Ainsi fait-on appel à l'association sodium - potassium, surtout dans les cyanurations à basses températures. Les activants sont le chlorure de baryum pour la carburation.

Pour avoir un résultat constant dès le début, il convient donc d'introduire initialement la quantité de cyanate nécessaire au bon fonctionnement du bain et de préserver celui-ci de l'oxydation excessive par une couche pulvérulente de graphite exempte de cendres qui, de plus, a un effet calorifique favorable.

Rappelons qu'il y a lieu pour la trempe à l'huile de recourir à des huiles minérales pures, car les huiles grasses végétales ou animales donneraient des savons avec des alcalis que contiennent les bains de sel et la trempe risquerait d'être gênée par des mousses.

33 - Durée et profondeur de cémentation.

La mise en température de la pièce est très rapide. La diffusion est d'autant plus rapide que l' N_2 et le carbone agissent simultanément. En raison de la fixation simultanée d'azote et de carbone, il convient d'éviter une action trop prolongée qui donnerait de la fragilité. En définitive, l'opération dure 20 à 30 minutes.

34 - Manutention.

Les pièces sont attachées à des crochets ; ceux-ci reposent sur des supports fixes et le four peut éventuellement être protégé du rayonnement par une couche graphitique? Notons qu'il existe aussi des montages spécifiques, et des petits paniers porte-pièces.

35 - Préchauffage.

Les précautions doivent être prises pour éviter de plonger dans le bain des pièces humides, ce qui provoqueraient une explosion, d'où nécessité d'une préchauffe des pièces, à $500^{\circ}C$ pendant 45 minutes environ.

36 - Trempe.

Après cémentation, la trempe s'effectue directement à l'huile ou à l'eau, ou mieux dans un bain de sel. Dans le cas de trempe bainitique au sel, la température du bain, de l'ordre de $200^{\circ}C$, oblige à recourir au mélange nitrate de sodium - nitrite de potassium.

Le cyanure entraîné par la pièce risquerait de donner une violente explosion au contact du mélange nitrate-nitrite. Il convient pour l'éviter de limiter la teneur en cyanure du bain de cémentation entre 7 et 14 %. Il faut alors laver les pièces par immersion de courte durée dans un bain neutre à la température de cémentation avant de les immerger dans le bain nitrate - nitrite.

37 - Dangers d'emploi des cyanures.

Les cyanures sont très toxiques, aussi des précautions doivent être prises dans les ateliers où ils sont manipulés. De même, les fours doivent être munis de hotte à bon tirage.

Dans les eaux résiduaires, les cyanures sont détruits par oxydation au moyen d'hypochlorite ou de chlore ; les cyanates formés ne sont pas toxiques comme les cyanures ; si l'oxydation est très énergique ceux-ci sont à leur tour détruits en azote libre, CO₂ et chlorures inoffensifs.

En conclusion, les risques d'explosion au contact des nitrates - nitrites fondus, la toxicité des cyanures, la totalité des cyanures, le prix de revient plus élevé (dépense d'énergie importante, du fait des pertes thermiques par la surface du bain), font généralement préférer la cémentation gazeuse.

Le port des gants d'amiante, des lunettes à verres filtrants, de souliers de sécurité, et de tenue de travail est obligatoire, cela pour minimiser les risques d'accidents.

4 - CEMENTATION GAZEUSE :

41 - Principe :

On chauffe les pièces dans une enceinte étanche remplie d'une atmosphère convenable, susceptible de fournir à la surface des pièces le carbone nécessaire. Quel que soit le mode de cémentation, le transfert du carbone s'effectue (à l'état atomique). Il paraît donc logique d'utiliser directement un gaz pour carburer rationnellement un alliage fer-carbone. Dans une cémentation gazeuse, le mélange carburant reste bien défini et parfaitement stable durant toute la phase active de cémentation, mais les réactions sont beaucoup complexes et que même certaines d'entre elles peuvent être franchement nuisibles, en cas de dérèglement de l'atmosphère gazeuse.

Il s'ensuit qu'une installation de cémentation gazeuse nécessite un matériel moderne comprenant un ensemble d'appareils de contrôle et de sécurité. La conduite de ces appareils exige une qualification technique du personnel.

Il ne s'agit plus ici d'agir sur un seul facteur important qui est la température, mais bien de contrôler de façon permanente la constance du produit cémentant gazeux, malgré sa continuelle transformation durant son débit.

42 - Mélange gazeux utilisés :

On fait le craquing du "Perlitol" (80 % alcool isopropylique + 20 % white spirit) dans l'enceinte du four et on obtient une atmosphère cémentante.

Dans ce procédé, la cémentite peut être évitée en arrêtant l'injection d'hydrocarbure liquide vers le dernier tiers de l'opération, ce qui constitue une phase de diffusion du carbone.

43 - Avantages de la cémentation gazeuse :

- . Le gaz actif est protecteur, d'où impossibilité d'oxydation
- . Uniformité de pénétration de la couche carburée .
- . Déformations réduites éliminant souvent le redressage.
- . Fabrication régulière et de meilleure qualité.

44 - Suivi de la cémentation gazeuse dans le four Meci :

Le four étant à la température de travail (920°C), on injecte en marche intermittente, le perlitol (80 % alcool isopropylique + 20 % white spirit) à raison de 0,6 l/h pendant 20 % du temps, ceci nous donne par expérience un potentiel carbone de l'atmosphère de 0,8 % de carbone.

Notons qu'à la réception d'un four neuf, une opération de saturation en carbone du moufle est faite (culotage) et cela avant l'utilisation effective du four.

Les pièces, avec quelques témoins, placés dans les paniers, sont chargés dans le laboratoire du four, en même temps qu'un fil de fer et quatre témoins dans la goulotte. Il s'ensuit alors une **baisse** de la température initiale.

On attend la remontée en température du four, et quand on est au-dessus de 650°C, on met le four en marche continue en injectant 0,6 l/h de liquide.

Quand on atteint la température, une heure après l'arrivée en température le four se stabilise ; on retire de la goulotte le fil de fer que l'on trempe et **que l'on casse** pour voir si le four commence à cémenter. On introduit ensuite le carbohm et le débit change à 1,2 l/h pour pouvoir aider dans la première phase la régulation du carbohm.

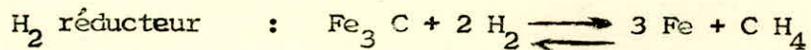
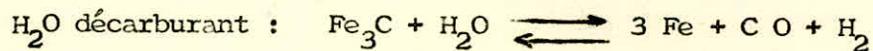
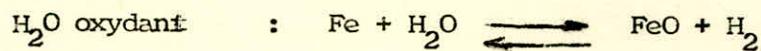
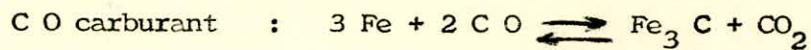
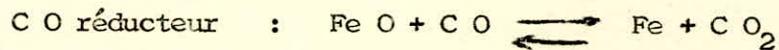
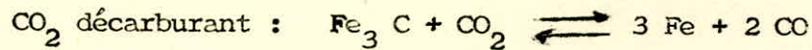
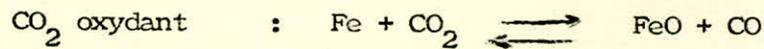
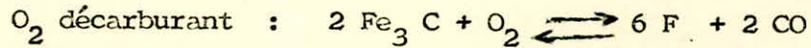
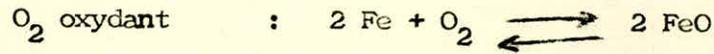
Le deuxième témoin est retiré au bout de la moitié du temps supposé nécessaire pour réaliser l'épaisseur visée.

Le retrait des autres témoins de la goulotte est fonction du résultat précédent et pour cela le **facteur expérience** de l'opérateur joue son rôle.

45 - Atmosphères contrôlées :

451 - Généralités sur les atmosphères contrôlées :

4511 - Principales réactions en présence du fer et des aciers :



4 512 - Equilibres chimiques et atmosphères contrôlées :

Si on chauffe dans un four sans alimentation particulière et qui par conséquent sera rempli d'air on aura en réaction

- l'acier des pièces

- O₂ et N₂ de l'air.

N_2 est un gaz inerte qui ne provoquera rien.

O_2 l'oxygène est décarburant et oxydant. Il provoquera une oxydation sur un acier pauvre en carbone, et une oxydation et décarburation sur un acier riche en carbone.

Si, de plus le four est chauffé au gaz par des brûleurs au gaz naturel, on aura aussi dans la réaction :

- du CO_2 provenant de la combustion (il est oxydant et décarburant)
- H_2O " " " " " " " "
- éventuellement un peu de CO et H_2 si le brûleur est en excès de gaz, mais le faible pourcentage de ces éléments aura peu d'influence sur la réaction.

On peut également déduire que si au lieu de laisser l'air emplir le four, on injecte à la place un mélange gazeux composé d'éléments inertes ou d'éléments carburants ou réducteurs, on pourra à volonté :

- soit maintenir la teneur en carbone d'origine de l'acier
- soit modifier cette teneur en carbone en plus ou en moins, mais de façon contrôlée.

Ce mélange gazeux qui devient une atmosphère contrôlée devra contenir :

H₂ : réducteur

CO : carburant

En outre, cette atmosphère contiendra toujours un certain pourcentage faible de CO₂ produit par une entrée d'air lors de l'ouverture du four pour le chargement et de l'étanchéité du four qui n'est jamais parfaite.

Elle contiendra également un certain pourcentage résiduel de C H₄ car le craquage n'est jamais absolument parfait.

Pour obtenir un équilibre entre la teneur en carbone de l'acier que l'on veut traiter et l'atmosphère qui l'enrobera, il faut maintenir pour la température choisie un rapport : $K = \frac{P^2 \cdot CO}{P \cdot CO_2}$ défini.

452 -Atmosphère réductrice et carburante par H_2 et CO :

C'est celle qui est produite par le générateur d'atmosphère :
Il s'agit d'un craquage du CH_4 en présence d'air. Dans les articles relatifs à la préparation des atmosphères on dit qu'il s'agit d'une "combustion ménagée" ou d'une "combustion incomplète". Mais comme le rapport gaz/air est insuffisant pour entretenir la combustion et qu'il faut fournir de la chaleur, on donne à cette atmosphère le nom d'atmosphère endothermique.

Les cornues du générateur endothermique sont chauffés extérieurement par des résistances électriques. Ces cornues sont remplies d'un catalyseur (à base d'oxyde de Ni) pour favoriser la réaction. On maintient une température généralement de $1050^\circ C$, qui concilie une bonne vitesse de réaction et une tenue correcte de matériel et dans des conditions constantes de pression et de vitesse de passage on obtient une atmosphère qui contient essentiellement :

CO : 20 %

H_2 : 40 %

N_2 : reste

CO_2 : 0,2 - 0,3 %

En faisant varier le rapport air/ CH_4 dans une faible mesure, on fera varier CO_2 , CH_4 résiduel et point de rosée et par conséquent l'équilibre en potentiel carbone. On maintient une atmosphère légèrement trop pauvre de façon à pouvoir ajuster l'équilibre dans le four par une addition de CH_4 .

4521 - Rôle de l'hydrogène dans la cémentation par C O :

Les expériences de Branley et ses collaborateurs ont montré (voir figure) que la cémentation par C O est, toutes choses égales par ailleurs, rendue plus active par l'addition de l'hydrogène. Dans les conditions de leurs expériences, le poids de carbone fixé passe par un maximum pour $H_2/C O = 1,5$.

