

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

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT MINES ET METALLURGIE.

PROJET DE FIN D'ETUDES

S U J E T

ETUDE COMPARATIVE D'UNE
TREMPE H.F. ET D'UNE TREMPE
AU CHALUMEAU.

2 PLANS

Proposé par :

SNVICVI
ROUIBA

Etudié par :

Abdelkrim
Belabbas

Dirigé par :

M.
Bouabdallah

PROMOTION :

juin 1985

DEDICACES



- A mes chers parents
- A la mémoire de mon frère Mabrouk
- A tous mes frères et sœurs, particulièrement Boubakewr pour son aide Matérielle
- A leurs familles
- A mon oncle Djilali et à sa famille
- A mes 418 amis

Je dédie cet humble travail

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon promoteur M^r Bouabdallah pour tout ce qu'il a fait pour moi.

Par la même occasion, je remercie tous les professeurs qui ont contribué à ma formation, sans oublier toutes les personnes qui m'ont aidé, de près ou de loin, à l'élaboration de ce projet.

Ma vive reconnaissance aux messieurs : Bouderballah, Mehamedi, Mourad, Khiat, Ouatassi, Ouahedj, Lotfi, Akrou, Achour... avec lesquels j'ai passé de bonnes journées.

Keimou

TABLE DES MATIERES

PAGE

introduction	1
chap.1: généralités	
1.considerations métallurgiques	4
2.considerations physiques	6
chap2: nuances étudiées	
1.aciers & fontes utilisées pour la trempe superficielle	9
2.nuances choisies	12
3.circuit de fabrication des pièces	12
4.fonctionnement des pièces	15
chap3: étude de la trempe HF	
1.principe	17
2.flammes utilisées	17
3.techniques du procédé	20
4.la trempe générale instantanée	20
chap4: étude de la trempe HF	
1.introduction	27
2.principe	28
3.influence de la fréquence	30
4.modes d'exécution de la trempe HF	32
5.inducteurs	32
chap5: étude macro et micrographique	
1.macrographie	34
2 micrographie	37
chap6: étude de la microdureté	
1.principe	41
2.essais de microdureté	42
3.interpretations	47
chap7: étude économique	
1.but de l'étude	49
2.postes de coûts	49
3.remarques	50
4.calcul des prix de revient	51
5.interprétation	52
CONCLUSION	53

chap 8: les inducteurs	
1. choix des inducteurs	55
2. quelques réflexions sur le rôle du circuit magnétiques des inducteurs linéaires	56
3. méthode de trempe	57
chap 9: calculs des inducteurs	
1. fréquence	61
2. puissance	63
3. temps de chauffe	71
CONCLUSION	74

INTRODUCTION

Les traitements superficiels des aciers ont pour but l'obtention d'une dureté élevée en surface jointe à une ténacité et une ductilité importantes à cœur. La structure est alors microscopiquement hétérogène et est constituée d'un véritable matériau composite présentant une âme résiliente et une zone superficielle de grande dureté avec augmentation de la résistance à l'usure et dans beaucoup de cas de la limite d'endurance aux sollicitations cycliques (fatigue). On peut obtenir ce résultat de diverses manières dont l'une d'elles est la trempe superficielle. Cette dernière a pour but l'obtention d'une structure martensitique dans une couche superficielle de quelques millimètres d'épaisseur. Pour cela il faut refroidir brusquement le produit métallurgique en question qui était porté à une température d'austénisation ($> A_{c3}$) et maintenu à cette température durant un certain temps afin d'homogénéiser l'austénite. Plusieurs techniques sont utilisées dans ce domaine et ne se différencient que par le mode d'apport de l'énergie thermique dans la zone superficielle. Celles utilisées à la S.N.V.I. - C.V.I de Rouiba sont :

1. Le chauffage par induction où l'apport thermique est dû aux pertes par hystérésis magnétique tant que l'acier est ferromagnétique ($\theta < A_2$) et surtout à l'effet Joule dû aux courants induits (ou de Foucault)
2. Le chauffage au chalumeau dont les flammes oxygène-acétylène permettent un apport thermique suffisamment rapide.

Ce dernier, vu la difficulté de son réglage et sa complexité grandissante avec le temps (vieillesse et usure de la machine) a nui à un grand nombre de pièces qui devraient normalement y subir une trempe superficielle. Parmi, ces torts, on citera surtout les brûlures (fusions superficielles du métal), causées par les ondes-chocs des flammes mal réglées.

Pour remédier à tout cela, nous avons fait une étude comparative entre la trempe au chalumeau et la trempe H.F. Nous y avons consacré quatre chapitres pour la partie théorique afin de montrer l'utilité des traitements thermiques superficiels et d'éclaircir le plus possible la trempe au chalumeau et la trempe H.F.; 3 chapitres pour la partie expérimentale avec les études, macrographique, micrographique et de la microdureté, pratiquées sur des mances bien déterminées;

deux chapitres pour les applications aux calculs du dimensionnement des inducteurs.

Etude faite, nous avons proposé de remplacer la trempé au chalumeau par une trempé à moyenne fréquence et de biais penser à l'adoption d'inducteurs adéquate.

Bien qu'il existe une riche bibliographie, surtout d'excellents articles parus dans des revues qui traitent la théorie du chauffage par induction, le dimensionnement ou la réalisation d'un inducteur reste toujours un travail personnel et ne fait appel qu'à la propre réflexion de son constructeur en regard aux diverses formes et dimensions des pièces. Ainsi les calculs faits, ne sont que des résultats théoriques, il est demandé donc d'essayer les inducteurs et d'y apporter des modifications si c'est possible.

CHAPITRE 1

GENERALITES



4

1. Considérations métallurgiques

1.1 L'austénisation

Avant trempe, les pièces doivent être portées à une température d'austénisation (Fig. 1) et maintenues à cette température. Ce maintien doit être assez long pour assurer la qualité optimale des pièces trempées, en homogénéisant au maximum la structure de l'austénite sans provoquer une surchauffe, qui se traduit, après trempe, par une formation d'aiguilles grossières de martensite et une teneur élevée en austénite résiduelle.

Aussi, il doit être suffisant pour permettre, par germination et croissance, la transformation complète de la ferrite et la perlite en austénite (diffusion du carbone de la ferrite dans le réseau de l'austénite)

La germination de l'austénite s'effectue aux joints de grains entre ferrite et perlite. Elle est étroitement liée à la structure de départ du métal car plus la structure est fine, plus le nombre de germes est grand et plus la dureté recherchée est atteinte en l'absence d'un traitement préalable de remise en solution des carbures.

1.2 La trempe

L'austénisation suivie par un refroidissement rapide dans un

milieu de trempe approprié nous permet d'obtenir une dureté élevée,

Cette propriété est due à la martensite dont la dureté est le résultat d'une forte densité de dislocations.

Cette martensite est obtenue par un cisaillement du réseau de l'austénite ne mettant en jeu que des déplacements des atomes inférieurs aux distances interatomiques de la structure cristalline.

Elle apparaît à l'échelle micrographique sous formes d'aiguilles.

L'obtention de cette structure privilégiée s'effectue à l'aide d'un traitement thermique simple appelé trempe.

Pour déterminer les paramètres de trempe, on se sert des diagrammes T.T.T et T.R.C, mais il faut toujours garder dans l'esprit que ces diagrammes concernent la trempe à cœur des éprouvettes de différents diamètres, pour des températures et des temps d'austénisation bien définis. Ces temps sont généralement plus longs que ceux utilisés dans la trempe superficielle.

Pour le milieu de trempe, et dans le cas d'un acier non allié à trempabilité faible, on choisira généralement une trempe à l'eau.

1.3 Les aciers

On recherche toujours à avoir une structure perlitique à cœur, pour que les contraintes en compression résultant de la transformation martensitique, s'ajoutent aux contraintes d'origine thermique tandis que le cœur reste relativement doux et tenace.

Pour régler les conditions de traitement au mieux, la connaissance de trempabilité du matériau est indispensable. La trempabilité exprime la capacité d'un acier de se transformer en martensite. Elle se mesure par l'essai

Jominy

Les aciers choisis sont des aciers au carbone ou des aciers faiblement alliés. Ils représentent toutes les caractéristiques de trempabilité nécessaires à ces traitements superficiels.

2. Considérations physiques

La chaleur se propage vers l'intérieur de la pièce et dès que l'épaisseur désirée a atteint la température de fin de transformation $A \rightarrow \gamma$ on fait la tremp.

La vitesse avec laquelle la chaleur se dissipe vers l'intérieur est donnée par la diffusivité thermique a

$$a = \frac{\lambda}{\rho c} \text{ avec:}$$

λ : coefficient de conductibilité thermique ($0,46 - 0,67 \text{ Js}^{-1}\text{cm}^{-1}\text{K}^{-1}$)

c : capacité thermique massique ($0,46 - 0,50 \text{ Jg}^{-1}\text{K}^{-1}$)

ρ : masse volumique ($7,8 \text{ g/cm}^3$)

a a pour valeur $0,118$ à $0,188 \text{ cm}^2/\text{s}$

Il en résulte que le temps de chauffage doit être court et bref dans le chauffage superficiel pour trempe. Cela est illustré par l'expérience de Sourdillon qui a relevé la filiation de la dureté après trempe, d'un rond de 25mm en acier mi-dur plongé dans un bain de sel fondu à 1000°C durant 30, 40 et 50 secondes (Fig. 2). On remarque:

Après 30 secondes d'immersion les duretés restent basses, après 40 secondes la trempe est réellement superficielle, après 45 secondes même le cœur est trempé.

En résumé, pour réussir un traitement thermique superficiel, il est important de définir en fonction des dimensions de la pièce, de la trempabilité de l'acier et de la dureté recherchée, la puissance surfacique de l'énergie thermique, la température à atteindre, le temps de maintien...

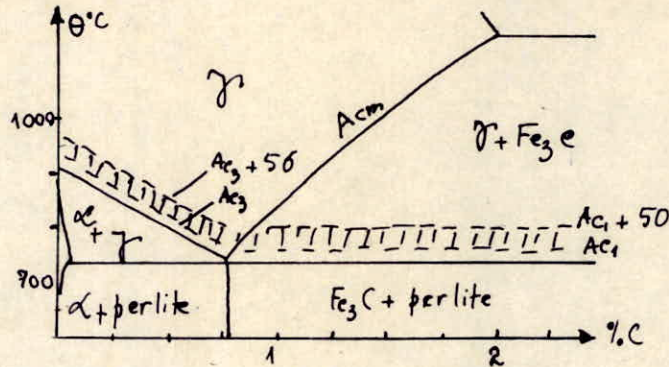


Fig 1 : Bandes d'austénisation

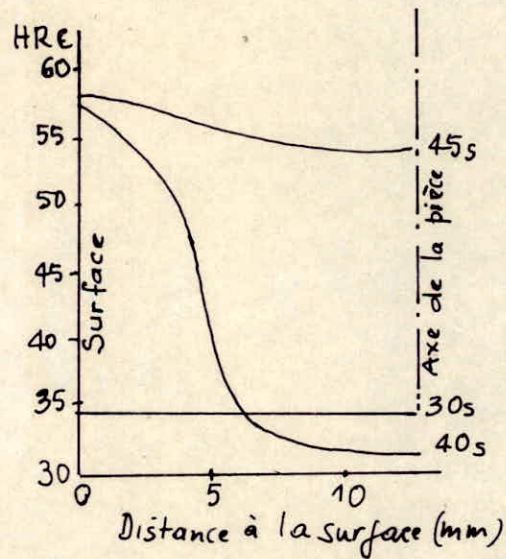


Fig 2 : Duretés en surface et en profondeur d'une éprouvette cylindrique en acier mi-dur, maintenue dans un bain de sel fondu à 1000°C pendant 30, 40 et 45 secondes.

CHAPITRE 2

NUANCES ETUDIÉES

1. Aciers et fontes utilisés pour la trempe superficielle

On emploie des aciers non alliés de type XC ou faiblement alliés du type C4, CD4, M4 dont les teneurs en carbone sont inférieures à 0,5%, en général. Une teneur plus importante favoriserait des taches de trempe et des taux d'austénite résiduelle trop élevés tendant à diminuer la dureté.

Pour juger approximativement des risques de taches on peut calculer l'expression :

$$Y\% = Mn\% + Cr\% + Ni\% + Cu\% - Al\%$$

- pour $Y < 0,7\%$ trempabilité insuffisante
- pour $0,8 < Y < 1\%$ nuance correcte.
- pour $Y > 1,2\%$ risque sérieux de taches.

Cependant les nuances utilisées, doivent présenter des garanties particulières d'homogénéité de composition, des teneurs limitées en S, P, Ni, Mo, un grain fin et relativement sensible au grossissement.

Les fontes, comme les aciers, sont susceptibles d'être trempées superficiellement. On peut les considérer, en gros, comme constituées par des grains d'acier entre les joints desquels se trouve des particules de graphite. Comme les aciers,

l'aptitude de la fonte à prendre la trempe sera fonction de la teneur en carbone combiné c'est à dire le carbone des grains d'acier. D'après leur structure et leur teneur en carbone combiné, les fontes se divisent en fontes martensitiques, ferritiques et perlitiques.

1. fontes martensitiques : présentent une grande dureté initiale, elles ne peuvent être améliorées à ce point de vue par la trempe superficielle. De plus, elles sont fragiles, de faible allongement et difficile à travailler.

2. fontes ferritiques : Elles sont constituées de fer presque pur semé de veines de graphite. Elles n'acceptent pas la trempe.

3. fontes perlitiques : constituent le matériau de fonte le plus convenable pour la trempe superficielle. Après trempe, la perlite de la couche périphérique est transformée en martensite caractérisée par sa grande dureté.

La répartition de graphite n'est pas modifiée par le traitement en raison de sa grande rapidité.

Dans la figure 3 le domaine des fontes à la trempe superficielle y est hachuré.

Donc, la trempe superficielle est applicable à toutes les fontes non ferritiques et en particulier, aux fontes à

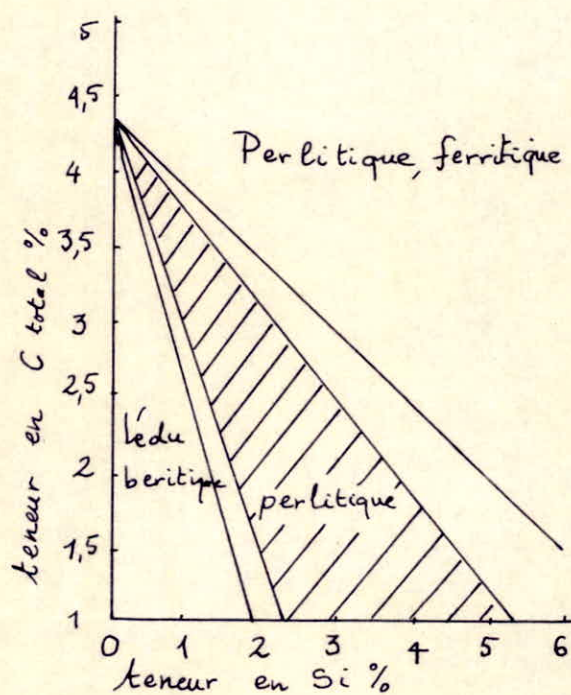


fig 3 : Composition d'une fonte permettant d'obtenir la structure désirée

graphite sphéroïdal.

2. Nuances choisies

À la SNVI. CVI les pièces trempées au chalumeau sont en XC48 et en fonte G.S. Pour pouvoir mener une étude comparative, on a pris deux autres pièces de mêmes nuances (XC48 et F.G.S) qui passent à la H.F.

L'acier XC48 est un acier mi-dur hypoeutectoïde, donc ferrito-perlitique. Sa composition chimique est la suivante:
 $\%C = 0,45 - 0,50\%$; $\%Mn = 0,55 - 0,80\%$; $\%Si < 0,40\%$; $\%P < 0,04\%$
 $\%S = 0,020 - 0,035\%$; $\%Cr < 0,1\%$.

La fonte G.S. est une fonte grise, dans laquelle le graphite est obtenu à l'élaboration sous forme sphéroïdale.

Sa composition chimique est:

$\%C = 3,45 - 3,75\%$; $\%Si = 2,35 - 2,85\%$; $\%Mn = 0,60 - 0,90\%$; $\%Mg = 0,040 - 0,06\%$
 $\%S = 0,020\%$.

3. Circuit de fabrication

3.1. Axe de pivot: XC48

À partir de barres rondes en XC48, on débite des morceaux à la longueur de l'axe. Après centrage et chamfreinage des extrémités, les pièces subissent une trempe à l'eau (2 heures de maintien à $820^{\circ}C$, 3 mn pour le refroidissement) suivie d'un

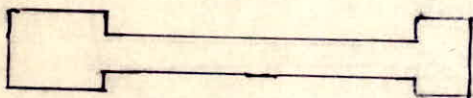
revenu à 620°C . Le maintien à cette température dure 3 heures et 20 minutes et le refroidissement se fait à l'air libre. Ensuite les pièces sont usinées (fraisage, tournage) et trempées superficiellement à haute fréquence. Les dernières opérations sont la finition et la rectification.

3.2. Came de freins : XC 48

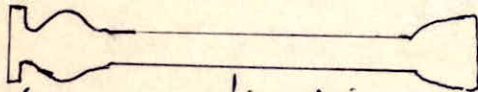
Les cames de frein sont débitées à partir de barres de section carrée ($55\text{ mm} \times 55\text{ mm}$)

Le poids du lopin, coupé pour réaliser une pièce est de $8,7\text{ kgs}$. Le débitage se fait à la scie. Les lopins sont portés à 1150°C pour subir l'estampage. Ce dernier comprend les trois opérations suivantes:

1. Etirage en 12 coups de pilon.



2. Roulage en 8 coups de pilon



3. Estampage finition en 3 coups de pilon

4. Ebarbage simple à chaud

5. Repasse en matrice finition un coup de pilon.

Estampées, les pièces subissent une trempé à l'huile (maintien

de 2^h 20^{mn}, refroidissement dans l'huile durant 6 mn 30 s)
 suivie d'un revenu à 580°C (maintien de 3h, refroidissement
 à l'air libre.)

