

3/75

UNIVERSITE D'ALGER

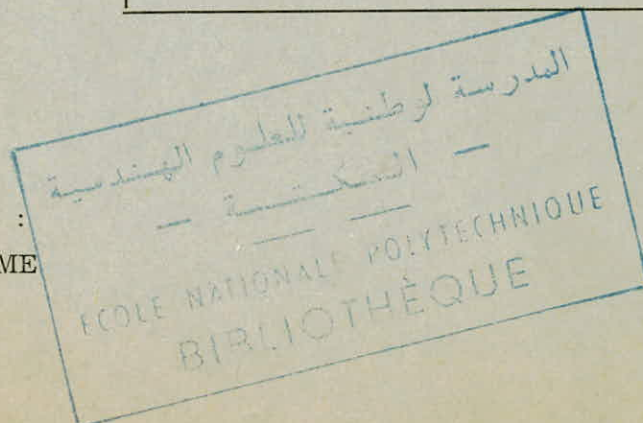
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT MINES ET METALLURGIE

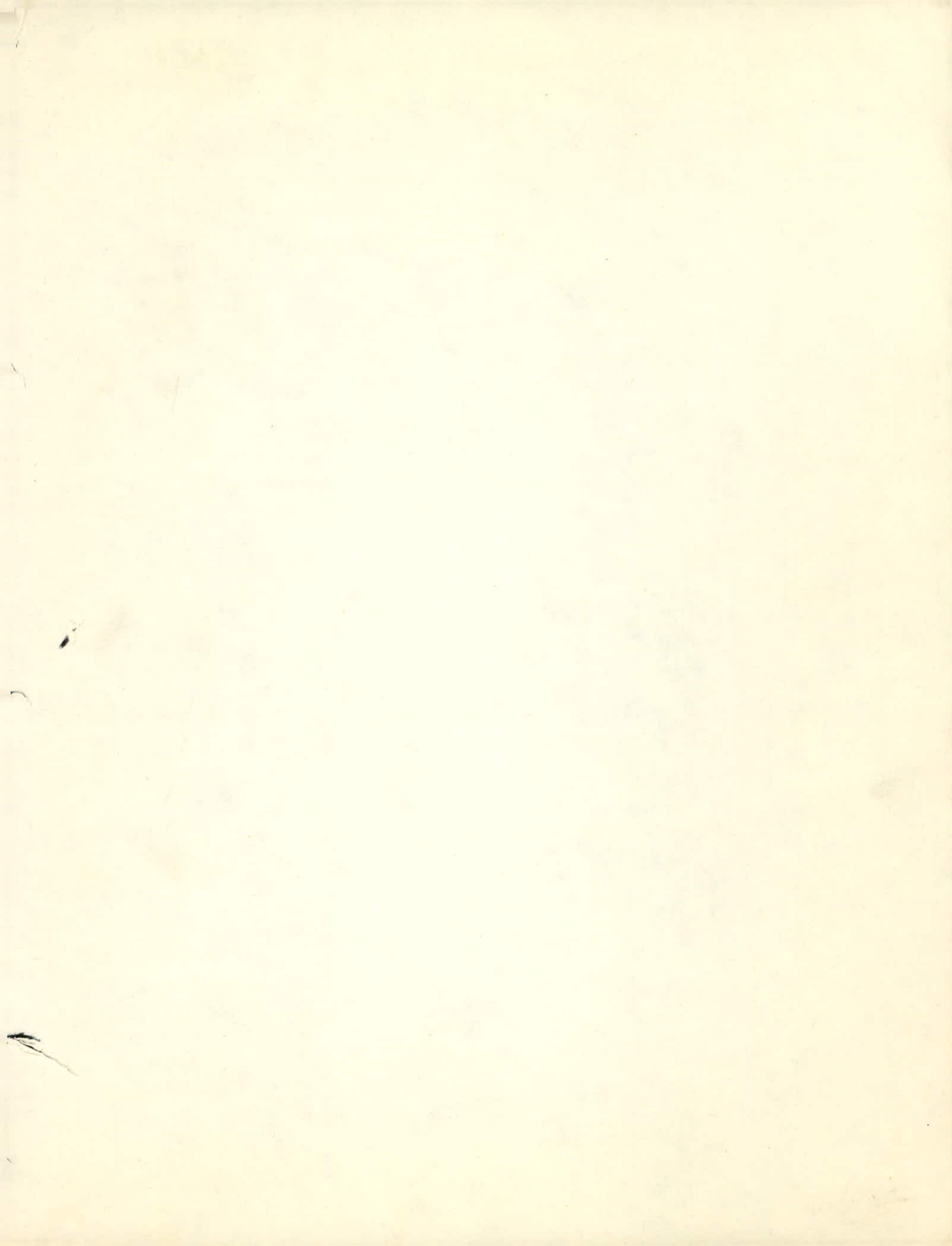
Projet de Fin d'Etudes présenté par Fatiha BENHAMOU

TRAITEMENTS THERMIQUES
D'UNE PIECE MECANIQUE

Sujet proposé :
par SONACOME



Dirigé :
par M. LECOMTE



Il m'est agréable pour commencer, d'exprimer mes sentiments de profonde gratitude à l'égard de tous ceux et toutes celles qui m'ont aidée à mener à bien ce travail.

C'est avec beaucoup de déférence que je tiens à remercier Monsieur LECOMTE de m'avoir inspiré le sujet de ce projet et d'avoir veillé à sa réalisation avec un soin bienveillant.

Durant ma scolarité de 4ème et 5ème année, j'ai reçu son enseignement dont j'ai apprécié le réalisme et la rigueur scientifique et technique. Qu'il me soit permis de lui exprimer, aujourd'hui, ma gratitude.

Je suis vivement reconnaissante à Monsieur BERTHELEMY qui a bien voulu me donner avec beaucoup de compétence certains rappels métallurgiques nécessaires pour aborder le présent travail avec beaucoup plus de sérénité et de maîtrise.

Ma reconnaissance est depuis longtemps acquise à Messieurs les Professeurs du Département Mines et Métallurgie, à Messieurs les Professeurs de l'Ecole Nationale Polytechnique.

Mes remerciements vont aussi à la Direction de la SONACOME C.V.I de ROUIBA.

Ces remerciements s'adressent également à Monsieur FAID Directeur Technique du Complexe, à Messieurs COTTAREL et MILLY, à tout le personnel du Complexe ROUIBA pour l'aide efficace et désintéressée qu'ils m'ont apportée.

Je n'oublierai pas tous ceux et toutes celles qui sur le plan matériel m'ont apporté leur concours.

A tous je n'oublierai pas ce que je dois

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

	Pages
PREMIERE PARTIE	
1. Introduction	2
2. Historique	3
3. Généralités	7
3.1. Critères du choix	7
3.2. Classification des traitements thermiques	7
3.3. Moyens de contrôle	8

DEUXIEME PARTIE

CHAPITRE 1 : PRESENTATION DE LA PIECE

1. Fonction de l'arbre de commande	21
2. Géométrie de la pièce	21
3. Sollicitations de cette pièce	23
4. Solutions apportées	24

CHAPITRE 2 : SUIVI DE FABRICATION

.1. FORGE

1.1. Réception de la matière brute	32
1.2. Forgeage	33
1.3. Contrôle	37
1.4. Conclusion	39

.2. TRAITEMENT THERMIQUE DE PREPARATION	
2.1. Théorie de ce traitement thermique	39
2.2. Organisation de ce traitement thermique	43
2.2.1. Description et fonctionnement de l'installation	44
2.2.2. Grenailage	47
2.2.3. Contrôle	47
2.3. Conclusion	48
.3. USINAGE	48
.4. TRAITEMENT THERMIQUE D'UTILISATION	
4.1. But de ce traitement	49
4.2. Théorie et application de la cémentation gazeuse	49
4.2.1. Procédé de la cémentation gazeuse	49
4.2.2. Cémentation dans l'industrie	61
4.3. La Trempe	74
4.3.1. La trempe différée	75
4.3.2. Pratique de la trempe différée	79
4.4. Le Revenu	87
4.5. Contrôle	89
4.6. Conclusion sur le traitement thermique d'utilisation	90

	Pages
.5. REDRESSAGE	91
.6. RECTIFICATIONS	92
.7. PRIX DE REVIENT DE LA FABRICATION DE LA PIECE	92

CONCLUSION GENERALE

- 1 -

-O PREMIERE PARTIE O-

1 - INTRODUCTION

Le but du projet est de suivre la fabrication d'une pièce mécanique, depuis la barre d'acier sur le parc jusqu'au magasin de stockage du produit fini en insistant sur l'aspect métallurgique : traitements thermiques de préparation et des traitements thermiques d'utilisation.

La première partie du plan d'étude est réservée à l'explication et aux moyens de contrôle des traitements thermiques.

La deuxième partie, l'essence même du projet, est consacrée à l'étude des différents procédés industriels et à l'explication des phénomènes métallurgiques résultants lors de la réalisation de la pièce mécanique.

oO _____ oOo _____ Oo

2 - HISTORIQUE

Destinés à améliorer et à modifier les propriétés des métaux et des alliages, les traitements thermiques ont suivi, sur le plan industriel, les progrès des connaissances métallurgiques.

Depuis le début de ce siècle, ils ont transformé les possibilités offertes par les matériaux de construction.

L'histoire de leur développement se situe dans un temps relativement court.

Il est possible, que les Egyptiens, dix siècles avant notre ère, aient pratiqué la trempe dans les liquides.

Plus récemment, les armuriers de l'Inde, ceux de Damas, d'Espagne, des artisans japonais, ont réalisé avant le dixième siècle des armes d'une beauté inégalée. Certains d'entre eux disposaient, dans les fers météoriques, d'aciers inoxydables susceptibles parfois de durcir par auto-trempe, qui se sont conservés sans trace de corrosion jusqu'à nos jours.

En fait, c'est seulement à partir de la fin du siècle dernier que les traitements des aciers de construction, puis des aciers spéciaux, ont pris naissance. Encore a-t-il fallu l'essor de l'automobile, de l'aviation et de l'armement pour conférer à cette évolution, toute son ampleur.

Grâce à l'emploi d'aciers alliés, des traitements, efficaces autrefois seulement sur les pièces de faibles dimensions, ont été, étendus à des éléments d'une importance considérable : pièces moulées ou forgées pesant plusieurs dizaines de tonnes.

Les traitements thermiques s'adaptent aux nécessités nouvelles, et se modifient, en complétant parfois l'action des traitements mécaniques ; ce qui permet d'atteindre sur certains alliages, des caractéristiques exceptionnelles.

Cette revue des dates principales qui ont marqué l'évolution des traitements thermiques dans leurs différentes applications, montre à la fois la nouveauté de cette technique et l'importance de son développement dans tous les domaines industriels.

Il y a maintenant peu d'éléments des industries mécaniques, chimiques, électriques qui ne soient traités thermiquement.

Ainsi l'évolution des traitements thermiques peut se caractériser schématiquement par les principales tendances suivantes :

- une précision accrue dans la définition et le contrôle des cycles thermiques pour produire de façon certaine et répétée, dans les fabrications en série, les améliorations recherchées, et, également, pour obtenir sans aléa les caractéristiques les plus hautes.

- une extension des applications à la fois vers les pièces minuscules comme celles de l'horlogerie ou de l'électronique, et vers les pièces considérables nécessaires aux industries lourdes, ce qui nécessite une évolution parallèle des moyens d'exécution.

- une modification des buts de traitement : on ne cherche pas seulement à produire des matériaux ayant intrinsequement de hautes caractéristiques, mais à produire en même temps une amélioration d'ensemble par la génération de précontraintes susceptibles de modifier profondément le comportement des pièces ;

- un soin particulier pour éviter de détériorer, au cours des traitements, la surface des pièces qui est le lieu des plus grandes

fatigues et le point de naissance, en service, des corrosions.

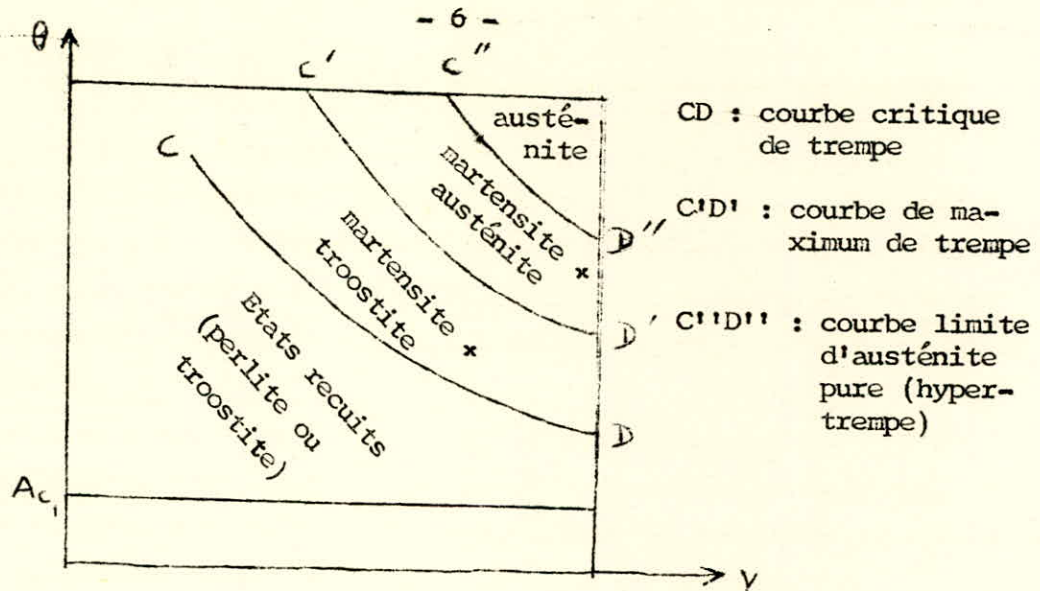
Les traitements thermiques doivent ainsi, non seulement ne pas détériorer ces surfaces, ne pas changer leur forme ou leur micro-géométrie, mais les amener dans un état de composition, de structure, et de précontrainte favorables. Les traitements thermiques superficiels, les cémentations multiples ont pour objet de réaliser ces états.

La mise au point chimique de tous les alliages, capables d'être améliorés par traitement thermique ou thermomécanique approprié à chacun, résulte directement des progrès de certaines connaissances concernant les propriétés physico-chimiques des métaux et alliages.

Un traitement thermique spécifique est donc appliqué à la nature du matériau, à la géométrie de la pièce et au but, où le temps et la température, ainsi que la variation de la température en fonction du temps sont les paramètres essentiels.

Le graphe $\theta = f(t)$ est appelé cycle thermique.

La température de mise en solution avant trempé et la vitesse de refroidissement étant, pour un alliage donné, les plus importantes, il est logique d'exprimer la trempabilité en représentant l'avancement de la réaction en fonction de ces deux paramètres, portés sur deux axes de coordonnées : v et θ



On voit ainsi apparaître les courbes caractéristiques limitant les états hypertrempés (austénite pure), les états trempés (martensite), les états de décomposition partielle ou totale de l'austénite (troostite-perlite).

D'une façon générale, nous pouvons dire que les traitements sont basés sur les transformations dues au cycle thermique, transformations qui ne sont, elles-mêmes, que le résultat des mouvements des atomes (sauf dans la trempe) et du réarrangement des structures qu'ils peuvent former.

Aux phénomènes de diffusion lors des traitements thermiques, se rattachent les problèmes d'enrichissement comme ceux de la cémentation par le carbone, de la nitruration par l'azote,

- 3 - GENERALITES

.1. Critères du choix d'un traitement thermique.

C'est évidemment le but visé qui devra nous guider.
Le but est toujours d'obtenir une pièce répondant aux conditions d'emploi, fixées au préalable d'après les sollicitations de tous ordres, auxquelles elle sera soumise au cours de sa vie.

Le choix du métal constitue la condition première : mais ce choix sera fait le plus souvent en fonction des caractéristiques que pourront attribuer au métal des traitements thermiques convenables.

Le choix du métal et le choix des traitements thermiques sont étroitement liés.

.2. Classification des traitements thermiques.

Il faut distinguer :

- les traitements de préparation

Ils sont destinés à faciliter, ou même à rendre possible une opération ultérieure tel que :

- un usinage
- une déformation élastique
- ou encore un autre traitement thermique.

- les traitements d'utilisation

Ils sont destinés à conférer à la pièce les caractéristiques mécaniques souhaitées.

.3. Moyens de contrôle :

On utilisera trois moyens principaux de contrôle pour les traitements thermiques :

- la dureté
- la macrographie
- la micrographie

.3.1. La dureté

La détermination de la dureté est une méthode facile.

Définition

La dureté est en général la faculté de résistance qu'offre un corps à la pénétration d'un corps plus dur que lui. Elle est caractérisée par un nombre qui dépend du genre d'essai exécuté.

Essais de dureté classique

En métallurgie, les duretés les plus employées sont :

- dureté Brinell
- dureté Rockwell
- dureté Vickers

.3.1.1. Dureté Brinell

Principe

L'essai consiste à imprimer dans le métal à traiter une bille en acier trempé de diamètre D sous une charge F , et à mesurer le diamètre d laissé sur la surface après enlèvement de la charge.

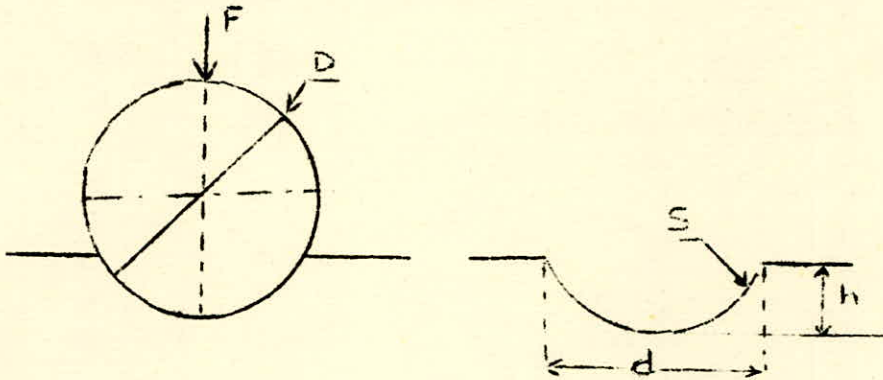
Symbole et désignation.

$$HB = \frac{F}{S}$$

HB : dureté Brinell

F : charge en kgF

S : surface de l'empreinte en mm²



$$HB = \frac{2 F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Essai normal

On utilise :

- une bille de diamètre = 10 mm
- une charge d'application F = 3000 kgF
- un temps d'application t = 10 s

La surface d'essai doit être lisse et plane.

Mesure

- diamètre \underline{d} de l'empreinte qui est la moyenne des deux lectures perpendiculaires

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

- lecture du diamètre de l'empreinte d se fait à l'aide d'une lunette micrométrique.

La dureté n'est pas donnée directement par lecture ; néanmoins , connaissant le diamètre d , on en déduit la dureté d'après un tableau (voir en annexe).

Avantages de l'essai

- facilité de mesurer l'empreinte
- la dureté Brinell est le procédé le plus précis pour le contrôle de dureté.

Inconvénients :

- pas de lecture directe de la dureté
- procédé inutilisable pour les petites pièces (charge trop grande)
- surface de l'acier doit être meulée, d'où essai destructif dans certains cas.

.3.1.2. Dureté Rockwell

Principe

L'essai consiste à imprimer en deux temps, dans la couche superficielle de la pièce à essayer, un pénétrateur de type normalisé (Bille ou Cône), et à mesurer l'accroissement rémanent e , de la profondeur de pénétration de ce pénétrateur ; l'unité de mesure de e , est égale à 0,002 mm. De cet accroissement lu sur un comparateur gradué directement en dureté, on déduit un nombre appelé dureté Rockwell.

Symbole et désignation.

La dureté Rockwell est désignée par le symbole HR, suivi par la lettre, indiquant le type de pénétrateur et la charge utilisés.

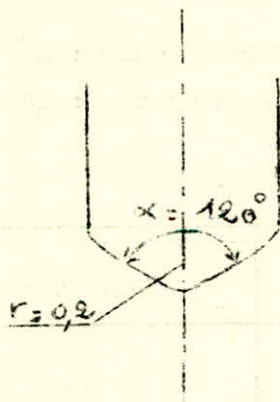
HR_C : dureté Rockwell au cône (120°) en diamant sous 150 kg

HR_B : dureté Rockwell à la bille (1/16), sous 100 kg

Pénétrateur Charge kgf.	Diamant cône 120°	Bille (1/16)	Bille (1/8)	Bille (1/4)	Bille (1/2)
60	A	F	H	L	R
100	D	B	E	M	S
150	C	G	K	P	V

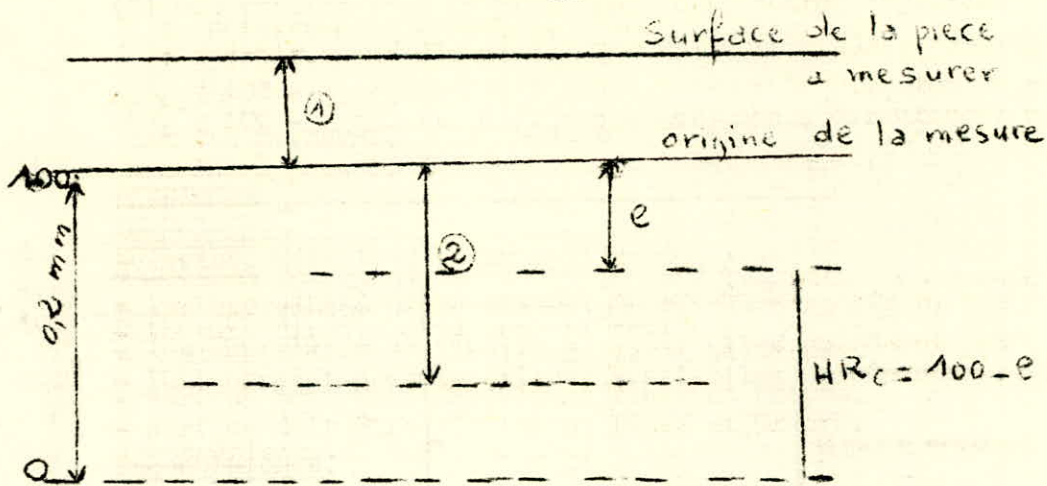
La précharge est de 10 kgf.

Essai de dureté au cône de diamant.



angle au sommet :

$$119,5^\circ < x < 120,5^\circ$$



(1) pénétration sous la précharge

(2) pénétration sous la précharge et la charge appliquée

e : accroissement rémanent.

$HR_c = 100 - e$; cette différence est donnée directement par la machine à essai. (voir annexe -8.b.)

Avantages

- lecture directe d'où travail rapide
- les empreintes sont petites, aussi elles ne gênent pas
- surface doit être simplement lisse et propre.

Inconvénients.

- essai ne convient pas aux matériaux tendres lorsqu'on utilise HR_c
- il est indispensable que la pièce repose sur un support rigide.
- il est nécessaire que le matériau soit homogène.
- état de la surface à biller correcte.

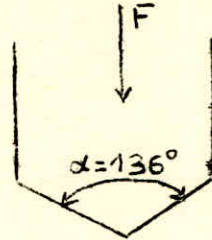
3.1.3. Dureté Vickers.

Principe

L'essai consiste à imprimer dans le métal à essayer, un pénétrateur en forme de pyramide droite à base carrée, d'angle au sommet prescrit, sous une charge F; et à mesurer la diagonale d de l'empreinte laissée sur la surface après enlèvement de la charge.

Symbole et désignation .

$$HV = \frac{F}{S}$$



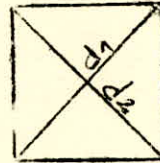
S: surface de l'empreinte

charges employées: 2Kgs <math>F < 120 \text{ Kgs}</math>

charge normale d'essai: 30 Kgs

temps d'application : 15 s

diamètre de l'empreinte: $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$



La dureté de Vickers est donnée par la formule :

$$HV = \frac{F}{S} = \frac{2F \sin 68^\circ}{d^2}$$

$$HV = 1,854 \cdot \frac{F}{d^2}$$

F: charge exprimée en grammes

d: longueur de la diagonale de l'empreinte en microns

Des tables de coefficient de dureté Vickers donnent respectivement les valeurs de $\frac{1,854}{d^2}$ pour chaque valeur de d de micron en micron.

Ce coefficient est multiplié par le poids, exprimé en grammes de la charge ayant servi à la mesure.

Fixation de l'angle de 136°

Dans l'essai Brinell, la précision dépend du rapport $\frac{d}{D}$ du diamètre de l'empreinte au diamètre de la bille.

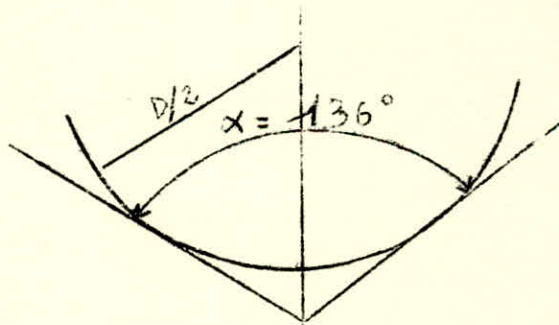
L'expérience a montré qu'elle est meilleure lorsque ce rapport est aux environs de $\frac{3}{8}$ (0,375) ; autrement dit :

$$0,25 D < d < 0,5 D$$
$$\text{soit } d = \frac{D (0,5 + 0,25)}{2} = 0,375 D$$

Théoriquement cette valeur 0,375D est idéale.

Pour 0,375D, le cône circonscrit à la bille suivant le cercle d'empreinte, a un angle au sommet de 136°

c'est par comparaison que l'on a choisi cet angle de 136°.