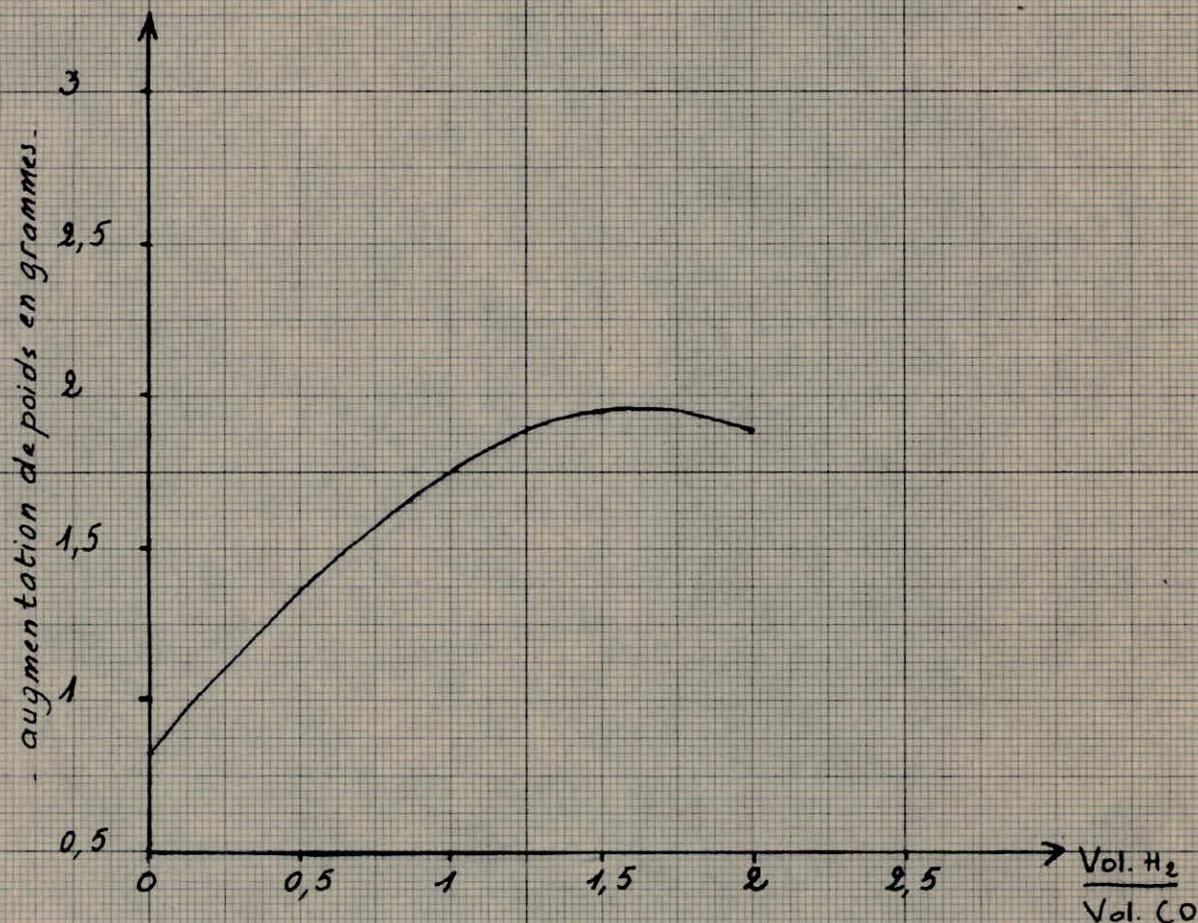
Dans la cémentation par les mélanges d'oxydes de carbone et d'hydrogène, ce dernier a deux effets contradictoires :

- Il accroît la constante K de vitesse de réaction ,
- Il abaisse la concentration Cf (finale) d'équilibre des cristaux mixtes χ et du gaz.

Pour les faibles teneurs en hydrogène, l'abaissement de K l'emporte ; inversement pour les fortes concentrations, l'abaissement de Cf devient prépondérant, de sorte que la vitesse de cémentation passe par un maximum quand l'hydrogène croît.

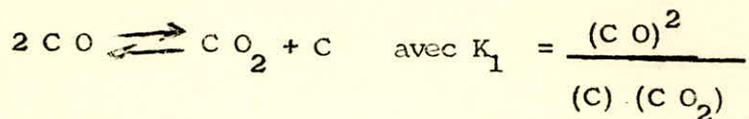
4522 - Utilisation de la teneur en C O₂ pour contrôler l'atmosphère :

L'intérêt d'une atmosphère endothermique est essentiellement de permettre la protection d'un acier pendant son chauffage.



Cémentation par les mélanges de CO et H₂
 [Cémentation acier doux : 10^A, 1000°C,
 Dimensions de l'éprouvette L = 256 mm ϕ = 31mm]
 (D'après Bramley).

Lui éviter en particulier toute décarburation ou carburation suivant la réaction déjà rencontrée :



Le critère, pour une température et une teneur en carbone données sera donc la valeur de $\frac{(\text{C O})^2}{(\text{C O}_2)}$, valeur qu'il y

a donc lieu de contrôler.

La teneur en C O variant peu, on contrôle donc l'atmosphère endothermique par la seule connaissance de sa teneur en C O₂.

Le rapport air/gaz variant peu, c'est la raison pour laquelle on ne peut se fier seulement à des mesures de débit pour contrôler le générateur ; les débitmètres industriels ne pourraient assurer une telle précision.

On retiendra donc que le fonctionnement du générateur intéresse un domaine très réduit des teneurs en C O ; ceci est également vrai pour l'hydrogène. Donc le rapport $\frac{\text{C O}}{\text{H}_2}$ est stable.

4523 - Utilisation du point de rosée pour contrôler l'atmosphère :

La dernière remarque est assez importante : nous savons que pour une température déterminée, les différentes teneurs sont reliées suivant :

$$K = \frac{(C O)(H_2O)}{(C O_2)(H_2)}$$

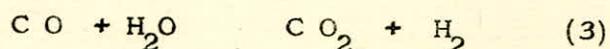
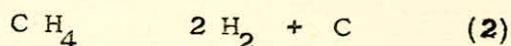
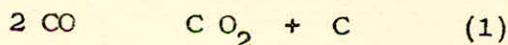
Donc le rapport $\frac{(H_2O)}{(C O_2)}$ est pratiquement constant pour une température donnée et la détermination de $(C O_2)$ peut être remplacée par celle de (H_2O) , donc par le point de rosée.

Ce moyen de contrôle présente un intérêt, dans la mesure qu'il est plus facile de mesurer un point de rosée qu'une faible teneur en $C O_2$. Cette dernière mesure fait appel à un appareil utilisant l'absorption du rayonnement d'infrarouge.

4524 - Courbes d'équilibre :

Un mélange gazeux constitué par exemple de 20 % de $C O$, 40 % de H_2 , d'un faible pourcentage de CH_4 , $C O_2$, H_2O et le reste en N_2 est introduit dans un four à une certaine température.

Ces constituants réagiront de façon à se trouver en équilibre à cette température, suivant les réactions :

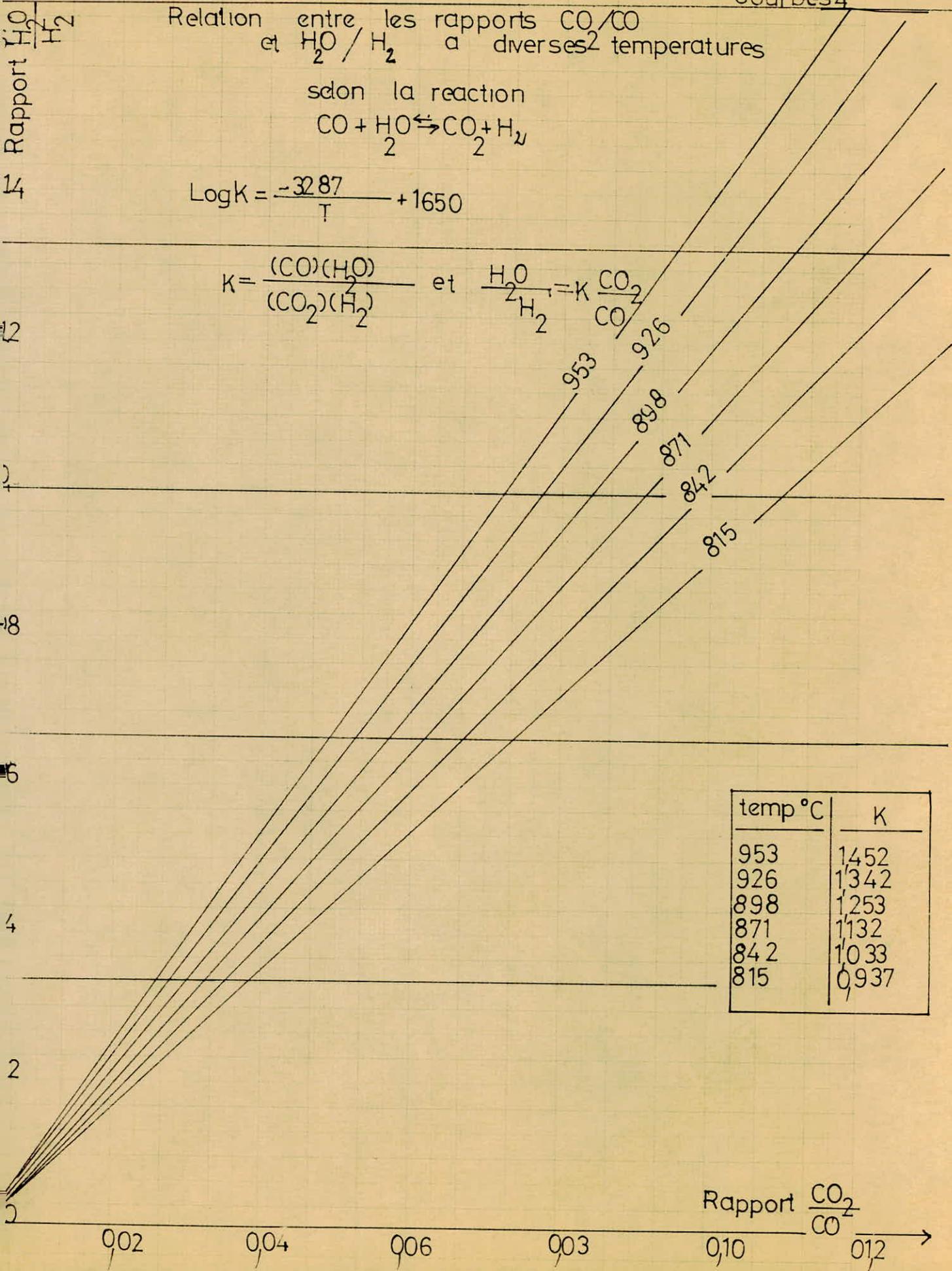


Relation entre les rapports $\frac{CO}{CO_2}$
 et $\frac{H_2O}{H_2}$ a diverses temperatures

selon la reaction
 $CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2$

$$\text{Log}K = \frac{-3287}{T} + 1650$$

$$K = \frac{(CO)(H_2O)}{(CO_2)(H_2)} \quad \text{et} \quad \frac{H_2O}{H_2} = K \frac{CO_2}{CO}$$

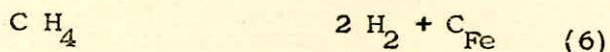
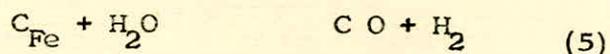


temp °C	K
953	1,452
926	1,342
898	1,253
871	1,132
842	1,033
815	0,937

Les concentrations partielles de C O et H₂, étant importantes par rapport à celles de C O₂, H₂O et C H₄ pourront être considérées comme constantes.