En dernier lieu, après usinage (dressage, centrage, copiage
 de l'oreille, taillage, filetage) les oreilles de la came
 sont trempées au chalumeau.

33. Entraîneur: F.G.S

Cette pièce est obtenue par moulage à la fondrière de
 la SNVI-CVI de Roniba. Après dessablage, ébarbage et
 premier contrôle visuel, les pièces moulées reçoivent
 un traitement de ferritisation dans des fours-poussoirs.

Ce traitement est constitué de trois étapes:

1. Chauffage pendant 2 heures jusqu'à atteindre 900°C
2. Maintien de 3 heures à 900°C
3. Refroidissement lent de 2 heures (dans le four)

Ce traitement est suivi d'une trempe à l'huile, plus un
 revenu à 700°C.

Les pièces sont trempées, après un maintien de 2 h 30 mn
 à 900°C, dans l'huile durant 15 mn.

En ce qui concerne le revenu, on note que le maintien
 à 700°C est de 3 heures et que le refroidissement se fait

dans le four pendant 2 à 3 heures.

Ces traitements peuvent créer des déformations rectifiables par des redressages à la presse. Par la suite, les pièces sont usinées (tournage, perçage, alésage, fraisage, perçage...) avant d'être trempées à haute fréquence.

3.4. Butée de ressorts : F.G.S

Ces pièces sont aussi obtenues par moulage à la fonderie. Apparemment, ce sont les mêmes opérations qu'a subi l'entraîneur. Après la fonderie, les butées sont usinées (fraisage, perçage des quatre trous, laminage) et trempées en dernier lieu, au chalumeau.

N.B. Toutes les pièces citées ci-dessus sont contrôlées à la fin (contrôles finaux).

4. Fonctionnement des pièces

- * L'axe de pivot a sa place dans le cordon de l'essieu où il est appelé à travailler au frottement
- * L'entraîneur (3^e - 4^e) est l'une des pièces qui constituent la boîte à vitesses. Il sert comme son nom l'indique, à entraîner dans son mouvement l'axe pour le changement des vitesses. Ce mouvement lui est communiqué par un autre entraîneur (1^e - 2^e) dont les dents viennent se

placer entre les dents de l'entraîneur (3^e - 4^e)

* La butée de ressorts fixée au châssis du camion. Elle permet d'amortir les chocs, surtout en cas de surcharge, en butant sur les ressorts à lames placés juste à côté des roues arrière.

* La came de freins est la pièce maîtresse du freinage. Ainsi, pendant le freinage, les oreilles de la came, poussent les galets pour permettre aux ferrodos relâchés, de frotter contre la paroi du tambour et d'arrêter alors la rotation de la roue.

D'après le fonctionnement de ces pièces, travaillant à l'usure, on voit bien l'utilité de la trempe superficielle.

CHAPITRE 3

ETUDE DE LA TREMPE AU CHALUMEAU

1. Principe

La surface de la pièce à traiter est rapidement portée à la température d'austénisation à l'aide d'un chalumeau alimenté avec un mélange de gaz de combustion et d'oxygène ou d'air. La profondeur trempée varie de quelques dixièmes de millimètre à plusieurs millimètres.

2. Flammes utilisées

Les flammes utilisées sont celles qui possèdent des températures et des puissances de chauffe élevées. Exemple: flammes d'acétylène, du gaz de ville, du propane (le comburant étant toujours l'oxygène)

La puissance de chauffe spécifique d'une flamme est la quantité de calories disponibles par unité de surface et unité de temps.

Combustible		C ₂ H ₂	Gaz de ville	Propane
Pouvoir calorifique	(kcal/m ³)	1100-1400	3800-4300	22300-24300
Oxygène théorique nécessaire	(m ³ /m ³)	2,5	0,8	5
Puissance spécifique	(kcal/cm ² .s)	10	3	2,5

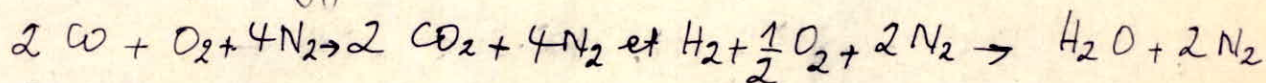
Tableau I: Caractéristiques de combustion des gaz avec l'oxygène pur.

D'après les figures 4 et 5, on peut dire que c'est la flamme oxyacétylénique qui possède la plus grande puissance de chauffe et la température la plus élevée.

L'acétylène brûle en deux phases:

1^{ère} phase : combustion primaire qui se produit suivant la réaction:
 $C_2H_2 + O_2 \rightarrow 2CO + H_2$ qui dégage une grande chaleur. La moitié de l'hydrogène obtenu est à l'état atomique.

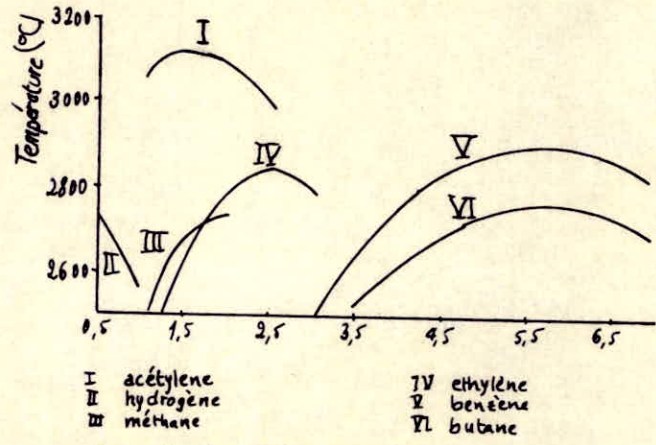
2^{ème} phase : deuxième combustion suivant les réactions qui font appel à l'oxygène de l'air ambiant



Il est à noter que les gaz produits par combustion primaire sont fortement réducteurs et protègent cette surface contre les oxydations et les décarburations toujours possibles.

La figure 6 décrit schématiquement une flamme qui comporte trois zones :

- Une zone conique et brillante dite dard ou flamme primaire où arrive le mélange oxygène acétylène à basse température. Le dard est entouré d'une gaine très mince constituant la zone de combustion stationnaire.
- Une zone grise ou réductrice contenant la plus forte proportion de CO et de C_2H_2



R = volume d'oxygène / volume de gaz Combustible

fig A : Températures maximales obtenues dans différentes flammes

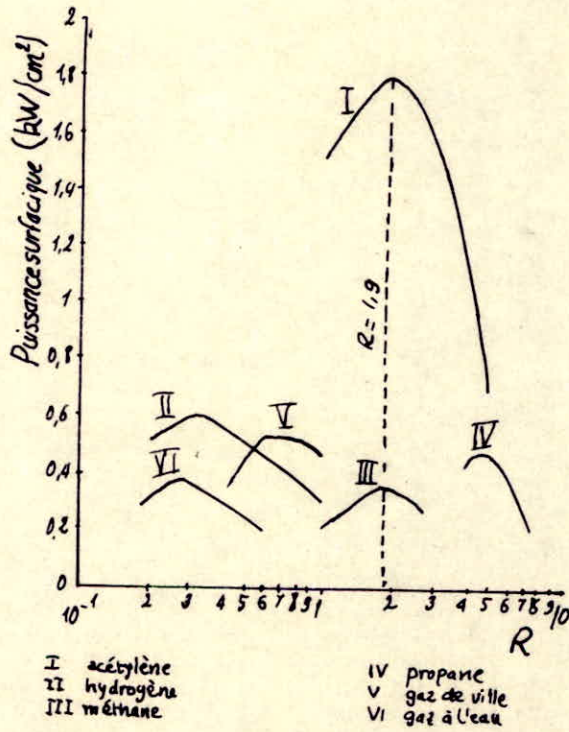


fig B : Puissances surfaciques de quelques flammes

Une zone violacée dite panache ou flamme secondaire

Suivant la valeur du rapport R des volumes d'oxygène et d'acétylène, la flamme présente un aspect différent.

Si $R > 1$ la flamme est oxydante

Si $R = 1$ la flamme est normale ou neutre

Si $R < 1$ la flamme est carburante.

3. Techniques du procédé

Comme méthodes de trempe on utilise :

* La trempe de proche en proche dans laquelle la pièce défile simultanément sous les dispositifs de chauffage et d'arrosage (fig 7)

* La trempe générale instantanée dans laquelle les opérations de chauffage et d'arrosage sont bien distinctes. A la SNVI-CVI cette installation est destinée à la trempe des came de freins et des butées de ressorts. (Fig 8)

4. La trempe générale instantanée

Les conditions qui influencent la trempe générale instantanée dépendent des dispositifs de chauffage et de refroidissement, de leurs durées de fonctionnement, de la vitesse de déplacement relative à l'ensemble chalumeau-pièce à tremper et des caractéristiques de cette dernière.

4.1 Dispositif de chauffage

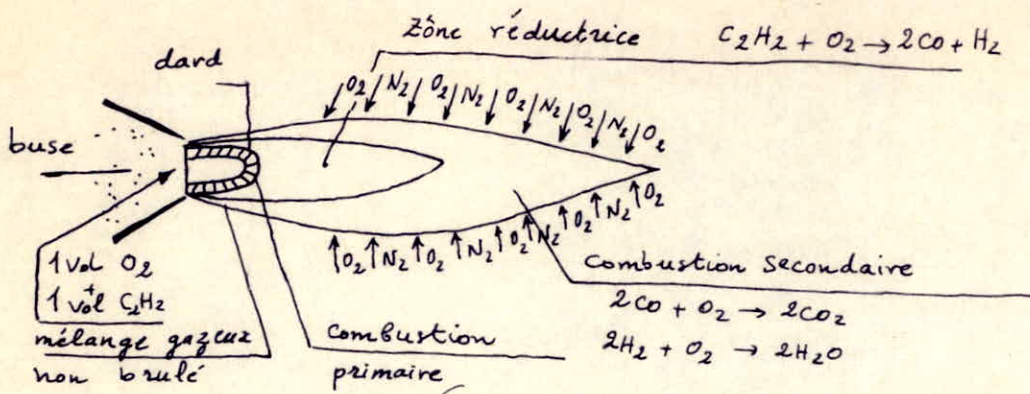


fig 6 : flamme oxy-acétylénique d'un chalumeau

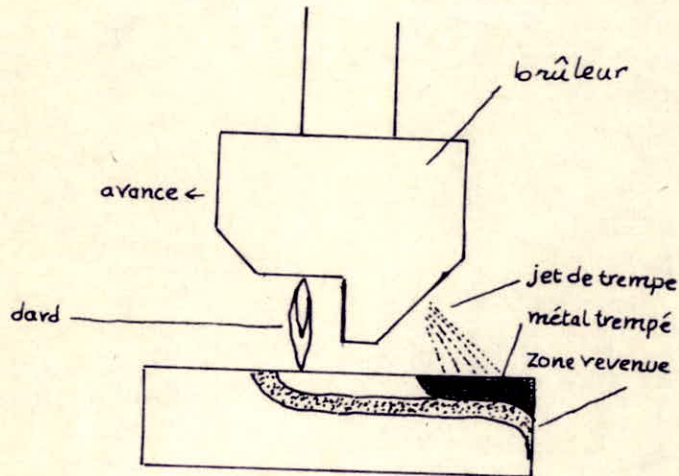


fig 7 : trempe au défilé ou de proche en proche

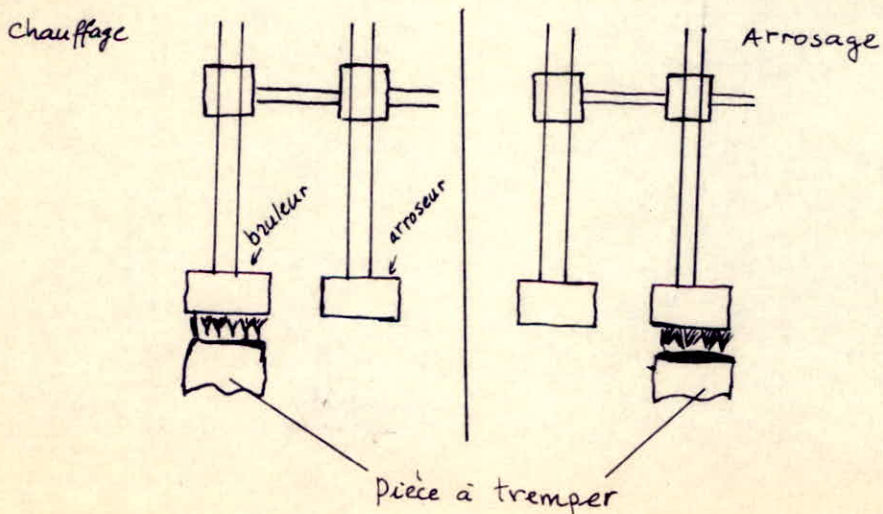


fig 8 :
Schéma de la trempe
ponctuelle ou sur
place

La puissance du chalumeau est définie par le débit horaire d'oxygène et d'acétylène. La courbe (figure 9) montre que la pénétration de la trempe et le débit de gaz varient dans le même sens et qu'au dessous d'une certaine valeur du débit, l'augmentation de la pénétration s'affaiblit. D'autre part, l'angle de contact des flammes par rapport à la surface à tremper a son importance, il y a intérêt à ce qu'elles soient perpendiculaires à la surface. Aussi, la distance des flammes est à considérer. Le meilleur rendement calorifique est obtenu quand l'extrémité du dard rencontre la surface de la pièce à chauffer (fig 10). La figure 11 montre que chaque dard peut être écrasé jusqu'à la moitié de sa longueur tout en obtenant un gain de pénétration.

La courbe (fig 12) montre que plus le nombre de points de chauffe, répartis sur le pourtour des surfaces de révolution est élevé, plus l'augmentation de la pénétration est appréciable. Pour l'établissement de cette courbe, il a été utilisé une flamme de débit D , deux flammes de débit $D/2$ disposées à 180° , quatre flammes de débit $D/4$, disposées à 90° et huit flammes de débit $D/8$ disposées à 45° .

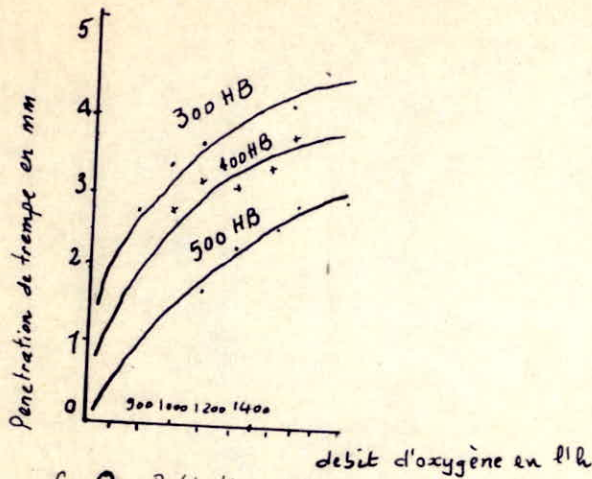


fig 9 : Pénétration de trempe en fonction du débit d'oxygène

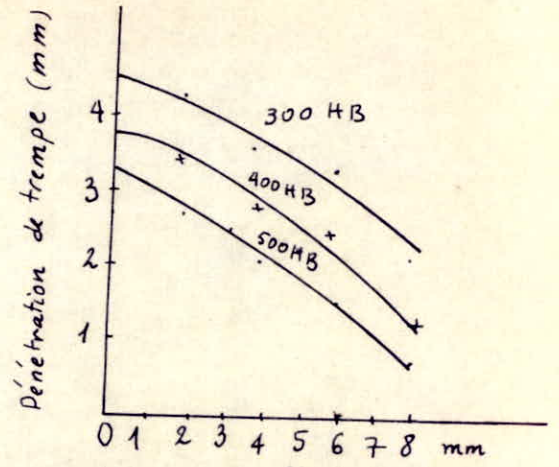


fig 10 : Pénétration de la trempe en fonction de la distance de l'extrémité du dard à la surface trempée

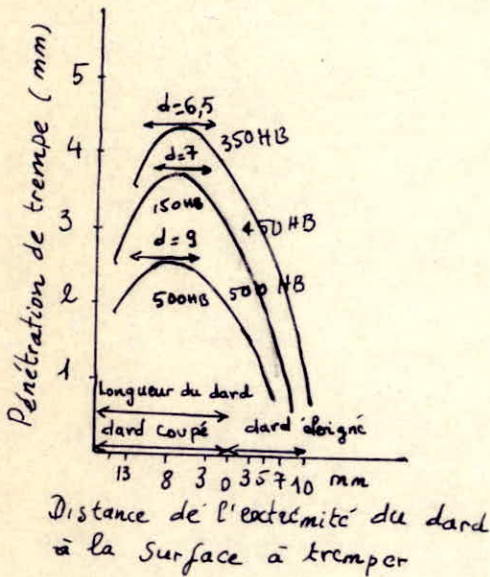


fig 11 : Pénétration de la trempe en fonction des distances de l'extrémité du dard à la surface à tremper

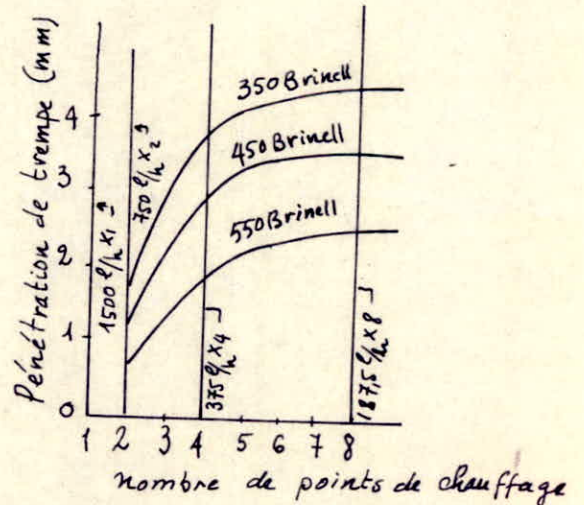


fig 12 : Pénétration de trempe en fonction du nombre de points de chauffage.