Avantages

- application pour tous les matériaux métalliques même les plus durs
- les empreintes sont petites, donc elles gênent peu.
- dureté indépendante de la charge.

Inconvénients.

- lecture indirecte
- la surface doit être bien polie.

Relation entre HB et HV

, HV \approx HB pour les pièces de dureté inférieure à 300

Conclusion

La précision de cette méthode et le large domaine de son application (voir microdureté) font que l'essai Vickers reste de loin celui qui donne les meilleurs résultats.

.3.1.4. Microdureté.

La plus utilisée est la méthode Vickers, mais avec de faibles charges (10 g à 2000 g)

Le microduremètre.

Principe.

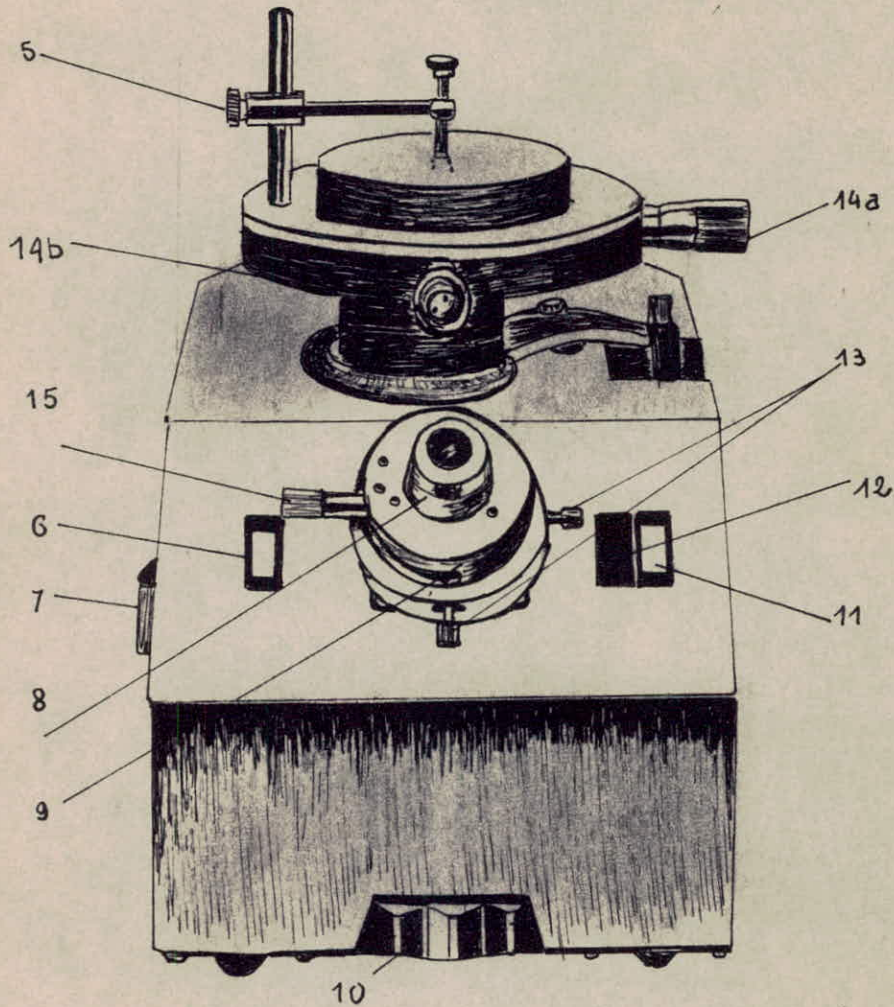
La précision de mesure de la dureté est fonction principalement de celle avec laquelle les dimensions de l'empreinte sont mesurées, ainsi que la fidélité du dispositif.

En éliminant l'action de l'opérateur, grâce à l'automatisme du cycle de pression du diamant sur l'échantillon, une grande part d'erreur est supprimée. Seule subsiste, celle due à la lecture micrométrique. Il faut veiller à ce que l'empreinte ait une dimension conforme à celle du grain.

Description.

L'appareil que nous avons utilisé, se présente sous la forme d'un microscope métallographique inversé dont la platine, mobile en rotation et en translation reçoit l'échantillon.

MICRO duremetre



Commande des réglages et du fonctionnement.

- | | | | |
|----|-------------------------------------|----|---------------------------------------|
| 5 | Bouton de blocage du valet | 11 | Commande du cycle |
| 6 | Commutateur d'allumage | 12 | Voyant de contrôle |
| 7 | Commutateur d'intensité d'éclairage | 13 | Vis de centrage du réticule |
| 8 | Cône de mise au point de l'oculaire | 14 | Palmeurs de déplacement de la platine |
| 9 | Couronne de commande du micromètre | 15 | Tige de rotation du réticule. |
| 10 | Molette de mise au point. | | |

La charge choisie entre 10 g et 2000 g, est disposée sur les plateaux d'une balance.

L'observation est faite au grossissement x500.

Emploi.

- préparation et mise en place de l'échantillon.

Pour que l'empreinte soit nette, l'échantillon doit être convenablement poli, et éviter qu'il ne soit gras.

- mesure de l'empreinte.

La lecture de la diagonale se fait avec le micromètre incorporé. Pour plus de précaution, on fait la lecture des deux diagonales, puis on fait la moyenne de ces deux mesures.

.3.2. La micrographie.

Principe

La micrographie a pour but de mettre en évidence les constituants des produits métallurgiques. Pour cela, on procède à l'examen au microscope par réflexion d'une surface polie et généralement attaquée.

Prélèvement de l'échantillon.

Le prélèvement se pratique à la scie ; l'échantillon est alors enrobé.

Polissage.

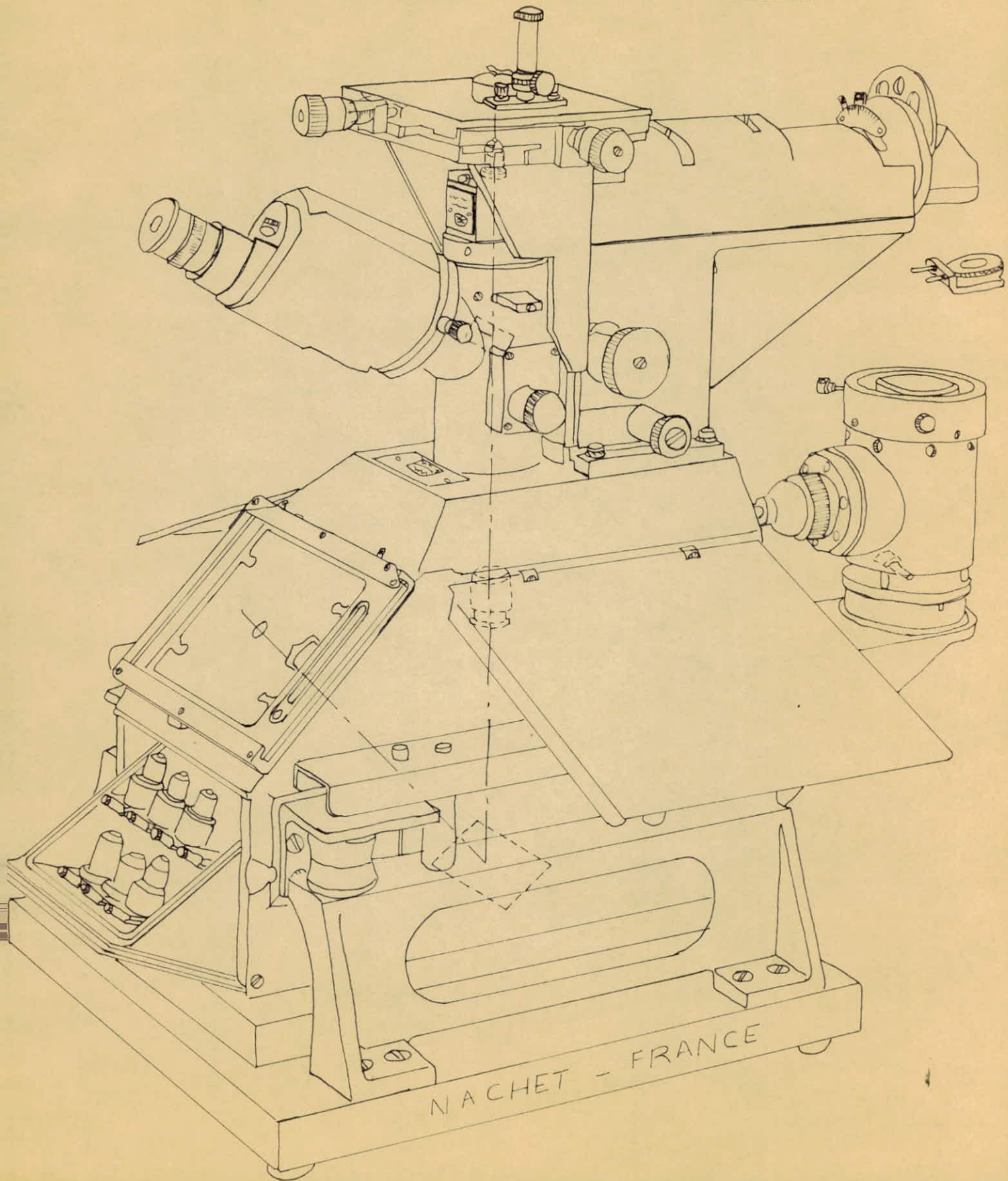
Il consiste à rendre la surface plane et brillante de façon à faire disparaître toutes les rayures qui risqueraient de gêner l'examen ultérieur. Pour cela on frotte le métal avec des abrasifs de plus en plus fins ; et on prend soin de rayer l'échantillon dans un certain sens avec l'abrasif, puis dans le sens perpendiculaire avec le suivant.

On utilise une machine où le papier abrasif est fixé sur un disque tournant dans un plan horizontal.

Durant l'opération de polissage, un filet d'eau coule sur le papier ceci afin d'éviter l'échauffement du métal et d'éliminer les grains et particules arrachés.

Pour le finissage, on utilise de la pâte diamantée que l'on étale sur un disque tournant.

MICROSCOPE METALLOGRAPHIQUE T.M. 75



Attaque.

L'attaque a pour but de révéler les joints de grains, et de différencier par dissolution sélective les constituants de l'alliage. Elle se fait en général avec, du nital, durant un temps très court.

Cette attaque est suivie d'un lavage soigneux dans l'eau, puis d'un séchage à l'aide d'air sous pression.

Examen micrographique.

On utilise un microscope inversé (schéma).

.3.3. La macrographie.

La macrographie est un examen d'ensemble, fait à l'oeil nu ou à faible grossissement (loupe), d'un produit métallurgique poli et attaqué.

Cet examen n'est guère utilisé que pour les aciers.

Polissage.

Il est moins poussé qu'en micrographie.

Il consiste à rendre la surface brillante ; pour cela un prépolissage est largement suffisant.

Attaque.

Avant l'attaque, nettoyer la pièce à traiter.

L'attaque est rapide ; le réactif utilisé est un acide: HCl concentré. Après attaque, on lève la pièce puis on la plonge dans un bain de soude, ceci pour la neutraliser.

Elle est ensuite relavée, et séchée par un jet d'air sous pression.

Applications de la macrographie.

La connaissance de la macrostructure renseigne d'une façon complète sur les traitements mécaniques ; ces traitements alignent progressivement les axes dendritiques et les inclusions dans la direction du travail ; il en résulte une alternance assez régulière des zones pures (anciens axes dendritiques) et impures (inclusions et surtout parties solidifiées en dernier lieu) qui entraîne la formation de fibres apparaissant sur une macrographie.

-o DEUXIEME PARTIE o-

CHAPITRE 1

1 - PRESENTATION DE LA PIECE

Nous avons choisi de suivre la réalisation d'un arbre de commande d'une boîte de vitesses, dont la gamme de fabrication comporte 2 types de traitements thermiques qui sont :

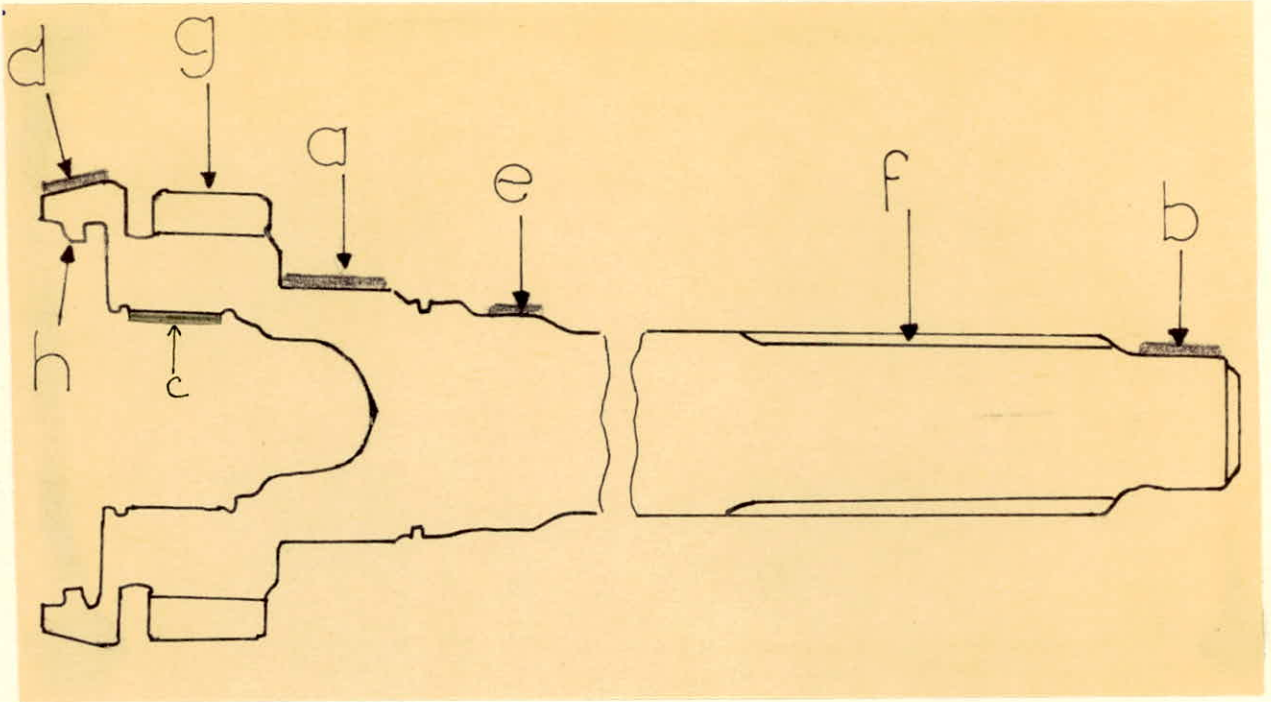
- les traitements thermiques de préparation
- les traitements thermiques d'utilisation

.1. Fonction de l'arbre de commande :

Il transmet le mouvement du couple moteur à l'intérieur de la boîte à vitesses.

.2. Géométrie de la pièce :

.2.1. Schéma :



.2.2. Signification des différents palier a,b,c,d,e,f,g,h.

- a : portée de roulement ; l'arbre de commande est centré dans le carter
- b : portée de roulement ; l'arbre de commande est centré dans le vilebrequin
- c : sert de cage extérieure d'un roulement à aiguilles ; l'arbre de commande sert de centrage pour l'arbre principal.
- d : surface conique d'entraînement par frottement du pignon synchroniseur ; l'arbre de commande sert de cône mâle pour le synchroniseur.

e : portée du joint à lèvres d'étanchéité.

f : cannelures ; l'arbre de commande sert de guidage au plateau d'embrayage et est entraîné par celui-ci à l'aide de cannelures.

g : dentures hélicoïdales ; l'arbre de commande entraîne l'arbre secondaire par ces dentures.

h : crabots ; l'arbre de commande entraîne l'arbre principal par l'intermédiaire de ces crabots.

.3. Sollicitations de cette pièce :

.3.1. Les portées a, b, c, d, e, doivent avoir :

- une bonne résistance à l'usure
- une couche dure en surface suffisamment épaisse
- une grande précision de cote

.3.2. les dentures (f, g, h) doivent avoir :

- une bonne résistance à l'usure
- une bonne tenue en fatigue
- résistance aux contraintes de Hertz.

4. Solutions apportées :

Pour le bon état de géométrie de la pièce, il faut :

- un usinage satisfaisant
- une rectification des portées , après les traitements thermiques d'utilisation

Pour les caractéristiques mécaniques, il faudrait que les traitements thermiques nous assurent :

- une bonne résistance à l'usure
- une bonne tenue en fatigue
- une bonne tenue aux chocs éventuels (embrayage brutaux)
- une couche superficielle dure d'une épaisseur suffisante pour englober le lieu des points des contraintes maximales de Hertz.

Le traitement qui nous donnerait ces caractéristiques souhaitées serait une cémentation-trempe ; celle-ci nous assure :

- une dureté superficielle élevée d'où une haute résistance à l'usure
- une limite de fatigue relevée.

- résilience à coeur non affectée
- une épaisseur durcie convenable pour pallier aux contraintes de Hertz.

De plus l'acier utilisé pour la fabrication de l'arbre de commande sera convenablement choisi.

.4.1. Matière prévue sur le plan :

Les analyses chimiques, de même que les caractéristiques mécaniques sont données par le cahier des charges.

Elle correspond à la norme AFNOR : 20 N C 6.

.4.1.1. Analyse chimique :

C %	Mn %	Si %	P %	S %	Ni %	Cr %	Mo %
0,16	0,60	<0,40	<0,03	<0,025	1,20	0,90	-
0,20	0,80			0,025	1,60	1,15	

.4.1.2. Caractéristiques mécaniques :

Traitement Thermique de référence	Essai de traction			Résilience min		Trempeabilité JOMINY					Ecrasement à chaud	Essais Spéciaux
	R (N/mm ²)	E _{min} (N/mm ²)	A% min	KCU (J/cm ²) long	Travers	2mm	5mm	10mm	20mm	25mm		
H 850	1330.1520	980	9	5,5	2	41.42	-	30.41	-	≥ 2,6	x	grain 5 à 8 (Mac Quaid)

.4.2. Traitements thermiques prévus :

Comme traitement thermique de préparation, on pratiquera un recuit isotherme, et comme traitements thermiques d'utilisation, on pratiquera une cémentation suivie d'une trempe et d'un revenu.

Ces 2 types de traitements sont consignés sur des fiches)

.4.3. Explication du choix de l'acier 20 N C 6 :

En règle générale, pour la cémentation, on utilise des aciers doux ou extra-doux (C = 0,05 ÷ 0,25 %) allié ou non.

On évite les aciers trop sensibles au grossissement de grains ainsi que les aciers à grains fins, les aciers à bas pourcentage en carbone sans aucun élément d'addition ou trop fortement calmé à l'aluminium, dans ce dernier cas, le grain devient parfois très fin et nuit à la trempeabilité de la couche.

Par ailleurs on évitera, les aciers trop chargés en chrome et surtout en manganèse ; ces deux éléments étant carburigènes, ils facilitent l'apparition de carbures, entre autre les carbures de chrome et de manganèse, les carbures de fer telle que la cémentite en réseau.

Aussi préférera-t-on utiliser le nickel pour compléter le pouvoir trempant, les additions de chrome étant limitées à 1 %.

Avantages de l'emploi des aciers alliés par rapport aux aciers ordinaires :

Les éléments d'alliage en diminuant considérablement la vitesse critique de trempé, autorisent la transformation martensitique pour une vitesse de refroidissement de l'ordre de $20 \text{ }^{\circ} \underline{\underline{50}} \text{ }^{\circ} \text{c/s}$.

Cette vitesse de refroidissement pas trop élevée offre l'avantage de ne pas engendrer dans la pièce des contraintes thermiques élevées et de donner à la structure trempée (martensitique) une bonne homogénéité.

Ainsi l'acier utilisé, 1,5 % en Nickel et environ 1 % en Chrome, cémenté, sera trempé à l'huile et non à l'eau (v_C 500 à 1000°c/s) comme il serait nécessaire pour un acier au carbone non allié.

Remarque :

L'amélioration de la qualité par incorporation d'éléments alliés, en proportion convenable, entraîne un accroissement de prix. Aussi les aciers alliés ne sont-ils utilisés, que lorsqu'on vise à accroître les efforts que les pièces auront à supporter.

.4.4. Limite de fatigue et contraintes de Hertz :

.4.4.1. Limite de fatigue :

Il arrive que des pièces cassent en service, bien qu'elles soient soumises à des efforts apparemment inférieurs à la limite élastique.

L'expérience a en effet montré que si l'amplitude et le nombre de sollicitations sont suffisants, il en résulte la rupture de fatigue, dont le caractère bien connu consiste en ce que la rupture se produit brutalement, sans allongement précurseur et que la cassure présente 2 zones :

- 1 zone lisse qui ^{est} la cassure proprement dite
- 1 zone d'arrachement qui ^{est} la cassure instantanée finale.

La surface de rupture est normale à la direction de tension maximum.

Le terme fatigue a été consacré par l'usage pour désigner ce comportement qui se traduit par une défaillance du métal en service.

L'endurance et la propriété de résister à la fatigue.

Limite d'endurance théorique :

C'est la limite supérieure de l'amplitude de la contrainte périodique qui peut être appliquée indéfiniment sans amener la rupture.

Limite d'endurance conventionnelle :

C'est la limite supérieure de l'amplitude de la contrainte périodique qui peut-être appliquée pendant un nombre conventionnel de cycles sans amener la rupture.

La limite de fatigue est désignée par la lettre f (Kg/mm^2). Cette limite se situe entre la plus faible contrainte qui produit la rupture et la plus forte contrainte qui ne produit pas la rupture au bout du nombre de cycles conventionnel.

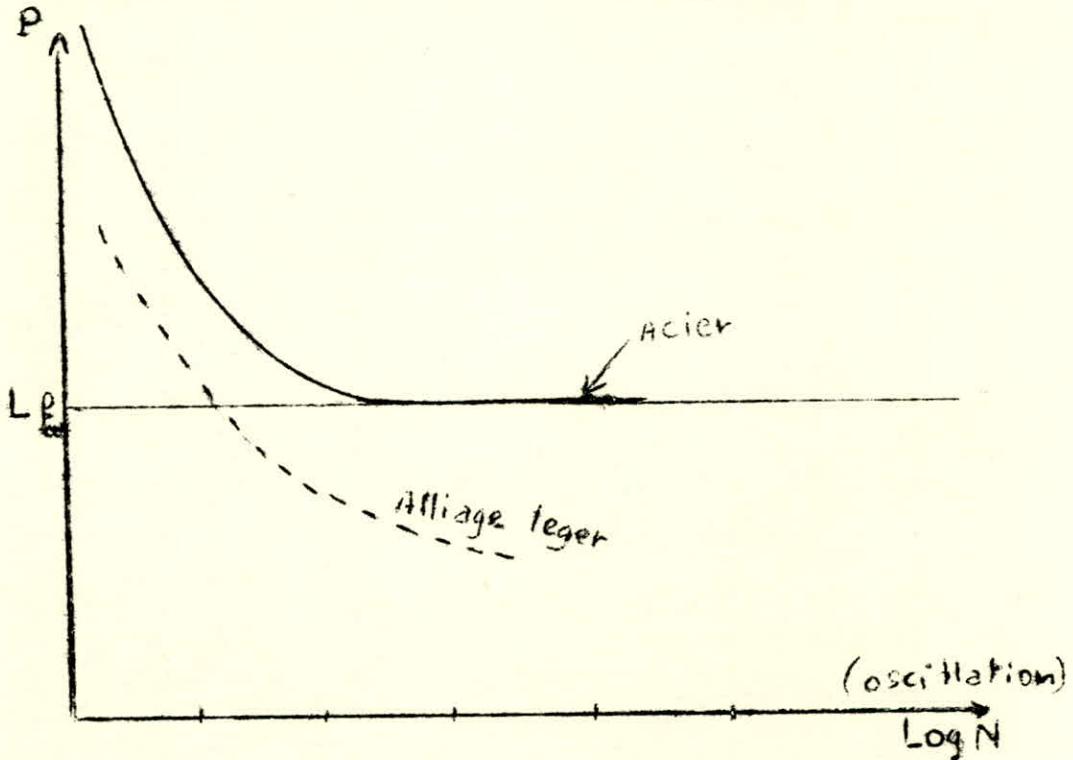
L'essai de fatigue consiste à faire subir au métal une déformation cyclique. Le type usuel est l'essai de flexion rotative sous une charge faible par rapport à la limite élastique.

Chaque génératrice de l'éprouvette est donc soumise alternativement à des tensions de traction et de compression.

Diagramme de Wöhler :

Pour chaque valeur de la charge P , on a le nombre de cycles N pour lequel se produit la rupture.

Sous des charges faibles, on constate la possibilité d'une durée d'existence de l'éprouvette, pratiquement infinie.



Pour les alliages légers, même après 500 M de cycles, la courbe descend encore et la limite de fatigue a alors un caractère conventionnel.

On peut améliorer la limite de fatigue :

- en évitant tous les points où les tensions sont susceptibles de se concentrer anormalement (angle rentrant aigu, ...)
- en ayant un excellent état de surface.

Le procédé de "peening" ou grenailage, qui consiste à bombarder la surface de la pièce avec des petites billes d'acier, augmente ainsi la limite de fatigue.

4.4.2. Contraintes de Hertz :

L'étude de la résistance des matériaux nous apprend que le contact sous effort avec déplacement relatif de deux corps élastiques, engendre une contrainte qui passe par une amplitude maximale en un point situé sur la normale à la surface de contact et à une certaine distance de cette surface de contact.