4525 - Carburation et décarburation :

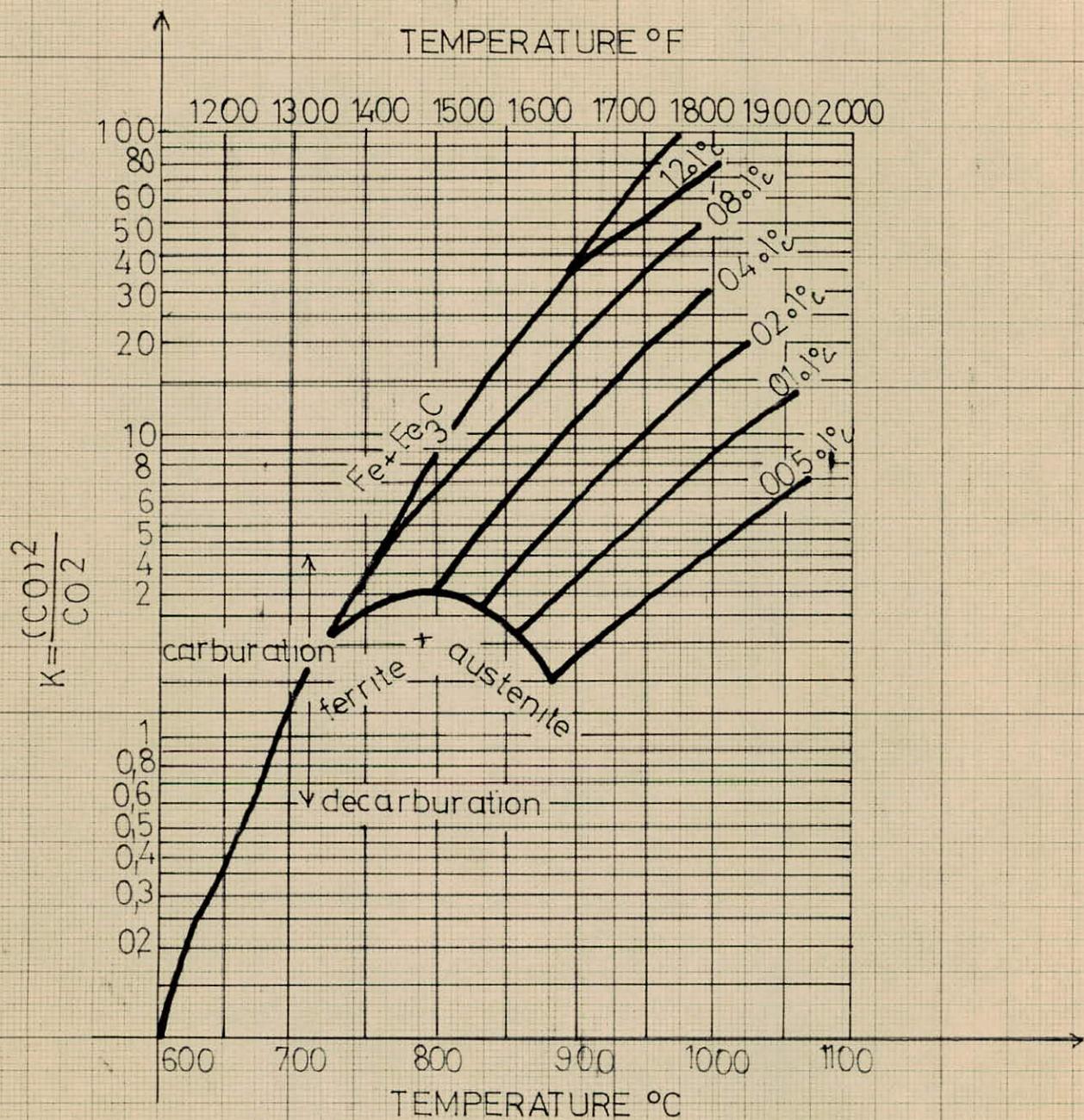
L'introduction de pièces dans la chambre de travail modifie à nouveau l'équilibre. L'atmosphère réagira suivant les réactions :



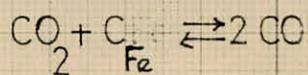
Les constantes d'équilibre ne sont que difficilement utilisables pour les raisons suivantes :

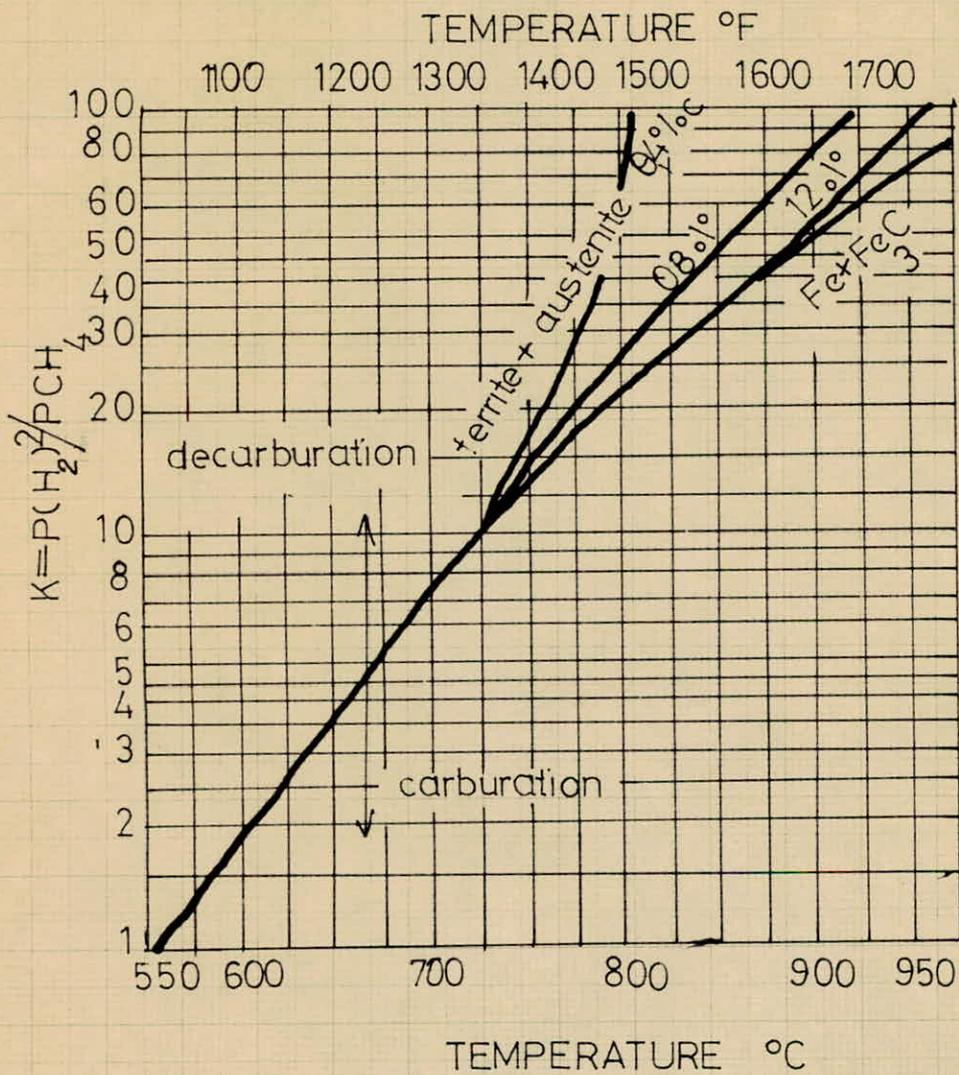
- l'équilibre parfait n'est pratiquement jamais atteint
- l'atmosphère est presque toujours perturbée, par exemple par des entrées d'air (ouverture des portes)

Les renseignements théoriques ne peuvent donc donner qu'une approximation sur le comportement de l'atmosphère vis à vis de l'acier, et ce ne sont, en fait, que des résultats expérimentaux obtenus dans des conditions de travail industriel qui donnent des renseignements précis.

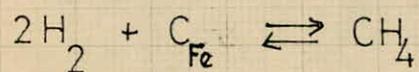


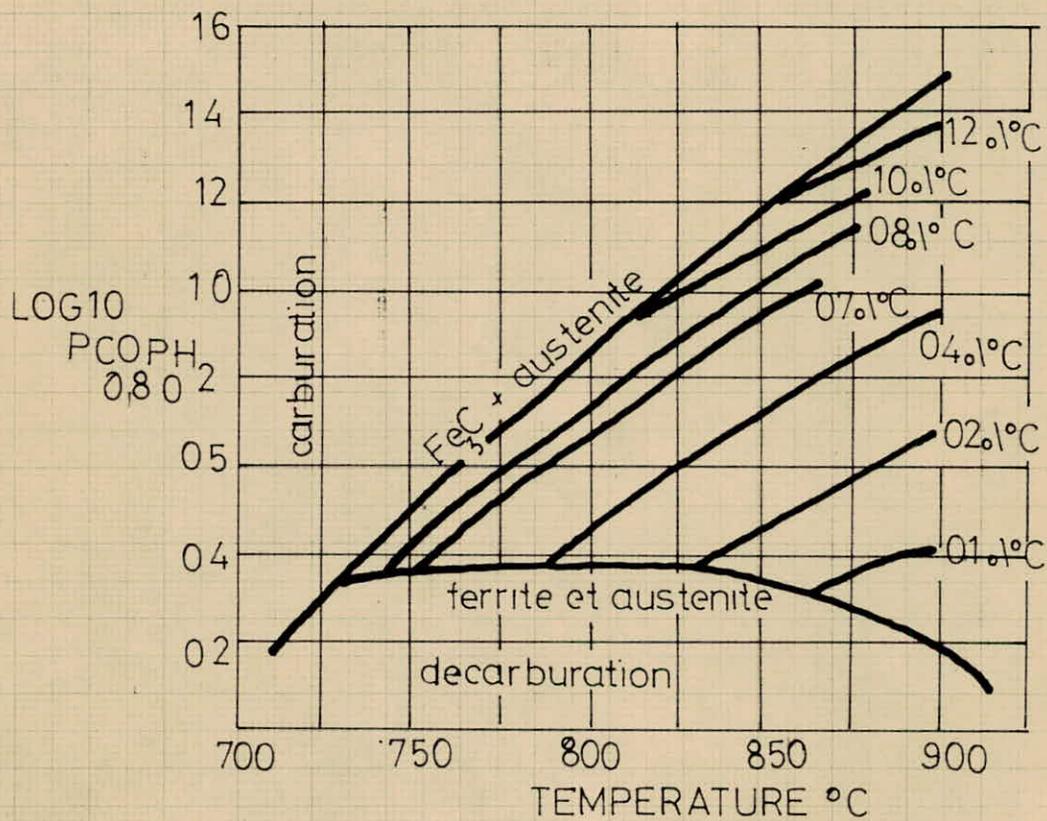
courbe 1: courbes d'équilibre de la réaction



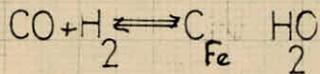


Courbe 2 : Courbes d'équilibre de la réaction





Courbes 3 : Courbes d'équilibre de la réaction



453 - Atmosphère réactive :

C'est celle que l'on obtient en craquant directement dans le four un ou plusieurs liquides organiques ; c'est le cas dans le four homocarb et microcarb.

Le liquide projeté doit arriver sur une plaque de craquage faite d'un alliage riche en Ni qui joue le même rôle que le catalyseur dans un générateur endothermique. Tous les liquides organiques peuvent théoriquement convenir, mais il faut choisir ceux qui donneront un minimum de suie pour un maximum d'efficacité et un prix de revient raisonnable.

Pour nous le mélange utilisé est du "perlitol" :

- alcool isopropylique : 80 %
- white spirit : 20 %

qui donne après craquage (et après que les gaz aient déjà réagi entre eux, c'est-à-dire pas exactement à l'instant zéro du craquage).

C O : 33 %

H₂ : 40 %

C O₂ : 0,1 à 0,2 % lorsque le four est purgé

C H₄ : variable avec le débit de la pompe d'injection.

Il doit être à environ 1,35 % pour être en équilibre à 0,80 % de carbone pour les aciers alliés au Ni-Cr

L'atmosphère étant créée dans le four lui-même, les réactions peuvent ne pas être complètes, et l'état d'équilibre n'est toujours pas atteint, ce qui interdit d'utiliser les courbes dont nous avons parlées précédemment.

Dans les atmosphères produites de cette façon, le pourcentage d' H_2O est assez élevé et on ne peut pratiquement pas se servir de la mesure du point de Rosée pour calculer un équilibre.

La méthode normale de régulation est le système microcarb qui, en mesurant directement la carburation d'un élément sensible, nous donne le potentiel carbone de l'atmosphère.