4.2 Dispositif de refroidissement

À la SNVI-CVI le refroidissement se fait par une série de jets d'eau en provenance d'une douche alimentée en eau sous pression ($2 \text{ à } 5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$). Le débit de cette eau doit être supérieure à une certaine valeur critique qui est fonction des dimensions de la surface à tremper et des modalités de l'opération. Dans le cas de la trempe oxyacétylénique, il est approximativement égal à la moitié du débit d'oxygène et la vitesse d'écoulement est de 4 à 5 m/s.

Suivant la température de l'eau, la dureté est invariable entre 0 et 25°C, erratique entre 25 et 70°C, au dessus de 70°C la trempe devient très douce, analogue à celle que l'on obtient à l'huile.

4.3 Autres facteurs

Les facteurs relatifs au temps sont les plus importants, surtout la durée de chauffage. La figure 13 montre que la profondeur de trempe est à peu près proportionnelle à la durée de chauffage.

Aussi la durée d'égalisation ou le temps qui s'écoule entre la fin de chauffage et le début de l'arrosage influe sur la pénétration. Plus elle est longue, plus la profondeur

de trempe est importante.

La figure 14 montre que la valeur de la pénétration passe par un maximum qu'on ne peut dépasser de peur de voir la température superficielle diminuer et devenir inférieure à celle du point de transformation au moment où l'aussage se produit. Cet aussage doit permettre une évacuation des calories apportées par le chauffage. Sa durée est d'autant plus brève que le caractère superficiel du chauffage aura été plus accusé.

La figure 15 fait apparaître une durée critique au dessous de laquelle la trempe n'est pas obtenue.

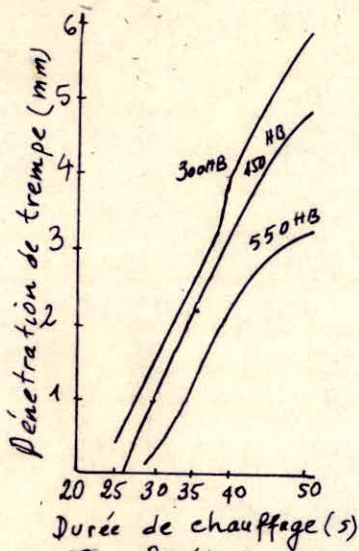


Fig 13 : Pénétration de trempe en fonction de la durée de chauffage

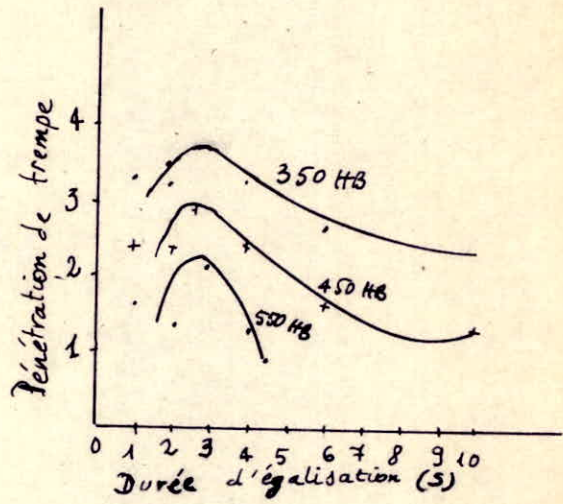


Fig 14: Pénétration de la trempe en fonction de la durée d'égalisation.

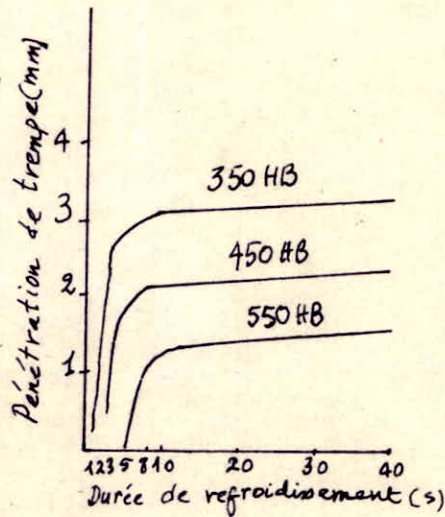


Fig 15 Pénétration de la trempe en fonction de la durée de refroidissement

CHAPITRE 4

ETUDE DE LA TREMPE A HAUTE FREQUENCE

1. Introduction

Une des qualités majeures de l'induction réside dans la possibilité de pouvoir effectuer un chauffage superficiel et localisé. De part leur utilisation, de nombreuses pièces mécaniques doivent répondre à des caractéristiques réclamant une bonne résilience à cœur et une dureté superficielle et localisée élevée. Le traitement par induction à haute fréquence répond parfaitement à ces deux critères par la possibilité de concentrer une puissance élevée par unité de surface, comme l'indique le tableau ci-dessous:

Mode de chauffage	Puissance maxi par cm^2
Convection	0,5 W
Radiation	25 W
Chalumeau	800 W
Induction	10 KW

Le chauffage étant superficiel et localisé, d'une part la puissance par unité de surface importante, d'autre part l'échauffement de la zone à tremper sera rapide, ce qui permet d'éviter toute oxydation importante et toute décarburation.

Avec un inducteur convenable, le chauffage est limité exactement à la ou les zones à traiter et le traitement est réellement localisé sans interférences sur les zones.

2. Principe

La pièce à chauffer est placée dans un champ magnétique alternatif créé par un générateur de chauffage par induction.
(Figure 16)

L'ensemble inducteur/pièce se comporte comme un transformateur dont l'inducteur est le primaire et la pièce le secondaire.

L'échauffement de la pièce est dû :

- 1°/ Aux pertes par courants de Foucault.
- 2°/ Aux pertes par hystérésis.

La circulation des courants induits, appelés aussi courants de Foucault s'effectue à la périphérie de la pièce sur une épaisseur qui est fonction de la fréquence (Fig 17)

Si le matériau à chauffer est magnétique, il est soumis à une aimantation alternative dont l'inertie magnétique entraîne une dépense d'énergie sous le nom de pertes par hystérésis s'ajoutant aux pertes par courants de Foucault pour l'échauffement de la pièce.

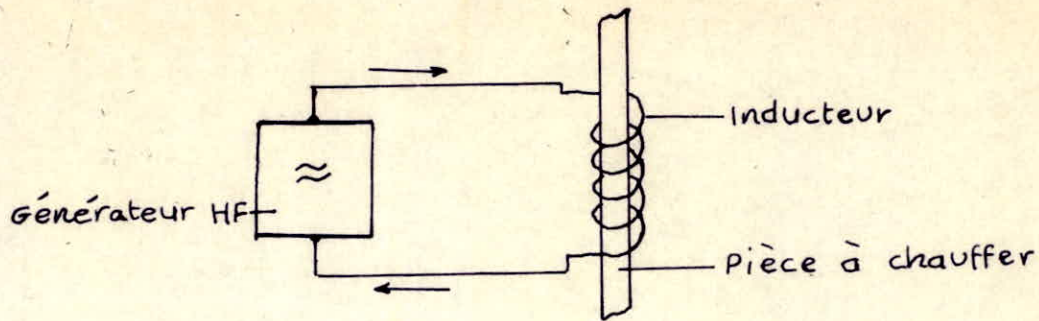


Fig. : 16

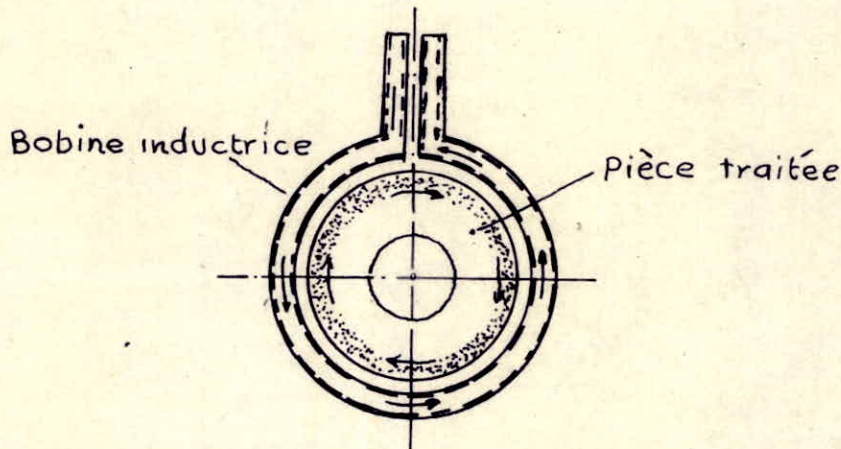
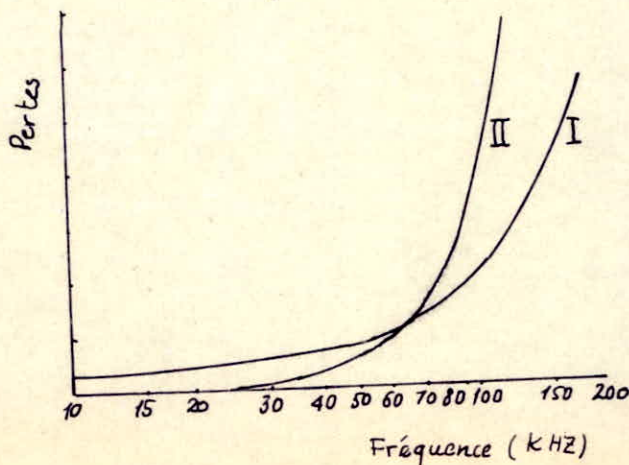


Fig 17 Circulation périphérique des courants induits dans la pièce



I : hystérésis magnétique
 II : courant de foucault

Fig 18: Pertes par hystérésis magnétique et courant de foucault en fonction de la fréquence, au cours du traitement par induction

Les pertes par hystérésis cessent dès que le matériau n'est plus magnétique, c'est à dire au passage du point de Curie. Alors seules les pertes par courants de Foucault demeurent pour continuer l'échauffement de la pièce.

Les deux sources de chaleur (hystérésis magnétique et effet Joule ou courants de Foucault) n'ont pas la même importance à basses et à hautes fréquences, comme le montre la figure 18. Les pertes par hystérésis magnétique sont prépondérantes à basses et moyennes fréquences, alors qu'aux hautes fréquences, ce sont les pertes par courants de Foucault qui sont les plus importantes.

3. Influence de la fréquence

En supposant que le champ à l'extérieur de la pièce est sinusoïdal et de pulsation ω constante, donc de forme $H_0 \sin \omega t$. On a calculé l'épaisseur E dans laquelle circule le courant induit pour une pièce cylindrique très longue et de grand diamètre par rapport à E

$$E = \sqrt{\frac{2\gamma}{\mu\omega}} \quad (1)$$

avec :

- γ ($\Omega \cdot m$) résistivité
- μ (H/m) perméabilité magnétique
- E (m) épaisseur.

En remplaçant ω par $2\pi f$, f en Hz étant la fréquence, la relation (1) s'écrit :

$$E = \sqrt{\frac{\rho}{\mu \pi f}} \quad \text{cette expression peut s'écrire :}$$

$$E = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{10^7 \rho}{\mu_r f}} \quad \text{ou} \quad \boxed{E = 503,3 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}}}$$

avec μ_r perméabilité relative

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} ; \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m} : \text{perméabilité du vide.}$$

Cette formule met en évidence que la profondeur de pénétration des courants est inversement proportionnelle à la racine carrée de la fréquence

Pour la mise au point des traitements les trois grandeurs variables sont : — la fréquence
— la puissance de chauffe
— temps de chauffe et aussi temps de douçage.

Exemple 1: pour un acier XC 42 porté à 900°C , $\rho = 120 \mu\Omega\text{cm}$
 $\mu_r = 1$ ($900^\circ\text{C} > A_2$, l'acier n'est plus ferromagnétique)

f (kHz)	5	10	100	500	1000
E (mm)	7,8	5,5	1,8	0,8	0,6

En fait, cette valeur de E ne donne pas l'épaisseur

réelle austénisée ; il faut tenir compte de la diffusion thermique au cours du chauffage.

Pratiquement pour augmenter la pénétration on peut diminuer la puissance et augmenter le temps de chauffe pour permettre une pénétration plus profonde des calories.

Exemple 2: Pièce XC48 longueur 25mm, diamètre 15mm

Puissance (kW)	6	9	12
Temps de chauffage (s)	9	5	2,5
Épaisseur trempée (mm)	2,7	2,0	0,5

4. Modes d'exécution de la trempe HF

À la SNVI-CVI de Rouba, une H.F. est destinée à produire un chauffage rapide mais de faible pénétration.

On distingue :

- * La trempe statique : la région à traiter est portée dans son ensemble à la température de trempe. Le refroidissement qui suit immédiatement se fait par douche.
- * La trempe au défilé vertical ou horizontal : pour les pièces longues et les grandes surfaces. La pièce défile dans l'inducteur à une vitesse déterminée.

5. Inducteurs

La forme de l'inducteur s'adapte généralement à la forme

de la pièce ou de la zone de celle-ci que l'on désire tremper superficiellement. Alors, on peut dire qu'il est conçu en fonction de la pièce et du traitement (total ou localisé) à réaliser. Il est en cuivre électrolytique très pur de section ronde, rectangulaire ou carrée, le plus souvent de 1mm d'épaisseur, mais elle peut descendre jusqu'à 0,5mm pour les petits diamètres de pièces.

L'inducteur est pratiquement toujours refroidi par circulation d'eau.

Vue la diversité des inducteurs on distingue: les inducteurs monospires, les inducteurs multispires, les inducteurs Pan Cake, les inducteurs épingle, les inducteurs tunnel ...

CHAPITRE 5

ETUDE MACROGRAPHIQUE ET MICROGRAPHIQUE

1. Macrographie

1.1 Principe

La macrographie est l'étude de l'ensemble ou d'une très importante partie d'une pièce attaquée par un agent chimique. Elle permet d'apprécier l'épaisseur de la trempe superficielle.

La macrographie permet également de mettre en évidence l'épaisseur des autres traitements superficiels (telles que : cémentation, nitruration...), les hétérogénéités cristallines, les défauts ...

La technique opératoire consiste en trois opérations successives :

- Le polissage
- L'attaque
- L'enregistrement par photographie.

1.2 Techniques opératoires

Après sciage ou tronçonnage de la pièce, la surface à polir est dressée à la meule pour éliminer les bavures. Durant cette opération préliminaire, il faut éviter l'échauffement ou l'érouissage de la partie superficielle. La zone choisie est polie à l'aide de

papiers abrasifs. Les papiers utilisés sont classés par grosseur de grains : 80, 120, 320, 600, 800, 1000.

Ces nombres correspondent au nombre de grains par unité de surface (cm^2).

Le polissage, dit d'ébauge, s'effectue sous l'eau pour deux raisons :

- l'eau entraîne les grains d'abrasifs ou les parties métalliques arrachées au métal, évitant aussi de rayer
- l'eau évite aussi l'échauffement superficiel qui pourrait modifier la structure de l'échantillon

On ne doit passer à un disque à grains plus fins qu'après avoir lavé l'échantillon sous l'eau de façon à éviter d'entraîner les grains d'abrasifs sur l'autre papier et croiser le sens du polissage qu'entre chaque papier.

La face polie doit être nettoyée soigneusement à l'aide de l'alcool puis séchée pour faciliter l'attaque.

Le réactif d'attaque utilisé est l'acide nitrique à 50%. À la fin de l'attaque, c'est à dire dès l'apparition de la couche trempée, la pièce est

abondamment lavé, puis parfaitement séché pour être photographiés

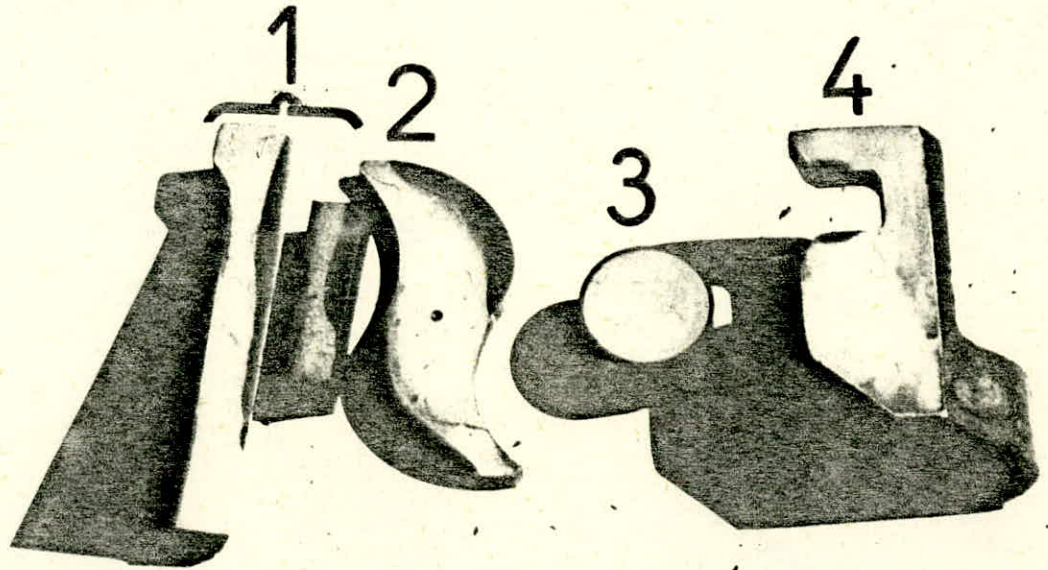
1.3 Résultats

Sur la photographie (macrographie) on note que la trempe après chauffage au chalumeau est plus pénétrante que celle après chauffage par induction à haute fréquence.