C'est donc en ce point que s'amorcera une rupture éventuelle. Grâce aux travaux de Hertz, les bureaux d'études sont en mesure de situer par le calcul, la position des points de contrainte maximale.

Par traitement thermique il convient éventuellement de conférer à cette zone les caractéristiques maximales, soit dans notre cas, celles apportées par la cémentation-trempe.

En pratique, l'épaisseur cémentée sera fonction du module du pignon.

4.5. Résultats :

L'acier 20 N C 6, cémenté trempé aura ainsi :

- une bonne tenue en fatigue
- une grande dureté $HR_C > 60$ (pour résister à l'usure et aux contraintes de Hertz).
- une bonne résistance aux chocs éventuels.

CHAPITRE 2 .

SUIVI DE FABRICATION.

Plan

- .1. Forge
- .2. Traitement thermique de préparation
- .3. Usinage
- .4. Traitement thermique d'utilisation
 - .4.1. Cémentation
 - .4.2. Trempe
 - .4.3. Revenu
- .5. Rectification
- .6. Prix de revient de la pièce

.1. FORGE

.1.1. Réception de la matière brute

L'acier est livré sous forme de barres laminées avec les dimensions suivantes :

$L = 6 \text{ m.}$

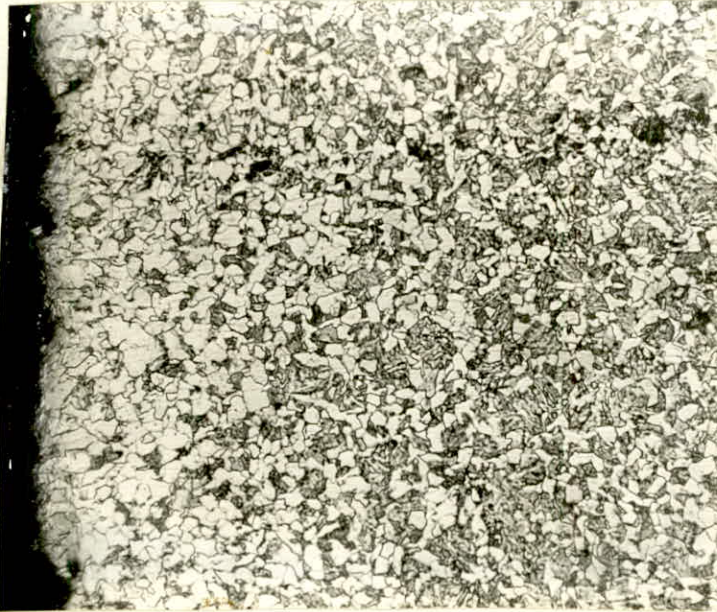
$\phi = 40 \text{ mm}$

Pour la réalisation d'arbres de commande, ces barres sont cisailées en lopins de 43 cm.

Contrôle

Pour voir la constitution de l'acier utilisé, on effectue une micro-graphie.

Micrographie



Grossissement 110
Attaque au Nital 5%
Structure du rond laminé:
ferrite + perlite

. 1 . 2 . Forgeage

Le forgeage est une opération qui a pour but, de donner une forme déterminée à une pièce, par pétrissage à chaud, avec des outils agissant par pression ou par percussion.

Le forgeage réalisé dans de bonnes conditions, crée une texture favorable de l'acier, et améliore les caractéristiques mécaniques dans le sens de l'écoulement du métal, c'est pourquoi on cherche toujours à faire coïncider le sens du forgeage avec celui des efforts supportés par la pièce.

Au cours de chaque opération de forgeage, les différentes régions du lopin subissent des allongements dans certaines directions, et des raccourcissements dans d'autres.

Le forgeage est une opération qui précède l'usinage, aussi a-t-elle pour but de faciliter cet usinage par économie de métal à enlever par copeaux et à améliorer les caractéristiques par un fibrage approprié.

1.2 . 1 . Chauffage du Four

Le four de forge destiné à réchauffer le métal pour le rendre malléable, se différencie des autres fours, par un chauffage à haute température, se plaçant entre le réchauffage pour Traitement Thermique et le chauffage de fusion.

Le type de four de forgeage est fonction de la fabrication qu'il doit assurer, et du combustible qu'il doit brûler.

Un four pour être économique doit être bien utilisé, bien conduit et bien contrôlé du point de vue mesure des températures et des pressions réalisées à l'intérieur du laboratoire, ainsi que du contrôle de la combustion.

1. 2. 2. Combustible employé

On emploie le gaz naturel, il permet d'obtenir aisément une haute température (1250°), de bien répartir le combustible et d'avoir ainsi un four simple.

1. 2. 3. Chauffage des pièces

La température de forgeage de l'acier utilisé pour la fabrication de l'~~arbre~~ de commande s'établit à environ 1250 ° C.

Précaution à prendre

Il faut éviter les surchauffes locales et le maintien prolongé des pièces à haute température, entraînant le grossissement du grain avec ses inconvénients (tapures de trempe, faibles valeurs de l'allongement et de la résilience).

1. 2. 4. Refroidissement (après forgeage)

Il se fait à l'air libre.

1. 2. 5. Opérations de forgeage.

Refolement

Il a pour but de réduire la longueur d'un tronçon de lingot ou d'ébauche suivant son axe, au moyen d'efforts de compression dirigés parallèlement à cet axe.

Les pièces sont forgées par écrasement.

1. 2. 5. 1. Machine à forger : La refouleuse (voir Annexe photo n°1).

Elle travaille à la fois aux chocs et à la pression.

En somme, la refouleuse est une presse mécanique, horizontale, à matrices ouvrantes qui permet l'exécution de travaux à partir de la barre.

Elle se compose d'un bâti en acier moulé très rigide supportant le dispositif de forgeage. Le bâti est entrecroisé à sa partie supérieure par 2 forts tirants en acier forgé, et transversalement par d'autres tirants le tout constitue un ensemble indéformable.

Ce dispositif de forgeage comprend 3 parties :

- 1-Le porte-poinçon coulissant sans jeu dans des rainures pratiquées dans le bâti, le mouvement est transmis par la manivelle.

La grande hauteur du coulisseau permet l'adaptation de plusieurs outils superposés.

- 2-Le porte-matrices fixe logé dans l'épaisseur du bâti et comportant les étriers de fixation de la matrice.

- 3-Le porte-matrices mobile dont le mouvement perpendiculaire à celui du coulisseau porte-outils, est transmis par de puissantes grenouillères.

La disposition de la machine est telle que la puissance maximum est atteinte en fin de course, dans les 2 sens (poinçon et machoire mobile), de façon à réaliser un effort progressif.

La puissance latérale de la machine est égale à sa puissance de refoulement pour éviter le glissement des pièces en cours de forgeage.

Le mouvement est produit par un moteur électrique commandant un harnais d'engrenages par l'intermédiaire d'une courroie.

La commande de la machine est assurée par une pédale ; chaque pression sur celle-ci commande.

- Le serrage des matrices
- Le mouvement aller du porte-poinçons
- Le desserrage des matrices
- Le mouvement de retour du porte-poinçons.

Le moteur tourne à vide jusqu'au moment où un nouveau coup de pédale déclenche les 4 mouvements.

Les possibilités de cette machine sont très grandes grâce à l'existence d'outils étagés.

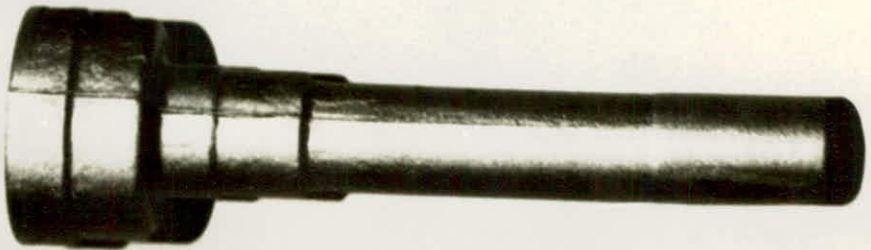
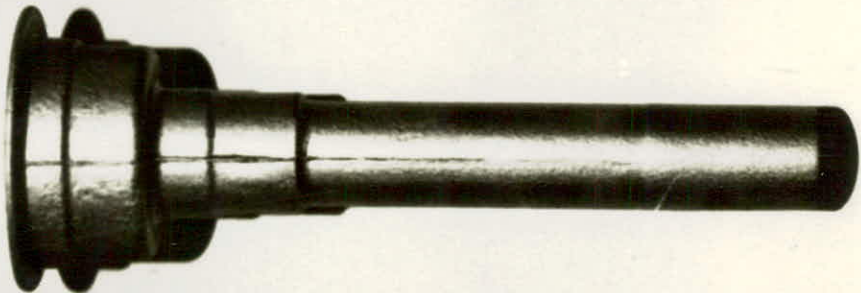
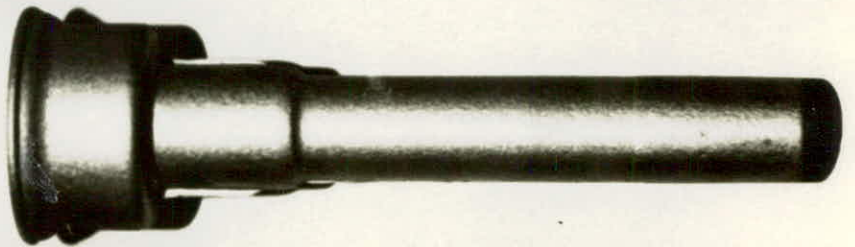
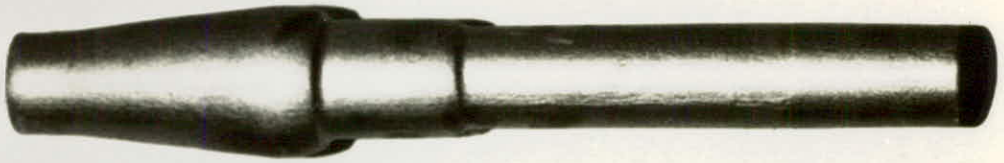
Pour obtenir un bon fonctionnement de la machine à forger l'outillage doit être prévu et exécuté en acier très résistant, afin que l'usure des outils soit négligeable et que les pièces forgées aient un bel aspect.

Pour ces 2 raisons, les frais d'outillage sont très élevés et doivent être amortis par des séries importantes.

1.2.5.2. Gamme de Forgeage.

La gamme de forgeage est représentée par la photo se trouvant au verso.

.../...



La pièce forgée est ensuite déposée dans un panier et laissée refroidir à l'air calme.

1. 2. 6. REMARQUE

Durant l'opération de forgeage, la pièce a subi une perte de masse appelée perte au feu ; elle est due à la chauffe et est de l'ordre de 3 %.

De plus on remarque une formation d'écailles sur la pièce (en contact de l'air la surface de la pièce s'oxyde). Ces écailles sont appelées batitures de forge. On peut éviter cette formation d'écailles en laissant refroidir les pièces dans le four, ou alors dans un lit de cendres sèches contenant du carbone.

1. 3. Contrôle

Les modes de contrôles utilisés sont la macrographie et la micrographie

1. 3. 1. La Macrographie

Elle nous renseigne sur le fribrage de la pièce.

Les photos de cette macrographie nous montrent la déformation des fibres lors du forgeage, ce qui prouve qu'il existe une structure en bandes.

Structure en bandes

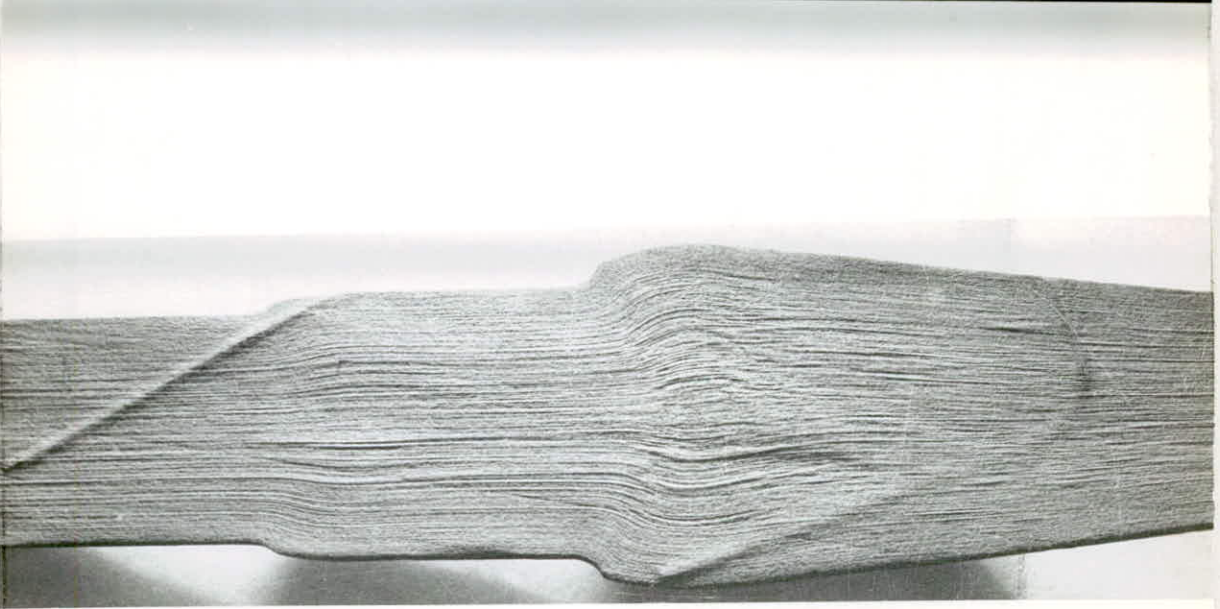
Au cours de la déformation plastique de forgeage, les dendrites sont couchées et déformées principalement dans les sens de l'allongement le plus accusé du métal.

Lors du refroidissement, la séparation des constituants proeutectoides est sous la dépendance de la composition chimique locale et elle est par la suite déclenchée par les ségrégations dendritiques alignées par le travail à chaud : la micrographie révèle alors, si la teneur en phosphore est suffisante, une structure en "bandes".

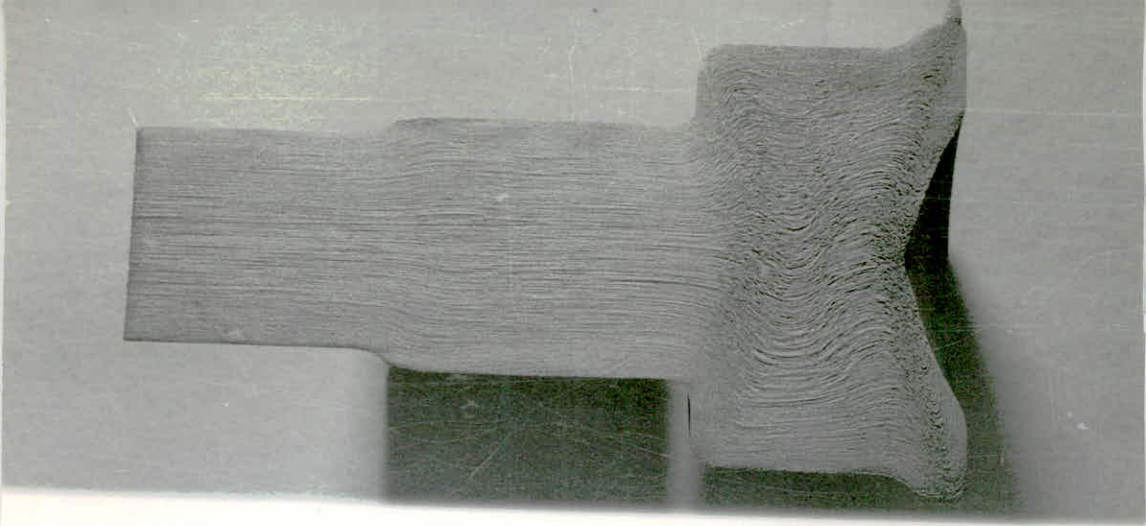
Evolution du fibrage lors des
différentes opérations de forgeage



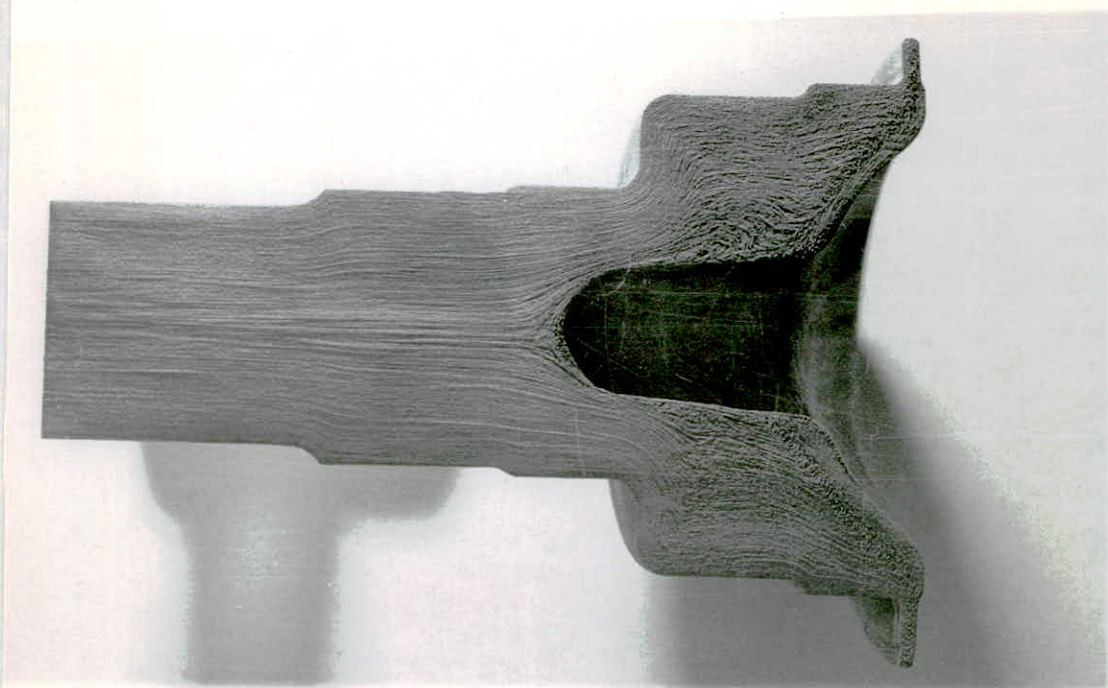
1



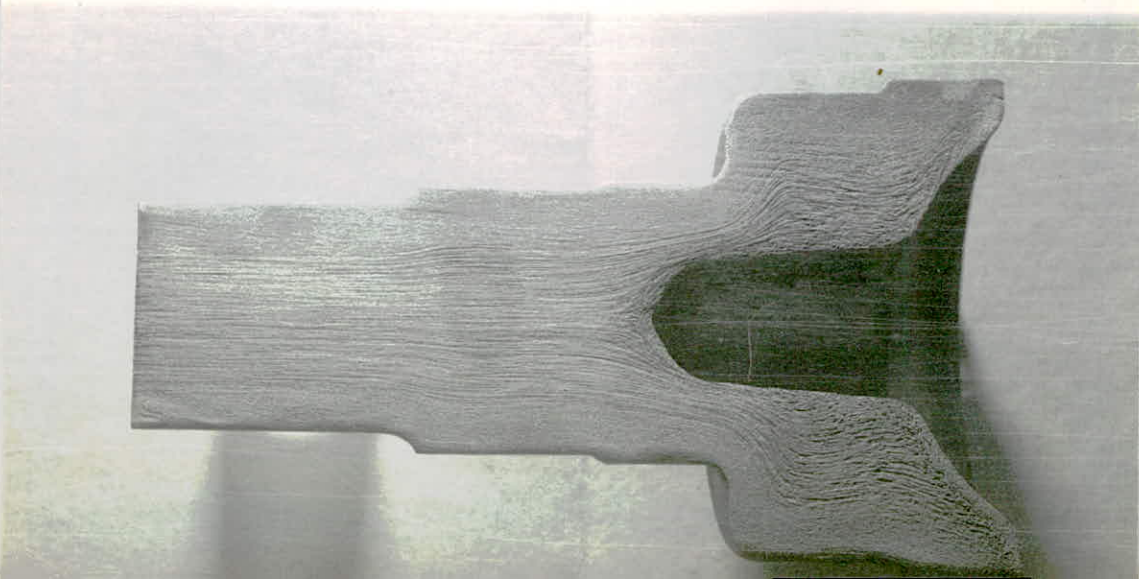
2



3

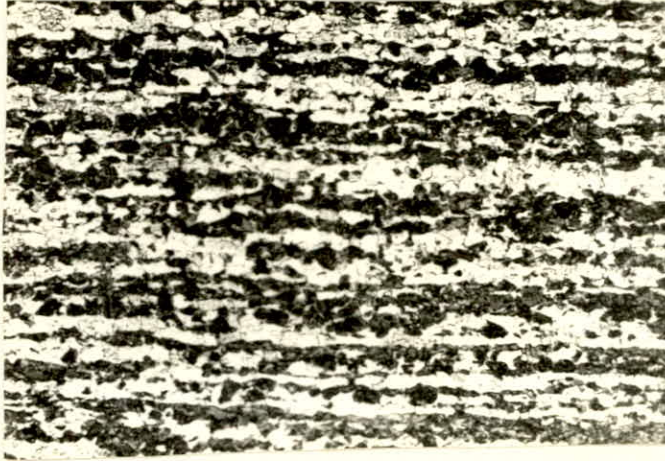


4



5

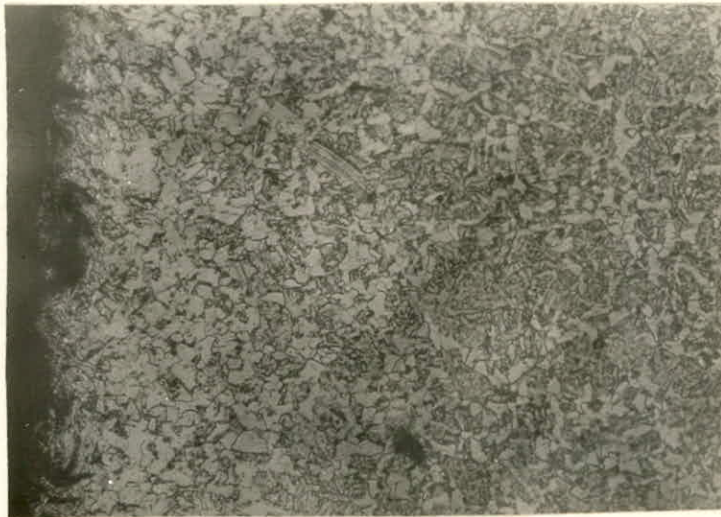
Les bandes blanches correspondent aux régions interdendritiques qui, ainsi que nous l'avons vu, sont généralement riches en phosphore, pauvres en carbone et à densité relativement grandes en inclusions, notamment en manganèse si toutefois le rejet en carbone se produit.



Grossissement 110
Attaque au Nital 5%
structure incorrecte :
bandes de perlite-ferrite.

1.3.2. La micrographie

Pour connaître la structure de l'acier après forgeage, on fait une micrographie de cet acier.



Grossissement 110
Attaque au Nital 5%
Structure du brut de forge :
grains irréguliers de
perlite-ferrite.

1.4. Conclusion

La macrographie et la micrographie nous révèlent que les pièces forgées possèdent une structure non convenable à l'usinage. Aussi doivent-elles être adoucies par un traitement thermique ultérieur.

2. TRAITEMENT THERMIQUE DE PREPARATION

2.1. Théorie de ce traitement thermique

Le traitement thermique utilisé est un recuit.

Un recuit même à haute température, suivi d'un refroidissement rapide, estompe sans faire disparaître complètement, la structure en bandes ; si le refroidissement est lent, celle-ci réapparaît et peut même être plus accusée qu'auparavant : ceci est dû au fait que la ségrégation du phosphore ne s'atténuant que très lentement par séjour à haute température, continue à provoquer le rejet du carbone des bandes riches en phosphore, effet d'autant plus accusé que le passage dans l'intervalle (Ar_3 , Ar_1) est plus lent. Il est possible notamment dans le cas le plus classique des bandes alternées de ferrite et de perlite, de faire disparaître cet aspect, par exemple en accroissant la vitesse de refroidissement dans ce cas particulier, c'est à dire éviter un refroidissement continu.

Un tel traitement fait-il disparaître les difficultés d'usinage? Il semble que du fait de la suppression des bandes de ferrite, les difficultés dues à ce constituant à dureté peu élevée et à forte ductilité, doivent elles-mêmes s'estomper.

2. 1. 1. But de ce recuit

Le but de ce recuit est de :

- Détruire l'écroutissage consécutif à un forgeage terminé à température relativement basse (recuit de recristallisation).

- Supprimer les autocontraintes susceptibles de distordre la pièce quand, par suite de l'usinage, certaines parties du métal exerçant une contrainte sur le reste de la pièce viennent à disparaître (recuit de stabilisation).

- Faciliter l'usinage en diminuant la dureté du métal aux points durcis par un refroidissement trop rapide après forgeage (recuit d'adoucissement).

- Affiner la structure du métal surchauffé par les hautes températures nécessaires pour le forgeage (recuit de régénération).