Seuls le débit de liquide et les durées de traitement sont réglables. Ils sont fonction de la charge à traiter et de la profondeur de cémentation. Ils seront déterminés expérimentalement.

454 - Comparaison des deux systèmes de production d'atmosphère :

Le système d'injection a l'avantage d'un prix d'achat assez bas, alors que le générateur est un appareil relativement important. De même la mise en service du système d'injection est instantanée, alors que celle du générateur endothermique demande un certain temps. Par contre le coût d'exploitation de l'injection est légèrement plus élevé que celui du générateur.

D'une manière générale, le système d'injection est utilisé dans les petites installations, le générateur étant réservé aux installations importantes travaillant en continu.

5 - ACIERS DE CEMENTATION :

51 - Choix :

Ce choix est règlementé par l'usage auquel on destine la pièce traitée. Cette règle logique n'implique pas qu'il soit nécessaire d'encombrer le standard d'une usine des nombreuses qualités d'acier de cémentation.

52 - Éléments nuisibles dans les aciers de cémentation :

Lors de l'élaboration du métal, le soufre qui subsiste durcit l'acier, et provoque des points doux sur les surfaces cimentées et donne naissance à des criques de forgeage.

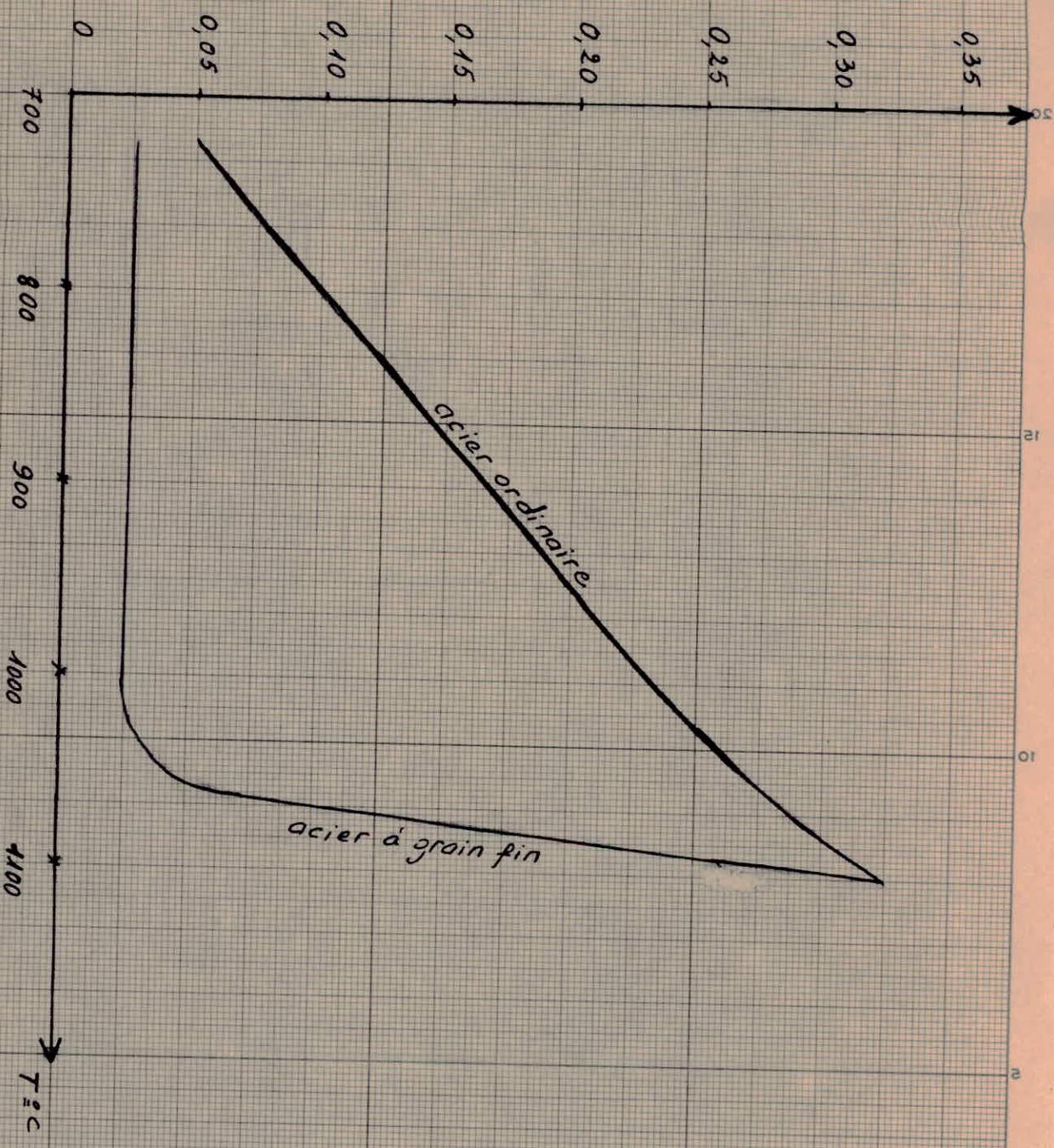
L'arsenic, comme le phosphore rendent l'acier fragile et favorisent la cristallisation grossière du grain ; ils provoquent aussi des tapures à la trempe et de l'écaillage sur couche cimentée.

53 - Dimension du grain de l'acier :

Il faut éviter tout grossissement de grain aussi bien à coeur que dans la couche cimentée ; pour y arriver plusieurs moyens sont employés conjointement :

- . On peut recourir à un acier spécial, tel est le cas des aciers contenant du Ni (1,5 % par exemple)

Diamètre moyen des cristaux χ (mm)



- Susceptibilité au grossissement du grain d'un acier ordinaire et d'un acier à grain fin (D'après H. W. Mc Quaid et J. Chipman)

Il convient de recourir à des aciers élaborés à grain fin. On arrive à ce résultat, au cours de l'élaboration de l'acier liquide après désoxydation finale, par l'addition d'alluminium en lingotière d'environ 0,03 %.

Notons aussi qu'un grain trop fin, nuit à la trempabilité de la couche cémentée.

54- Nuance d'acier :

La teneur initiale en carbone est à considérer. Le fer se cimente plus vite que l'acier en raison de sa porosité naturelle qui favorise la pénétration du gaz cimentant. De plus la cémentite libre aura plus tendance à se développer dans un acier déjà chargé en carbone.

Pour ces différentes raisons d'ordre métallurgique, un acier de cémentation sera toujours de nuance douce par le carbone
(0,08 à 0,20 % C)

On évitera aussi les aciers trop chargés en chrome et surtout en manganèse qui favorisent l'apparition de la cémentite en réseau. Ils seront limités à 1% environ.

Au C.V.I. en utilise : X C 10, 12 N C6, 20 N C6, 16 N C6
14 N C12, 18 N C13.

Pour les témoins de cémentation : X C 10 : pour les aciers
au carbone.

12 N C6 : pour les aciers
alliés.

55 - Choix du cycle :

Le cycle normal comprend une cémentation à 920°c et 0,8 % c suivie d'une trempe à 850° c; Le milieu de trempe est l'eau pour les aciers au carbone et l'huile pour les alliés.

6 - TRAITEMENTS APRES CEMENTATION :

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 **ne jamais perdre** de vue qu'une pièce cémentée est composée de deux aciers au carbone très différents.

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

C'est ce qui nécessite cette étude distincte du traitement des aciers cémentés. Du fait que l'enrichissement de la couche superficielle en carbone, la température de cémentation est toujours supérieure au point AC_3 de la couche. Il s'ensuit que la température de trempe correcte pour la couche est toujours plus basse que celle de la cémentation, Pour opérer cette trempe correcte on aura donc recours en pratique à trois artifices de traitement :

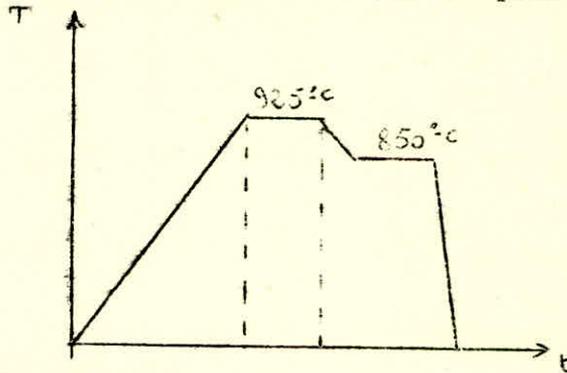
- . trempe directe
- . trempe différée
- . double trempe

61 - Trempe directe :

On chauffe à la température de cémentation, on laisse un temps convenable pour l'épaisseur voulue ; puis en ayant opéré un palier à la température de trempe de la couche cémentée on effectue la trempe directement à la sortie du four.

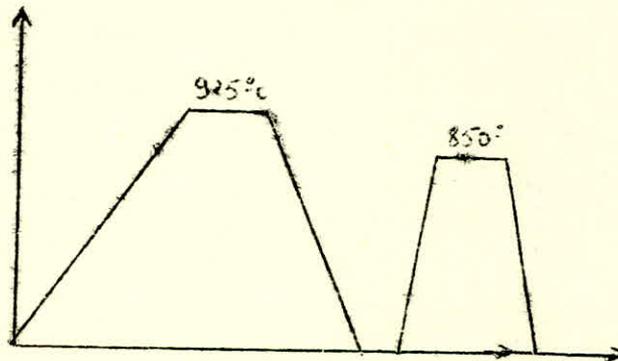
avantage : on opère une seule chauffe

inconvenient : austénite résiduelle plus importante.



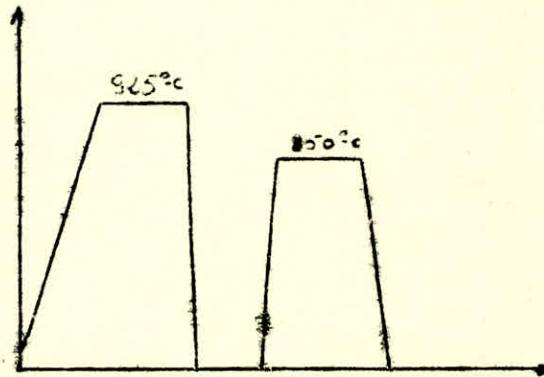
62 - Trempe différée :

On monte en température de cémentation et on laisse refroidir à température ambiante, (éviter toute décarburation et oxydation) puis on rechauffe à température de chauffage avant trempe de la couche cémentée et on trempe.



63 - Double trempe :

Elle est peu utilisée. On chauffe à température de cémentation puis on trempe. Ensuite on rechauffe à température de trempe de la couche cémentée et on retrempe.



64 - Revenu :

La trempe est toujours suivie d'un revenu de détente qui ne change rien à la structure. Cela permet de libérer les contraintes thermiques et les contraintes de compression dues au fait que la densité de la martensite est inférieure à celle de l'austénite.

65 - Grenaillage :

Le nettoyage de la grenaille ronde (petits éléments d'acier martensitique) des pièces cémentées trempées est recommandé car il a en outre un effet favorable sur la structure ; les couches superficielles s'écroutissent avec transformation de l'austénite résiduelle en martensite, d'où durcissement et développement des contraintes de compression.

66 - Conséquences pratiques :

Le but recherché est l'obtention d'une couche martensitique en surface exempte de constituants de trempe incomplète, tels que troostite ou bainite et sans teneur excessive en austénite résiduelle.

L'austénite résiduelle provient de ce que la couche superficielle est trop chargée en éléments rejetant la fin de la transformation martensitique vers les basses températures (Cr, Ni, Mn) ou d'une stabilisation de l'austénite au cours du cycle de trempe.

La bainite apparaît lorsque le refroidissement suffisant vers 600°C devient trop lent vers les températures au dessus du point Ms. Il y a lieu d'abaisser la température du liquide de trempe.

L'apparition de la troostite est due à une décarburation superficielle entre cémentation et trempe, notamment si l'on utilise un four de réchauffage pour retremper sans atmosphère adéquate. La troostite apparaîtra aussi si pour le métal considéré, la vitesse de refroidissement dans le domaine des températures relativement élevées (vers 600°C) est insuffisante.