La deuxième remarque qu'on peut faire est que la pénétration de la trempe H. F. est uniforme (pièce N°3: axe de pivot) à l'opposé de celle de la trempe au chalumeau.

Ceci est justifié par ce qu'on observe sur la pièce N°1 qui représente des morceaux de butée de ressorts trempés au chalumeau. On voit nettement que la pénétration de trempe élargie par le cahier des charges est loin d'être atteinte dans des zones voire dépassée dans d'autres zones. Cela est dû essentiellement à la mauvaise répartition du mélange gazeux dans le brûleur qui a, ainsi, entraîné un ensemble de flammes non adaptées à la forme et aux dimensions de la surface à traiter.

Il faut avouer aussi que la machine à tremper au chalumeau utilisée est rudimentaire pour ne pas dire



macrographie : Pénétration de trempe.
(réactif d'attaque : HNO_3 à 50%)

1. Butée
2. Came

3. Axe
4. Entraîneur.

archaïque, ce qui rend son réglage évidemment très compliqué.

2. Micrographie

2.1. Principe

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

2.2. Prélèvement de l'échantillon

Le lieu et le sens du prélèvement dépendent du but à atteindre : le résultat observé sera pas le même si l'échantillon vient du cœur, ou de la périphérie d'une même pièce.

Le prélèvement des échantillons qui sont de petits fragments se fait par trouage. Le mode de prélèvement ne doit pas provoquer une grande élévation de température, sinon il pourrait y avoir modification du métal.

2.3. Enrobage des échantillons

Dans le cas où les échantillons sont de petites dimensions, l'enrobage est toujours nécessaire. D'une façon générale, il permet d'obtenir une surface de polissage bien plane.

24. Polissage

On peut considérer deux étapes importantes dans le polissage:

- Le polissage d'ébauche; voir V.1.2
- Le polissage de finition.

Ce dernier s'effectue aux pâtes diamantées formées de grains de diamant de calibre identique, enrobés dans un liant chimique. Le liant de pH neutre, est soluble dans l'eau, ce qui rend son enlèvement aisé par nettoyage. Les pâtes diamantées sont conditionnées en seringues plastiques.

En plus de la pâte diamantée, on ajoute du lubrifiant qui permettra son bon étalement.

Après obtention d'un état de surface "miroir", l'échantillon est nettoyé à l'eau et séché à l'air comprimé filtré.

2.5. Attaque

L'attaque a pour but de différencier les constituants de l'acier ou la fonte trempée. Elle a lieu à la température ambiante et dure quelques secondes. Le réactif utilisé est le nital à 5% (5% d'acide nitrique et 95% d'alcool éthylique). Pour arrêter l'attaque, on lave soigneusement l'échantillon dans un courant d'eau et on sèche

dans un jet d'air sous pression.

L'examen microscopique et la prise de photographies ont été exécutés à l'aide d'un microscope métallographique.

25. Interprétation de l'observation microscopique

Pour les pièces trempées au chalumeau, la structure observée est hétérogène.

Cette hétérogénéité est due à une surchauffe qui a entraîné un grossissement de la martensite de la couche durcie par la trempe (micrographie 3 pour la came et la butée)

Ces dites pièces présentent, en plus, des fissurations et des décarburations superficielles et aussi des taches de trempe (micrographie 1 et 2)

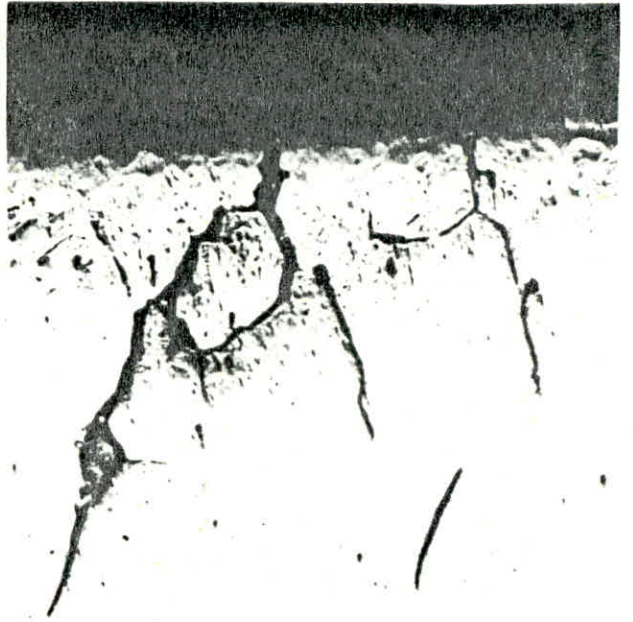
La fissuration superficielle est due, pratiquement, à un gradient de température. Ce gradient est né suite à l'existence d'une différence de température entre les zones situées juste au-dessous du dard de la flamme où la puissance est maximale et les zones intermédiaires.

La décarburation superficielle est provoquée, essentiellement par une flamme oxydante dont l'excès d'oxygène a réagi avec le carbone de l'acier ou de la fonte à chauffer. Le carbone se dégage sous forme de gaz après la

réaction.

Les tapures de trempe sont causées par la création de contraintes internes élevées qui ont dépassé, en valeur, la limite élastique du matériau à tremper.

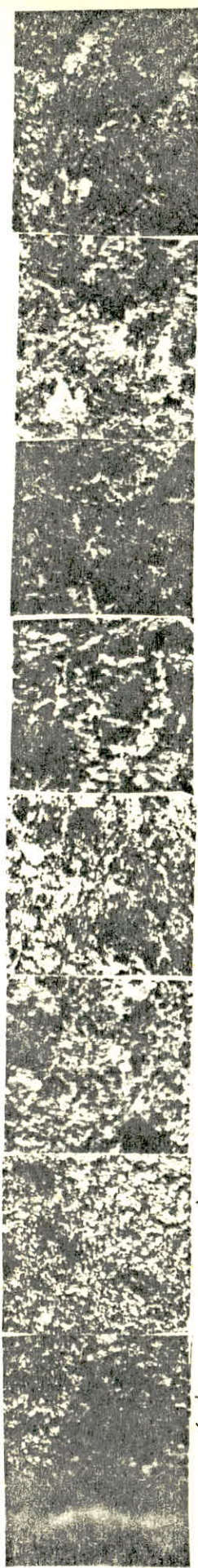
La trempe à haute fréquence élimine tous ces obstacles, on n'observe ni décarburation superficielle, ni fissuration, ni surchauffe et ni hétérogénéité de la structure (micrographie 3 pour l'entraîneur et l'axe).



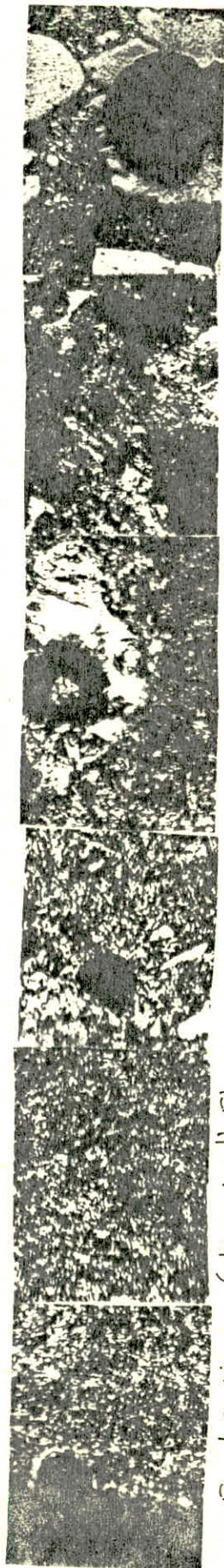
avec attaque (Nital à 5%) (x800) sans attaque (x800)
 micrographie 1: XC48, trempé au chalumeau; Décarburation et fissuration superficielles



Décarburation superficielle (x100) Fissuration superficielle (x250) ← Apures de trempé (x700)
 micrographie 2: F.G. 5 trempée au Chalumeau; réactif d'attaque: nital à 5%



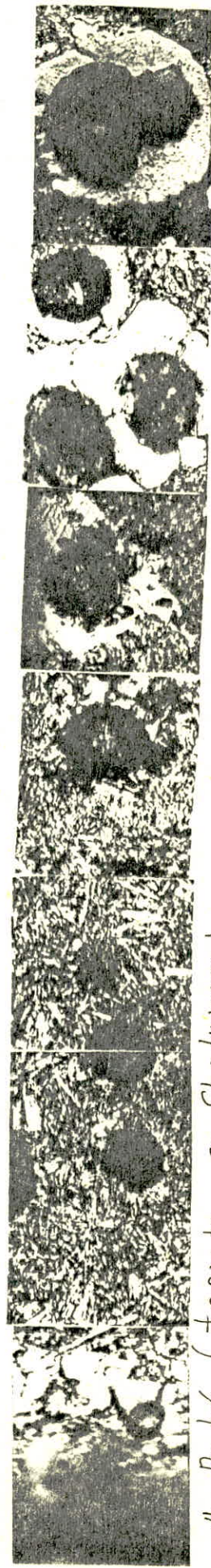
1. Axe (trempé H.F.)



2. Embranchement (trempé H.F.)



3. Came (trempé au Chalumeau)



4. Butée (trempé au Chalumeau)
Micrographie 3: Evolution de la structure à partir de la surface (x500) : Nital à 5%

CHAPITRE 6

ETUDE DE LA MICRODURETE

1. Principe

La mesure de dureté superficielle est un des moyens les plus importants qui permettent de déterminer le comportement physico-chimique d'un alliage. Alors que les duromètres pour fortes charges donnent une valeur moyenne de la dureté, les microdurimètres permettent de mesurer les duretés des constituants isolés d'une structure, ils permettent aussi de mesurer la dureté superficielle, sur des couches de 1μ d'épaisseur. On utilise dans le microdurimètre la mesure de dureté Vickers. C'est en effet la méthode qui peut être utilisée dans la totalité du domaine de mesure.

On sait que pour déterminer la dureté Vickers, on produit avec un diamant pyramidal une empreinte que l'on mesure optiquement. La pyramide de Vickers est à base carrée. L'angle dièdre de deux faces contiguës de la pyramide est de 136° . La profondeur de l'empreinte est égale au septième de sa diagonale.

Si l'on exprime la charge P en grammes-poids et la valeur moyenne de la diagonale de l'empreinte en μ , la dureté Vickers est donnée par la relation $H_v = 1854,4 \frac{P}{d^2}$

Le poids utilisé durant nos essais est de 300 grammes, ceci pour réduire au plus l'erreur

2. Essais de microdureté

On a effectué des essais de filiation de microdureté pour voir l'évolution de la dureté à partir de la surface de la couche trempée jusqu'au cœur qui est resté doux. Les résultats sont portés sur les tableaux ci-dessous.

AXE DE PIVOT

distance (μ)	50	150	250	350	450	550	650	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	2000	2500	3000
dureté (HV)	640	646	655	634	625	580	497	449	390	350	310	284	254	240	233	226	231	230

BUTEE DE RESSORTS

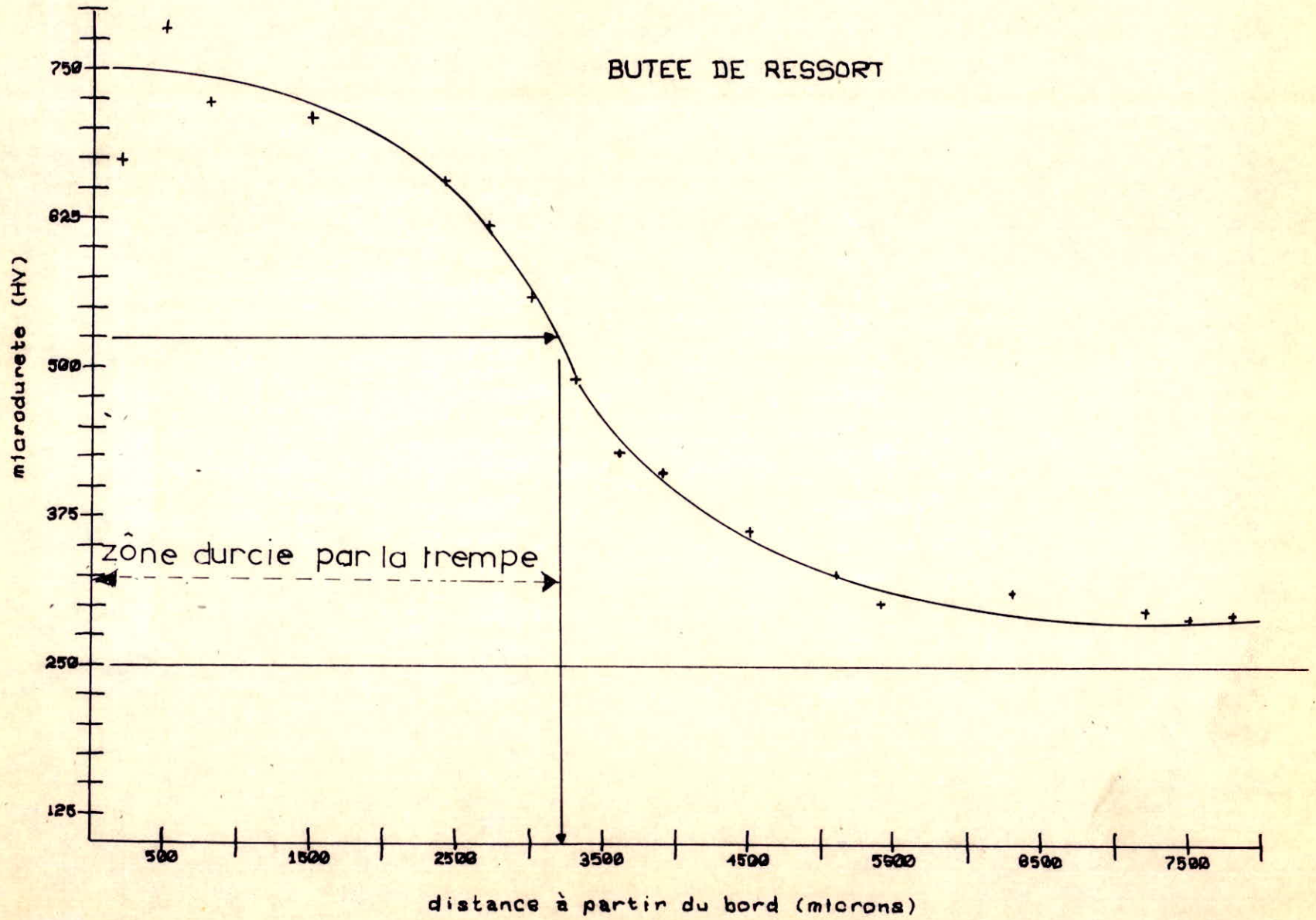
distance (μ)	200	500	800	1500	2400	2700	3000	3300	3600	3900	4500	5100	5400	6300	7200	7500	7800
dureté (HV)	675	784	722	710	657	620	560	491	429	412	364	327	303	312	297	291	294