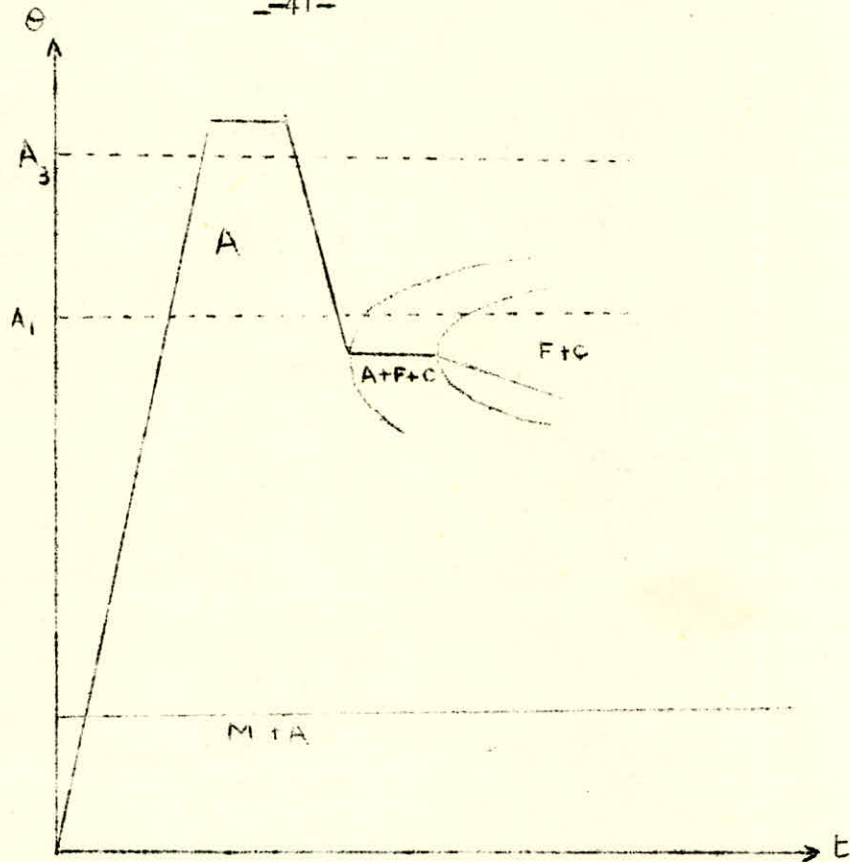
- Eliminer en grande partie la structure en bandes, puisqu'il y a recristallisation.

En un mot, ce recuit permet de conférer au métal une structure le rendant plus apte à l'usinage. Pour cela, un recuit isotherme est à pratiquer sur la pièce.

2. 1. 2. Recuit isotherme

2. 1. 2. 1. Définition.

L'acier chauffé vers $A_3 + 50^\circ \text{C}$, est refroidi à une température voisine de $A_1 - 50^\circ \text{C}$, puis maintenu à cette température durant un temps convenable pour que la transformation isotherme donne une structure perlitique. Il est suivi d'un refroidissement quelconque.



2. 1. 2. 2. Paramètres essentiels de de recuit

Nous avons dit que le recuit isotherme se produit lorsque la température de transformation se trouve dans la zone de transformation perlitique.

La transformation est progressive, le constituant en excès, ferrite pour l'acier hypoeutoïde, se développe à partir de germes existant dans l'acier, puis, lorsque la composition de l'austénite restante a atteint celle de l'eutoïde, il se forme de la perlite.

• Température d'auténisation

L'élévation de la température d'auténisation peut produire 2 effets : Elle augmente la trempabilité apparente de l'acier, en abaissant la température optima de transformation, et allonge légèrement le temps de transformation.

D'autre part si le grain d'auténite a notablement grossi, la structure perlite ferrite est à damiers * gros, ce qui est en général favorable à la tenue des outils de taillage.

- Influence de la vitesse de refroidissement

La disposition de la ferrite et de la perlite dépend de la vitesse avec laquelle on a atteint la température de transformation.

Une disposition en damiers régulièrement répartis est favorable aux opérations d'usinage à faible vitesse, brochage et taillage, où elle donne la plus longue durée d'outils entre affûtages. A vitesse trop faible, on constate une répartition en bandes donnant des difficultés d'usinage par collage du copeau et arrête rapportée si la direction de la coupe est parallèle aux bandes. On explique ce fait par la différence de composition chimique entre les dendrites et leurs eaux-mères lors de la solidification des lingots d'aciers, différence qui subsiste encore après les forgeages et laminages. Les différents points ayant des courbes T.T.T. différentes, les zones les moins riches (axes des dendrites) se transforment les premières par dépôt de ferrite le long des axes.

- Temps de transformation

Le temps de transformation est déterminé par les courbes T.T.T. Il est en général d'autant plus long que l'acier est chargé en éléments d'alliages.

Une conséquence de cet allongement du temps de transformation peut-être l'impossibilité de réaliser le recuit à structure perlite-ferrite. Si le maintien à la température de transformation est insuffisant, on obtient des structures mixtes: zones de bainite et zones de perlite ferrite, difficilement usinables.

Tableau (Exemple de recuit iso.)

A C I E R		TRAITEMENT				Refroidissement	Dureté HB 10/3000
Type	Désignation A F N O R	Austénisation Temps mn	T° °C	Maintien Isotherme Temps mn	T° °C		
Doux au Ni Cr	16 à 20 NC 6	120	900	120	650-660	air calme	155-200
Mi dur au Ni Cr	35 N C 6	15	900	50	630-640	"	196-250
Mi dur au Cr	35 C 4 38 C 4	15	"	45	680	"	190-240
Mi dur au G Mo	35 CD4 38 CD4	15	"	"	"	"	190-250
Mi doux au Cr Mn	18 et 20 MC 5	20	"	"	650	"	155-200
Dur au Cr	100 C 6	45	"	"	680	"	250-285

2. 1. 3. Mise en application industrielle du recuit isotherme

Le recuit iso peut être exécuté sur les barres laminées, sur les pièces de forge ou sur les lopins.

Dans notre cas le recuit iso est fait sur la pièce forgée. Il en résulte une opération supplémentaire de grenailage pour décalaminer correctement avant les opérations d'usinage.

2. 2. Organisation des Traitements Thermiques

L'installation de traitement thermique destinée aux traitements de pièces brutes de forge permet de faire :

- Normalisation
- Recuit isotherme
- Trempe eau ou huile

Cette installation se compose de :

- 2 fours
- entre les 2 fours, 3 lignes :
 - une pour trempe à l'eau
 - une pour trempe à l'huile
 - la 3^{ème} permettant l'acheminement vers le système de refroidissement, si on fait un recuit isotherme.

Dans notre cas, c'est la ligne du recuit isotherme qui nous interesse.

2.2.1. Description et fonctionnement de l'installation

Les fours sont du type poussant à plateaux, glissant sur des rails plats.

Les plateaux en refractaire d'un encombrement : 50 cm x 100 cm . peuvent recevoir une charge utile de 120 Kgs.

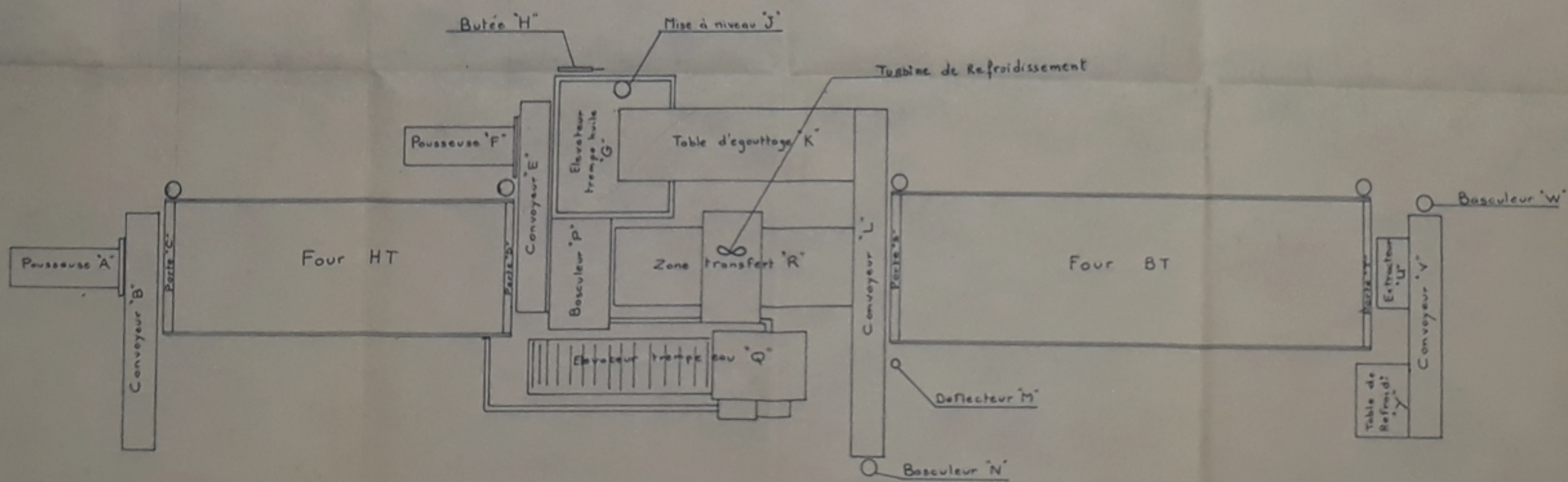
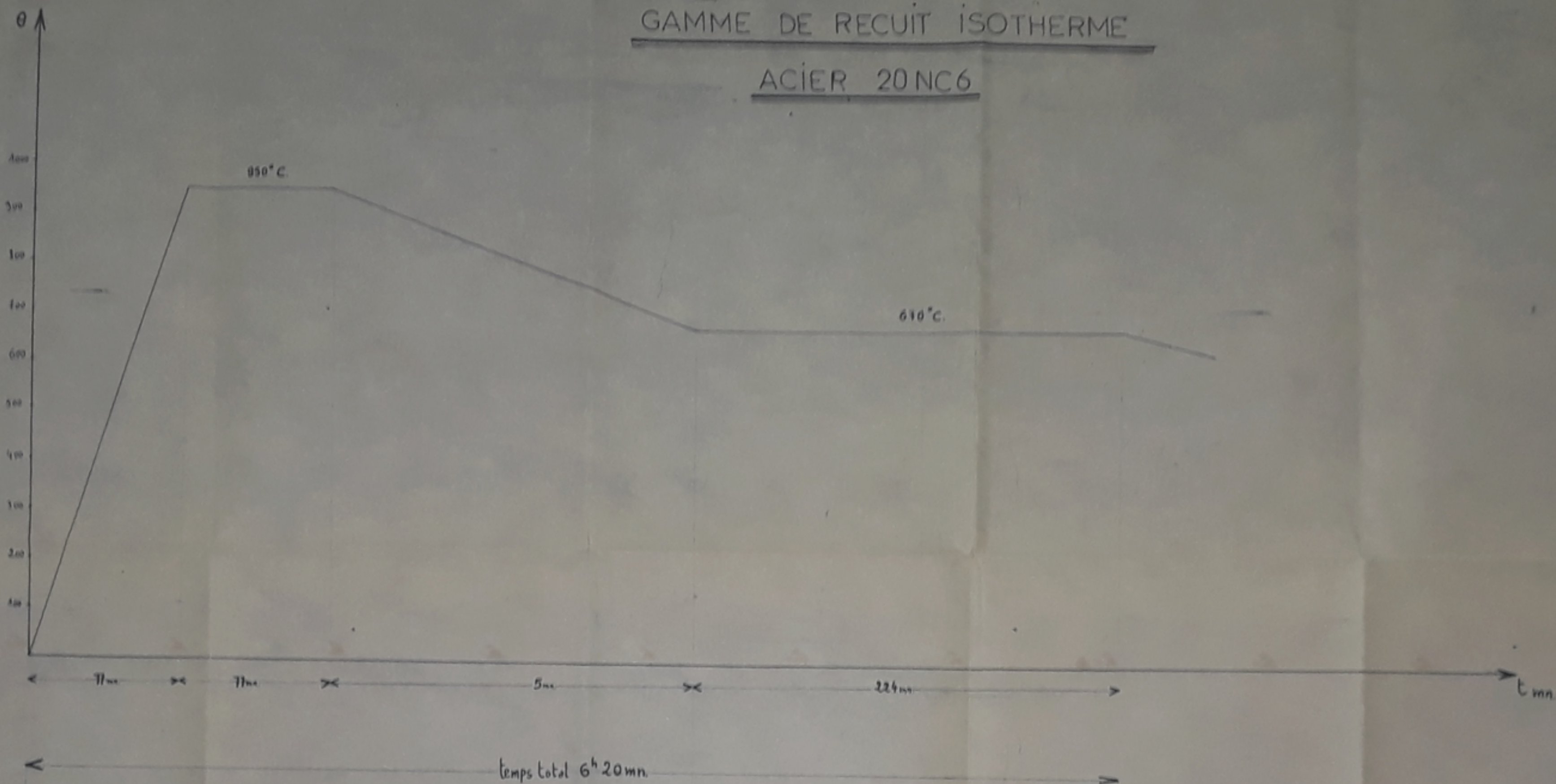
Le positionnement des pièces est important avant l'enfournement, ceci afin que la température soit homogène dans toute la pièce.

La ligne du recuit comprend (se référer au schéma du recuit isotherme):

- un four d'austénisation avec à l'entrée :
 - une pousseuse d'enfourchement
 - une chaîne avec des cliquets amenant les plateaux du four d'austénisation à la chambre de refroidissement.
- une chambre de refroidissement
- un four de maintien
 - une chaîne avec des cliquets, pour enfourner les plateaux dans le four de maintien.

GAMME DE RECUIT ISOTHERME

ACIER 20NC6



FOUR DE RECUI T ISOTHERME

- un mécanisme de défournement à la sortie du four de maintien avec basculement des pièces sur l'élevateur final et dispositif d'amenée des plateaux vides sur le chemin de retour.

Voir. Annexe

PHOTOS n: 2 et 3.

Fours d'austénisation

Le four d'austénisation est chauffé à l'aide de 10 brûleurs en voûte et 2 brûleurs de porte pour compenser la mauvaise étanchéité de la porte.

Il est divisé en 5 zones :

- 1 zone préchauffage : 880°
- 1 zone chauffage : 920°
- 3 zone maintien : 950°

La montée en température à 950 ° est de 77 mn

Le maintien à température constante est aussi de 77 mn ; c'est le temps d'austénisation.

La contenance du four est 11 plateaux, avec une cadence d'enfourchement réglable par minuterie qui est 1 plateau/14 mn .

Donc le temps mis par 1 plateau pour traverser le labo. est de
 $11 \times 14 = 154 \text{ mn}$

• Chambre de refroidissement

La chambre de refroidissement, isolée du four d'austénisation et du four de maintien par 2 portes, permet le refroidissement, des pièces par un ventilateur de recirculation de l'air.

Le plateau stationne sous le courant d'air pendant 4 mn. Le transport de H.T. - Refroidissement et Refroidissement-B.T. est 1 mn. Donc dans la zone de transfert, le plateau met 1 temps de 5 mn.

• Four de maintien

Dans le cas de notre arbre de commande, le four de maintien est utilisé à une température de 670° , sa température maximum est 700° . Il est divisé en 6 Zones, La 1ère zone est chauffée à l'aide de 2 brûleurs en voûte, les autres zones à l'aide de brûleurs latéraux. A la porte d'entrée, il y a 2 brûleurs. Au total on a 14 brûleurs. Dans ce four, il y a une turbine permettant l'homogénéité de température.

Ce four permet le séjour de 16 plateaux, avec une cadence d'enfournement, réglable lui aussi, et qui est de 1 plateau toutes les 14 minutes. Le temps mis par un plateau pour traverser ce four de maintien:

$$14 \times 16 = 224 \text{ minutes.}$$

• Temps total mis par un plateau pour traverser la ligne de recuit:

$$154 \text{ mn} + 5 \text{ mn} + 224 \text{ mn} = 6H 23 \text{ mn.}$$

• Mécanisme de poussée.

Tous les mouvements de poussées, basculements, ouvertures des portes sont automatiques.

• Capacité des fours

Elle est de 600 Kg /Heure.

• Pyrométrie

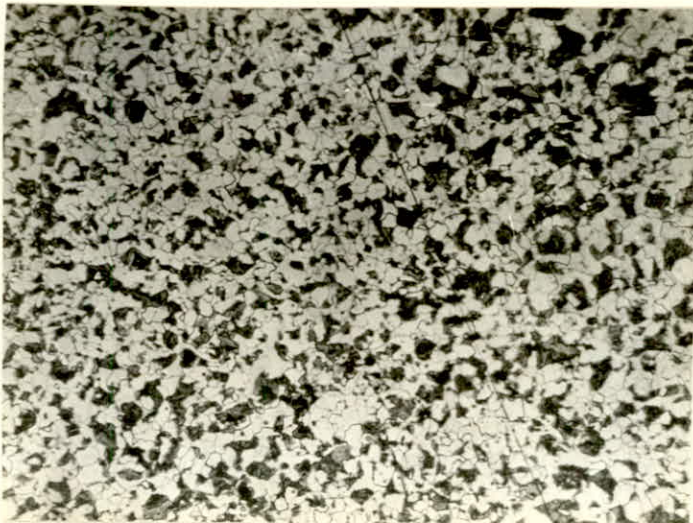
Chaque four a sa cabine pyrométrique. Dans ces cabines, un potentiomètre enregistreur donne les évolutions de température en fonction du temps, pour chaque zone des fours.

2.2.2. Grenaillage.

C'est une opération de nettoyage des pièces ; le grenaillage supprime la calamine.

2.2.3. Contrôle

On utilise 2 moyens de contrôle : la micrographie et la dureté.
micrographie.



Grossissement 110
Attaque au Nital 5%
Structure du recuit:
damiers de grains
ferrite - perlite.

Dureté

On détermine la dureté avec la machine Brinell .

On trouve :

$$HB = \frac{46}{10}$$

Ce qui répond bien à la dureté désirée.

2.3. CONCLUSION

Ce recuit isotherme nous donne un damier de grains de perlite lamellaire et de ferrite. Une telle structure facilite l'usinage de notre acier allié 20 NC6.

De plus ce recuit limite ou régularise les déformations aux traitements thermiques de cémentation-trempe après usinage.

. 3 . USINAGE

Après le traitement fait à la forge, la pièce va être usinée. Cet usinage est destiné à donner à la pièce, la forme désirée.

Les opérations effectuées sont :

- des opérations de tournage
- des opérations de taillage
- des opérations de rectification

Les opérations en détail sont notées sur le tableau suivant :

DESCRIPTION DES OPERATIONS

Tronçonnage - centrage

Tour. Ebauche finition corps.

Tour. Ebauche Tête.

Tour. finition Tête.

Exécution gorge intérieure (DEPANNAGE)

Reprise gorge intérieure $L = 1,6$ (DEPANNAGE.)

Tour Reprise centre corps

Contrôle Tour

Rectification portée sur Tête. Dévoilage face pour S.U.

Taillage cannelures

Lavage

Taillage denture.

Lavage.

Taillage du crabot.

Lavage.

Fraisage des entrées de dents du crabot.

Lavage

Persage - Trous de graissage.

Persage. Trous de dégazage.

Chanfreinage - Ebavurage. Marquage.

Lavage.

Shaving.

Lavage

Contrôle = Taillage - Persage - Shaving.

.4. TRAITEMENT THERMIQUE D'UTILISATION :

4. 1. But de ce traitement thermique

Il s'agit de trouver un compromis pour la pièce donnée, c'est à dire avoir :

- des caractéristiques ductiles à coeur.
- des caractéristiques de dureté élevée en surface pour remédier à l'usure.
- enfin, avoir une limite de fatigue compatible avec les sollicitations alternées que subissent les parties dentées et cannelées de la pièce.

Ces trois impératifs trouvent une solution commune ; la cémentation-trempe suivie d'un revenu d'adoucissement.

4.2. Théorie et Application de la cémentation gazeuse.

Aux procédés plus anciens de cémentation en caisse et de cémentation en bain de sel, s'ajoute la cémentation en phase gazeuse, d'application industrielle récente. C'est cette technique qui est employée pour traiter l'arbre de commande.

4.2.1. Procédé de la cémentation gazeuse.

On chauffe les pièces dans une enceinte étanche, remplie d'une atmosphère convenable, susceptible de fournir à la surface des pièces, le carbone nécessaire.

4.2.1.1. Atmosphère de cémentation

Cette atmosphère est produite directement dans le four par craquage de substances organiques.

4.2.1.1.1. Principe de la méthode de craquage.

Lorsqu'on introduit un liquide organique ($C_xH_yO_z$) dans une enceinte à haute température, ce produit se décompose immédiatement.

On constate que les produits finaux du craquage sont :

CO , CO₂, CH₄, H₂, H₂O avec parfois dépôt de carbone.

La composition de l'atmosphère dépend :

- de la température de l'enceinte
- du temps de maintien à cette température
- de la composition du produit craqué.

Par exemple (thèse de Roussel), si l'on chauffe brusquement du méthanol à 925 ° et qu'on laisse séjourner le gaz à cette température on obtient une atmosphère de :

CO = 32,9 %

CO₂ = 0,2 %

CH₄ = 0,7 %

H₂O = 0,5 %

H₂ = 65,7 %

A 825 ° C.

CO = 31,3 %

CO₂ = 0,9 %

CH₄ = 1,7 %

H₂O = 1,6 %

H₂ = 64,5 %

Si on prend du propanol, après craquage à 925 ° C on obtient :

CO = 19,85 %

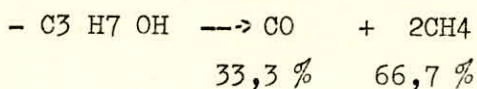
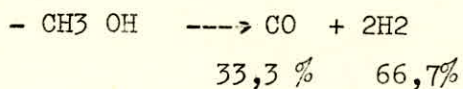
CO₂ = 0,05 %

CH₄ = 0,75 %

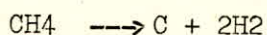
H₂O = 0,30 %

H₂ = 79,05 %

Si on pouvait analyser les gaz au moment exact du craquage on trouverait :



On remarque que les gaz issus du propanol évoluent beaucoup dans le temps, en particulier le CH₄ varie de 66 % à 1,7 %. Il se produit cette décomposition.



Le carbone libéré peut être retrouvé sous forme de suie ; ou alors être absorbé par les pièces en acier dans le gaz; il y a alors carburation.

4.2.1.1.2. Qualité physique des liquides de craquage.

Les produits utilisés sont généralement des mélanges de plusieurs liquides organiques.

Les liquides mélangés devront être parfaitement miscibles et le rester en toute circonstance, même à basse température.

4.2.1.1.3. Qualité chimique des liquides de craquage.

Les liquides devront craquer facilement sans donner de suie ou de dépôts goudronneux. Pour cela, il faut éviter l'emploi de composés cycliques ou à poids moléculaire trop élevé.

4.2.1.2. Courbes d'équilibres

Les constituants résultants du craquage réagiront de façon à se trouver en équilibre à la température du four.

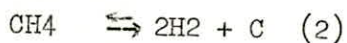
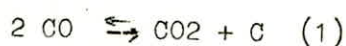


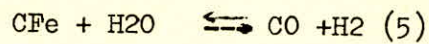
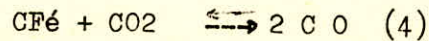
Tableau des constantes d'équilibre :

VALEUR DES CONSTANTES D'EQUILIBRE POUR LES REACTIONS 1, 2 et 3.			
Temp. °C	$K_1 = \frac{P_{\text{CO}}^2}{P_{\text{CO}_2}}$	$K_2 = \frac{P_{\text{CH}_4}}{P_{\text{H}_2}^2}$	$K_3 = \frac{P_{\text{CO}_2} \cdot P_{\text{H}_2}}{P_{\text{CO}} \cdot P_{\text{H}_2\text{O}}}$
400	$9,2 \times 10^{-5}$	14.1	14.1
450	5.6×10^{-4}	6.02	7.04
500	3.7×10^{-3}	2.34	4.88
550	0.0186	1.00	3.41
600	0.0794	0.467	2.54
650	0.347	0.251	1.95
700	1.01	0.138	1.54
750	2.98	0.079	1.26
800	10.0	0.050	1.05
850	17.2	0.032	0.892
900	37.6	0.021	0.764
950	74.1	0.014	0.672
1 000	143	0.009	0.592
1 050	462	0.007	0.527
1 100	759	0.005	0.474
1 150	822	0.004	0.435

Les concentrations partielles de CO et H₂ sont importantes par rapport à celles de CO₂ , H₂O et CH₄.