C'est le cas des pièces en acier au carbone cémentées et trempées à l'huile (faire trempe à l'eau fortement brassée). La seule solution est d'enrichir la couche en éléments trempants autre que le carbone (acier allié).

7 - STRUCTURE DES COUCHES CEMENTEES.

Lorsqu'un acier à faible teneur en carbone est mis en présence à chaud, d'une atmosphère carburante, le carbone atomique obtenu par dissociation de CO , CH_4 par exemple est absorbé par la surface de l'acier et diffuse vers l'intérieur du métal d'abord dans le réseau du fer.

Lorsque la limite de saturation de l'austénite en carbone est atteinte; les conditions favorisent la naissance à la surface des germes d'une phase nouvelle stable à la température considérée, de la cémentite notamment.

Il se forme progressivement une couche continue de cémentite à la surface.

Dans les conditions réelles, il est rare qu'on observe la formation d'une couche continue de cémentite à la surface.

Un refroidissement lent produit dans ces conditions trois zones dans la structure de la couche cémentée.

- * Eutectoïde : composée de perlite
- * Hypoeutectoïde : " " + ferrite
- * Coeur : où la quantité de ferrite augmente à mesure que l'on s'y approche.

Dans notre cas, la concentration en carbone, dans la couche superficielle cémentée est visée à 0,8 % de carbone (Eutectoïde) et cela dans le but d'éviter la formation de cémentite libre qui fragilise la structure globale.

Dans la couche cémentée trempée en a de la périphérie au coeur :

- * de la martensite
- * bainite inférieure
- * bainite moyenne
- * bainite supérieure
- * ferrite : qui ne s'est pas transformée.

8 - CONTROLES DES PIECES CEMENTEES :

81 - Définition de l'épaisseur de la couche cimentée.

La définition de l'épaisseur cimentée varie suivant les auteurs et les problèmes posés. On peut dire qu'elle est :

- soit la profondeur à laquelle on retrouve le pourcentage initial de carbone de l'acier.
- soit la profondeur jusqu'à laquelle on retrouve un pourcentage de carbone donné, 0,5 % par exemple. Dans ce cas, la couche considérée présente pratiquement sur toute son épaisseur les mêmes caractéristiques.
- soit conventionnellement, et c'est celle-là que nous prendrons dans la suite de notre travail ; la distance entre la surface et la couche dont la dureté est de 550 points Vickers.

82 - Machine d'essai de dureté, pour la détermination de la profondeur des couches cimentées.

821 - Dans l'atelier : méthode de la Reichert.

Le principal but de la machine d'essai Reichert, et de donner au chef d'atelier le traitement thermique une indication permettant de déterminer si la conduite du four est adéquate, indication qu'il pourra se procurer rapidement et facilement en prélevant une pièce sur la série ou sur un témoin de charge.

Le principe de cette méthode est basé sur la méthode Rockwell.

Si les pièces ne se prêtent pas facilement à l'essai ROCKWELL du fait de leurs formes et de leurs dimensions, on joindra à la série, des pièces d'accompagnement dont la forme ressemblera le plus possible aux pièces à cémenter mais qui sera assez simple pour permettre l'essai ROCKWELL sans dispositif d'appui spéciaux ni têtes d'essai spéciales.

Connaissant HR 187,5 et HR 1000, un tableau à double entrée nous donne directement la valeur de l'épaisseur cémentée.

822 - Au laboratoire.

Pour le contrôle final des charges de cémentation, et de par la même confirmer ou infirmer si besoin est, les données de la Reichert, un témoin de la charge, est envoyé, après cémentation au Laboratoire.

L'éc. antillon étant enrobé dans la résine, puis poli spéculairement est positionné sur la plaque du microduremètre.

Le principe de mesure de cet appareil est basé sur la méthode VICKERS mais avec de faibles charges (10 g, 20 g, - 30 g, 500 g).

Le pénétrateur est un diamant pyramidal à base carrée dont l'angle dièdre de deux faces opposées vaut 136° .

L'empreinte a la forme d'un carré

$$HV = \frac{P}{S} = 2 \cdot \frac{P}{d^2} \sin \frac{136^\circ}{2} = 1,8544 \cdot \frac{P}{d^2}$$

P : charge d'essai : 10 g ; 20 g ; ...

d : moyenne arithmétique des deux diagonales de l'empreinte, mesurées après suppression de la charge.

- Contrôle de la couche cémentée trempée efficace :

Des points de microdureté sont faits sur l'échantillon perpendiculairement au bord, l'épaisseur cémentée est alors la distance du bord, au point de microdureté HV = 550 pris conventionnellement.

- Contrôle de cémentation

L'échantillon est poli spéculairement, puis attaqué au nital (4%), et au microscope inversé, on vérifie la structure de la couche cémentée (si, il y a décarburation, austénite résiduelle ...).

Dans ce cas l'épaisseur cémentée est la distance du bord de l'échantillon à la zone où on a 50 % de ferrite, 50% de perlite.

83. Machine d'essai de dureté, pour la détermination de la dureté des pièces cémentées trempées. Méthode ROCKWELL.

L'essai ROCKWELL consiste à mesurer l'enfoncement d'un pénétrateur dans le métal à tester sous une charge déterminée. Pour la réalisation de l'essai, on applique une précharge de 10 kg, qui a pour effet de positionner correctement la pièce à contrôler et d'éliminer toutes les irrégularités de la surface en amenant le pénétrateur en contact avec la partie saine du métal. La valeur de la dureté ROCKWELL ne représente plus le rapport de la charge à l'aire de l'empreinte, mais la lecture faite directement sur un comparateur gradué en degré ROCKWELL qui est égal à 2 microns ; on mesure ainsi la profondeur rémanente. Les 2 échelles les plus courantes sont :

HRC = Le pénétrateur est un cône en diamant d'angle au sommet 120° et la charge appliquée est 150 kg.

HRB = Le pénétrateur est une bille d'acier de $\phi = 1,5875$ mm et la charge appliquée est 100 kg. On admet pour une bonne dureté de la couche cémentée trempée HRC = 60.

84- Micrographie : contrôle des structures.

841- Contrôle des structure cémentées.

Lorsque la cémentation a été bien conduite et qu'il n'y a pas eu de décarburation superficielle, de ferrite, de cémentite en réseau ou en modules, pas d'oxydation aux joints de grains, dans la couche cémentée, on observe en portant de la périphérie :

Une couche eutectoïde à perlite compacte riche en carbone, sans carbure en excès. Cette partie, dont la teneur en carbone visée est de 0,8 % C, est appelée couche cémentée effective qui peut atteindre $\frac{2}{3}$ de la profondeur cémentée totale.

Une zone hypoeutectoïde, qui est une zone de transition entre l'âme et la couche cémentée effective.

Une zone ferritique à coeur.

842- Contrôle des structures cémentées trempées.

On regarde si dans la couche martensitique il n'y a pas de carbure en réseau ou en modules, s'il n'y a pas aussi d'excès d'austénite résiduelle.

85 - Conclusion.

Dans l'industrie on ne cherche pas à déterminer l'épaisseur exacte de cémentation. On désire surtout avoir l'assurance que cette couche n'est pas inférieure au minimum, ni supérieure au maximum exigés par l'emploi normal de l'organe (usure, efforts) traité et c'est ce qu'indiquent les témoins de cémentation, de même que les essais de dureté.

9 - QUALITES ET DEFAUTS DES PIÈCES CEMENTÉES.

91 - Influence de la température.

On prend pour tous les aciers de cémentation les températures de 900 à 925° c dans les buts suivants /:

- . Diminuer les risques de déformation des pièces.
- . Faciliter la régénération, en évitant le séjour à température trop élevée.

La température de cémentation, doit être maintenue constante ; c'est la raison pour laquelle les fours de cémentation sont équipés de thermo-couple avec régulateur.

92 - 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. Les surfaces doivent être exemptes de calamine, d'oxydes, de sulfures. Le choix du métal est de nature à exercer une influence prépondérante sur trois facteurs importants :

- . Vitesse de pénétration du carbone
- . Dureté de la surface carburée
- . 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 la 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.

Le nickel diminue la vitesse de cémentation, tandis que le chrome et le manganèse en augmentent la pénétration.

93 - Dureté insuffisante.

On doit pouvoir obtenir normalement une dureté Rockwell de 63 à 66 avec un bon acier de cémentation trempé à l'eau et 62 à 65 avec un acier allié trempé à l'huile.

Parfois on rencontre des ennuis au cours de la trempe des aciers cémentés pour lesquels une grande dureté superficielle est exigée. Si l'on apprécie à la lime la dureté de la couche cémentée il arrive que l'on trouve des parties plus dures que d'autres. Cet accident peut avoir comme cause la qualité de l'acier ou un mauvais traitement.

931 - Insuffisance de cémentation/

Ceci peut être dû soit à ' : un mauvais positionnement des pièces.

ou à : une décarburation dû à un manque d'étanchéité.

ou un : mauvais état de surface.

932 - Mauvaise trempe/

Si la teneur en carbone de la couche cémentée est correcte c'est vers les phénomènes de trempe qu'il faudra orienter les recherches.

94 - Ecaillages, Criques, tapures.

Quelquefois la couche cimentée s'écaille ou s'égrène sous la meule en rectification, cela étant dû à la présence de cimentite libre à la périphérie.

La rectification à grande vitesse, c'est à dire par passes exagérées avec arrosage insuffisant, a tendance à produire l'écaillage, par soulèvement de la couche cimentée. Le rectifieur enlevant la matière trop rapidement les particules métalliques s'attachent aux pores de la meule, il se produit alors un fort dégagement de chaleur qui amène les criques.

Un moyen pour éviter les criques et écaillages de la couche cimentée consiste à faire un revenu après trempe, à une température qui n'influe pas la dureté de la surface. Ce revenu se pratique généralement à 150°C.

95- Déformation des pièces cimentées.

Les déformations des pièces cimentées et trempées ne sauraient être évitées malgré les précautions prises, surtout pour ce qui concerne les pièces longues.

Au cours des opérations de cémentations (chauffage) et de trempes ; les modifications de volumes qui se produisent sont causes de ces déformations, en effet, le refroidissement étant plus rapide à l'extérieur de la pièce et dans ses parties les plus faibles,

Le changement de volume ne s'effectue pas simultanément dans toute la pièce ; il en résulte des tensions internes qui se traduisent par des déformations.

Un redressage après trempe des aciers cémentés est une opération qui peut amener des rebuts d'autant plus coûteux que la pièce est le plus souvent terminée.

Donc le mieux est de rechercher à éviter le redressage.

Pour certains organes ayant un axe de symétrie, il existe un sens de trempe pour lequel la déformation est minimum.

:- TROISIEME PARTIE -:

- FOUR DE CEMENTATION A LA SONACOME -

- APPAREILLAGE DE CONTROLE DES ATMOSPHERES -

1 - FOURS A BAIN DE SEL :

Les fours à bain de sel sont constitués par un bain de sel fondu dans une cuve chauffée extérieurement au méthane, par des brûleurs.

11 - La carcasse :

Elle est en tôle fortement raidie, comporte des ouvertures pour le logement des brûleurs, elle est largement isolée de la chambre de chauffe.

12 - Le briquetage : comporte

- une paroi calorifuge prévue pour réduire au minimum les pertes thermiques.
- une paroi réfractaire de qualité adaptée aux températures d'emploi du four. Les briques ont une excellente tenue mécanique et résistent bien aux chocs thermiques.

13 - Les brûleurs :

Ils sont quatre, et ils assurent le chauffage de la cuve. Le circuit des gaz de combustion garantit un chauffage très homogène.

14 - La cuve :

Elle est suspendue dans la chambre de chauffe par une colerette reposant sur une margelle en acier avec interposition d'un joint d'amiante pour réduire les pertes par conductibilité. Elle est en acier réfractaire.