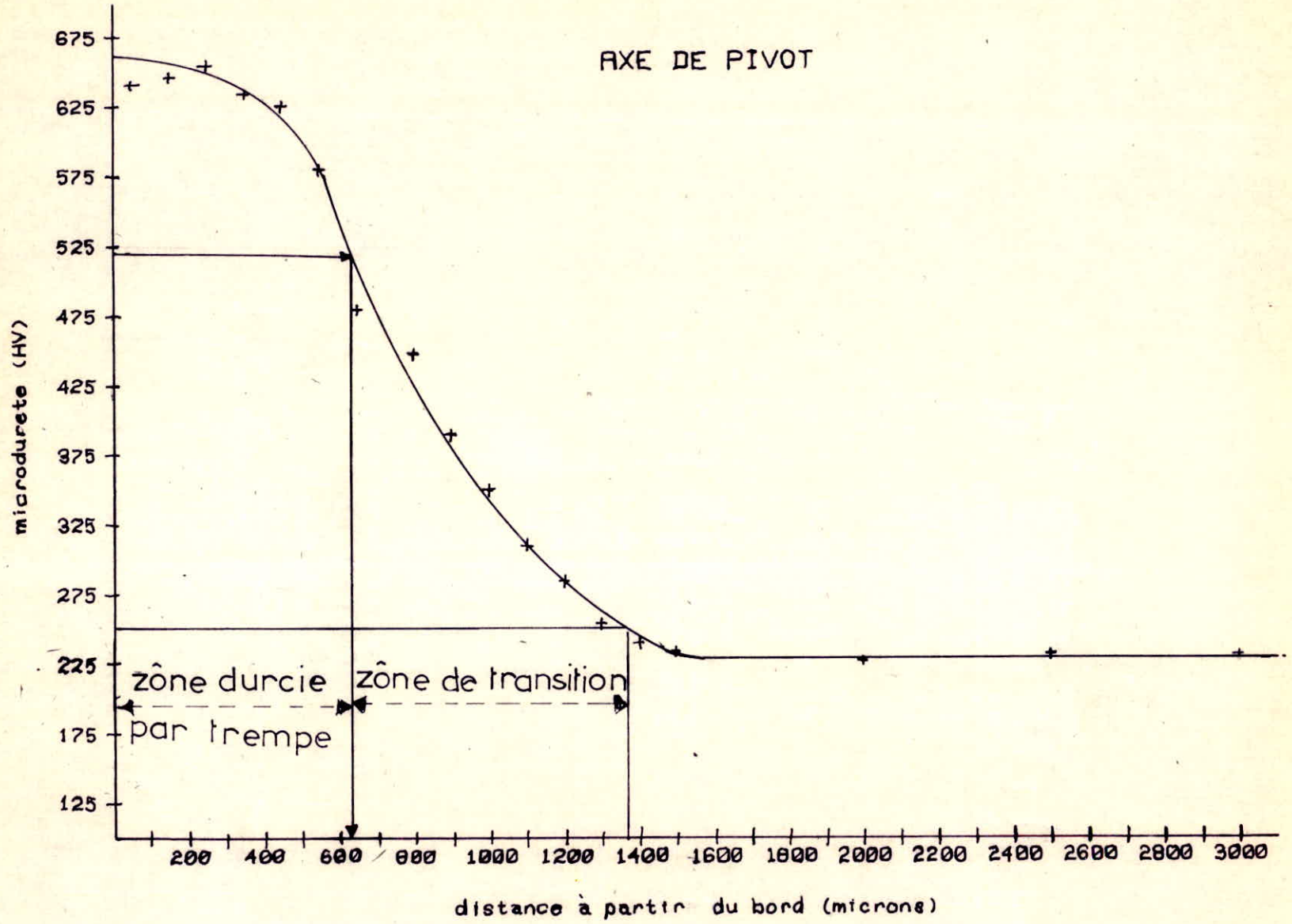
CAME DE FREINS

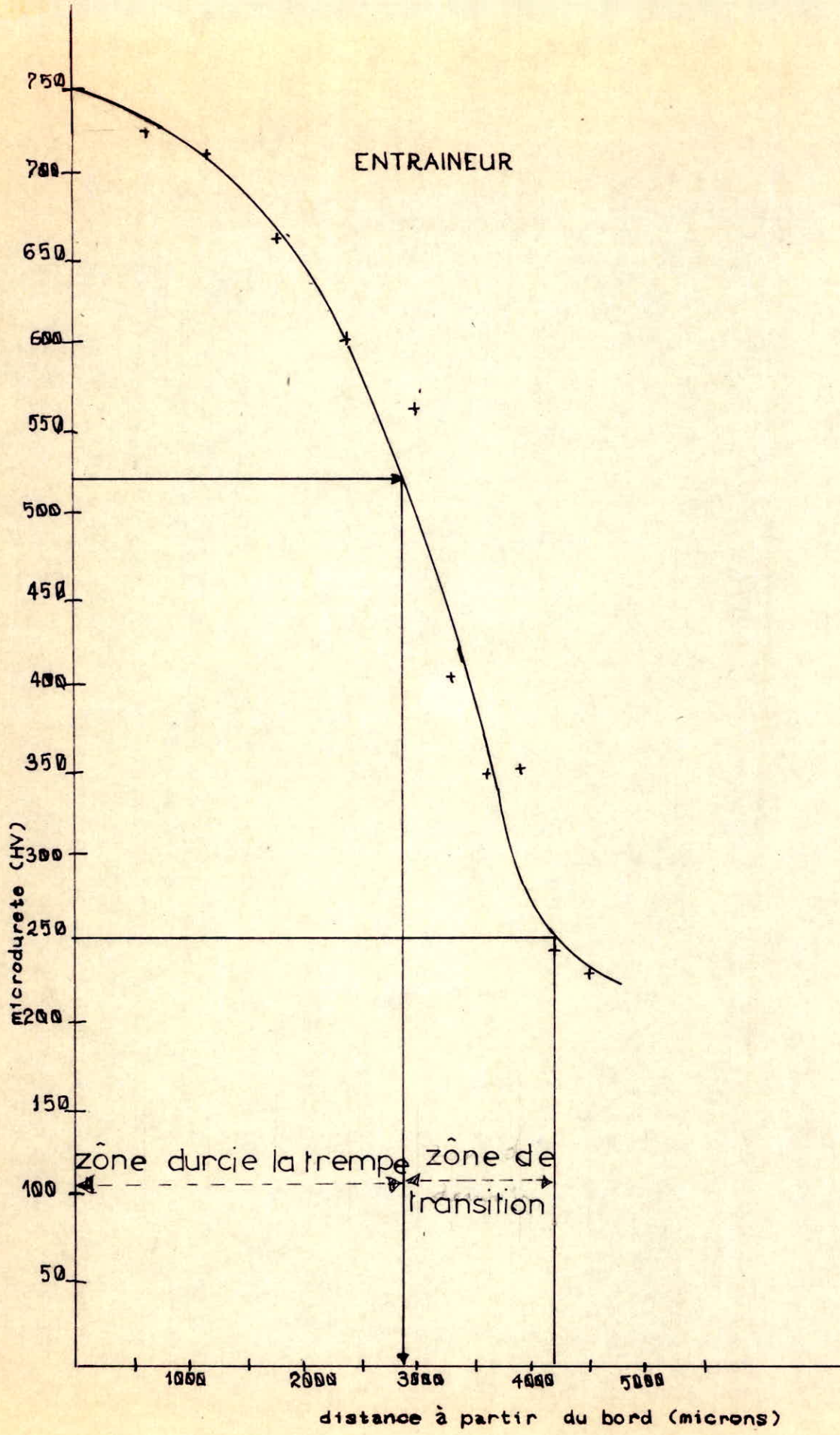
distance (μ)	1000	2000	3000	4000	5000	5500	5700	5900	6100	6500	6900	7100	7300	7500	8000	8500
dureté (HV)	678	692	684	640	555	466	424	397	377	358	336	327	315	313	284	278

ENTRAINEUR

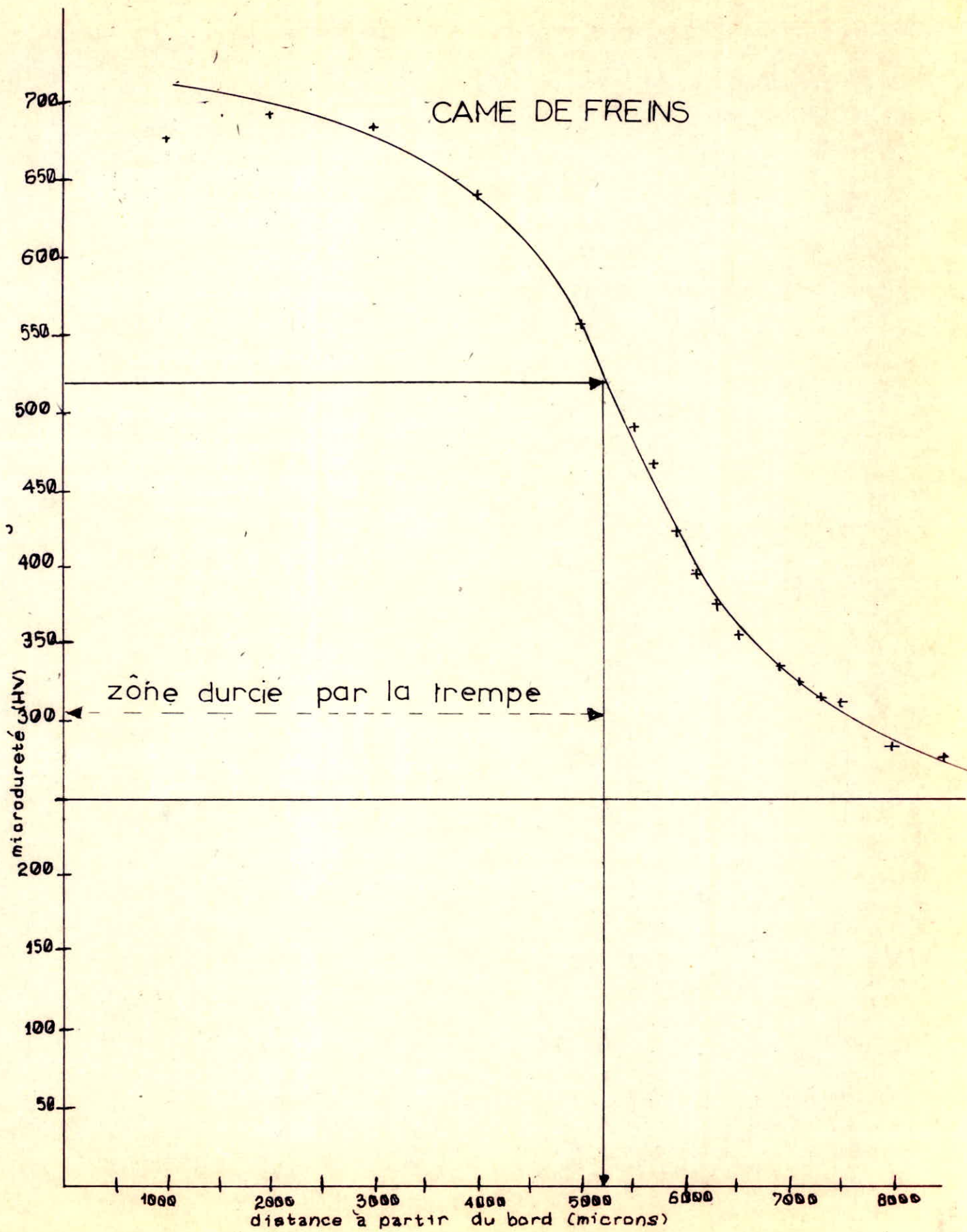
distance (μ)	600	1200	1800	2400	3000	3300	3600	3900	4200	4500
dureté (HV)	726	710	659	600	560	402	347	300	244	241







distance à partir du bord (microns)



Dans le but de faire un travail plus élaboré, nous avons approximé notre courbe de la filiation de la microdureté à une fonction numérique du troisième (3^e) degré, que nous avons déterminé par la méthode des moindres carrés.

Ces fonctions déterminées, ont vérifié un bon degré de corrélation.

3. Interprétations

La forme de la filiation de la microdureté varie d'une pièce à une autre.

Pour les pièces trempées à la H.F. on note l'existence d'une zone, d'une importance capitale, appelée zone de transition qui correspond au passage des contraintes de compression, en surface, à des contraintes d'extension au cœur.

Cette zone de transition ayant des propriétés mécaniques comprises entre celles de la couche martensitique et celles de la partie non traitée, réalise un accrochage énergique et progressif de la couche trempée sur le noyau, et les écaillements de la couche durcie, les amorces de fissures... ne sont plus à craindre

Pour les pièces trempées au chalumeau, cette zone est plus large; ce qui nous permet de dire que le cœur est moins doux, donc moins tenace et moins ductile que la zone non traitée des pièces trempées à la H. F.

Nous avons noté aussi que, pour la came de freins trempée au chalumeau, la profondeur de pénétration de trempé obtenue a largement dépassé la valeur demandée.

Cela pourrait avoir pour cause un temps de maintien très long sous le chalumeau, qui a permis à la chaleur de pénétrer plus profondément par conduction.

En résumé, on peut dire que le chauffage par induction est plus efficace que le chauffage au chalumeau pour sa bonne précision de température et pour sa meilleure homogénéisation de cette température dans le matériau à chauffer. Aussi, la trempé après chauffage par induction répond, plus complètement que la trempé au chalumeau, aux exigences d'un traitement thermique superficiel réussi qui signifie l'obtention d'une surface dure jointe à un cœur resté doux.

CHAPITRE 7

ETUDE ECONOMIQUE

1. But de l'étude

Vue l'importance des aspects économiques de notre étude et dans le soin de la compléter, nous avons calculé le prix de revient de deux pièces de même nuance, ayant subi l'une, une trempe à haute fréquence, l'autre une trempe au chalumeau

Notre choix s'est porté sur les axes de pivot et les cames de freins qui sont en XC48

2. Postes de coûts

Les postes pris en considération sont :

a. Les investissements qui incluent :

- les coûts d'achat des machines et leur installation
- les coûts des surfaces occupées
- les pièces de rechange en stock

b. La main d'œuvre directe (M.O.D)

c. La main d'œuvre indirecte (M.O.I) y compris la part du contrôle

d. Les consommations fluides : électricité, eau, gaz, air...

e. Les matières de consommation : huile hydraulique, produit de protection des pièces...

f. Les outillages de traitement : inducteurs, brûleurs, douches, équipement support des pièces, équipements individuels de sécurité...

g. La maintenance : pièces de rechanges, assistance technique.

3. Remarques

* Les surfaces occupées comptent les surfaces nécessaires au poste de traitement et les surfaces annexes (pistes, aires de stockage...)

* La part de la M.O.D est très importante, mais elle peut être réduite par une automatisation de l'opération de trempe qui permettra un gain de temps substantiel et une augmentation de la production

La M.O.D représente les salaires des opérateurs sur machines

* Les consommations fluides sont un facteur important du prix de revient, mais leur détermination reste à priori difficile, car elle varie avec la masse des pièces trempées et la profondeur de pénétration de trempe désirée.

* La tenue des inducteurs et des brûleurs est un élément non négligeable. Une refecton ou une remise en état partielle des inducteurs et des brûleurs peut permettre de réduire

le coût du poste relatif à l'outillage

4. Calculs du prix de revient

Les coûts qui nous ont été délivrés par le service prix de revient de la SNVI-CVI étaient d'une notation spéciale à l'entreprise; il était, donc, nécessaire d'étudier, ce qu'ils englobaient comme coûts qu'on a privilégié, et pris en considération. Dans cette étude du prix de revient d'une pièce trempée la notion de production exprimée en fonction de kilogrammes n'est pas valable. Et c'est pour cette raison qu'on n'a pas comptabilisé le coût de la matière, vu que pour les cames de freins, seule une infime partie est intéressée par la trempe (oreilles de la came)

En effet, le processus mis en oeuvre pour obtenir des profondeurs transformées de quelques dixièmes de millimètre sera différent de celui nécessaire pour la transformation métallurgique de plusieurs millimètres. Nous avons jugé donc intéressant de chercher les coûts par cm^3 traités (la profondeur traitée étant définie à partir de la profondeur dite conventionnelle pour une dureté 520 HV) Pour la came, la surface traitée est de $12,495 \text{ cm}^2$

Avec une profondeur de trempé de 3,5 mm selon le cahier de charges.

Pour l'axe de pivot la surface est de $20,149 \text{ cm}^3$ avec une profondeur de trempé de $\frac{18}{10}$ mm (selon le cahier de charges)

COUTS	AXE DE PIVOT		CAME DE FREINS	
	D.A./pièce	D.A./ cm^3	D.A./pièce	D.A./ cm^3
M.O.D	0,471	0,0234	0,7819	0,0626
Outillage, matières de consommation, M.O.I	4,45	0,2209	4,8953	0,3918
Consommations fluides Maintenance	1,015	0,0504	1,0307	0,0825
Investissement	9,141	0,4537	7,7373	0,6192
Total		0,7484		1,1561

N.B. Les prix sont ceux de 1984.

5. Interprétation

Le prix de revient d'un cm^3 trempé après chauffage au chalumeau vaut presque le double du prix de revient d'un centimètre cube (cm^3) trempé après chauffage par induction. Évidemment la trempé après chauffage par induction (H.F) est plus rentable et plus économique.

On n'oubliera pas de noter que les résultats présentés ci-dessus ne devront pas être considérés au sens des valeurs absolues.

CONCLUSION

Le chauffage par induction est de plus en plus apprécié dans l'industrie pour de multiples raisons:

- Rapidité de chauffage:

Quelques secondes suffisent pour atteindre la température requise, contre quelques dixièmes de minutes pour le chalumeau.

- Réduction des fentes par oxydation:

La diminution de la calamine permet de plus d'obtenir des pièces présentant un meilleur état de surface et une qualité plus élevée.

- Bonne précision de température:

La précision de température obtenue est bonne ainsi que l'homogénéité dans la pièce.

- Absence de décarburation:

La décarburation des métaux ferreux est pratiquement nulle, ce qui augmente les caractéristiques des pièces et se traduit par une meilleure qualité. Moins de décarburation signifie également moins d'usinage ultérieur pour enlever la couche superficielle de métal affectée, donc des économies de matière, d'énergie et d'usinage.

- Qualité élevée des pièces:

L'oxydation et la décarburation limitées, l'homogénéité et la

précision de température, le maintien d'une structure métallurgique à grain fin et la ductilité du cœur permettent d'élaborer des pièces de qualité

- Encombrement réduit

Une installation de chauffage par induction occupe généralement moins de place qu'une installation de chauffage au chalumeau. Cette dernière est plus encombrante à cause de ses équipements: bouteilles de gaz, conduites de gaz, d'eau...

Pour toutes ces raisons qu'on a citées, nous étions conduits à réfléchir sur la substitution de la trempé au chalumeau, par la trempé moyenne fréquence et à penser à la réalisation d'inducteurs pour chacune des pièces étudiées.

CHAPITRE 8

LES INDUCTEURS

Il n'existe pas, en pratique, une formule permettant de déterminer un inducteur. L'expérience acquise par l'élaboration des résultats obtenus, jointe à l'application de quelques règles élémentaires permettant de résoudre, de façon satisfaisante, la majorité des problèmes.

1. Choix des inducteurs

L'inducteur le plus simple et le plus connu est l'inducteur de type solénoïde, mais à cause des formes de nos pièces à étudier, nous avons opté pour des inducteurs linéaires.