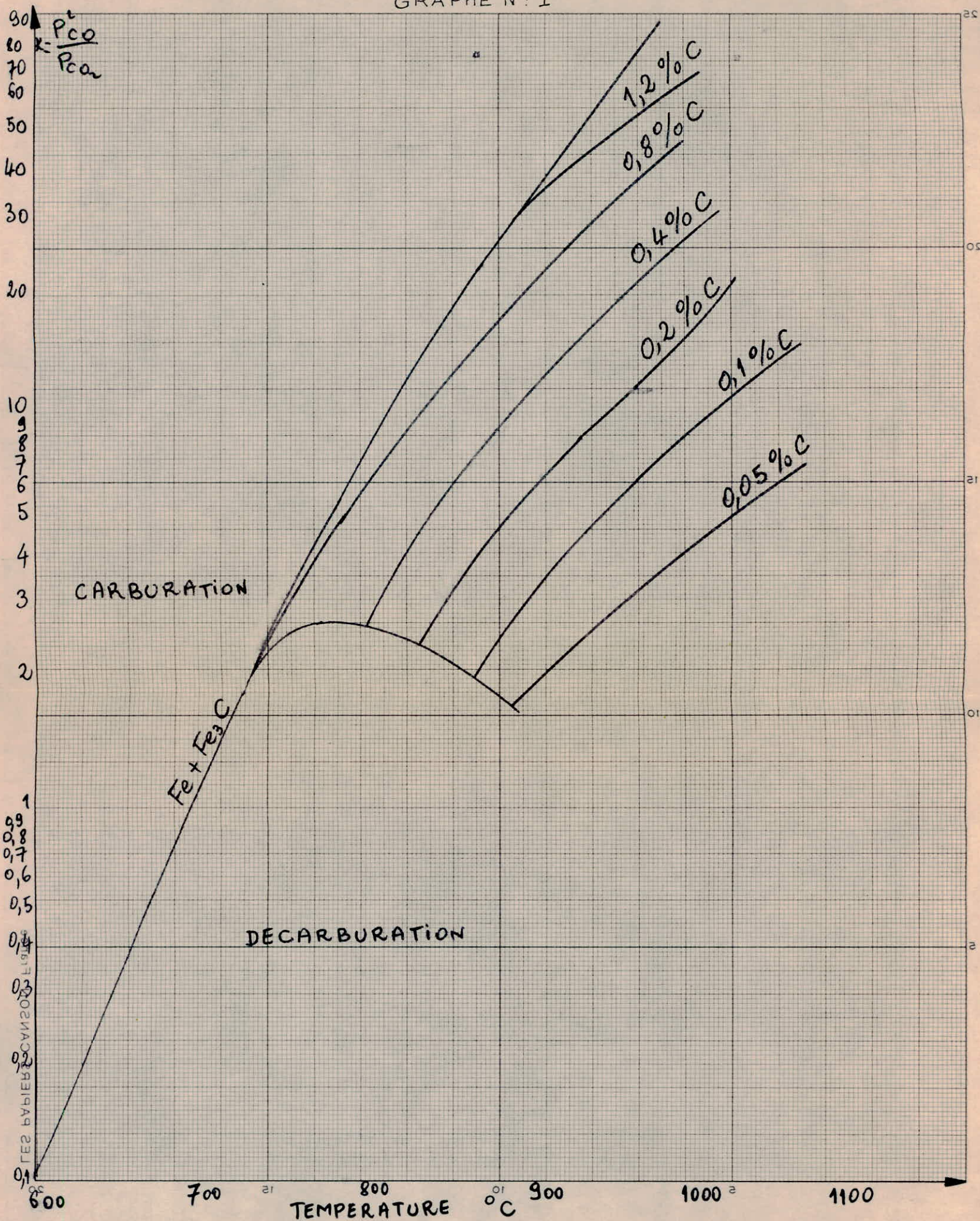
4.2.1.3. Carburation et décarburation

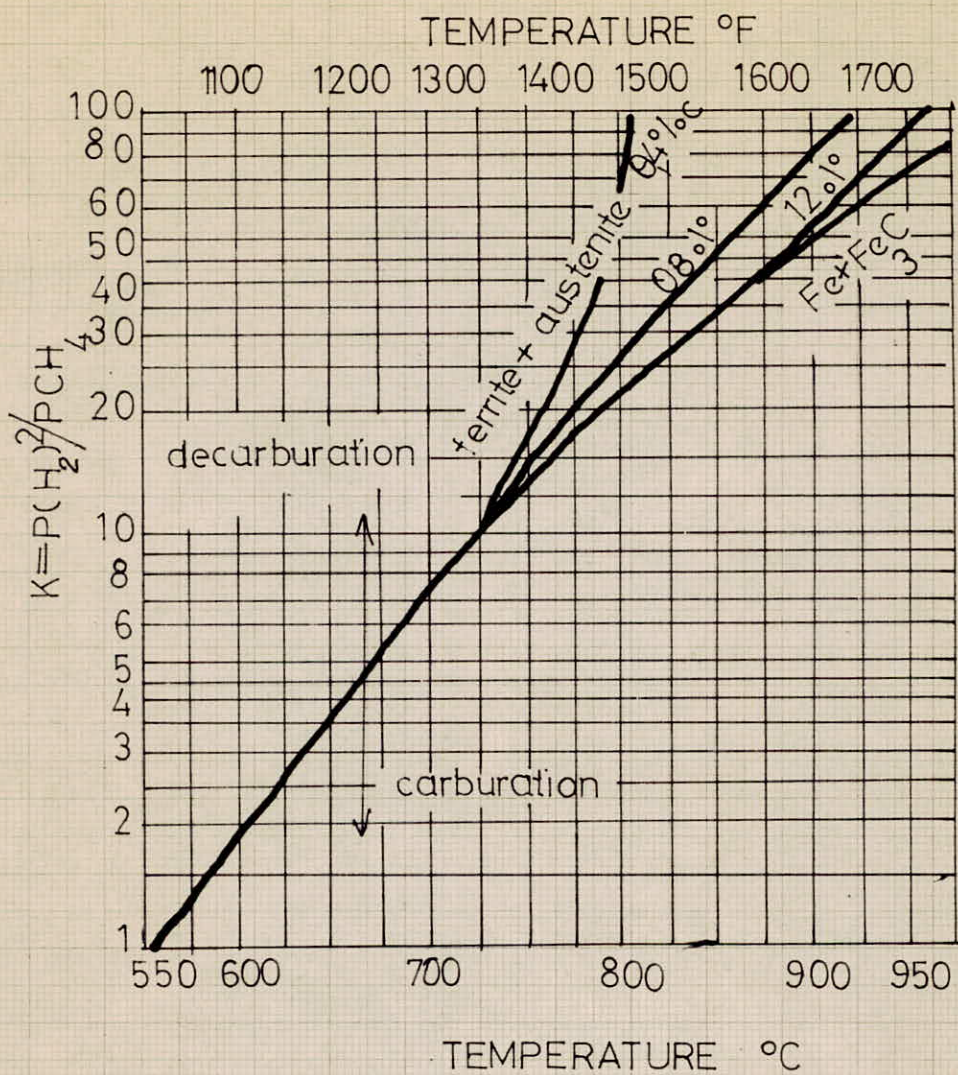
L'introduction des pièces dans la chambre de travail modifie à nouveau l'équilibre. L'atmosphère réagira suivant les réactions :



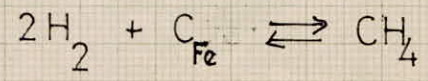
Les constantes déterminées théoriquement, devraient permettre de montrer avec exactitude l'action de l'atmosphère sur un acier donné, c'est à dire sa tendance à carburer ou à décarburer cet acier.

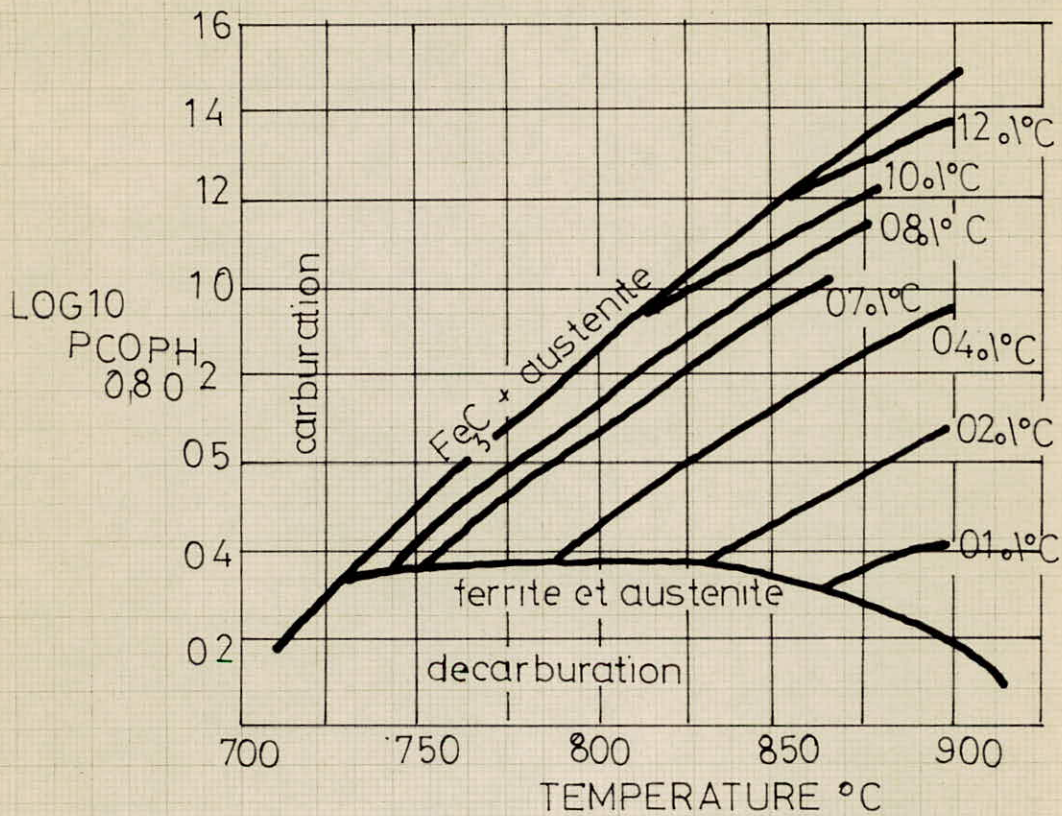
GRAPHE N° 1



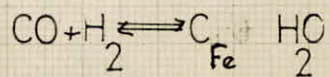


Courbe 2 : Courbes d'équilibre de la réaction





Courbes 3 : Courbes d'équilibre de la réaction



Pratiquement les constantes ne sont que difficilement utilisables pour les raisons :

- la précision des constantes d'équilibre déjà faible pour les aciers au carbone, devient très mauvaise pour les aciers alliés.

- l'équilibre parfait n'est pratiquement jamais atteint.

- l'atmosphère est presque toujours perturbée (entrée d'air, ouvertures des portes), présence d'oxyde de fer sur les pièces, ...)

Les renseignements théoriques ne peuvent donc donner qu'une approximation sur le comportement de l'atmosphère vis à vis de l'acier.

4.2.1.4. Introduction du liquide dans le four.

Le liquide est introduit goutte à goutte dans le four étanche à l'aide d'une pompe d'injection.

Il faut s'assurer du débit exact.

Il ne faut jamais introduire ce liquide à une température du four inférieure à 650 ° C, il y aurait danger d'explosion.

4.2.1.5. Réalisation d'une couche cémentée

Lorsqu'un acier à faible teneur en carbone est mis à chaud, en présence d'une atmosphère cémentante, le carbone apporté par l'atmosphère se dissout dans les couches superficielles si la solubilité du carbone dans le fer le permet à cette température. La teneur en carbone, en surface, croît progressivement pour devenir égale à une valeur maximum qui correspond au "potentiel carbone" de l'atmosphère utilisée.

Il est cependant à noter 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 %.

Quelle que soit la nature du gaz cémentant, il y a apparition de carbone atomique ou naissant à la surface de l'acier; et non pas libération de carbone à l'intérieur du métal, après diffusion du gaz dans le métal. Les recherches sur les réactions gaz-métaux et les phénomènes de diffusion ont montré, qu'une molécule complexe est incapable de diffuser dans le métal.

Par contre elle peut se dissocier en atomes après adsorption à la surface du métal, tous les atomes ainsi libérés pouvant diffuser dans le métal. Dans le cas de la cémentation par CO, la réaction primaire est la dissociation de la molécule de gaz à la surface du métal en carbone libre et atomes d'oxygène; le carbone étant rapidement absorbé par l'acier aux températures de cémentation, il diffuse dans le métal.

L'oxygène, lui, n'est pas absorbé aussi rapidement, et sa diffusion est plus lente, aussi reste-t-il en majorité, sinon en totalité à la surface de l'acier, où il se combine avec une autre molécule de CO ou tout autre gaz réducteur.

La vitesse de pénétration du carbone dans la couche superficielle varie selon l'acier traité; elle est fonction de sa teneur initiale.

Pour un même acier, cette vitesse croît rapidement quand la température de traitement s'élève.

Il convient cependant de ne pas envisager un traitement à une température trop élevée, qui risquerait de nuire aux caractéristiques de l'acier traité.

La température habituellement choisie est 925 ° C.

4.2.1.6. Incidence de l'activité de l'atmosphère sur la cémentation.

Si la vitesse d'apport du carbone par la surface devient supérieure à la vitesse de diffusion du carbone vers le coeur de la pièce, la surface s'enrichit de trop, et le carbone ne peut plus se dissoudre dans l'austénite, il se forme alors Fe_3C .

Cette limite de solubilité indiquée par le diagramme d'équilibre (Fig.1) dépend en fait de la composition de l'acier et de sa structure cristallographique.

Certains éléments en particulier le chrome et le manganèse favorisent l'apparition de **carbure** . ; il faudra les limiter dans les aciers de cémentation.

On peut assimiler la plus grande partie des courbes riches en carbone profondeur, à des droites et représenter ainsi schématiquement l'évolution des couches cémentées en fonction du temps.

On constate (fig.2) qu'avec une bonne approximation, ces droites convergent vers un point dont l'ordonnée correspond au potentiel en carbone virtuel de l'atmosphère (1,5 % dans le cas de la figure).

La **richesse** de la couche en surface croit avec la durée de cémentation et sa valeur tend à se rapprocher de ce potentiel virtuel. Si ce potentiel, est supérieur à celui de la limite de solubilité du carbone à la température de cémentation, il y aura obligatoirement formation de cémentite au bout d'un certain temps.

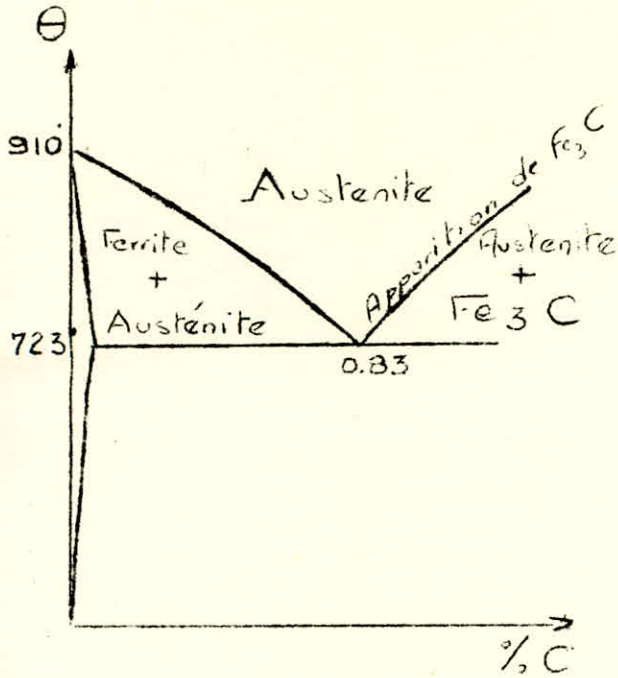


Fig. ①

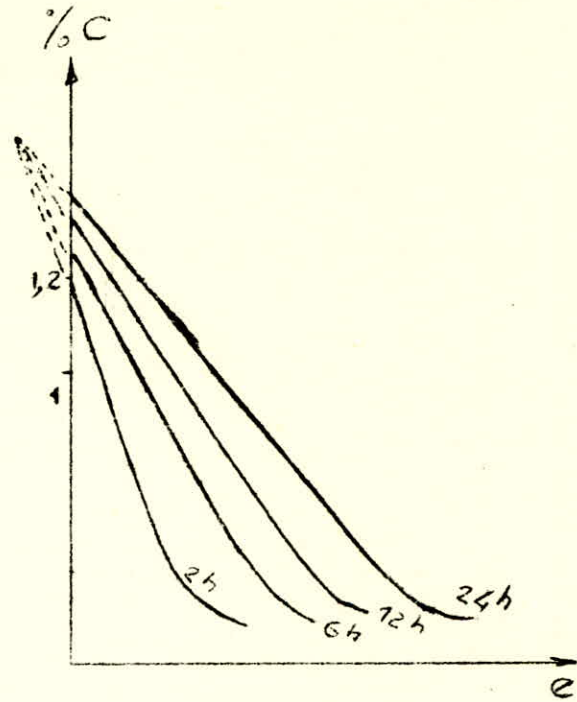


Fig. ②

4.2.1.7. Pourquoi avoir choisi une cémentation à 0,8 % C

On souhaite une structure martensitique et point de cémentite pour la pignonerie ; c'est la raison pour laquelle, on vise la valeur eutectoïde (0,8 % C), valeur limite pour ne pas avoir de cémentite libre.

On évite la formation de cémentite car celle-ci se dépose aux joints de grain; et le réseau ainsi formé est fragile, n'a pas de souplesse; et toute déformation amènerait une rupture par décohésion à l'intérieur de la structure.

Conséquences pratiques .

- obtention de la vitesse de cémentation maximum sans risque de Fe_3C .
- obtention d'une couche homogène sans variations trop fortes d'épaisseur et de richesse d'un point à un autre.

1. Choix des réglages en fonction de l'épaisseur visée.

La Fig. 2 montre que plus le potentiel "virtuel" est élevé, plus le temps nécessaire pour obtenir une épaisseur suffisamment enrichie (0,8 % C) est réduit; et qu'en outre on dispose d'un certain temps pour que s'établisse l'équilibre entre le potentiel en carbone de l'atmosphère, et la teneur en carbone de la couche superficielle. La méthode utilisée : cémentation dans une atmosphère d'activité constante et modérée, c'est à dire un équilibre avec 0,8 % de carbone.

2. Suppression de la cémentite en réseau

L'existence d'un réseau de cémentite, rend la couche fragile et sujette aux écaillages ; ceci est à éviter.

La première solution consiste à diminuer l'activité du gaz, en réduisant les additions de CO et H_2 .

On peut chercher à homogénéiser le métal, en particulier dans le cas des pièces surchauffées à la forge, risquant de présenter une structure grossière avant cémentation. On fait alors un traitement de normalisation.

3. Homogénéisation des profondeurs et richesse en divers points de la charge.

Ce résultat est atteint en ayant :

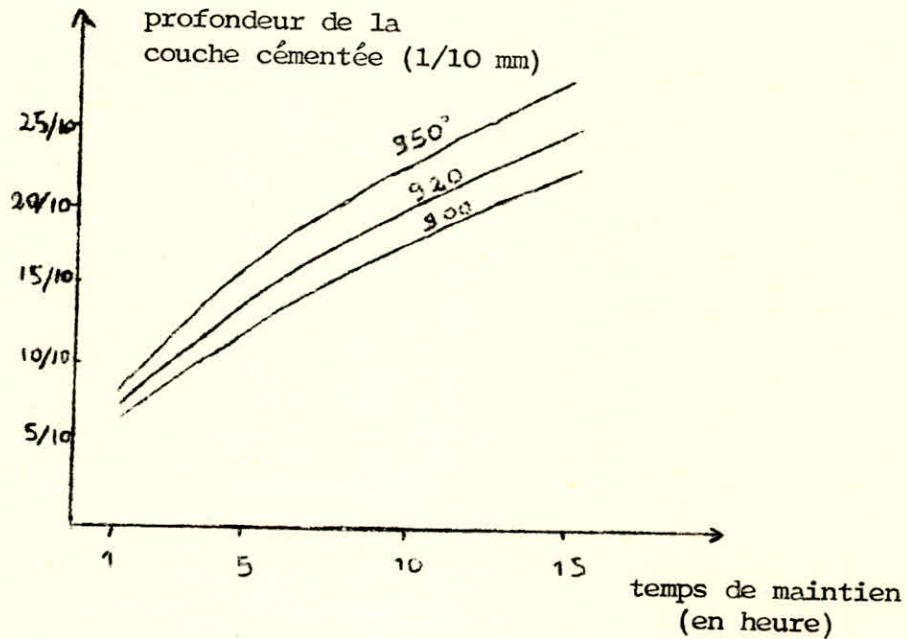
- même richesse de gaz (brassage suffisant)
- même vitesse d'échauffement (bonne circulation de gaz, montage aéré).
- même état de surface des pièces (propres, absence de suie).

En bref, le résultat final dépend de la conception des fours et de la disposition des pièces.

.4.2.1.8. Profondeur de la couche cémentée :

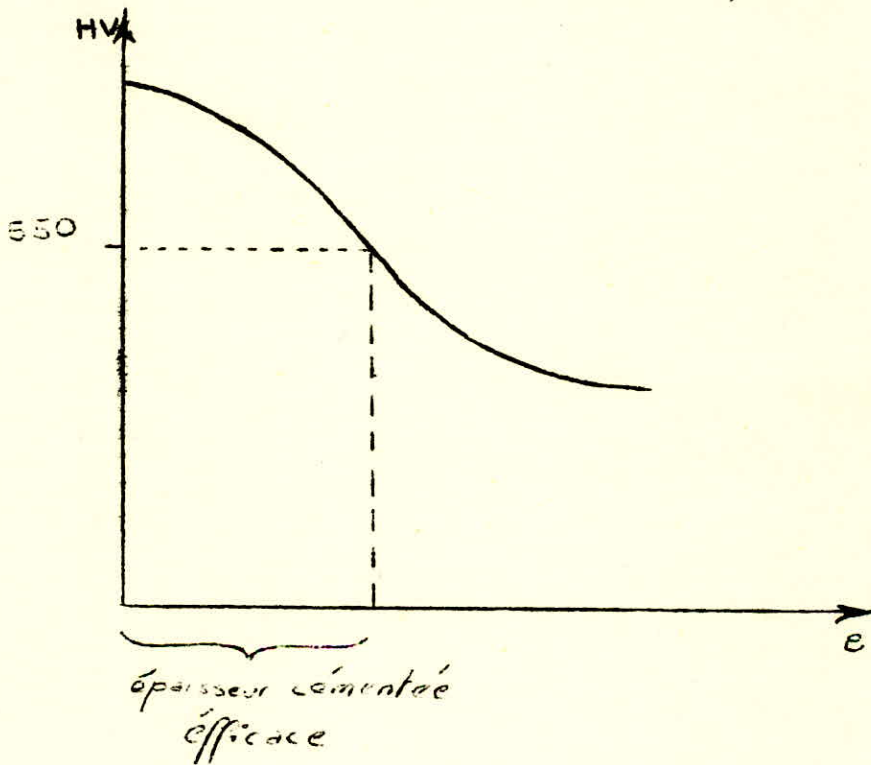
La définition de la profondeur de la couche cémentée varie suivant les auteurs. On peut considérer qu'elle est :

- soit la profondeur à laquelle on retrouve le pourcentage initial de carbone dans l'acier (c'est ce pourcentage qui est pris en considération dans la courbe suivante).



- soit la profondeur jusqu'à laquelle on retrouve le pourcentage de carbone donné, 0,8 % pour notre cas. Dans ce cas, la couche considérée présente pratiquement sur toute son épaisseur les mêmes caractéristiques.

- soit la 3^{ème} définition retenue chez SONACOME, qui consiste à pratiquer une microdureté sur la pièce cémentée, et, de considérer l'épaisseur efficace de cémentation atteinte, lorsqu'on arrive à la dureté Vickers $HV_{0,05} = 550$



4.2.2. Cémentation dans l'industrie.(voir annexe photo n° 4)

Avant d'être cémentées, les pièces sont systématiquement lavées. Une machine à laver, à eau chaude (70 °) additionnée d'un produit de lavage et d'un neutralisant, permet le dégraissage des pièces.

Le lavage se fait par agitation.

La machine se compose de :

- 1 tableau de commande électrique avec un cycle de réglage sous minuterie commandant l'agitation des pièces.
- un régulateur de température de lavage.
- une étuve de lavage des pièces (70 °)
- une " de rinçage des pièces (70 °)
- une " de séchage des pièces (120 °)

Les pièces propres sont dirigées vers le lieu de cémentation.

4.2.2.1. Description du four de cémentation.

Pour la cémentation gazeuse, chez SONACOME, on utilise des fours verticaux comportant 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.

Le four se compose :

- La carcasse

Elle est en tôle fortement raidie, montée sur pieds.

Le couvercle métallique est percé de trous servant chacun à

- l'arrivée de l'atmosphère
- l'évacuation de l'atmosphère
- introduction des témoins de cémentation
- introduction du thermo-couple.

Le Briquetage :

Il comporte une couche calorifuge, suffisamment épaisse pour réduire au maximum les pertes thermiques du four, et une paroi réfractaire en briques silico-alumineuses ayant une excellente tenue mécanique et une bonne résistance aux chocs thermiques.

Les résistances

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

Le moufle vertical.

Il est en acier réfractaire.

Dans la goulotte remplie de corindon, vient s'insérer le bord de la coupole du couvercle.

L'extrémité inférieure du moufle plonge dans un joint d'huile refroidi par circulation d'eau.

- Le panier.

Il est en acier réfractaire; il est constitué d'un seul bloc ou de plusieurs parties qui s'emboîtent, afin de répartir ^{la charge} en plusieurs étages. Les fonds du panier ou de chaque élément de panier sont à claire-voie.

- La Turbine.

Elle est en acier réfractaire, l'axe de cette turbine refroidi par circulation d'eau, traverse la base, et est entraîné par un moteur électrique monté sur les pieds du four.

Cette turbine permet le brassage de l'atmosphère au sein du four.

4.2.2.2. Marche du four.

4.2.2.2.1. Alimentation en atmosphère cémentante.

On envoie, sous pression et en quantité réglable avec précision, dans la chambre de traitement, du perlitol constitué de 80 % d'alcool isopropylique et 20 % de White spirit.

Ce liquide arrive à la partie supérieure de la chambre par une tubulure traversant le couvercle et 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 à la cémentation.

L'atmosphère obtenue dans le four est composée de :

CO 33 %
H2 40 %
CH4 1,35 %
CO2 0,1 - 0,2 %

4.2.2.2.2. Puissance chauffante

Le chauffage du four est assuré par des résistances électriques, placées tout autour de la chambre de traitement.