La cuve a une profondeur relativement importante par rapport a son diamètre, elle présente ainsi une surface d'échanges thermiques importante qui permet de réduire sensiblement le gradient température extérieure / température du bain et lui confère une meilleure tenue.

L'évacuation des fumées de combustion se fait par une amorce de cheminée munie d'un volet de réglage.

1-5- Appareillage pyrométrique.

Monté sur une coffret mural, comporte :

- Un régulateur automatique de température, relié à un thermocouple placé dans une gaine de protection en acier réfractaire plongeant dans le bain.
- Deux lampes de signalisation permettent d'observer la marche du four.
- Un interrupteur général.

1-6- Appareillage de combustion.

Les brûleurs sont du type à mélange air/gaz. Ce mélange est obtenu à partir d'un mélangeur qui permet de régler à volonté le rapport air/gaz afin d'obtenir la combustion désirée à toutes les allures de chauffe.

Le mélangeur est alimenté :

- En air surpressé, par un groupe moto-ventilateur centrifuge muni de son contacteur - disjoncteur.

Le régulateur agit sur une vanne motirisée en aval du ventilateur, qui ouvre ou ferme cette alimentation en air surpressé.

- en gaz, par un détendeur muni d'une électrovanne asservie à la vanne motorisée de l'admission d'air. Ce dispositif permet une fermeture du gaz quand l'alimentation d'air est coupée.

17 - Cellule de récupération :

Le four est équipé d'une cellule de préchauffage par récupération des fumées de combustion. Cette cellule comporte une chambre calorifugée à l'intérieur de laquelle est disposée une enceinte métallique de préchauffage à sec. La circulation des fumées entre la paroi de la chambre et celle de l'enceinte, assure, dans l'enceinte une température suffisante pour préchauffer les pièces avant leur introduction dans le bain de sel (350° - 450° c)

18 - Aspiration des fumées :

Les sels fondus dégagent des fumées qu'il faut aspirer. Les fours sont munis d'un dispositif d'aspiration des fumées.

19 - Entretien :

Il se limite à un examen périodique de la cuve pour vérifier qu'elle ne présente aucune porosité et à un contrôle du bon fonctionnement de l'appareillage pyrométrique et de combustion.

2 - FOURS VERTICAUX DE CEMENTATION GAZEUSE :

Les fours verticaux de cémentation gazeuse comporte essentiellement une enceinte verticale en acier réfractaire dans laquelle sont chargées les pièces à traiter. Cette enceinte est disposée dans la chambre de chauffe d'un four électrique. La convection forcée de l'atmosphère cémentante assure :

- un chauffage rapide de la charge et une température très homogène dans toute la charge.
- le renouvellement du gaz autour des pièces, donc une cémentation régulière de toutes les pièces.
- la parfaite étanchéité de la chambre de traitement permet une mise en atmosphère rapide et garantit contre la pollution de l'atmosphère par rentrées d'air.

21 - La carcasse :

Elle est en tôle raidie montée sur pieds. Les parois sont largement isolées de la chambre de chauffe. Le couvercle métallique calorifugé est suspendu à une potence orientable ; il est traversé par les tubulures d'arrivée et dévacuation de l'atmosphère muni d'une soupape qui permet en outre l'introduction de l'échantillon ; la coupole qui ferme la chambre de traitement est en acier réfractaire.

22 - Le briquetage :

comporte une paroi réfractaire en briques silico-alumineuses

ayant une excellente tenue mécanique et une bonne résistance aux chocs thermiques.

23 - Les résistances :

Elles sont disposées de façon à assurer un chauffage très homogène de la chambre de traitement.

24 - Le moufle vertical :

En acier **réfractaire**, l'extrémité inférieure du moufle plonge dans un joint d'huile refroidi par circulation d'eau.

25 - Bloc de convection :

Il ferme le moufle vertical et il comporte :

a) une base robuste en fonte, fixée aux pieds du four. Une tôle verticale soudée à cette base, plonge dans le joint d'huile pour assurer l'étanchéité de la chambre de traitement.

b) une turbine en acier réfractaire dont l'axe refroidi par circulation d'eau traverse la base et est entraîné par un moteur électrique monté sur les pieds du four.

26 - Le panier :

En acier réfractaire et à parois **pleines** et sert de moufle pour la convection forcée de l'atmosphère. Il est en plusieurs parties qui s'emboîtent afin de répartir la charge en plusieurs étages.

27 - Appareillage électrique et pyrométrique

L'ensemble de l'appareillage groupé dans une cabine comprend:

- Le contacteur de régulation à soufflage magnétique.
- Le relais disjoncteur de protection du moteur de la turbine
- Un régulateur indicateur à deux, le premier réglé à 650°C ^{index} interdit l'admission d'atmosphère dans le four au-dessous de cette température, le deuxième réglé à la température de traitement assure la régulation lorsque la température de la charge approche de cette valeur. Il est relié au couple pyrométrique situé dans la charge.
- Un régulateur indicateur à un index réglé à une température légèrement supérieure à la température de travail ; il assure la régulation pendant la montée en température de la charge.
- Les lampes de signalisation d'allure de marche du four.

28 - Alimentation en atmosphère cémentante:

On envoie sous pression et en quantité réglable avec précision dans la chambre de traitement du perlitol (80% alcool isopropylique + 20 % white spirit) qui tombe sur une plaque qui est solidaire du couvercle. La température de la plaque et de l'enceinte assure une vaporisation instantanée et une décomposition du liquide pour former une atmosphère convenable de cémentation.

29 - Cellule de refroidissement :

La cémentation gazeuse s'effectue aux environs de 925°C, nettement au-dessus de la température de temps des aciers de cémentation. On pratique donc la trempe différée : la cémentation terminée, le four est ouvert et les paniers contenant la charge sont transportés rapidement dans une cellule de refroidissement qui est une enceinte étanche. cylindrique, verticale dont la double paroi métallique est refroidie par eau. Elle est munie d'un couvercle relevable, dont les bords s'insèrent dans un joint de sable, monté sur la carcasse pour assurer l'étanchéité. Elle est alimentée en gaz naturel pour protéger les pièces contre l'oxydation pendant le refroidissement.

3 - FOUR A BAC DE TREMPE INCORPORÉ :

Au C.V.I., il est surtout utilisé pour la trempe sous atmosphère.

31 - Conception :

Le cycle est entièrement automatique ; seuls les opérations d'introduction et de sortie des charges sont manuelles. Les temps de maintien à la température de travail et de séjour dans le bain de trempe sont réglés par minuterie.

32 - Chambre de chauffe :

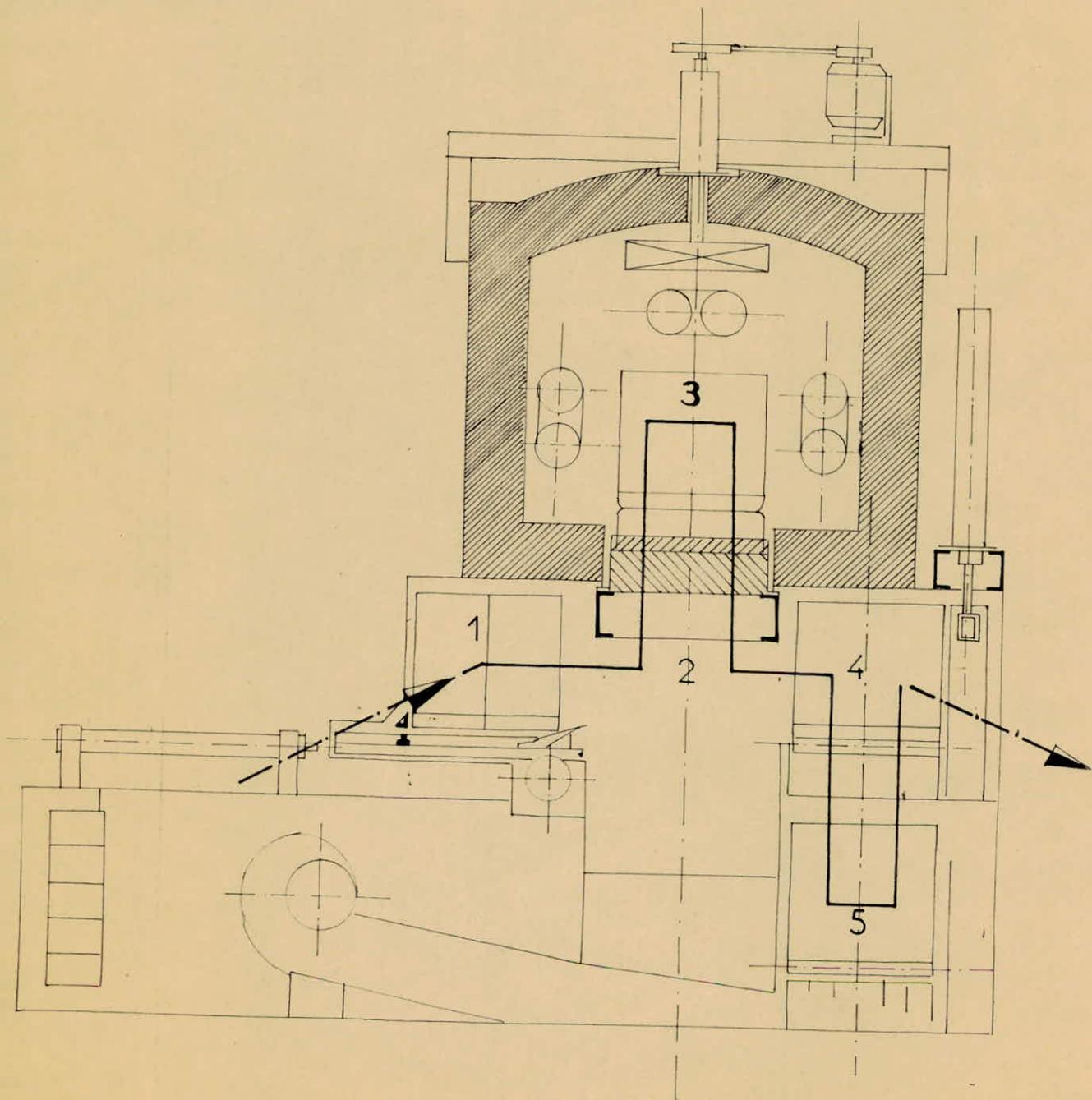
Elle est surélevée et grâce à cette disposition :

- aucun organe mécanique ne travaille à chaud, les vérins commandant les manutentions des charges dans le four sont montés à l'extérieur.
- la charge à tremper est abaissée de 3 à 2 et transférée de 2 en 4 en même temps qu'une charge à traiter passe de 1 en 2. Pendant que la charge à tremper est immergée en 5, la charge à traiter est introduite en 3 ; le nouveau cycle commence alors.

33 - Tubes radiants de forte section :

Ils donnent une grande puissance de chauffe, avec une faible dissipation de calories par unité de surface.

Coupe schématique du four G33



34 - Turbine de brassage de l'atmosphère :

Elle accélère le chauffage et assure une bonne homogénéité de la température et du traitement. Ses paliers sont refroidis par circulation d'eau.

35 - Bac de trempe :

Le volume du bac (8 000 litres) et la puissance de la pompe de circulation d'huile permettent la trempe homogène des charges.

. chauffage du bac de trempe

Par tube immergé et refroidissement par radioplaques à circulation d'eau ; la régulation de la température de l'huile commandée par thermostat.

. Débitmètres et vannes de réglage de l'atmosphère montés sur le four.

. Prise d'échantillons pour contrôle du traitement au cours du cycle.

. Dispositif de sécurité pour parer aux pannes de courant.