Dans un inducteur linéaire, les conducteurs de cuivre de l'inducteur, au lieu d'envelopper la pièce, sont disposés parallèlement à celle-ci.

L'efficacité thermique d'un tel inducteur est mauvaise du fait de la présence d'un flux de fuites magnétiques importants.

Pour le butée de ressorts, vu la superficie à tremper, nous avons employé des concentrateurs de champ magnétique. Celui-ci est constitué par un cavalier en tôles magnétiques feuilletées d'épaisseur appropriée (5/100 à 20/100 mm) qui

coiffent les conducteurs de cuivre de l'inducteur et qui concentrent ainsi la quasi-totalité du courant sur la face de l'inducteur situé vis-à-vis de la pièce. On obtient alors, pour des entrefers inducteur-pièce de 1 à 2,5 mm, des valeurs de rendement variant de 50 à 75%.

2. Quelques réflexions sur le rôle du circuit magnétique des inducteurs linéaires

Les inducteurs avec circuit magnétique, ont souvent un profil carré, rectangulaire ou circulaire, donc un profil généralement simple.

On peut imaginer ce qu'est en moyenne fréquence, la répartition des courants dans l'inducteur, sans cavalier magnétique. Cette répartition (fig 19) est sensiblement uniforme, et, en moyenne, le courant tend à s'éloigner de la pièce. Autrement dit, le champ tangentiel diminue et n'est sensible qu'au voisinage du plan médian de l'inducteur. L'efficacité thermique est donc limitée à cette seule région médiane d'où un faible rendement au chauffage.

Par contre, en présence d'un circuit magnétique, les lignes de champ se trouvent rassemblées dans l'entrefer et occasionnent ainsi un renforcement du champ tangentiel donc un accroissement considérable de l'efficacité de l'inducteur (fig 20)

3. Méthode de trempe

3.1 Pour la came

Un que l'inducteur a une position fixe, il a fallu donc penser à prévoir un système pour immobiliser complètement la pièce sur le plateau du chariot

Ce système comprend:

- Une crémaillère soudée sur le chariot et qui s'engrène avec les cannelures de l'axe de la came.
- Une fourchette placée sur la partie plane de l'axe située juste après la came (voir planche 1)
- Une butée pour empêcher le glissement de la pièce durant le chauffage

Pour cette pièce, le déplacement du chariot porte-pièces est assuré par des vérins pneumatiques ou hydrauliques

L'inducteur choisi est un inducteur-douche qui permet donc le chauffage et la trempe par douchage à l'eau de la pièce

3.2 Pour la butée

Nous avons proposé pour la fixation de cette pièce durant le chauffage, un dispositif simple à réaliser.

Ce dispositif est constitué d'une plaque métallique

métallique verticale, où sont soudés des axes qui épousent, ajustement, les alésages de la pièce (planche 2). Cette plaque est fixée sur un chariot coulissant sur deux rails et actionné par l'intermédiaire d'une bielle. Un système pneumatique communique à cette dernière un mouvement alternatif permettant au chariot de se déplacer entre deux positions PMB et PMH. Le PMB (point mort bas) correspond à la position où la pièce est maintenue à l'aide des quatre axes de la plaque métallique sous l'inducteur. Après le temps de chauffe, le chariot regagne la position PMH (point mort haut) et laisse ainsi la pièce tomber dans le bac d'eau prévu pour la trempe.

On a suggéré ce type de trempe, trempe par immersion, vu la moindre importance de la pièce.

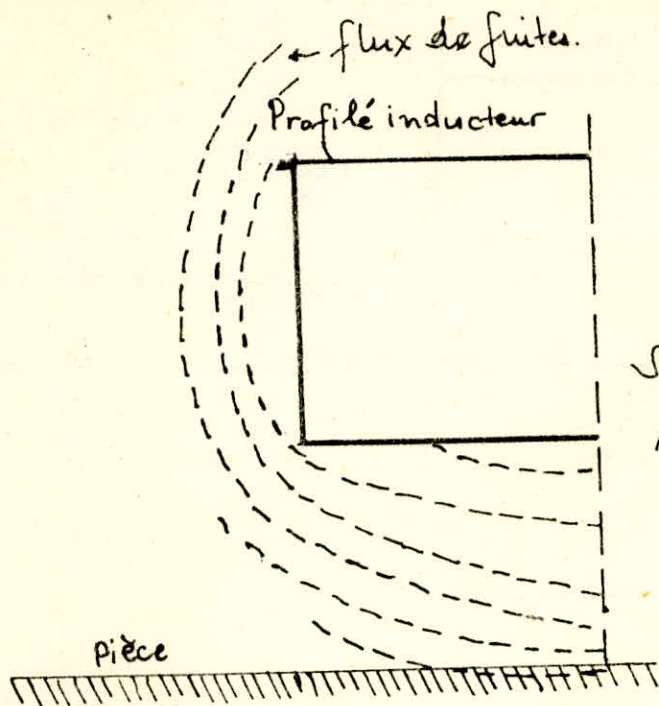


Fig 19

Spectrogramme d'un inducteur
MF sans culasse magnétique

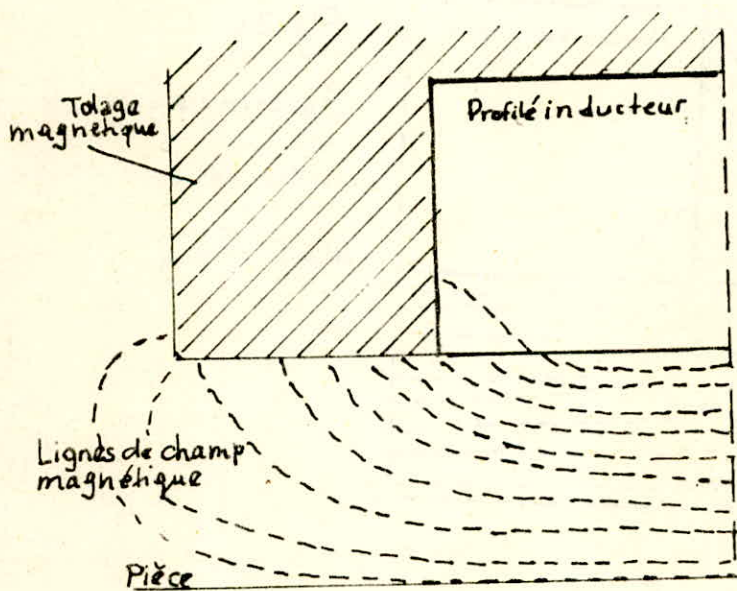


Fig:20

Spectrogramme d'un
inducteur à culasse
magnétique.

CHAPITRE 9

CALCULS DES INDUCTEURS

Le choix de la fréquence est subordonné à la profondeur de trempée désirée - Nous venons de voir qu'une haute fréquence est destinée à produire un chauffage rapide, mais de faible pénétration.

Par contre une moyenne fréquence possède un pouvoir pénétrant sur une plus forte profondeur

Par suite de la conductivité du métal et de l'élévation de la résistance électrique des zones chauffées, la pénétration durcie en fin de trempée est d'autant plus épaisse que la durée de chauffage est plus élevée et que la fréquence est plus basse à puissance de chauffe constante.

Le domaine de la M.F est de 60 Hz à 10 KHz voire jusqu'à 25 KHz
Les générateurs de moyenne fréquence utilisés, que ce soient des générateurs à groupe rotatif ou des générateurs statiques de moyenne fréquence à thyristors, produisent aux bornes de l'inducteur une basse tension de 40 à 60 volts.

Pour mettre au point la trempée à moyenne fréquence des butées de ressorts et des cames de freins, on doit déterminer les trois grandeurs suivantes.

1. La fréquence
2. La puissance.
3. Le temps de chauffe

NB. Dans tous les calculs qui suivent, nous avons assimilé notre inducteur au primaire d'un transformateur et la pièce au secondaire d'un transformateur à spire unique en court circuit.

1. La fréquence

A l'aide de l'équation du V.3 $\epsilon = 503,3 \sqrt{\frac{S}{\mu r f}}$, on peut avoir la fréquence nécessaire pour une profondeur donnée et imposée par le cahier des charges.

Nous avons opté pour les profondeurs de trempes suivantes :

la came de freins = 3,5 mm.

la butée de ressorts = 4 mm.

D'après l'équation du V.3 on a :

$$f = \left(\frac{503,3}{\epsilon} \right)^2 \cdot \frac{S}{\mu r}$$

avec ϵ : profondeur de pénétration en mètres

ρ : résistivité de l'induit, en ohms mètres

f : fréquence du courant parcourant l'inducteur en Hertz

Selon le tableau 2 ci-dessous, publié par la revue USINE-INFRA dans un article intitulé "le chauffage par induction haute fréquence", on voit qu'aux températures inférieures que la température du point de Curie, la pénétration est minime par rapport à celle obtenue après point de Curie.

Fréquence	E (mm) avant point de Curie	E (mm) après point de Curie	Zone trempée (mm)	
			Normale	Minimale
3.000 Hz	0,2	7	7 à 10	1,5
10000 Hz	0,1	4	3 à 5	1

Tableau 2

On ne considère alors que les températures supérieures au point de Curie

1.1. Came

à 900°C ; $\rho = 120 \cdot 10^8 \Omega \frac{\text{m}^2}{\text{m}}$; $\mu_r = 1$; $\epsilon = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{m}$

$$f = \left(\frac{5033}{\epsilon} \right)^2 \cdot \frac{\rho}{\mu_r}$$

$$f = 24814 \text{ Hz}$$

1.2 Butée

Cette pièce est fabriquée en fonte à graphite sphéroïdal ferrite-perlitique. On peut considérer cette fonte comme constituée de grains d'un acier mi-dur (ferrite-perlitique) entre les joints desquels se trouvent les nodules de graphite.

Le graphite n'est pas intéressé par la trempe.

Le carbone combiné de la F.G.S, c'est à dire, le carbone associé à la ferrite et à la perlite est de 0,5%.

Ainsi pour un acier mi-dur à 0,5% C et à la température d'austénisation d'environ 850°C on a :

$$\rho = 115 \cdot 10^8 \Omega \frac{\text{m}^2}{\text{m}} \quad \mu_r = 1$$

pour une profondeur de trempe de 4 mm.

la fréquence nécessaire est

$$f = \left(\frac{503,3}{\epsilon} \right)^2 \cdot \frac{s}{4\pi}$$

$$f = 1,8207 \cdot 10^4 \text{ Hz.}$$

2. Puissance

La figure 18 montre qu'en MF le chauffage des pièces est dû en grande partie aux pertes hystérésis. On peut dire donc que le chauffage par effet joule (courants de Foucault) n'intervient qu'après point de Curie.

Et si on revoit le tableau N° 2 on peut dire que la profondeur désirée n'est atteinte qu'après point de Curie où le matériau à chauffer passe de l'état magnétique à l'état paramagnétique et où le chauffage ne se fait que par courants de Foucault.

On doit noter que la perméabilité relative du matériau vaut l'unité ($\mu_r = 1$) après A_2 .

Selon le livre "Electrothermic industrielle" les pertes par hystérésis ne représentent que les 10% des pertes engendrées par les courants induits.

En regard à ces données, on a essayé de calculer, au premier lieu, et pour les deux pièces étudiées, la puissance transmise sous l'effet des courants induits puis la puissance totale en y ajoutant les 10% de la première puissance dus aux pertes par hystérésis.

2.1. Pour la came

2.1.1 Puissance transmise à la pièce par effet Joule

Pour faciliter les calculs nous avons assimilé l'oreille de la came à un cylindre de rayon de 28 mm (voir planche 1).

Dans ce calcul, le courant est supposé entièrement concentré dans une zone d'épaisseur égale à la profondeur de pénétration E .

Les courants induits parcourent donc un conducteur assimilable à un cylindre. (fig 21). La longueur du conducteur est égale à la circonférence d'une section circulaire de ce cylindre, soit πd , d diamètre de la pièce. La section du conducteur est égale à hE , produit de la profondeur de pénétration E (épaisseur du cylindre) par la hauteur h du cylindre. La résistance électrique a donc pour valeur approchée: $R = \rho \frac{l}{S}$ ou, $R = \rho \frac{\pi d}{h E}$

ou encore, en remplaçant E par sa valeur

$$R = 2\pi^2 \frac{d}{h} \sqrt{10^{-7} \rho \mu_r f}$$

L'énergie dissipée dans le corps à chauffer est alors égale à

$$P_f = R I_2^2$$

En remplaçant R par sa valeur précédente et I_2 par I_1 ,

I_1 : intensité des courants dans le primaire

L'inducteur ou le primaire, est composé, dans notre cas, d'une seule spire de même que la pièce à chauffer est considérée à spire unique

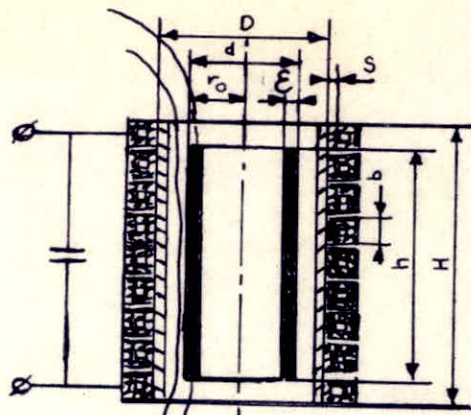
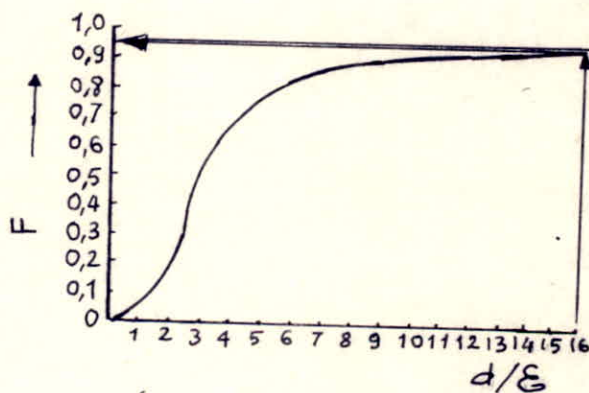
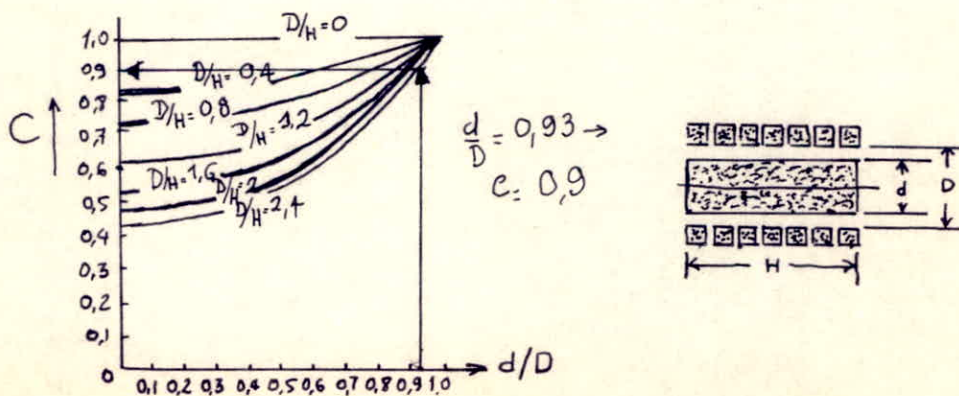


Fig 21 Inducteur et corps à chauffer



$\frac{d}{E} = 16 \rightarrow F = 0,95$

Fig 22: facteur de transmission de la puissance pour une pièce cylindrique



$\frac{d}{D} = 0,93 \rightarrow C = 0,9$

Fig 23 Facteur de couplage pour une pièce cylindrique

Donc $\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_1}{n_2} = 1$, L'expression de la puissance devient.

$P_F = 2\pi^2 \frac{d}{h} \sqrt{10^{-7} \mu_r f} (I_1)^2$ [W] en introduisant le champ magnétique efficace $H_e = \frac{n_1 I_1}{h} = \frac{I_1}{h}$

$$P_F = 2\pi^2 d h H_e^2 \sqrt{10^{-7} \mu_r f} \text{ [W]}$$

La puissance thermique spécifique est

$$P_F^s = 2\pi H_e^2 \sqrt{10^{-7} \mu_r f} \text{ [W/m}^2\text{]}$$

NB. Les puissances qui seront calculées par la suite sont des puissances spécifiques

2.1.2 Puissance transmise réelle par effet Joule

2.1.2.1. Influence de la répartition des courants induits

Le courant décroît de façon exponentielle de la périphérie vers le centre de la pièce à chauffer et le rapport diamètre - profondeur de pénétration peut prendre des valeurs très variables

La puissance calculée précédemment reste valable à condition de l'affecter d'un facteur F (Fig 22) de transmission de la puissance dépendant du rapport diamètre - profondeur de pénétration de la géométrie de la pièce.

L'expression devient :

$$P_F^s = 2\pi H_e^2 \sqrt{10^{-7} \mu_r f} \cdot F \text{ [W/m}^2\text{]}$$

2.1.2.2. Influence du couplage

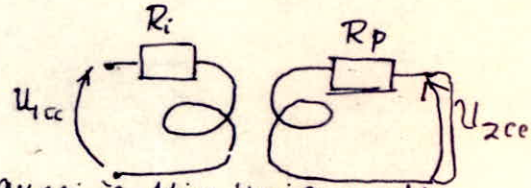
Le couplage inducteur - induit n'est donc jamais parfait. Les courbes de la figure 2³ montrent que si la longueur de l'inducteur est beaucoup plus importante de son diamètre, le facteur de couplage reste excellent, voisin de 1. La puissance transmise, pour une pièce cylindrique, devient donc

$$P_{F_3} = 2\pi H_e^2 \sqrt{10^{-7} g \mu_r f} \cdot F \cdot C \text{ [W/m}^2\text{]}$$

213 Applications

213.1 Calcul du champ magnétique efficace : H_e

Comme on a assimilé l'inducteur et la pièce à chauffer respectivement au primaire à spire unique et au secondaire, aussi à spire unique, d'un transformateur en court circuit.