4.2.2.2.3. Dispositif de contrôle de l'atmosphère et de la température

Appareillage électrique et pyrométrique.

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

- le contacteur de régulation
- le relais disjoncteur de protection du moteur de la turbine.
- un régulateur indicateur à 2 index; le 1er réglé à 650 ° C, interdit l'admission de gaz dans le four au dessous de cette température, le 2ème 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 sous gaine, situé dans la charge.
- un régulateur indicateur à 1 index réglé à une température légèrement supérieure à la température de travail; il assure la régulation pendant la montée en température de la charge, et protège les résistances contre toute surchauffe. Il est relié à un couple pyrométrique sous gaine situé au voisinage des résistances.
- un enregistreur de température à une courbe, est relié à un couple pyrométrique sous gaine situé à proximité de la charge.
- les lampes de signalisation d'allure de marche du four, les interrupteurs boutons-poussoirs "Marche-arrêt".

CONTROLE DE L'ATMOSPHERE

A SONACOME, le dispositif de contrôle d'atmosphère est utilisé avec les fours de cémentation verticaux; c'est un système Microcarb.

Le système Microcarb est constitué par un élément primaire: le carbohm, et une cabine de contrôle qui comprend :

- un régulateur-enregistreur pour le carbone
- un ensemble D.A.T.
- un châssis d'accessoires qui supporte les relais électriques, un circuit de mesure intégrale et un ensemble d'étalonnage.

A l'aide ces appareils, le potentiel de carbone de l'atmosphère du four est détecté, mesuré, contrôlé et enregistré.

a) LE CARBOHM

Il comprend :

- un détecteur
- un tube de protection
- un moteur actionnant le mécanisme d'introduction du carbohm dans le four.

Une chambre de refroidissement par circulation d'eau, assure le refroidissement rapide du carbohm quand celui-ci est retiré de la chambre de chauffe.

. Historique et utilisation du carbohm

C'est un procédé Américain.

Le détecteur carbohm est un fil très fin, en alliage ferro-nickel à 3 %, R = 7 Ω . La résistance de ce fil est fonction du % en carbone et de la température.

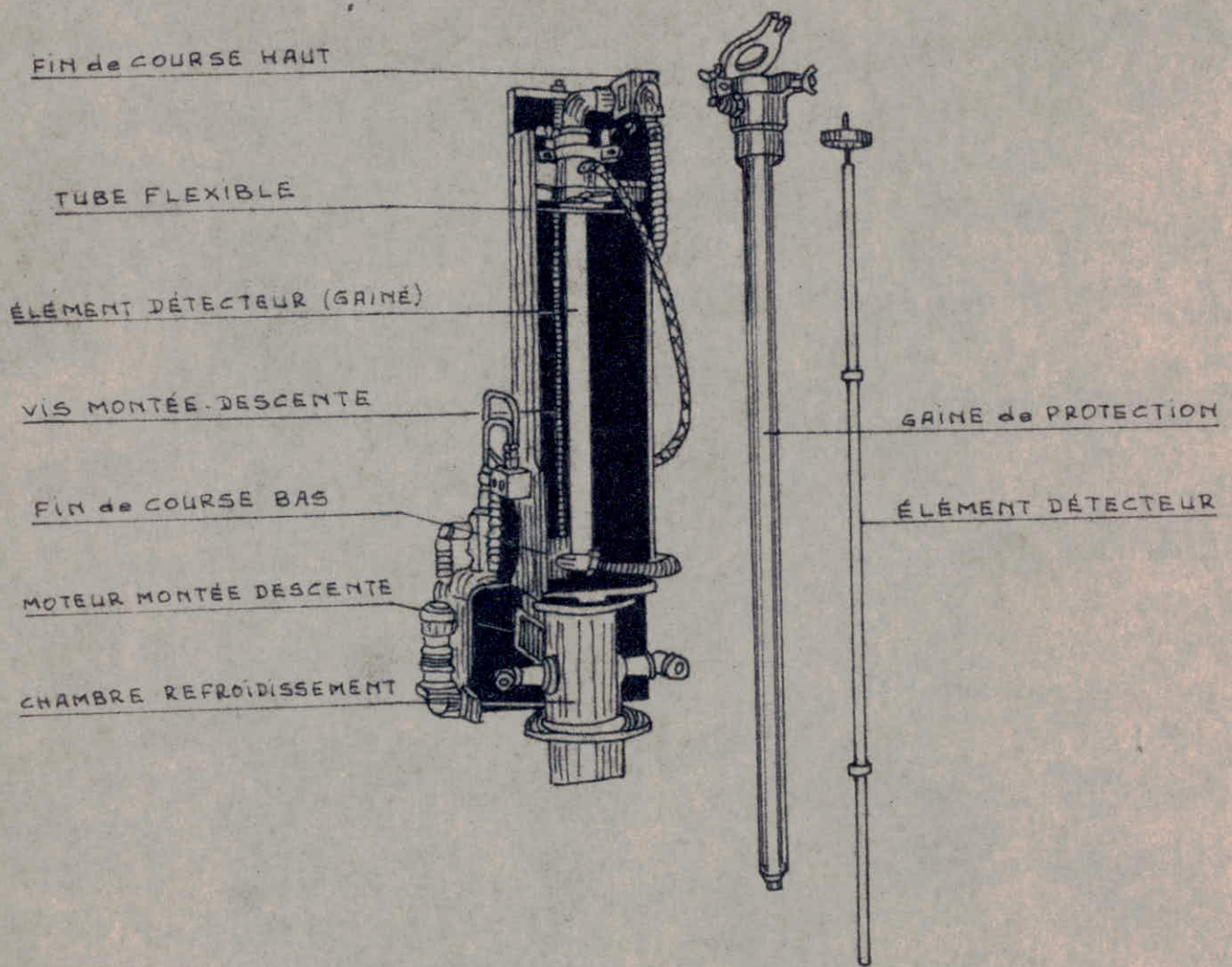
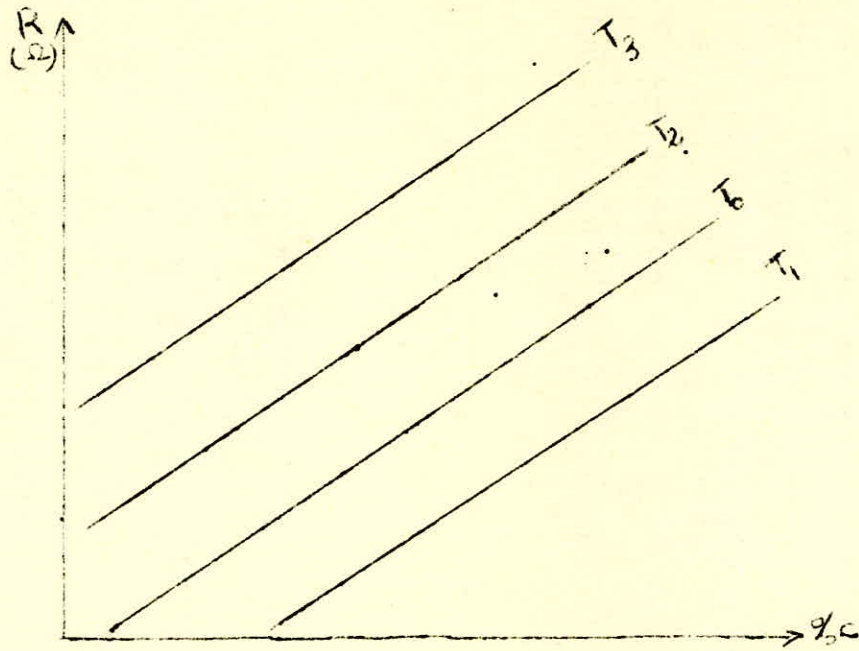
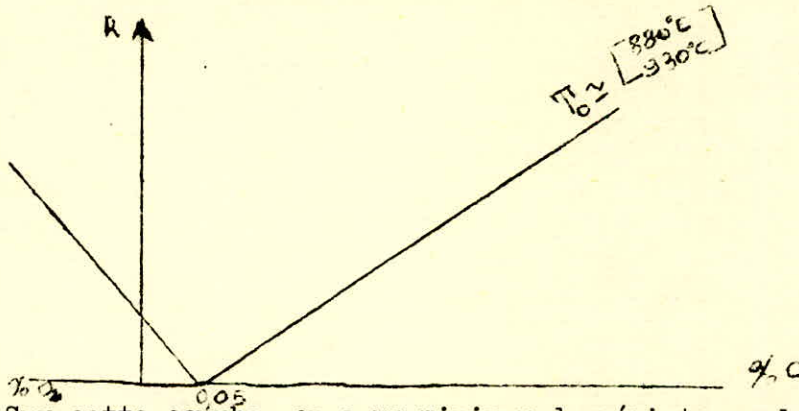


FIG 2 : ÉLÉMENT DÉTECTEUR
MONTAGE sur FOUR



On considère que le paramètre température est constant au moment de l'introduction de ce dispositif de contrôle dans le four. On obtient ainsi qu'une seule courbe.



Sur cette courbe, on a un minimum de résistance de 0,05 % C, si on décarbure le fil en dessous de 0,05 % C le fil s'oxyde et la résistance croît.

Le changement de courbe permet de faire l'étalonnage du système.

Le carbohm n'est utilisé qu'en cémentation, pas en carbonituration. Ce carbohm atteint rapidement un équilibre avec le gaz cémentant contenu dans le four.

Sa résistance électrique varie en fonction de la teneur en carbone, d'où la possibilité de déterminer continuellement le potentiel de carbone de l'atmosphère, en mesurant la résistance du fil (la résistance change également en fonction de la température, mais un fil calibré, compensateur de température, monté dans l'enregistreur de température rend cet effet nul).

Un système fournit de l'azote hydrogéné, qui est utilisée par intermittence en quantité déterminée, pour la protection et l'étalonnage du carbohm.

- b) F O N C T I O N N E M E N T

(Voir schéma pneumatique).

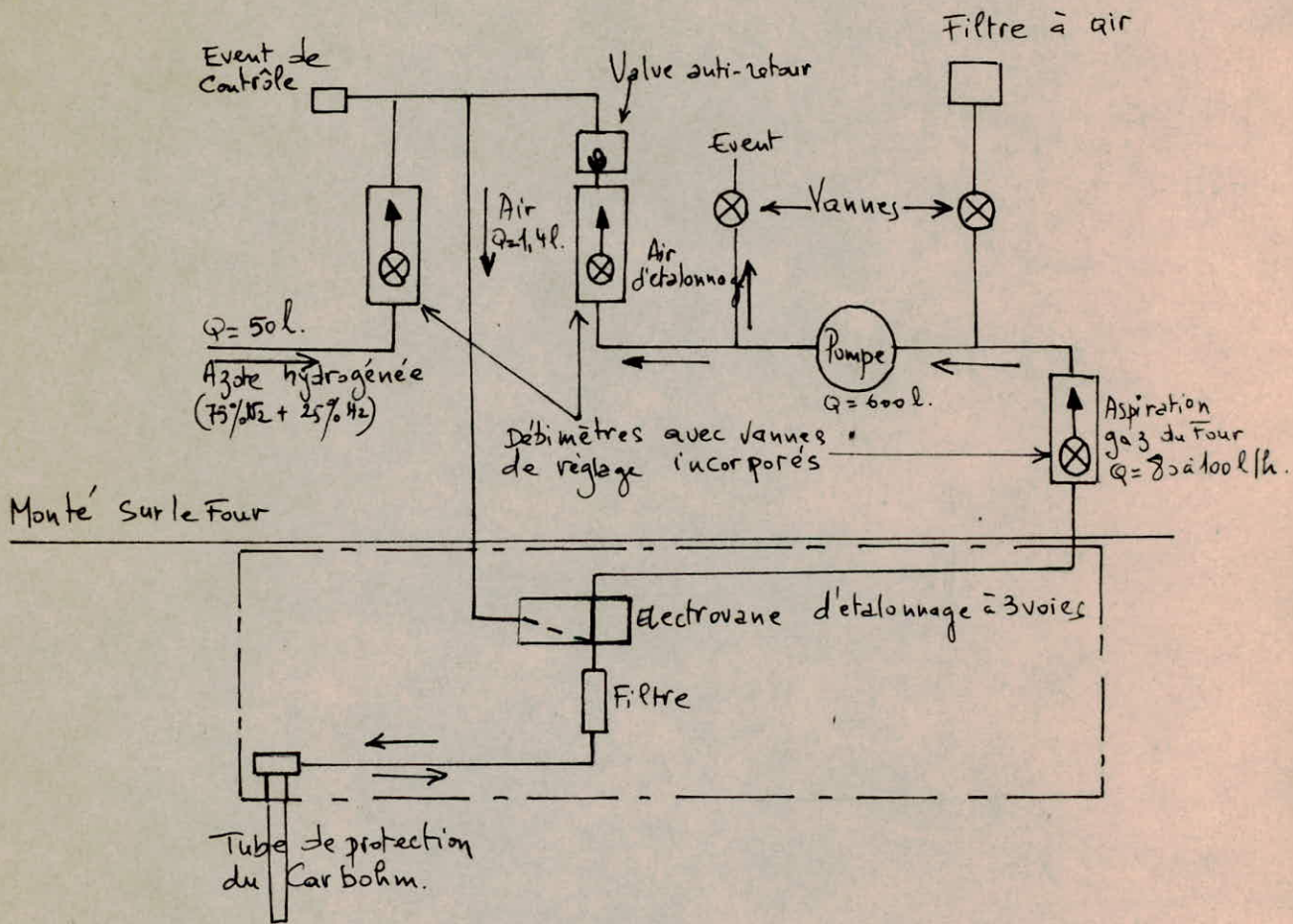
Le schéma pneumatique de principe pour le dispositif microcarb comprend 2 circuits menant à l'électrovanne à 3 voies.

- un circuit d'échantillonnage
- un circuit d'atmosphère d'étalonnage.

Dans des conditions normales de fonctionnement, lorsque le carbohm est introduit dans le four, l'électrovanne à 3 voies est au repos, et la pompe d'aspiration, montée dans la cabine microcarb, aspire un échantillon d'atmosphère du four, pour la faire passer sur le détecteur du carbohm.

Si l'électrovanne à 3 voies est mise sous tension, pendant que le carbohm se trouve en position de fonctionnement et que la pompe d'aspiration est en marche, alors :

Schéma pneumatique



- 1-la pression est libérée dans le circuit d'étalonnage.
- 2-un débit d'azote hydrogénée additionnée d'une petite quantité d'air (50l N₂ + H₂, et 1,5 l d'air) passe par l'électrovanne 3 voies, le filtre et dans le tube Carbohm chaud où il décarbure celui-ci.

La bobine de cette électrovanne est alimentée:

-Lorsqu'on manoeuvre le bouton Etalonnage ou le commutateur Sécurité.

-Lorsque la température du four est supérieure à 650 ° C et que lecarbohm est en position " retiré", (la pompe étant alors arrêtée), seule N₂ + H₂ passera par l'électrovanne, le filtre et le tube du carbohm.

Par l'intermédiaire du commutateur Sécurité, on permet à l'atmosphère d'étalonnage de passer dans le tube du carbohm pour le nettoyer.

REMARQUE : Le carbohm ne peut être introduit dans le four, et le fonctionnement de la microbarb ne peut fonctionner, si la température du four est inférieure à 650 ° C.

Lorsque le carbohm est introduit dans le four, et la pompe d'aspiration faisant passer un échantillon d'atmosphère sur le détecteur, la teneur en carbone de ce dernier s'équilibre avec le potentiel carbone de l'atmosphère.

La résistance du fil détecteur est comme nous l'avons dit plus haut, fonction de sa teneur en carbone, la température étant constante.

La seule modification de résistance, enregistrée par le régulateur enregistreur de teneur en carbone, est celle dérivant de cette teneur. La valeur de cette résistance et ses variations, contrôlent et commandent la régulation de l'atmosphère du four.

c) E T A L O N N A G E D U C A R B O H M

L'étalonnage est nécessaire au moins toutes les huit heures.

Il doit être fait à 870 ° C Minimum.

L'étalonnage consiste à décarburer le fil détecteur du Carbohm au moyen d'un gaz décarburant mais fortement réducteur. Pendant l'opération, le circuit de mesure est équilibré à la valeur 0 % de carbone jusqu'à ce que le fil soit complètement décarburé et qu'aucun changement ne puisse se produire.

Lorsqu'on appuie sur le poussoir Etalonnage, l'électrovanne à 3 voies est mise sous tension, l'échantillonnage est alors arrêté et un débit contrôlé de N₂ + H₂ est envoyé dans le tube du carbohm.

Quand le fil détecteur est complètement décarburé, l'équilibre du pont de mesure est stabilisé au point 0 % de carbone; une minuterie enclenchée et déclenchée par des contacts à chaque battement, ouvre un contact qui rétablit les conditions normales d'échantillonnage et de contrôle.

Le cycle complet d'étalonnage doit durer de 10 à 15 minutes.

PRECAUTIONS

- faire couler l'eau de refroidissement quand le four est en marche.

- contrôle microcarb utilisé à une température entre 790 ° C et 950 ° C.

- le potentiel de carbone ne peut être contrôlé qu'entre 0,15 et 1,15 % C (si on arrive à C = 0,05 %, le fil perd ses propriétés mécaniques, au dessus de 1,15 % on forme des carbures qu'il est impossible de détruire, le fil devenant trop fragile).

La durée de vie du fil dépend de :

- l'étanchéité du four
- D'un coup brusque
- Charge sale (vapeurs d'huile; c'est pour cela qu'on opère à un lavage avant cémentation)

Entretien

Il faut avoir de bons filtres (alliage métallique tressé en manganin (Cu + Mn).

Ces filtres arrêtent les suies (ces suies sont des résistances qui viennent s'ajouter en parallèle).

Quand le détecteur est en position retirée, pour le protéger on lui adjoint N₂ + H₂.

Les fils détecteurs sont en général stockés dans du pétrole.

4.2.2.3. SUivi de la Cémentation

4.2.2.3.1. La Charge et les témoins.

Le chargement de pièces se fait à 920 ° C. On soulève le couvercle pour y introduire 4 paniers. La disposition des pièces est bien étudiée.

Dans chaque panier, on place 2 témoins en acier 12 NC6. La courbe de diffusion est la même pour l'acier 20 NC6 et l'acier 12 NC6. Aussi dans le domaine industriel, pour éviter qu'il y ait beaucoup de nuances de témoins on s'est limité au 12 NC6 qui donne des satisfactions suffisantes, car d'autres pièces réalisées avec d'autres nuances d'acier peuvent être traitées en même temps que l'arbre de commande. Par la goulotte du couvercle on introduit un fil de fer et 4 témoins en 12 NC6 que l'on retirera au fur et à mesure que s'effectue la cémentation.

Quelques minutes après l'introduction de la charge et fermeture du couvercle, la température est descendue au dessous de 650 ° ; il y a eu arrêt automatique de l'injection du liquide (si le liquide était injecté, il craquerait mal).

4.2.2.3.2. Disposition de la charge dans le four.

La disposition des pièces doit satisfaire aux principes suivants :

- assurer une répartition régulière de la charge, pour obtenir une mise en température, homogène et régulière, de l'ensemble des pièces.

- maintenir suffisamment les pièces pour qu'elles ne puissent plier ou se déformer sous leur propre poids aux températures de traitement.

- éviter que les pièces se touchent.

- réaliser des montages aérés pour permettre une bonne circulation de l'atmosphère.

4.2.2.3.3. Contrôle de la marche régulière de la cémentation

Le contrôle se fera par prélèvement réguliers de témoins.

Le moyen de contrôle utilisé est la machine Reicherter (voir annexe photo n° 8-b.)

Principe de cette machine.

L'essai consiste à imprimer en 2 temps, dans la couche superficielle de la pièce à contrôler, un pénétrateur de type normalisé. Durant le premier temps, on applique la charge de 187,5 Kgs et quelques secondes après, on relève sur un comparateur la valeur de la dureté correspondante.

Durant le deuxième temps, on applique la charge de 1000 Kgs et quelques secondes après, on relève sur un comparateur la valeur de la dureté correspondante.

Connaissant ces deux duretés, on se réfère à un tableau et on lit l'épaisseur cémentée.

Opérations de contrôle sur les témoins. (voir graphe n° 4).

Le chargement a eu lieu à 9H 10

A 11H45, retrait du fil de fer qu'on trempe dans l'eau.

En pliant ce fil, il casse facilement : on déduit qu'on est bien en atmosphère cémentante.

Le contrôle donne une épaisseur cémentante de 2/10.

A 14H15 : retrait du 1er témoin introduit dans la goulotte

Contrôle : épaisseur cémentée : 4,5 /10

A 16H : retrait du 2 ème témoin
épaisseur cémentée : 6/10

A 19H : retrait du 3 ème témoin
épaisseur cémentée : 7,2/10

A 20H30 : retrait du 4 ème témoin
épaisseur cémentée : 7,5/10

A 22H45 : déchargement du four

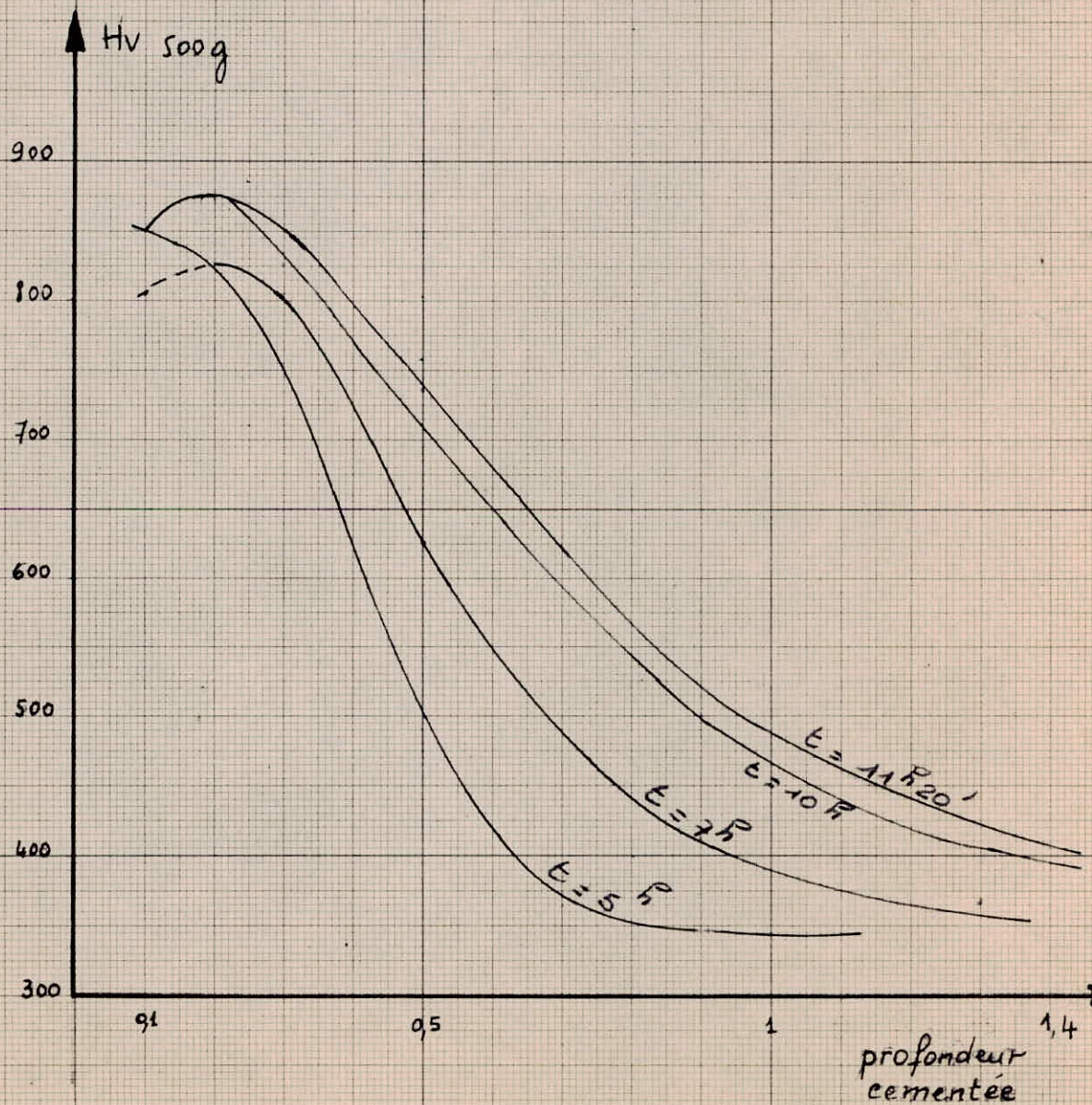
4.2.2.4. Cellule de refroidissement

La cémentation a été effectuée à 920 ° C, nettement au dessus de la température de trempe 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". Cette cellule est une enceinte étanche, cylindrique, verticale, dont la double paroi est refroidie par eau.

GRAPHE N° 4

EVOLUTION de la PROFONDEUR
des COUCHES CEMENTÉES en FONCTION du TEMPS
(par contrôle de dureté après trempe)



Elle est munie d'un couvercle relevable, dont les bords s'insèrent dans un joint de sable, monté sur la carcasse, pour s'assurer l'étanchéité.

Cette cellule est alimentée en azote hydrogénée (95% d'azote et 5% d'hydrogène) pour protéger les pièces contre l'oxydation pendant le refroidissement. Vers 400° C, les paniers sont retirés et laissés refroidir à l'air.

Récupération du témoin de cémentation.

Après que les pièces aient refroidi dans la cellule de refroidissement, on récupère le témoin contenu dans le panier.

L'examen de ce témoin se fera au laboratoire pour déterminer l'épaisseur cémentée et vérifier l'absence de cémentation anormale de la couche.