4 - RÉACTEURS ENDOOTHERMIQUES :

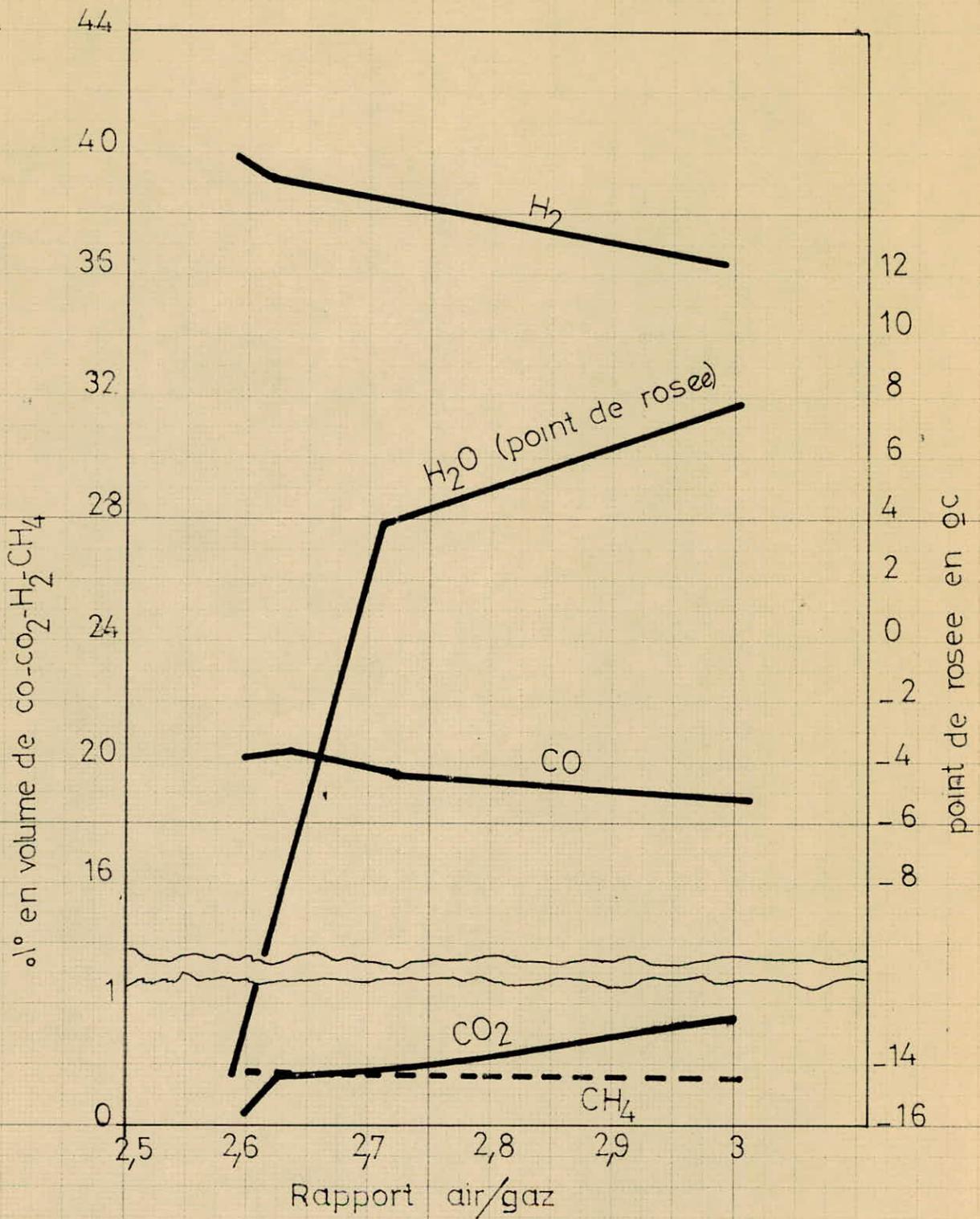
La production d'atmosphère se fait grâce à un générateur d'atmosphère de type endothermique qui alimente le four à bac de trempe incorporé. L'atmosphère réductrice est produite par réaction endothermique.

41 - Fonctionnement d'un générateur endothermique :

Un surpresseur aspire le gaz et l'air en proportion définie, réglée par deux débitmètres. Le mélange est envoyé sur un catalyseur contenu dans une cornue chauffée à 1 050° c. A son contact, il réagit pour donner un gaz comprenant essentiellement CO, H₂ et N₂ avec de faible quantité de CO₂ et de H₂O. Le gaz quitte la cornue passe à travers un refroidisseur et un échangeur qui stoppent la réaction $CO \rightleftharpoons CO_2$.

42 - Composition type d'atmosphères endothermiques :

Rapport gaz/air	CH ₄	CO	CO ₂	H ₂	N ₂	pt de rosée
2,1	0,7	28,5	0,1	47,4	23,3	- 10°c
1,9	0,4	28,0	0,2	45	26,4	0°c
1,7	0,3	27,6	0,6	43	28,5	- 13°c
1,5	0	27,2	1	42,2	29,6	20°c



Variation de l'analyse et de l'humidité d'un gaz endothermique en fonction du rapport air/gaz d'alimentation du générateur

Potentiel de carbone
des atmospheres
III atmosphere CO=20% - H₂=40%
a 925°C

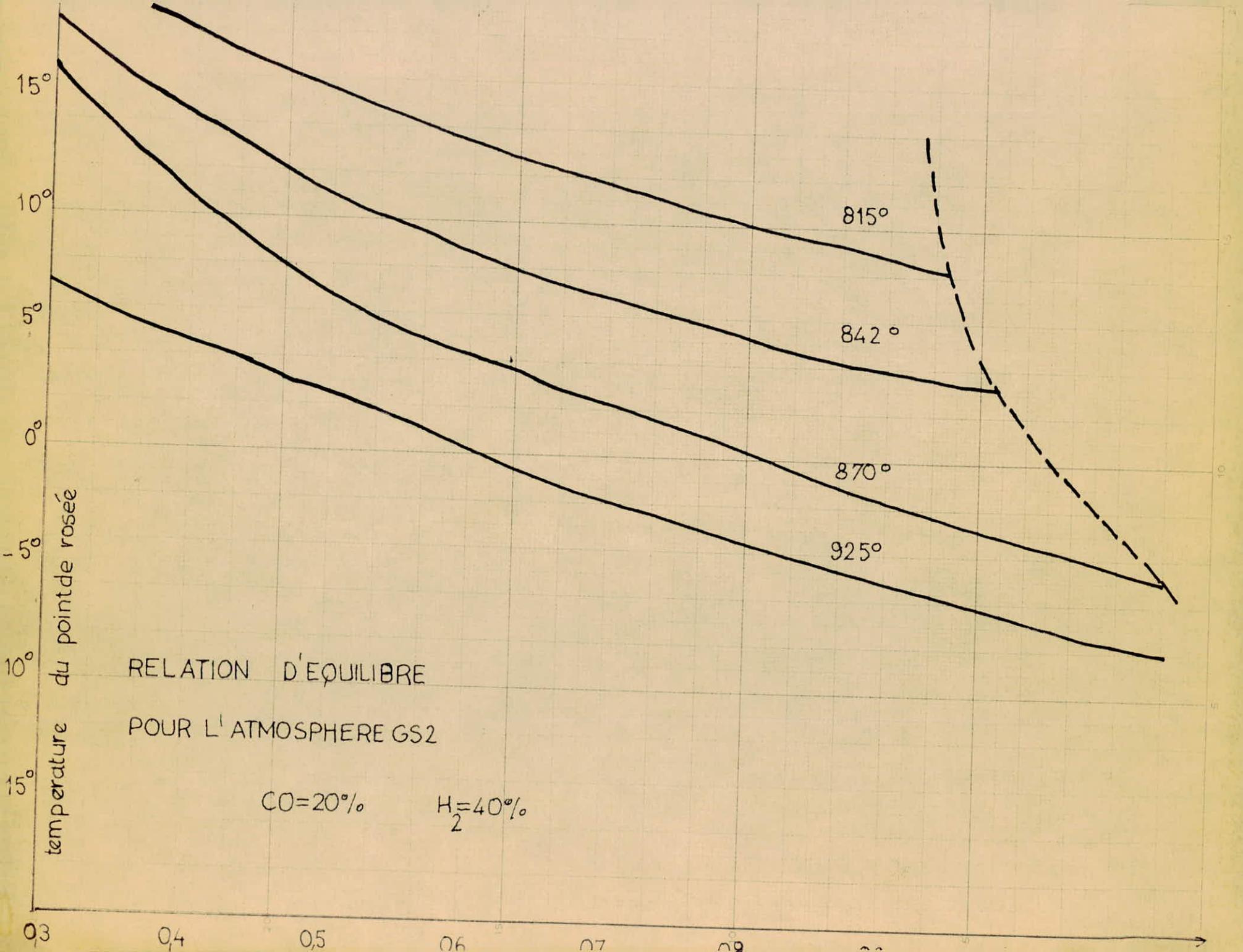
carbone % a l'equilibre avec fer pur	CO % 2	point de rosee °C
1,20	0,09	- 10,5
0,80	0,13	- 4
0,70	0,17	- 3
0,60	0,20	0
0,50	0,24	+ 2
0,40	0,30	+ 5
0,30	0,38	+ 9
0,20	0,59	+ 15
0,10	1,10	+ 26

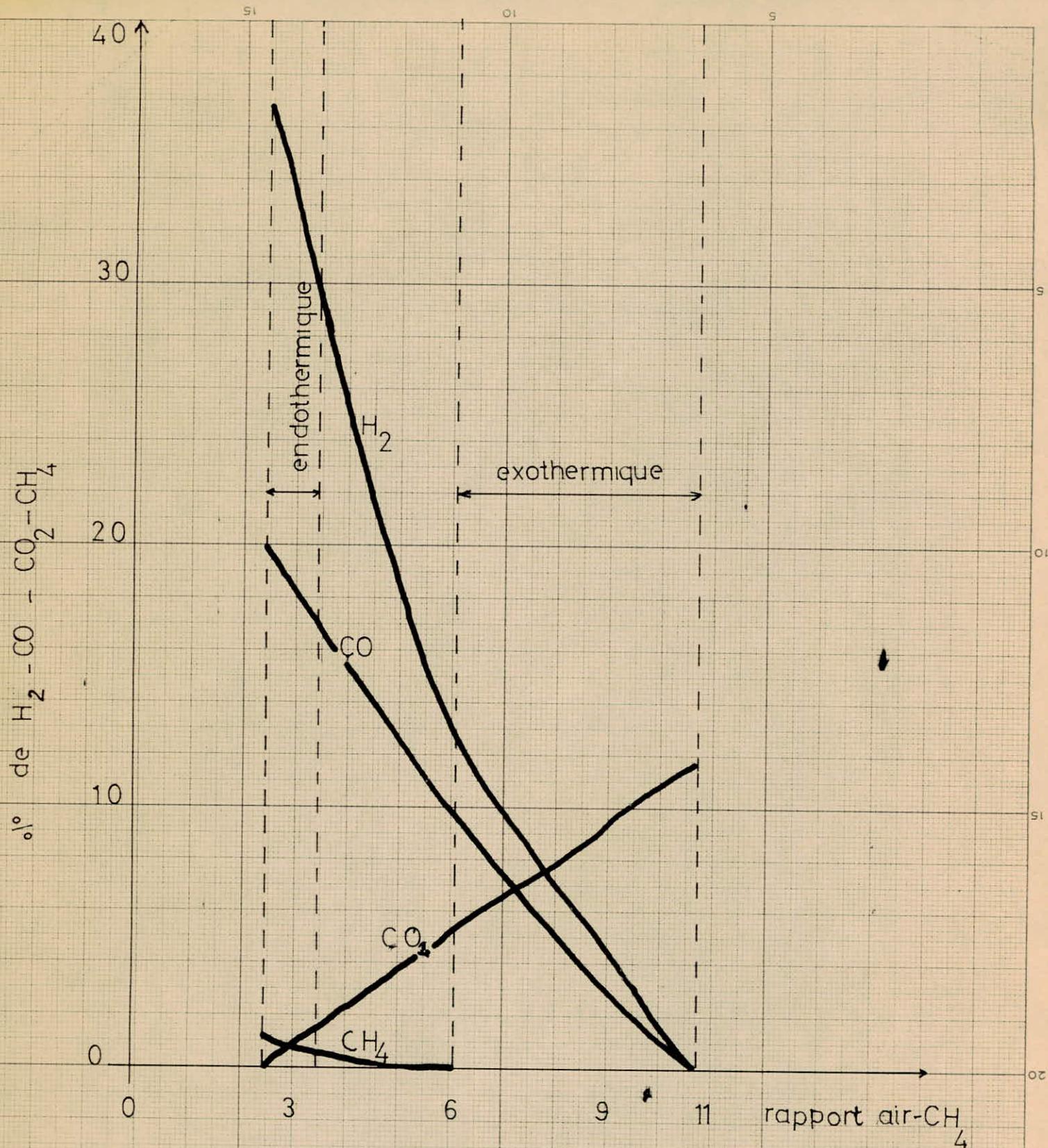
D'apres METALS HANDBOOK
volume 2 8^e edition

Potentiel de carbone
des atmospheres
II atmosphere CO=20% - H₂=40%
a 870°C

carbone % a l'equilibre avec fer pur	CO % 2	point de rosee °C
1,20	0,19	- 3
0,80	0,29	+ 2
0,70	0,33	+ 4
0,60	0,39	+ 6
0,50	0,45	+ 9
0,40	0,55	+ 12
0,30	0,75	+ 17
0,20	1,10	+ 23
0,10	1,85	+ 35

D'apres METALS HANDBOOK
volume 2 8^e edition





- courbe de rapport air-CH₄ -

43 - Description :

Le générateur comprend :

- Les débinètres à lecture directe (3) permettent le réglage du rapport air/gaz.