On peut écrire : $\frac{U_{1cc}}{U_{2cc}} = \frac{1}{m} = 1$ ($m = \frac{n_1}{n_2} = 1$: facteur de transf.)
donc $U_{2cc} = U_{1cc} = E_2$.

E_2 c'est la force électromotrice en volts.

Comme nous l'avons souligné, les générateurs MF nous donnent des tensions aux bornes de l'inducteur des tensions comprises entre 40 et 60V. Nous avons choisi une tension de 50V

Alors, on écrit $U_{1cc} = U_{2cc} = E_2 = 50V$

La valeur de E_2 est donnée par l'équation de Boucherot :

$$E_2 = 4,44 \text{ m f } \phi_{\text{max}} \text{ [V]}$$

ϕ_{max} : flux maximum.

puisque $\phi_{max} = B_{max} S$, $B_{max} = \mu H_{max} = \mu_0 \mu_r H_{max}$, et $H_{max} = \frac{E_2}{\mu_0 \sqrt{2}}$

La force électromotrice vaut alors :

$$E_2 = 4,44 \sqrt{2} \mu_0 \mu_r n f H_e S$$

Dans notre cas $n = 1$ et $\mu_r = 1$

L'intensité efficace du champ magnétique est :

$$H_e = \frac{E_2}{4,44 \sqrt{2} \mu_0 f S} \quad [A/m]$$

S : section de la spire $\approx 6 \cdot 10^{-4} m^2$

$$E_2 = 50V \quad ; \quad f = 24814 \text{ Hz} \quad ; \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$$

$$H_e = 4,2561 \cdot 10^5 A/m.$$

21.3.2 Calcul de la puissance réelle transmise

En appliquant l'équation

$$P_{FS} = 2\pi H_e^2 \sqrt{10^{-7} \mu_r f} \cdot F \cdot C$$

$$H_e = 4,2561 \cdot 10^5 A/m$$

$$S = 120 \cdot 10^{-8} \Omega m^2/m$$

$$\mu_r = 1$$

$$f = 24814 \text{ Hz}$$

$$F = 0,95$$

$$C = 0,9$$

$$P_{FS} = 6,2107 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2$$

ou $P_{FS} = 6,2107 \text{ KW/cm}^2$

21.33 Calcul de la puissance transmise totale

On définit la puissance transmise totale P_T comme la somme de la puissance due aux pertes par courants induits et de la puissance dissipée dans la pièce par hystérésis : $P_T = P_{F_5} + P_{H_5}$ et

$$P_{H_5} = 0,1 P_{F_5} \text{ donc } P_{H_5} = 0,62107 \text{ kW/cm}^2$$

$$\text{et } P_T = 6,8318 \text{ kW/cm}^2$$

Cette valeur représente la puissance dissipée dans tout le cylindre considéré (Planche 1). Mais l'oreille tronquée de la came ne représente que le $\frac{115}{360} = 0,32$ de ce cylindre

En supposant que la puissance dissipée dans le cylindre est uniforme, la puissance totale dissipée dans les deux oreilles de la came sera.

$$P_S = 2 \times \frac{115}{360} \times P_T$$

$$P_S = 4,365 \text{ kW/cm}^2$$

22. Pour la butée

Nous avons assimilé cette pièce à un cylindre creux de 109 mm de rayon et de 12 mm d'épaisseur

22.1 Puissance transmise à la pièce par effet Joule

Dans les pièces creuses la distribution des courants induits est pratiquement la même que pour une pièce pleine et les expressions de la puissance déterminées pour ces pièces

s'appliquent. L'expression de la puissance transmise est alors:

$$P_{\#3} = 2\pi H_e^2 \sqrt{10^{-7} \cdot \mu_r f} Q \text{ [W/m}^2\text{]}$$

Le facteur Q de transmission de la puissance est fonction de deux rapports, celui de l'épaisseur du cylindre à la profondeur de pénétration et celui de l'épaisseur de ce cylindre à son diamètre.

Les courbes de la figure 24 donnent la variation du facteur Q en fonction de ces deux rapports.

2.2.2 Applications

2.2.2.1 Calcul de H_e

En appliquant l'équation de Boncherot

$$E_2 = 4,44 \sqrt{2} n \mu H_e S f \quad \text{On cherche } H_e.$$

$$H_e = \frac{E_2}{4,44 \sqrt{2} n \mu_r S f} \text{ [A/m]}$$

n = nombre de spires de l'inducteur ($n=1$)

μ_0 = perméabilité du vide ($4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$)

μ_r = " relative ($\mu_r=1$)

f : fréquence = 18207 Hz

S : section de la spire = $3 \times 7 = 21 \text{ cm}^2 = 21 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$

E_2 : force électromotrice (50V)

$$H_e = 1,6573 \cdot 10^5 \text{ A/m}$$

Le noyau magnétique, ou le renforceur de champ permet

d'avoir un rendement ou un gain pouvant aller jusqu'à 75%. L'intensité de champ sera

$$H_e = 2,9003 \cdot 10^5 \text{ A/m}$$

2.2.2 Calcul de la puissance transmise par effet Joule

$$P_{J_5} = 2\pi H_e^2 \sqrt{10^{-7} \mu_r f} Q$$

$$H_e = 2,9003 \cdot 10^5 \text{ A/m} \quad ; \quad Q = 0,92$$

$$P_{J_5} = 2,2728 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2$$

$$P_{J_5} = 2,2728 \text{ KW/cm}^2$$

2.2.2.3 Calcul de la puissance transmise totale

$$P_{T_5} = P_{J_5} + P_{R_5}$$

$$P_{R_5} = 0,1 \times P_{J_5} = 0,22728 \text{ KW/cm}^2$$

$$P_{T_5} = 2,5004 \text{ KW/cm}^2$$

En supposant que la puissance se dissipe uniformément dans tout le cylindre, la puissance dissipée dans la butée sera :

$$P_S = \frac{40}{360} \cdot P_{T_5}$$

$$P_S = 0,278 \text{ KW/cm}^2$$

3. Temps de chauffe

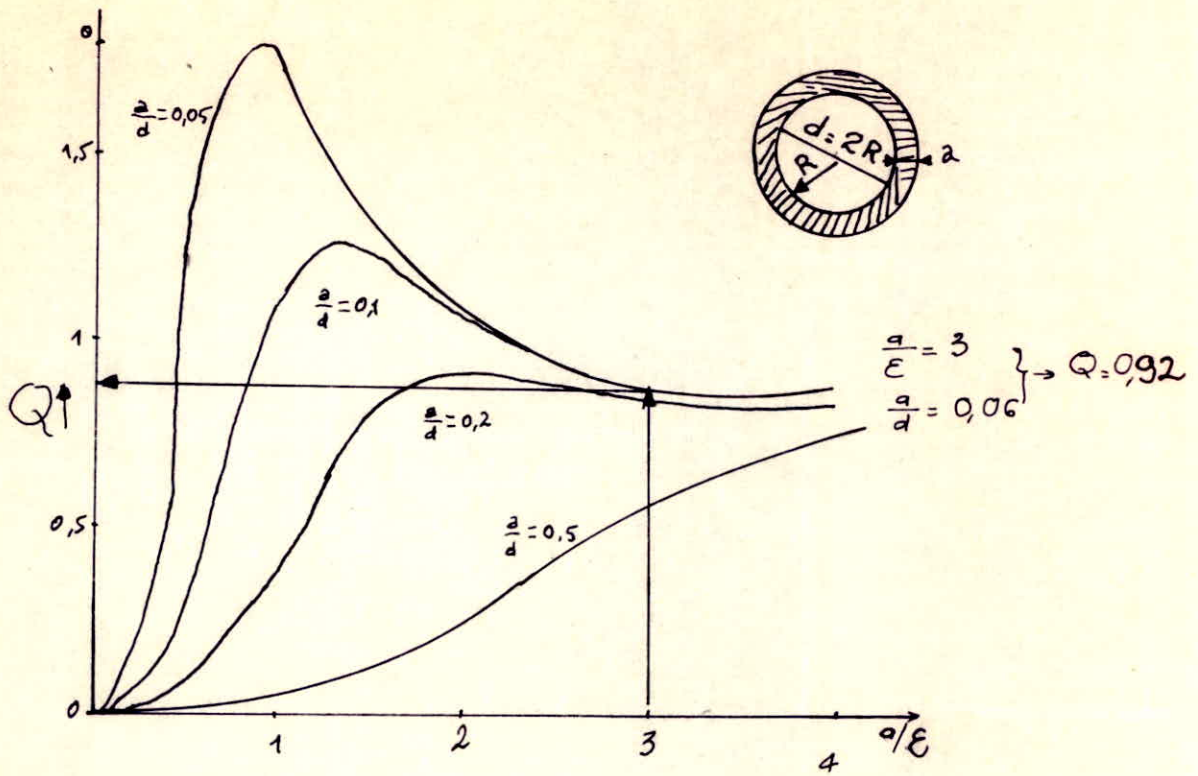


Fig 24 Facteur Q de transmission de la puissance Pour une pièce creuse ($\mu_r = 1$)

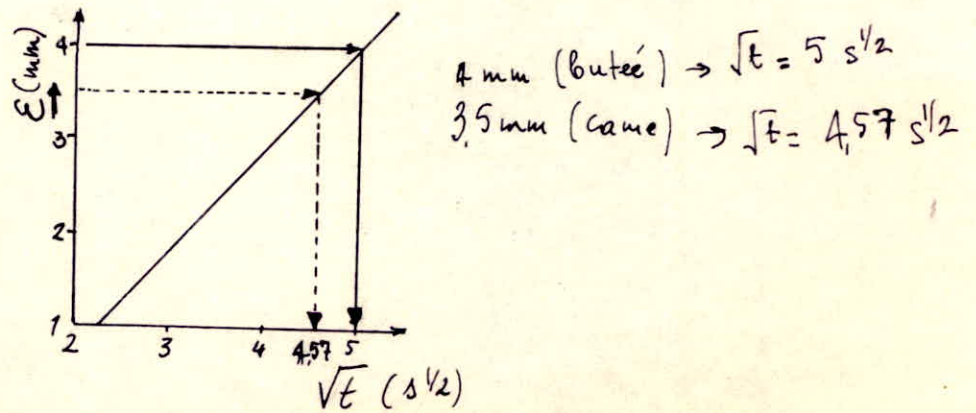


Fig 25 Profondeur chauffée par inducton en fonction de la racine corré du temps

Kégel a donné une forme simplifiée et linéaire de la courbe qui exprime la profondeur trempée E en fonction de la diffusivité thermique a et du temps de chauffe t (figure 25)

Cette courbe a pour expression : $E = \sqrt{2at}$

a : diffusivité thermique. (voir I.2)

De la figure 25 on peut tirer le temps de chauffe nécessaire

Pour la came : $\sqrt{t} = 4,57 \text{ s}^{1/2}$

$$t = 21 \text{ s}$$

Pour la butée $\sqrt{t} = 25 \text{ s}^{1/2}$

$$t = 25 \text{ s}$$

RESUME

	fréquence en KHz	Puissance en kW/cm ²	temps de chauffage en s
butée	18,2	0,278	25
came	24,8	4,365	21

CONCLUSION

La réalisation complète des inducteurs est très difficile à cause des calculs très complexes. Si on prend comme exemple la détermination de la puissance dissipée dans la charge à chauffer, qui est un paramètre très important, on doit utiliser les lois fondamentales de l'électromagnétisme (équations de Maxwell) dont la résolution fait appel en particulier aux fonctions de Bessel, de même on ne peut s'en passer des équations conformes pour assimiler ajustement la pièce à n'importe quel profil qu'on désire.