4.2.2.5. Contrôle au laboratoire.

L'épaisseur cémentée du témoin pris dans le panier sera définie comme suit : autant de grains de ferrite que de perlite, ce qui correspond à 0,4 % de carbone.

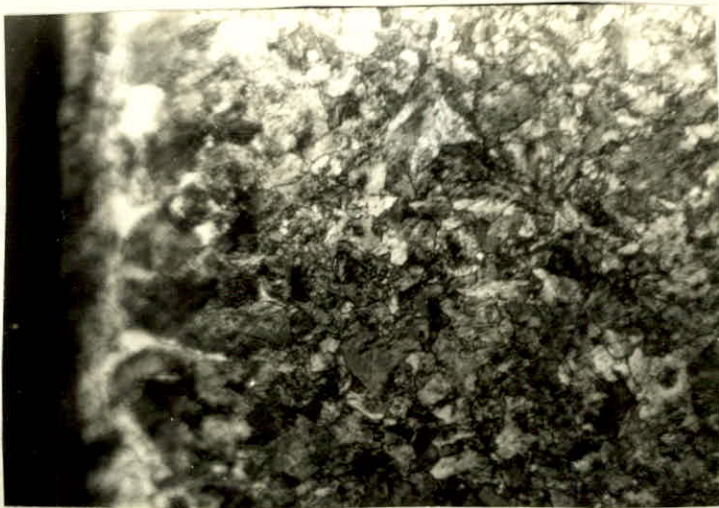
L'examen micrographique nous donne une épaisseur cémentée de 8,5/10.

De plus on remarque une légère débarburation en surface qui est de l'ordre de 1/100 (visible au microscope par l'appauvrissement superficiel en carbone).

L'origine peut être un courant d'air).

A SONACOME, est utilisée la carte de contrôle suivante donnant les renseignements nécessaires sur la marche de la cémentation.

TEMOIN CEMENTÉ A L'ETAT RECUIT.



Attaque au Nital 5% x 350
Bord de la Couche Cementée



Attaque au Nital 5%. x 350
Zone de Transition: 50% Pearlite, 50% Ferrite.

Four MICROCARB	Désignation des Pièces	N° des Pièces	Quantité	POIDS	
				UNITAIRE	TOTAL
	Inter. de Commande	164 429	71	3,5	248,5 Kg
Date 19. 02. 75	Arbres de commande	165 526	13	3,1	40,3 Kg
Poids de la Charge 403,96 Kg	Planétaire fixe 2,80	184 977	46	2,3	105,5 Kg
N° de la Charge 9	Heure de chargement	9 ^H 10	Heure des Prélèvements	Epaisseur Contrôlée	épaisseur: 8,5/10 légère décar- buration en surface ≈ 1/100 Bon
N° du Four 3	Heure Arrivée en température	11 ^H 10	11 ^H 45: fil de fer cassé	2/10	
Température 920° C	Heure d'Arrêt du four	21 ^H 55'	14 ^H 15	4,5/10	
Tolérance 7-9	Heure de Déchargement	22 ^H 45	16 ^H	6/10	
			19 ^H	7,2/10	
			20 ^H 30	7,5/10	
			Epaisseur Cement. fin d'Opération		

Conclusion

La pièce jugée bonne après cémentation est conduite vers la ligne de trempe-revenu.

.4.3. LA TREMPÉ

Introduction

La cémentation ne produit pas elle-même le durcissement de la couche traitée et celui-ci doit être obtenu par une trempe ultérieure.

Le procédé utilisé dans notre cas est la trempe différée.

.4.3.1. - La trempe différée

.4.3.1.1. Définition

La trempe différée consiste à laisser refroidir après cémentation les pièces, sous atmosphère protectrice pour éviter la décarburation ou l'oxydation, dans une cellule placée à côté du four de cémentation ; après refroidissement ces pièces sont réchauffées dans un four sous atmosphère protectrice et elles sont trempées à l'huile.

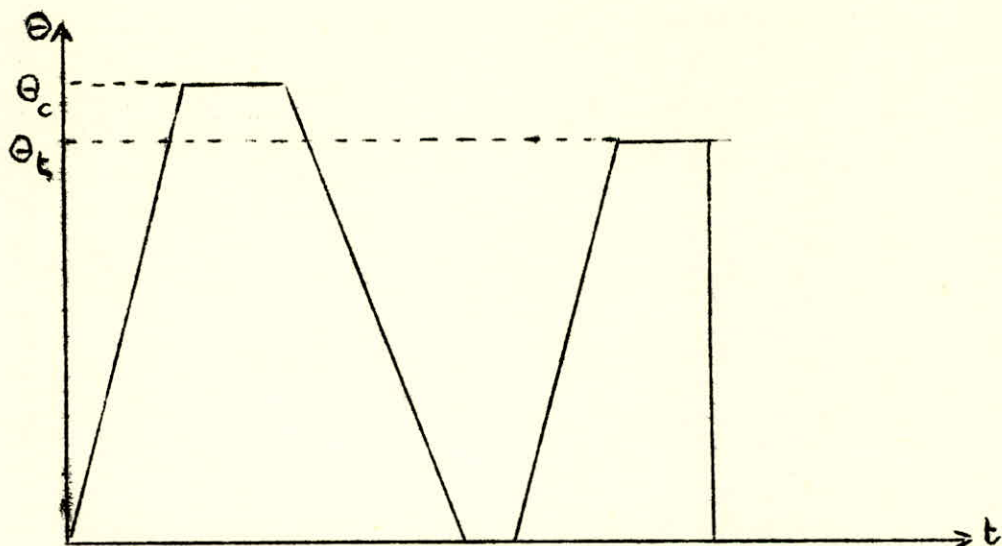
.4.3.1.2. Cycle de trempe

Il est nécessaire pour avoir une cémentation uniforme et rapide d'opérer la cémentation proprement dite, à une température supérieure au point de transformation du coeur ; mais du fait de l'enrichissement de la couche en carbone, cette température est toujours nettement supérieure au point A_{c3} de la couche.

Il s'ensuit que la température de trempe correcte pour la couche est toujours plus basse que celle de la cémentation.

La trempe consiste à chauffer l'acier à une température, supérieure à son point de transformation A_3 pour l'amener à un état structurel "austénitique".

On le fait refroidir alors rapidement à une vitesse supérieure à une certaine limite critique dépendant de la composition ; très souvent on immerge dans l'eau ou dans d'autre liquide ; (on verra que dans notre cas on utilisera comme bain de trempe, l'huile chauffée à 90°).



La structure est modifiée ; et la transformation de l'austénite se fait en un constituant hors d'équilibre : martensite ou bainite, qui attribue à l'acier une grande dureté.

Les conditions de la trempe sont très variables suivant la constitution du métal traité : on peut jouer sur :

- la température d'auténisation (et parfois sur le temps de maintien à cette température)
- la vitesse de refroidissement (eau, huile, air, ...)
- et sur la température finale (réfrigération éventuelle en dessous de 0°C)

.4.3.1.3. Avantages et inconvénients

Avantages

- La trempe différée diminue la quantité d'austénite résiduelle.
- Dans le domaine industriel ce mode trempe nous permet de libérer le four de cémentation.

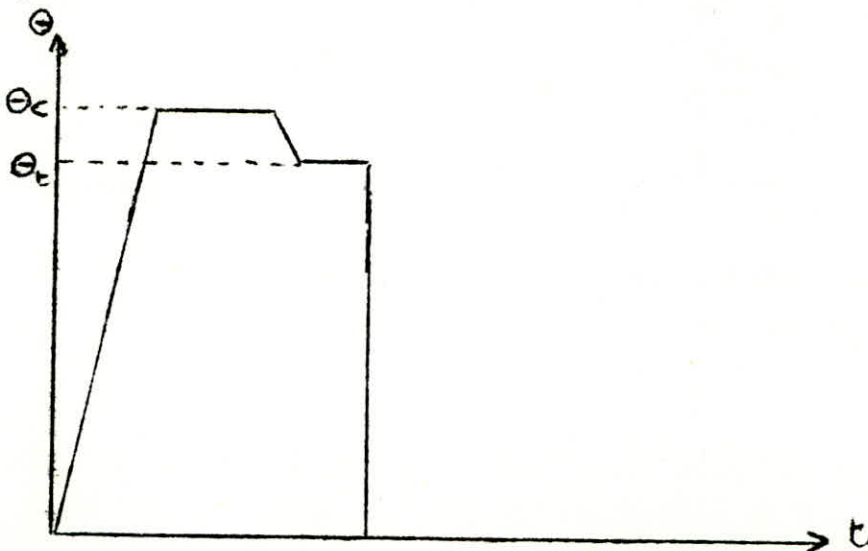
Inconvénients

Du point de vue métallurgique, ce procédé est intéressant mais il est conditionné par des raisons économiques ; il est plus coûteux que la trempe directe (manipulation et stockage des pièces).

.4.1.1.4. Autres procédés de trempe

1 - Trempe directe

Elle consiste à chauffer la pièce jusqu'à une température de cémentation Θ_c et la maintenir à cette température durant un certain temps pour réaliser la **cémentation** de la couche ; puis baisser la température jusqu'à Θ_t : température de trempe avec un certain temps de maintien à cette température, puis à tremper la pièce.



L'avantage de ce procédé est évidemment un avantage économique ; on ne fait qu'une seule chauffe.

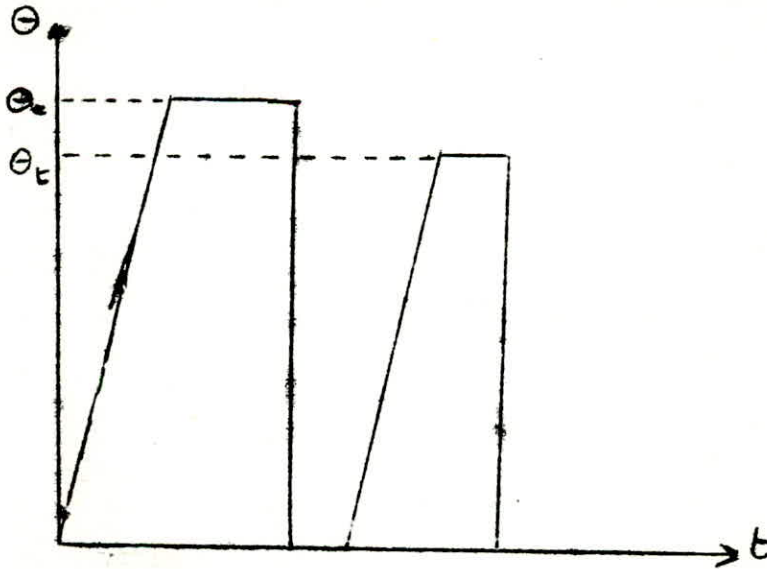
L'inconvénient est la quantité assez importante d'austénite résiduelle que contient la pièce.

2 - Double trempe

Elle consiste à chauffer en un premier temps la pièce jusqu'à la température de cémentation Θ_c , à la maintenir durant un temps suffisant, à cette température afin de cémenter la couche puis de tremper la pièce.

On fait une deuxième chauffe jusqu'à Θ_t : température de trempe, on laisse la pièce à cette température le temps qu'elle s'austénise correctement, puis on le trempe.

Un lavage des pièces est nécessaire après chaque trempe.



4.3.2. Pratique de la trempe différée

La trempe de notre arbre de commande s'effectue dans un four à bac de trempe incorporé et en présence d'atmosphère de protection.

4.3.2.1. Four de trempe

(voir annexe photo n° 5)

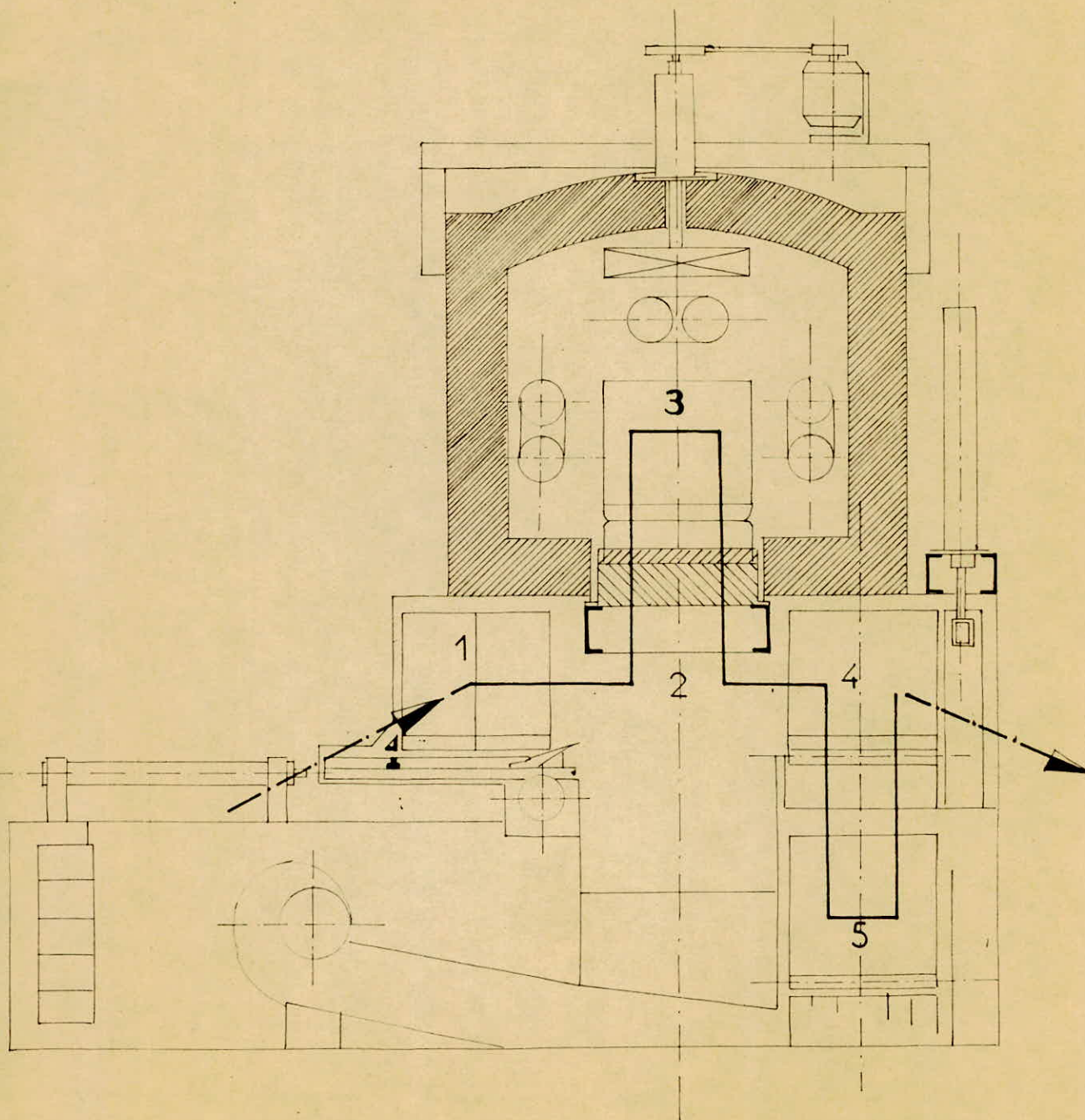
Ce four se compose de :

- une chambre de chauffe équipée de 3 tubes radiants et d'une turbine de brassage dont le boitard doit être continuellement alimenté en eau.
- un sas qui permet le chargement, la translation et le déchargement des charges.

Les portes d'entrée et de sortie qui donnent accès au sas sont du type "pont-levis".

- un bac de trempe chauffé par tube radiant immergé.
Il est refroidi par de l'eau circulant dans 4 circuits tubulaires immergés dans l'huile.
- un élévateur permettant l'introduction des charges du sas dans le four.
- un ascenseur permettant l'immersion des charges à tremper dans l'huile.

Coupe schématique du four G33



- un dispositif de transfert jumelé qui permet de déplacer les charges en attente sur la sole élévatrice et les charges chauffées sur l'ascenseur de trempe.
- une pousseuse d'évacuation qui permet de sortir les charges du sas vers le chariot placé devant la porte de déchargement.

.4.3.2.2. Atmosphère protectrice

Pour pouvoir admettre le gaz de protection dans la chambre de chauffe, il faut que cette dernière soit au moins à 750°C.

Un contact de sécurité du régulateur coupe l'admission d'atmosphère lorsque la température du four descend en dessous de 600°C.

Le gaz de protection est distribué par les générateurs.

.4.3.2.2.1. Production d'atmosphère

L'atmosphère employée est du type :

- réductrice et carburante par H_2 et CO (endothermique à bas support air-gaz et élimination du CO_2)

Cette atmosphère est produite dans un générateur endothermique. Il s'agit d'un craquage du CH_4 en présence d'air à une certaine température ; on maintient cette température généralement constante qui concilie une bonne vitesse de réaction et une tenue correcte du matériel ; et dans des conditions constantes de pression et de vitesse de passage, on obtient une atmosphère constante et qui contient essentiellement CO et H_2 .

Elle contiendra toujours un certain pourcentage de CO_2 (très faible) produit par une entrée d'air. lors de l'ouverture du four pour le changement et de l'étanchéité du four qui n'est jamais parfaite.

Cette atmosphère contiendra également un certain pourcentage résiduel de CH_4 car le craquage de ce gaz 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 (840°) un rapport

$$K = \frac{(\text{Pco})^2}{\text{Pco}_2} ; \text{ ce rapport est donné par un diagramme.}$$

Courbes d'équilibre

graphe n° 1

Sur cette courbe d'équilibre, pour une certaine température (860°c) et pour un certain pourcentage de carbone, si le rapport :

$$\frac{\text{P}^2_{\text{co}}}{\text{Pco}_2} = 13 \quad)$$

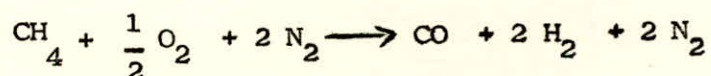
On maintiendra indéfiniment le pourcentage de C ($0,8 \% \text{ C}$)

GENERATEUR ENDOTHERMIQUE

Description du procédé

a) Principe de l'opération

Les générateurs produisent par réaction endothermique une atmosphère protectrice ; cette atmosphère résulte du cracking d'un mélange gaz naturel-air, craqué dans une cornue à 1 050°C, emplie de catalyseur NiSO₄ ; ce catalyseur réduit l'oxygène provenant du cracking du gaz (c'est-à-dire il réduit CO₂ en CO)



On utilise un rapport air-gaz = 2,3

Les cornues du générateur sont chauffées extérieurement par des résistances électriques.

L'analyse des gaz résultant est du type :

$$\text{CO}_2 = 0,3 \%$$

$$\text{CH}_4 = 0 \%$$

$$\text{CO} = 20 \%$$

$$\text{H}_2 = 40 \%$$

$$\text{N}_2 = \text{reste} \simeq 40 \% \text{ (avec gaz rares)}$$

Dans le cas d'une panne de gaz ou de température on envoie N₂ pour protéger les pièces.

b) propriété et emploi du gaz endothermique

- . Le gaz endothermique est combustible et s'enflamme dans l'acier au-dessus de 600°C .
- . Il est employé pour que la trempe s'effectue sans oxydation ni décarburation.

c) Fonctionnement

Le mélange air/gaz est pulsé à travers le catalyseur de la cornue chauffée. A son contact, il réagit pour donner un gaz comprenant essentiellement CO , H_2 et N_2 avec très peu CO_2 , H_2O et CH_4 .

Un enregistreur potentiomètre permet l'enregistrement des teneurs des différents constituants résultants.

La régulation de température est assurée par un régulateur relié à une canne pyrométrique. Sur ce régulateur, un relais autorise l'admission de gaz à $1\ 000^{\circ}\text{C}$.

Un ensemble de détection de flammes par électrodes, contrôle les veilleuses du générateur.

Le plus important pour obtenir de bons résultats, c'est qu'il faut fonctionner à des pressions et à des débits constants.

N.B. : Ne pas descendre à $0,3\ \%$ CO_2 car on risque de détruire le catalyseur par saturation de suie.

Si le pourcentage $\text{CO}_2 > 0,5 \div 0,6 \Rightarrow$ augmenter légèrement débit du gaz

Si le pourcentage $\text{CO}_2 < 0,5 \div 0,6 \Rightarrow$ diminuer gaz naturel

.4.3.2.2.2. Contrôle de l'atmosphère

Le contrôle de l'atmosphère se fait par mesure du point de rosée.

Définition du point de Rosée

C'est la température à laquelle se condense la première goutte de vapeur d'eau donc la température à laquelle la pression devient saturante.

Mesure par le point de Rosée

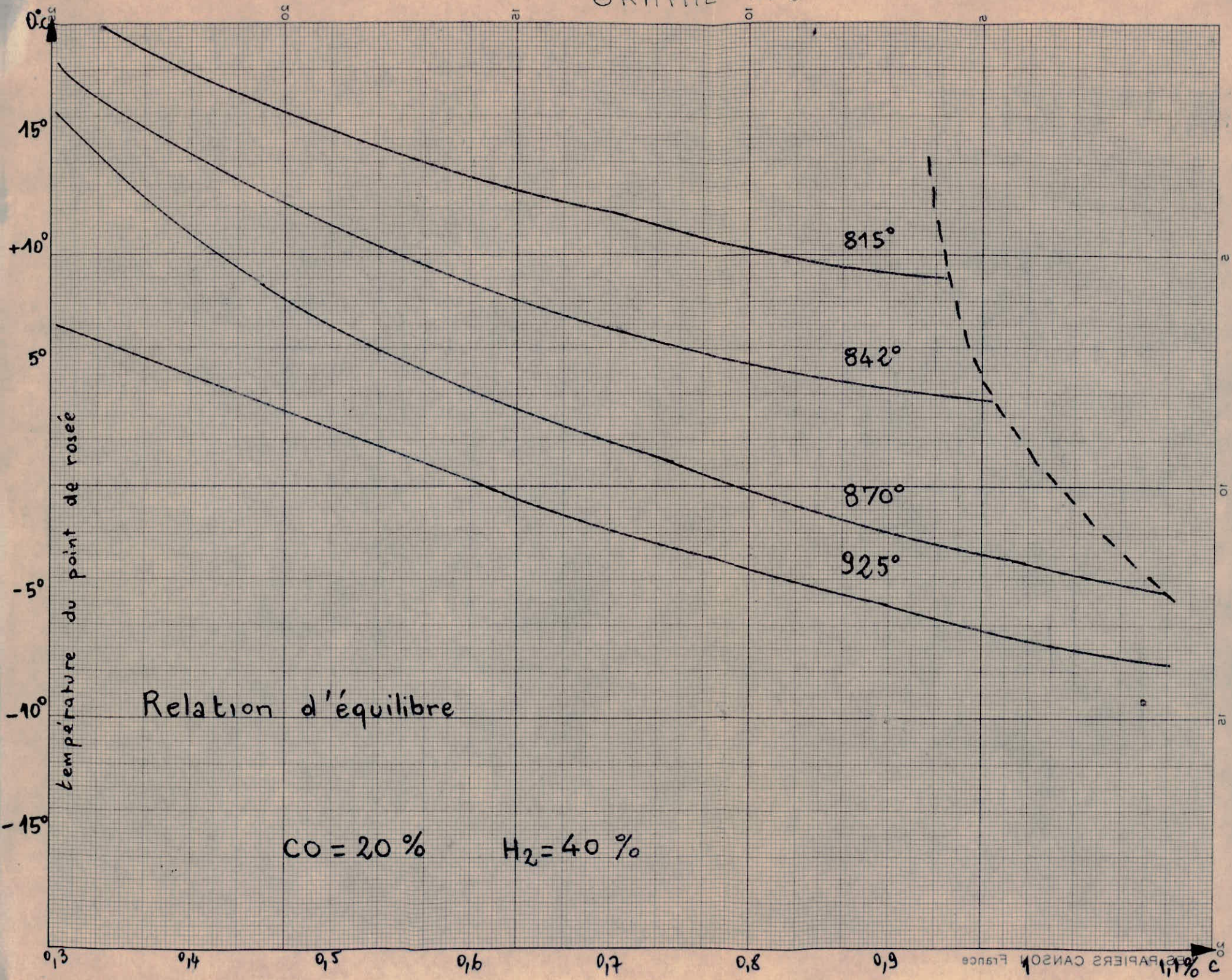
A condition que les teneurs en CO et H_2 de l'atmosphère produite restent constantes, il y a également un rapport constant entre CO_2 et H_2O à une certaine température .

Par conséquent, la mesure du point de Rosée pourrait permettre de calculer le pourcentage en H_2O et pour une température donnée ce pourcentage en H_2O correspondrait à un autre pourcentage en CO_2 .

Pour éviter tous ces calculs qui nous donneraient le pourcentage en CO_2 , on a établi des courbes d'équilibre entre la température du point de Rosée et la teneur en carbone de l'acier.

graphe 5

GRAPHE N° 5



Remarque

La trempe engendre dans les pièces un gradient de température et de vitesse de refroidissement de la surface au coeur. Il en résulte des autocontraintes qui sont la résultante de celles ayant une origine métallurgique (transformation de l'austénite).

- a) Sur le plan purement thermique, la couche périphérique se contracte en premier en comprimant le coeur de la pièce, puis le refroidissement du coeur entraîne une mise en compression de la couche périphérique.
- b) Sur le plan métallurgique, la transformation martensitique entraîne un gonflement, cette transformation se poursuit vers le coeur de la pièce tant que la vitesse de refroidissement restera supérieure à la vitesse critique. Les contraintes d'origine métallurgique dépendront donc de la trempabilité de l'acier. Il convient de rappeler que la cémentation, par le gradient de teneur en carbone qu'elle a créé, conduit à un gradient de trempabilité.