431 - La cornue à catalyseur :

La catalyseur est constitué de petits cubes silico-alumineux imprégnés de Nickel empilés dans une cornue cylindrique en alliage réfractaire.

432 - La chambre de chauffe :

Elle est formée d'un ensemble cylindrique vertical calorifugé à chauffe électrique. La température de la chambre est maintenue à température convenable par un régulateur.

433 - Le surpresseur :

Le mélange air/gaz est maintenu à une pression déterminée quel que soit le débit du générateur par un surpresseur du type volumétrique.

434 - L'échangeur :

Il est du type tubulaire à circulation d'eau.

435 - Le dispositif déverseur :

Il maintient la pression d'utilisation constante quel que soit le débit d'utilisation.

436 - Dispositif de sécurité :

Une électrovanne est montée sur l'alimentation en gaz. Elle se ferme en cas de manque de courant électrique ou en cas de pression insuffisante de gaz. Un signal sonore avertit du manque d'eau dans le circuit de refroidissement ; un contact pyrométrique interdit l'introduction de gaz en dessous d'une certaine température.

5 - APPAREILLAGES DE CONTRÔLE DES ATMOSPHERES :

51 - Contrôleur basé sur la teneur en eau du gaz :

Le point de rosée correspond à la température à laquelle les premières traces de condensation apparaissent lorsqu'on refroidit progressivement le gaz. On comprime un échantillon de gaz à analyser et on note la pression à laquelle apparaissent les premières traces de condensation lorsqu'on le détend : connaissant la température et la pression initiales du gaz, on en déduit son point de rosée.

52 - Système microcarb - Le carbohm :

Il consiste à mesurer la résistance électrique d'un fil d'acier placé dans l'atmosphère à sa température d'utilisation normale. La résistance de ce fil variant avec la température et sa teneur en carbone, on pourra en comparant cette résistance à celle d'un fil identique placé à la même température dans une atmosphère neutre, étalonner directement l'appareil de mesure de résistance en teneur en carbone, de l'acier à l'équilibre avec le gaz à la température considérée.

En pratique, on utilisera un fil suffisamment fin ($\varnothing = 1/10$ mm) pour arriver rapidement à l'équilibre avec les gaz qui l'entourent.

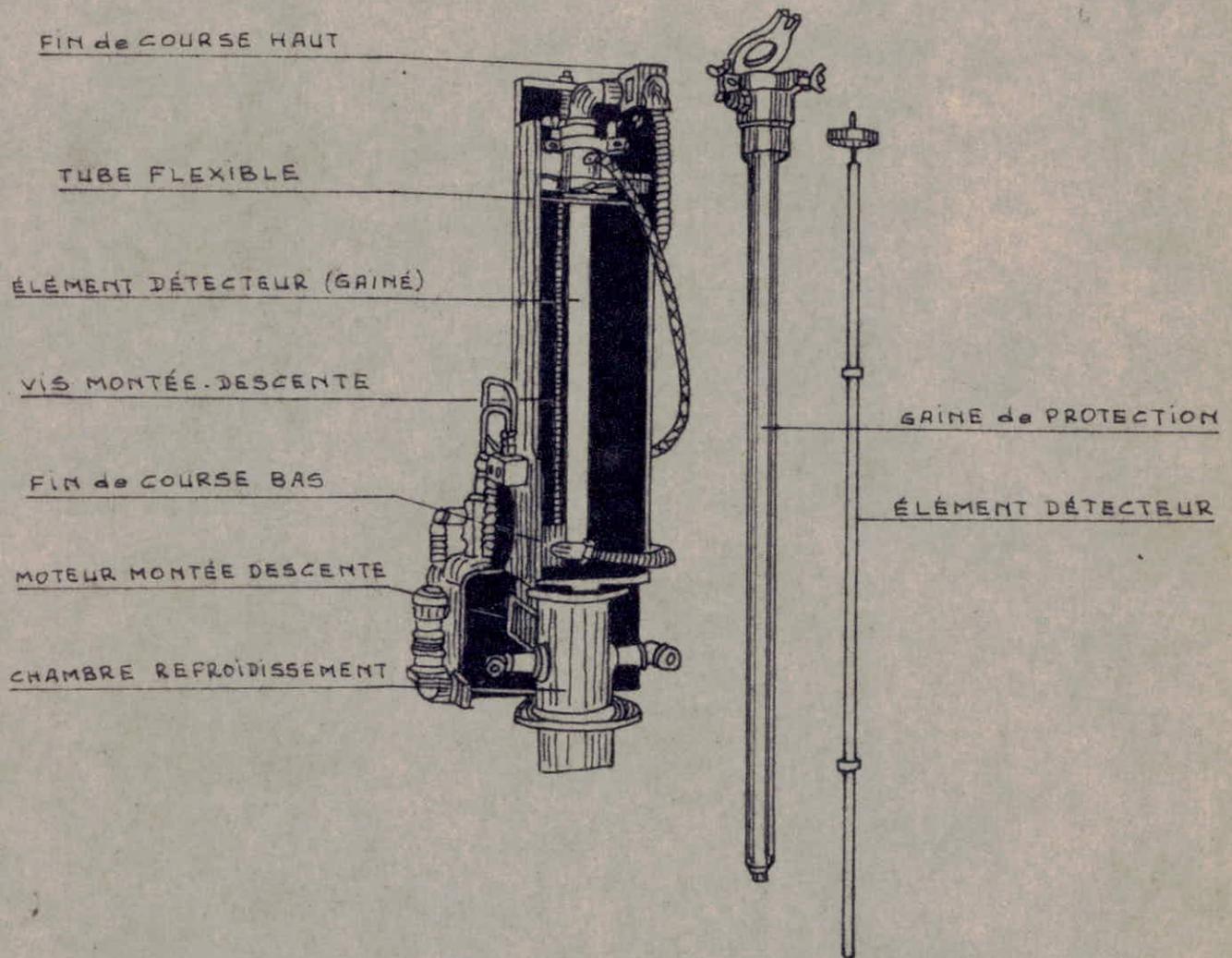
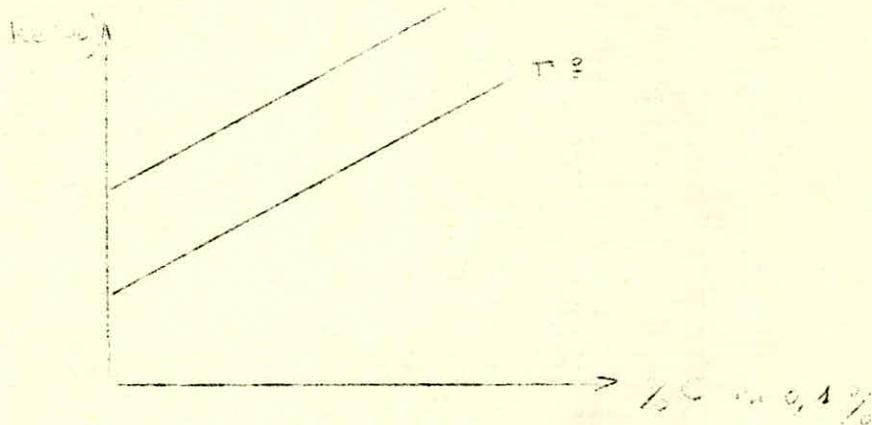


FIG 2 : ÉLÉMENT DÉTECTEUR
MONTAGE sur FOUR

Le fil utilisé sera en alliage Fe - Ni (3 % de Nickel) pour rester austénitique même à faible teneur en carbone, dans tout le domaine de température normalement utilisées pour les traitements de cémentation ou de recarburation (790° - 950° c)

La variation de résistance est fonction linéaire à la fois de la teneur en carbone et la température.



Il est donc nécessaire de connaître avec précision la température de l'atmosphère et de comparer exactement la variation de résistance due à la température.

On montera donc en opposition dans un pont de Wheastone, l'élément détecteur et une résistance de compensation dont la résistance variera linéairement avec la température comme celle de l'élément détecteur.

En pratique l'appareil de mesure est utilisé comme régulateur, les déviations du pont, commandant le débit du fluide cémentant. Le réglage du zéro de l'appareil est basé sur le fait que la résistance du fil décroît avec une teneur en carbone décroissante, puis se met à remonter dès les premières traces d'oxydation du fil. Celle-ci a lieu pour une température donnée, pour une certaine valeur "Cm" de la teneur en carbone de l'alliage fournie par le constructeur de l'appareil.

Pour régler l'appareil on introduit donc une légère quantité d'air dans le gaz circulant au contact du fil détecteur, jusqu'à ce que l'on observe un changement de sens dans la variation de la résistance. A ce moment on arrêtera l'opération et l'on réglerá les résistances de calibre du pont pour amener l'indication de l'appareil sur la valeur "Cm".

: - CONCLUSION GENERALE - :

Cette étude a surtout été l'occasion de connaître les traitements thermiques, procédés qui actuellement avec leurs spécificités nécessitent de plus en plus de gens hautement qualifiés.

Elle a permis aussi de faire découvrir vu le cadre, dans lequel elle s'est faite, le milieu industriel avec ses particularités différentes de celles du laboratoire universitaire, d'où une sensibilisation de l'étudiant des problèmes concrets qu'il a pu rencontrer.

Nous pensons que ce genre d'expérience est souhaitable pour l'étudiant qui se choisit une vocation industrielle et cela renforcera sans doute le lien entre l'université et l'industrie.

Nous souhaiterions que ce travail soit poursuivie, par l'étude des autres traitements de surface utilisés à la SONACOME (C.V.I.) :

- trempe H F
- phosphatation
- sursulf

ou la détermination des coefficients de cémentation ($k = \frac{e}{\sqrt{T}}$) c'est-

à dire, voir pour chaque four et chaque famille de pièce, et cela à chaque instant durant la cémentation, du temps nécessaire à l'opération de la cémentation. Cette étude se basera sur des données de deux années de production en cémentation gazeuze, et cela pour une juste approximation des résultats.

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



- * Techniques de l'ingénieur : Métallurgie , tome II
(Précontraintes et durcissements : 1180) .

- * Métallographie et traitements thermiques des métaux .
I. LAKHTINE . (éd. MIR .)

- * La pratique des traitements thermiques des métaux industriels .
G. DE SMET . (éd. DUNOD .)

- * Atmosphères contrôlées dans les traitements thermiques .
I. JENKINS . (éd. DUNOD .)

- * Chimie : H. GUERIN . (éd. DUNOD .)

- * Documents UGINE - INFRA .

- * Documents MECI .

...../.....