Conclusion

Pour atténuer les contraintes défavorables qui auraient pu naître on dirige les pièces cémentées trempées vers la ligne de revenu.

.4.4. LE REVENU

Introduction

Lorsqu'un acier a été trempé correctement, il atteint la dureté la plus élevée possible, fonction essentiellement de sa teneur en carbone mais il est alors généralement fragile et il serait imprudent de l'utiliser en cet état en raison des risques de ruptures que cela comporterait.

On doit alors lui faire subir un REVENU inférieur au point de transformation (A_1).

Un revenu vers 150°C ne fera pas baisser sensiblement la dureté, mais améliorera un peu la ductilité, en faisant disparaître une partie des contraintes mécaniques dues au refroidissement brusque.

Ce type de revenu est surtout utilisé pour les aciers à outils pour lesquels une très grande dureté est nécessaire.

Principe.

Le revenu que l'on pratique est un revenu de détente à 140° , avec maintien à cette température pendant une heure et quarante minutes.

But

Ce revenu est destiné à réduire les tensions internes.

Il va atténuer les risques d'écaillage et de criques de rectification de la couche cémentée.

Four de Revenu

a) Caractéristiques du four

- nombre de plateaux	: 5
- plateau de base	: 450 x 600
- t° d'utilisation	: 200°C
- cadence	: 1 plateau /20 mn.

b) Principe de fonctionnement. (voir annexe photo n° 6)

Les pièces après passage dans le four à bac de trempe incorporé sont montées sur un charriot, dont le déplacement s'effectue par deux boutons poussoir: marche avant et marche arrière.

Les pièces sont dirigées vers la ligne de lavage puis dans le four de revenu.

Les plateaux issus du poste de séchage de la machine à laver sont introduits automatiquement par un mécanisme de transfert dans la chambre de chauffe.

Le transfert intérieur est assuré par une barre à cliquets.

A la sortie du four les plateaux sont placés sur une table à rouleaux au moyen d'une extractrice commandée par vérin pneumatique.

Le chauffage de la chambre de chauffe est assuré par des éléments chauffants répartis en deux zones :

- zone de chauffe
- zone de maintien

Chacune des deux zones a sa propre régulation trois turbines de brassage placées en voûte assurent une homogénéité de température dans l'enceinte chauffante.

A chaque extrémité du four, se trouve une porte guillotine actionnée par un vérin pneumatique.

c) Cycle de traitement

Le cycle de traitement est de vingt minutes. En début de cycle :

- un plateau est en attente sur l'aire de stockage
- cinq plateaux sont en traitement dans le four de revenu
- l'aire de sortie est libre.

Lors des manoeuvres tous les plateaux progressent d'un pas. Le cycle se fait comme suit :

- * la porte de sortie s'ouvre, un plateau est extrait du four et placé sur l'aire de sortie par une extractrice. Il est ensuite déchargé manuellement. La porte se referme.
- * la porte d'entrée s'ouvre : le plateau en attente sur l'aire de stockage est pris en charge et introduit dans la chambre de chauffe tandis que tous les plateaux se déplacent d'un pas.

Cette progression est assurée par un barre à cliquets. La porte d'entrée se referme.

Comme le four de revenu contient cinq plateaux, et que toutes les vingt minutes sort un plateau, le temps total de revenu est :

$$5 \times 20 \text{ mn} = 100 \text{ mn} \text{ soit } 1 \text{ heure et } 40 \text{ minutes.}$$

Les pièces ayant subi le revenu sont laissées refroidir à l'air ; puis elles vont passer au grenailage (le grenailage se fait de la même façon que dans la forge après le recuit isotherme).

.4.5. Contrôle.

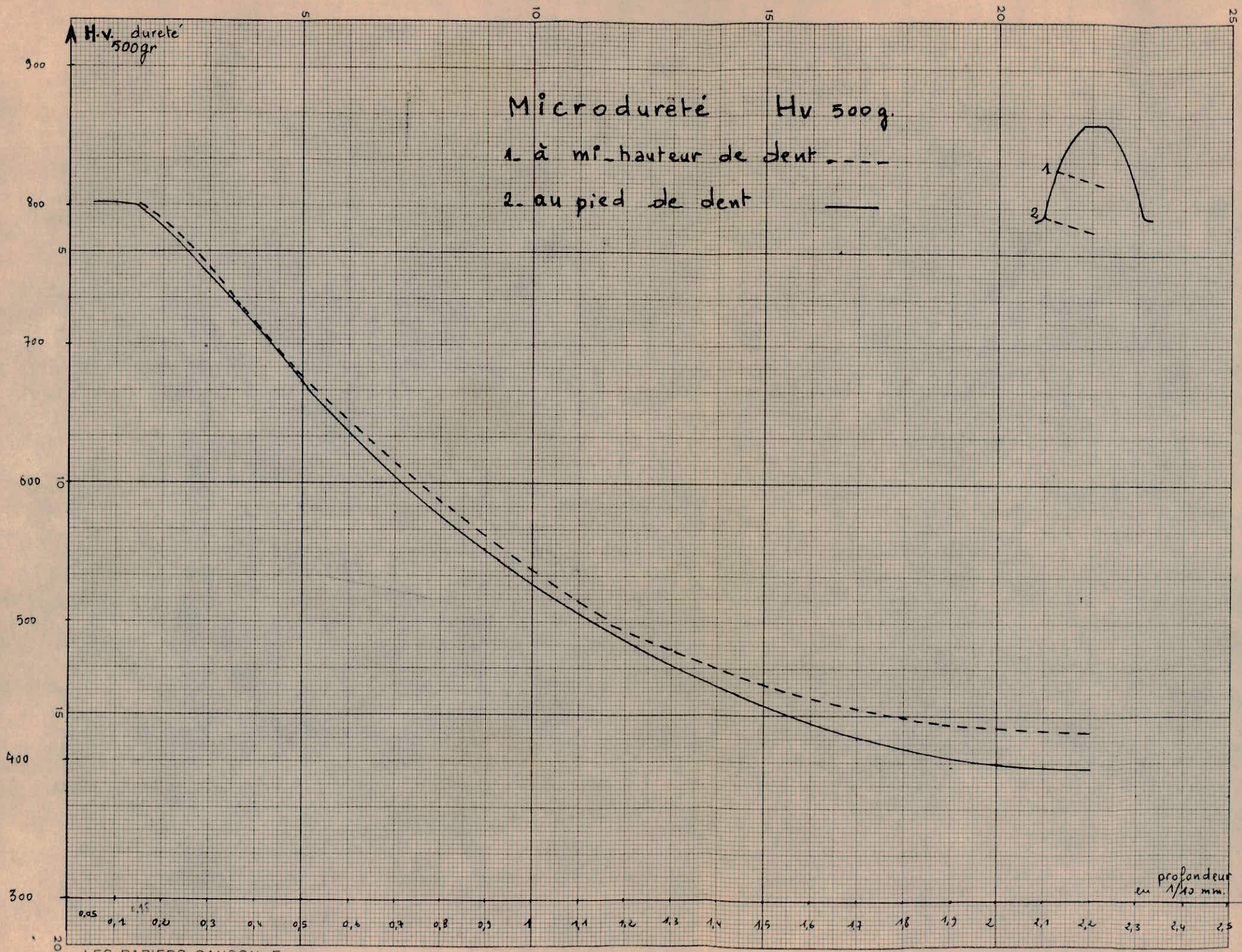
On effectue une microdureté :

- sur la dent
- sur la portée de roulement du tronçon cylindrique de l'arbre de commande

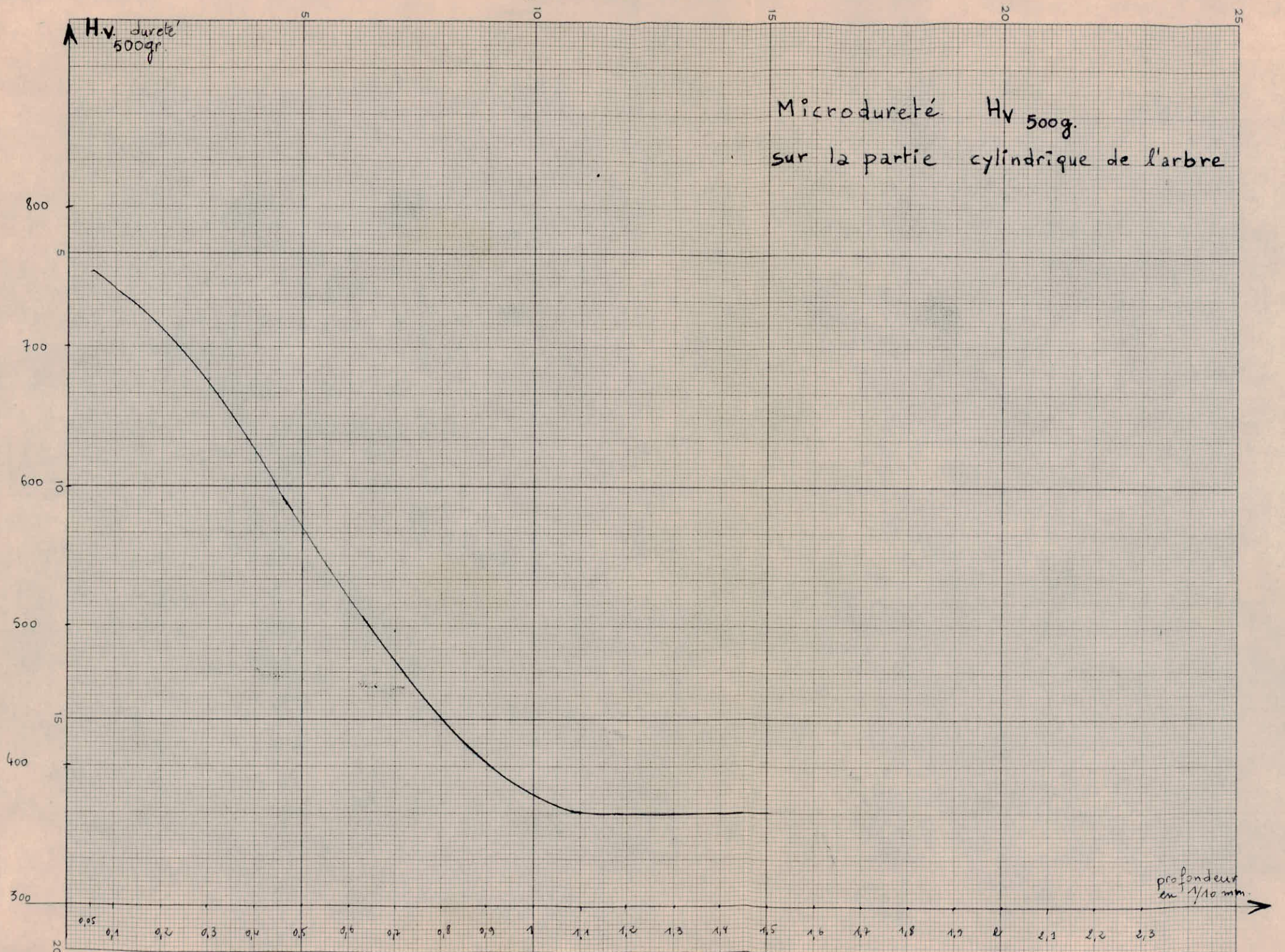
On obtient les courbes (n° 6 et 7).

On contrôle également la structure de cet acier traité, à l'aide d'une micrographie. (voir photos de la pièce traitée).

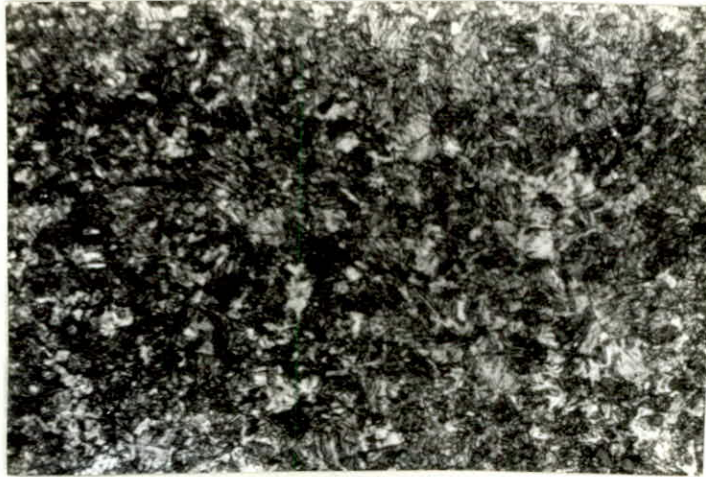
GRAPHE N° 6



GRAPHE N° 7



Micrographie sur la pièce traitée



Attaque au Nital 5%
Bainite Supérieure.

X110



Attaque au Nital 5%
Structure Martensitique.

X110

.4.6. Conclusion sur le Traitement Thermique d'Utilisation.

La technique utilisée pour cémenter - tremper le pignon de commande tout en n'étant pas des plus modernes (par rapport aux lignes de cémentation - trempé directe), a été choisie :

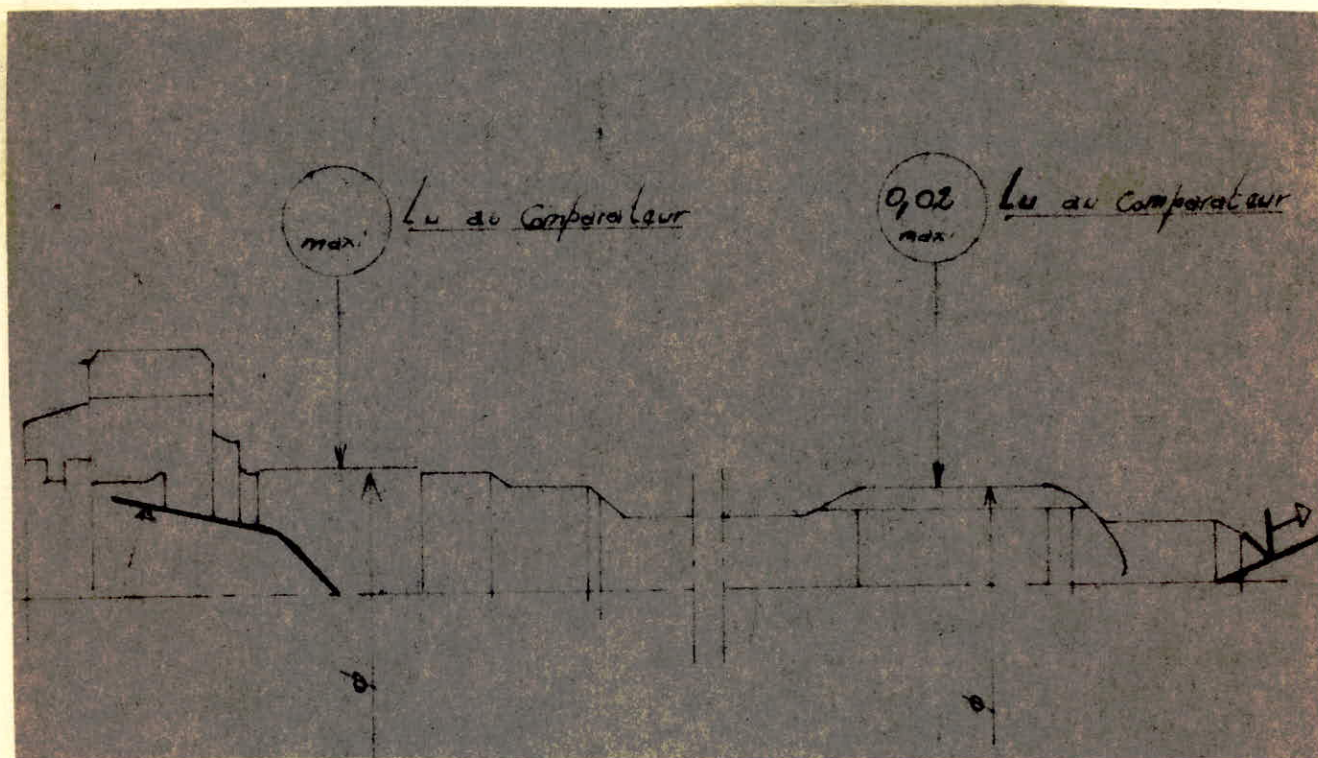
- pour la précision et la fiabilité de la qualité des couches cémentées (efficacité quant au produit fini)
- pour la relative simplicité technique
- pour l'expérience que le personnel a de ces techniques.

Cependant, les techniques utilisées n'empêchent pas les défauts habituels, des traitements thermiques tels que les déformations qui sont éliminées par un redressage.

5 - REDRESSAGE

Les pièces ayant été soumises à divers traitements, peuvent au cours de ces opérations, avoir subi des déformations.

C'est pour cela, que tous les arbres de commande sont vérifiés et éventuellement redressés au moyen d'une redresseuse munie d'un comparateur (voir schéma du redressage).



.6. RECTIFICATION

Les pièces retournent vers l'usinage pour y subir certaines rectifications, au niveau des portées de roulement.

Elles sont ensuite dirigées vers le contrôle final, où on vérifie les différentes côtes.

.7. PRIX DE REVIENT DE LA FABRICATION DE LA PIECE

A SONACOME, pour le calcul du prix de revient, on utilise 2 unités : 1'U. A. S. et 1'U. T. S.

1 U. A. S. = 1 minute de main d'oeuvre directe

1 U. T. S. = 1 minute d'utilisation du poste de travail

Sur les trois tableaux qui suivent, sont consignés les prix de revient de chaque opération.

Sur le tableau 3, on a le prix de revient total de la fabrication de la pièce qui s'élève à 358,02 DA.

Ce chiffre est élevé parce que les installations ne sont pas utilisées à temps plein, de même que le personnel.

Signalons que l'usine est en voie de démarrage, que les prix de revient des U. A. S. et des U. T. S. seront recalculés chaque année, et que les prix devront baisser pour de nombreux postes, compte tenu de la charge de ces postes.

Désignation des opérations	nombre d'U.A.S.	Taux d'1 U.A.S. (D.A.)	Taux des U.A.S. (D.A.)	nombre d'U.T.S.	Taux d'1 U.T.S. (D.A.)	Taux des U.T.S. (D.A.)	Taux des U.A.S. + Taux des U.T.S. (D.A.)
Cisaille débitage	0,18	0,436	0,07848	0,18	4,525	0,8145	0,89298
Refouleuse	3,75	"	1,635	1,25	43,166	53,9575	55,5925
Recuit isotherme	0,55	"	0,2398	0,55	5,185	2,85175	3,09155
Grenaillage	0,30	"	0,1308	0,30	3,755	1,1265	1,2573
					TOTAL	(Forge)	60,83433

Département FORGE : Taux U.A.S. + Taux U.T.S.

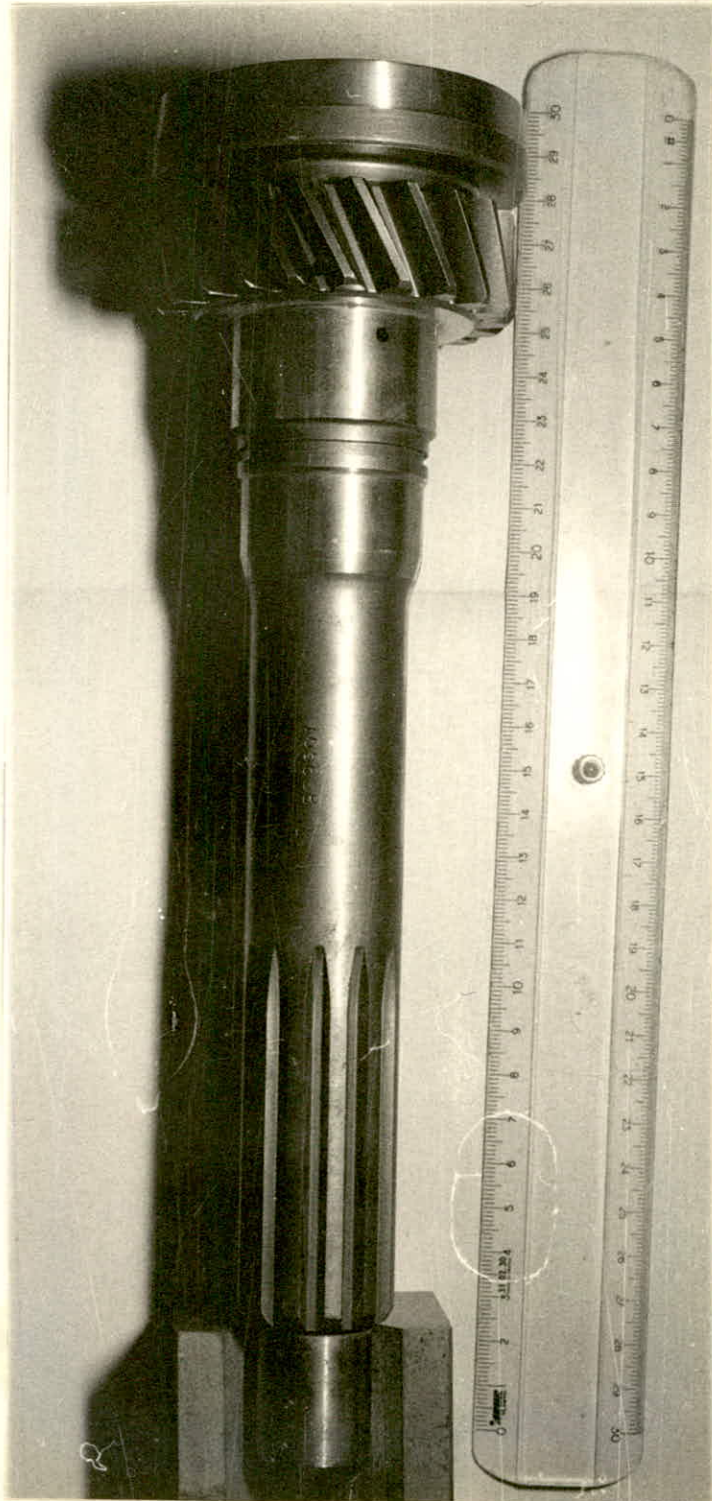
Désignation des opérations	nombre d'U.A.S.	Taux d'1 U.A.S. (D.A.)	Taux des U.A.S. (D.A.)	nombre d'U.T.S.	Taux d'1 U.T.S. (D.A.)	Taux des U.T.S. (D.A.)	Taux des U.A.S + Taux des U.T.S. (D.A.)
Débitage	1,90	0,306	0,5814	1,90	1,662	3,1464	3,7278
Tournage	15,15	0,310	4,6965	15,15	3,408	51,6312	56,3277
Rectification	2,20	0,310	0,682	2,20	3,609	7,9398	8,6218
Taillage	5,50	0,310	1,705	5,50	3,609	19,8495	5,314
Rectification	1,85	0,310	0,5735	1,85	4,671	8,6435	9,21485
Taillage	7,70	0,310	2,387	7,70	3,609	27,7893	30,1763
Taillage	14,35	0,310	4,4485	14,35	3,609	51,78915	56,23765
lavage avant cémentation	0,15	0,795	0,11925	0,15	4,879	0,73185	0,8511
Cémentation	5,60	0,795	4,452	5,60	4,879	27,3224	31,7744
Austénisation	0,94	0,795	0,7473	0,94	4,535	4,2629	5,0102
lavage	0,32	0,795	0,2544	0,32	4,535	1,4512	1,7056
Revenu	0,32	0,795	0,2544	0,32	4,535	1,4512	1,7056
Grenailage	0,20	0,795	0,159	0,20	4,535	0,907	1,066
Redressage	5,35	0,795	1,4151	1,78	4,535	8,0723	9,4874

Département MECHANIQUE : Taux U.A.S. + Taux U.T.S.

Désignation des opérations	nombre d'U.A.S	Taux d'1 U.A.S (D.A.)	Taux des U.A.S (D.A.)	nombre d'U.T.S.	Taux d'1 U.T.S. (D.A.)	Taux des U.T.S. (D.A.)	Taux des U.A.S. + Taux des U.T.S. (D.A.)
Rectification	15,25	0,310	4,7275	15,25	4,671	71,23275	75,96025
					TOTAL (mécanique)		297,18065

Prix de revient = total forge + total mécanique
 = 358,015 D.A.

Arbre de Commande
prêt pour le Montage.



oOo CONCLUSION GENERALE oOo

L'étude de la fabrication de l'arbre de commande nous a permis de voir l'importance technique des traitements thermiques en construction mécanique. Nous avons vu que sans ces traitements thermiques, il était impossible d'obtenir les caractéristiques exigées :

- par les usineurs : traitements thermiques de préparation
- par le bureau d'étude : traitements thermiques d'utilisation

Il est évident que l'incidence économique des traitements thermiques dans une gamme de fabrication est également importante et que même lorsque l'on a largement recours aux ressources énergétiques du pays (utilisation du gaz naturel pour le chauffage et pour la production d'atmosphère de protection) il est souhaitable de :

- limiter l'introduction d'un traitement thermique dans une gamme au strict minimum.
- de les placer le plus judicieusement possible dans cette gamme.
- d'avoir recours aux traitements thermiques les plus économiques.

Dans cette perspective beaucoup de travail reste à accomplir.

oOo BIBLIOGRAPHIE oOo

- Technique de l'ingénieur
- Métallurgie : Chaussin - Hilly
- Métallurgie : Albert De Sy et Julien Vidts
- Atmosphères contrôlées dans les traitements thermiques :
I. Jenkis
- Revues : Traitements Thermiques
- Documents : S onacore

-O-----O-