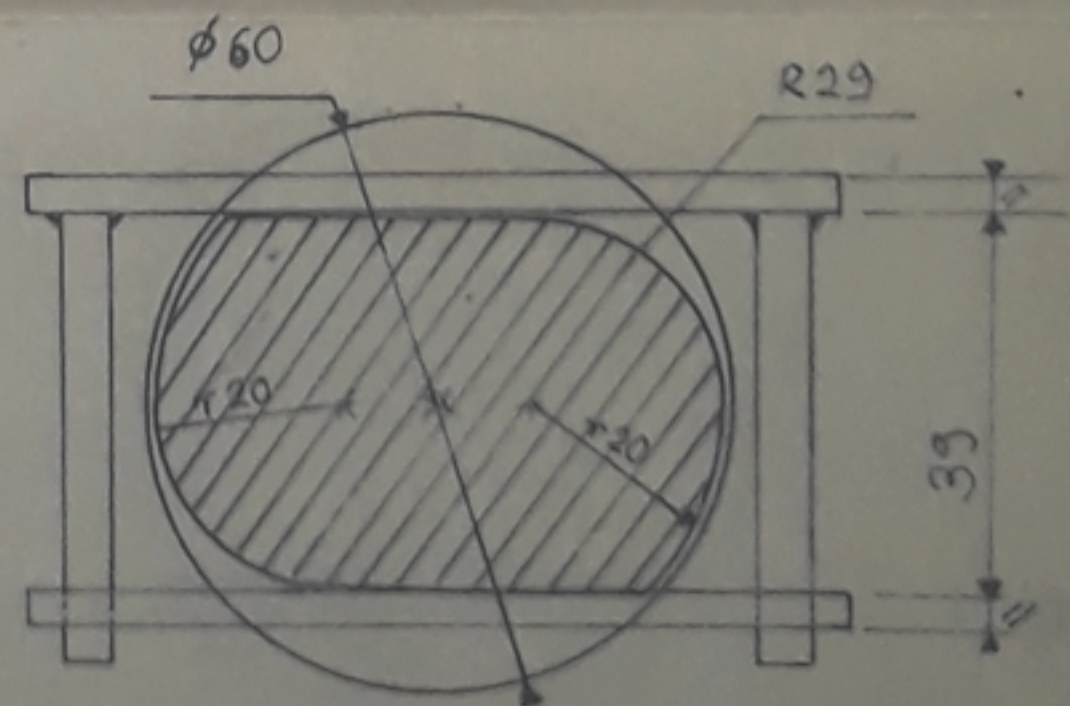
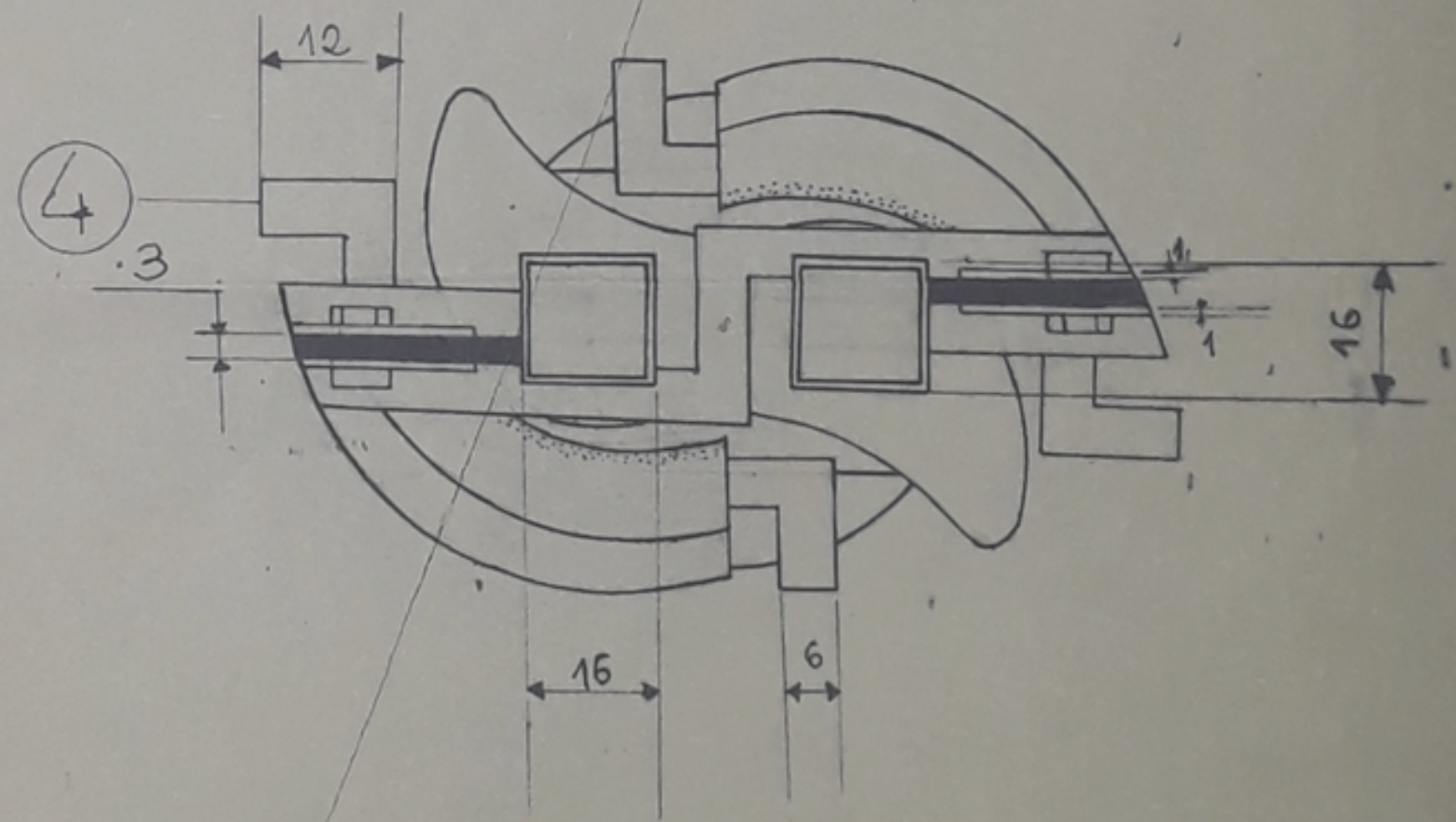
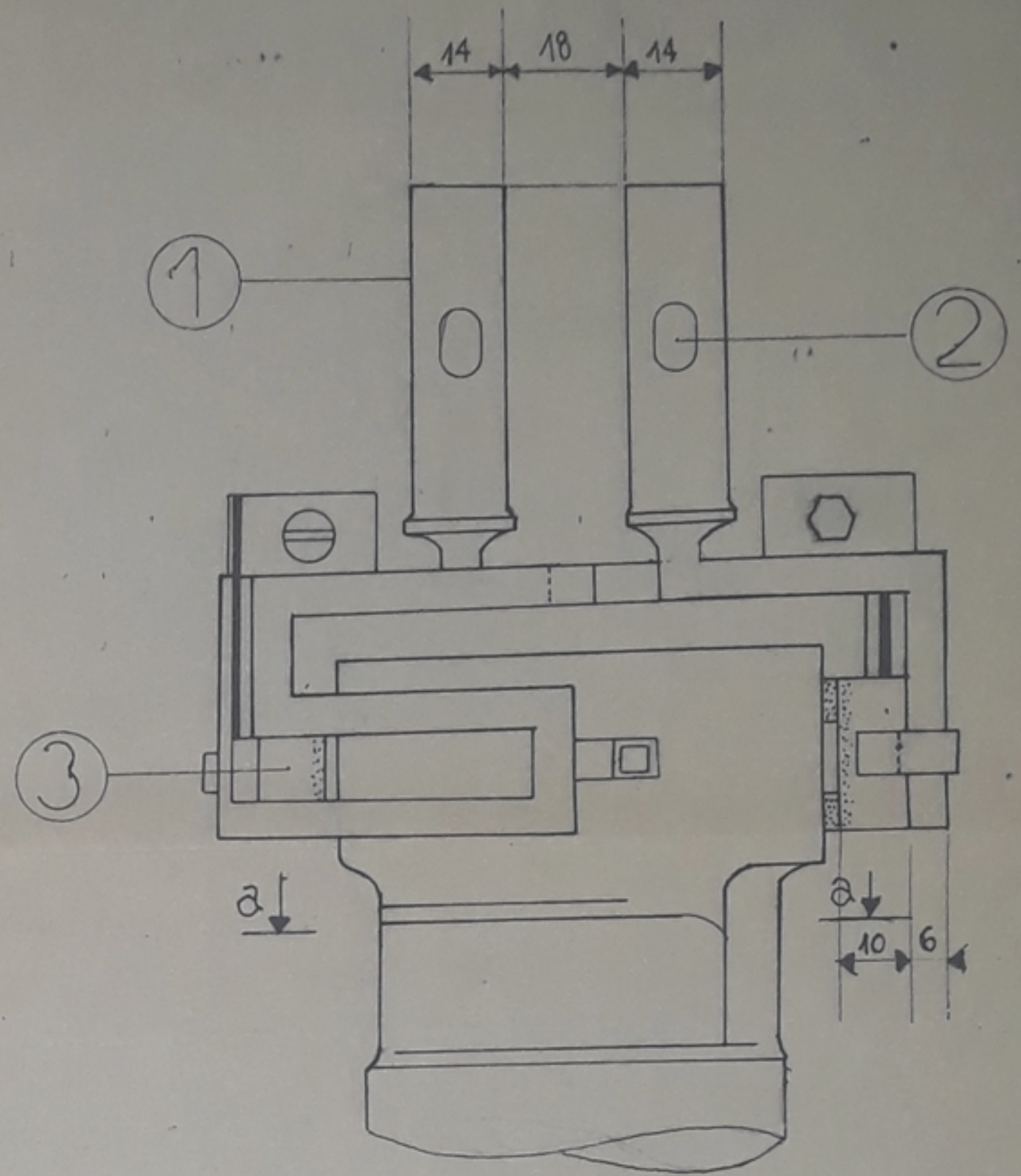
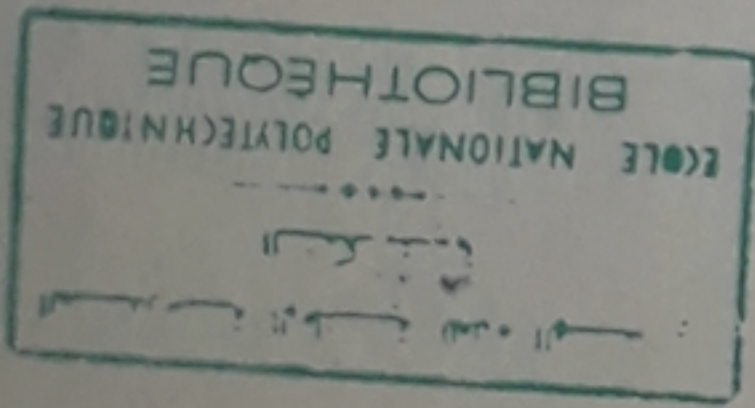
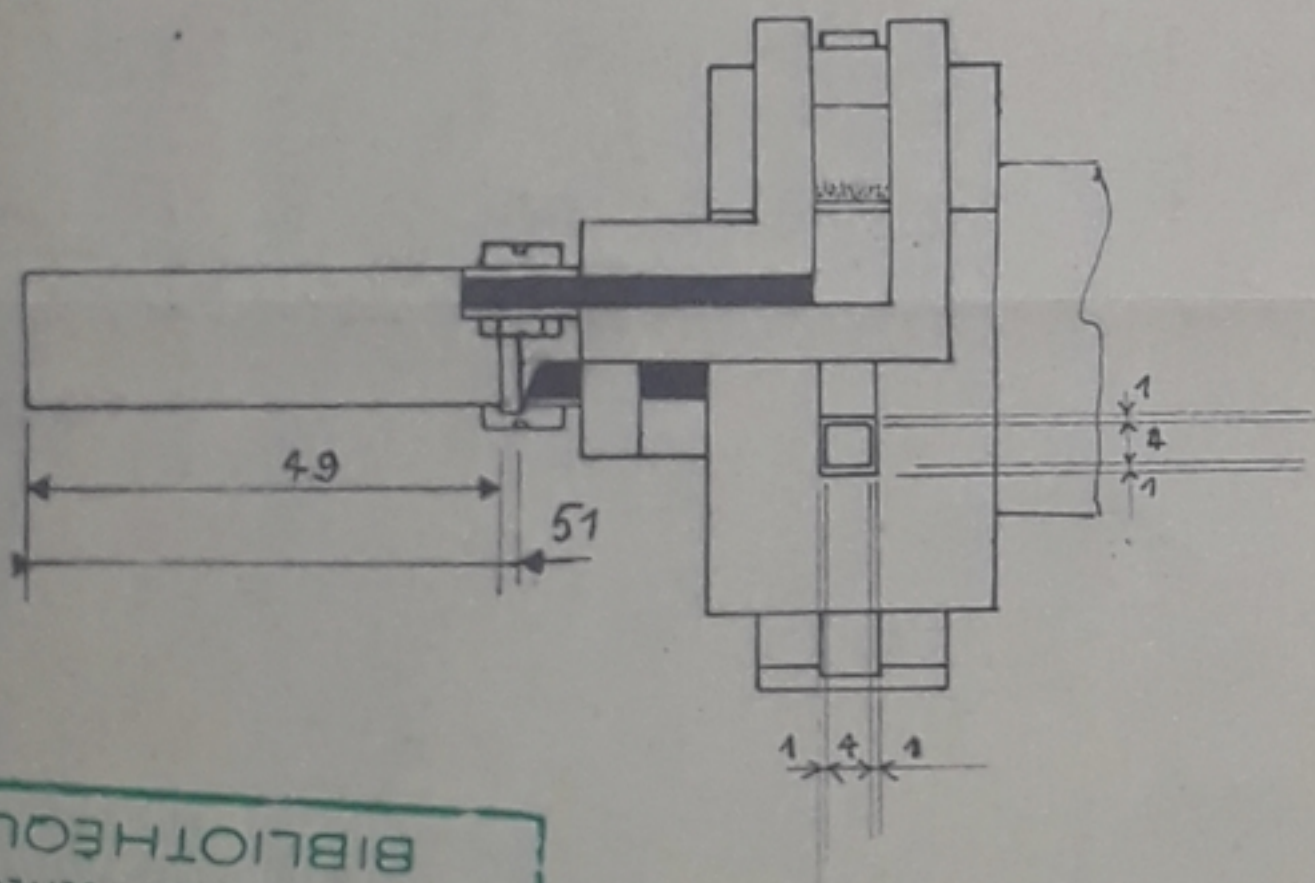
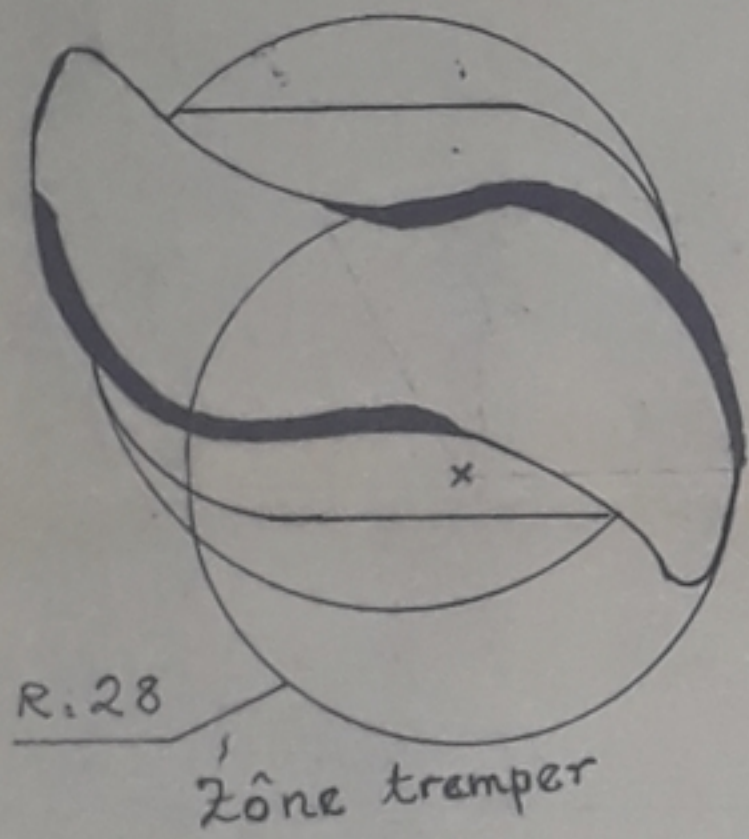
À mon avis ce genre de travail serait mieux traité s'il était proposé à un ensemble d'étudiants de différentes spécialités et qui travailleraient en collaboration.

Tout de même, on a essayé par la présente thèse, de toucher aux principaux points et de donner un ordre de grandeur aux différents paramètres à l'aide d'un raisonnement et des calculs simples.

À la fin, on peut conclure que cette étude n'est qu'un point de départ et on espère que d'autres étudiants viendront essayer les inducteurs proposés ou les modifier ou en proposer d'autres si c'est possible; parce que, ce n'est que par des essais et des enseignements qu'on en tire, qu'on peut parler de l'exactitude des paramètres déterminés.

BIBLIOGRAPHIE

1. C. Chaussin, G. Hilly, *Métallurgie*, Tome I, 10^e édition, Dunod
2. *Techniques de l'ingénieur; traitements superficiels*;
Editions : 1947 et 1981
3. M. Orfeuil, *Electrothermie industrielle*, Edition 1981, Dunod
4. Revues "traitement thermique" N° 180, N° 179.
5. M. Bornand, *Cahiers d'électrotechnique*, Tome 1, Edition 1980, Vuibert
6. J. Curé, *Métallurgie appliquée*, Edition 1970, Hachette
7. *Journal du four électrique; Applications industrielles de l'électrothermie*; N° 3 - Mai 1984.
8. J. Barralis, G. Maeder, *Précis de métallurgie*, Mars 1983, Nathan



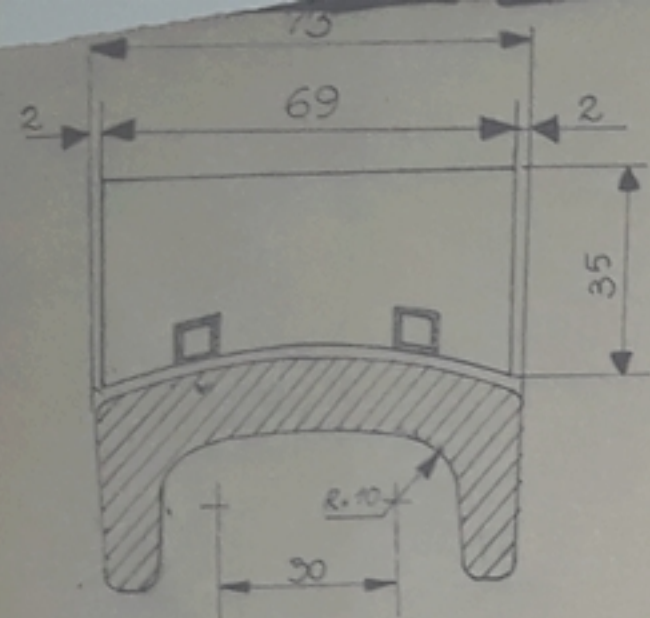
coupe a-a avec une
possibilité de soutènement
de la came pendant
la trempe

PL00185

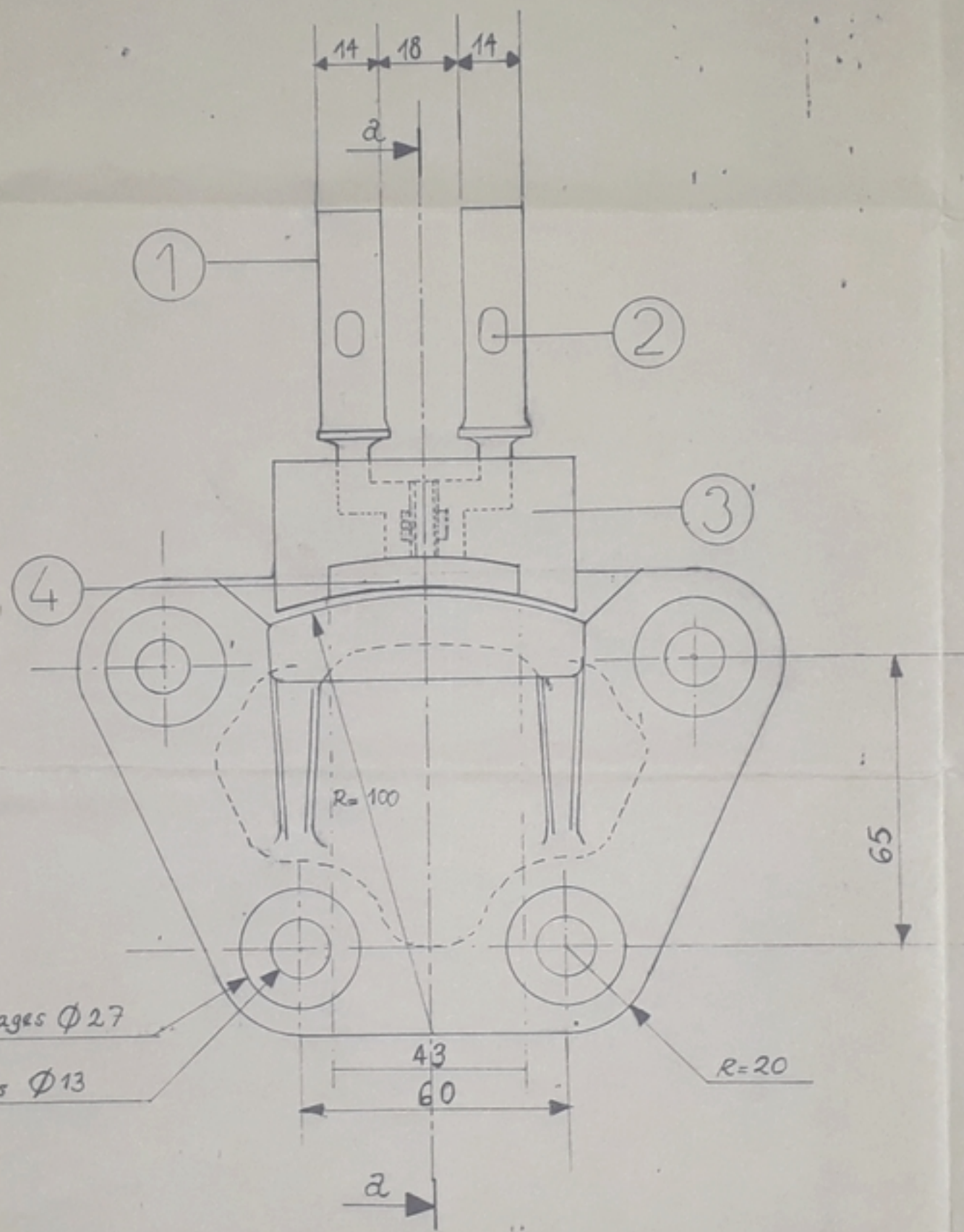
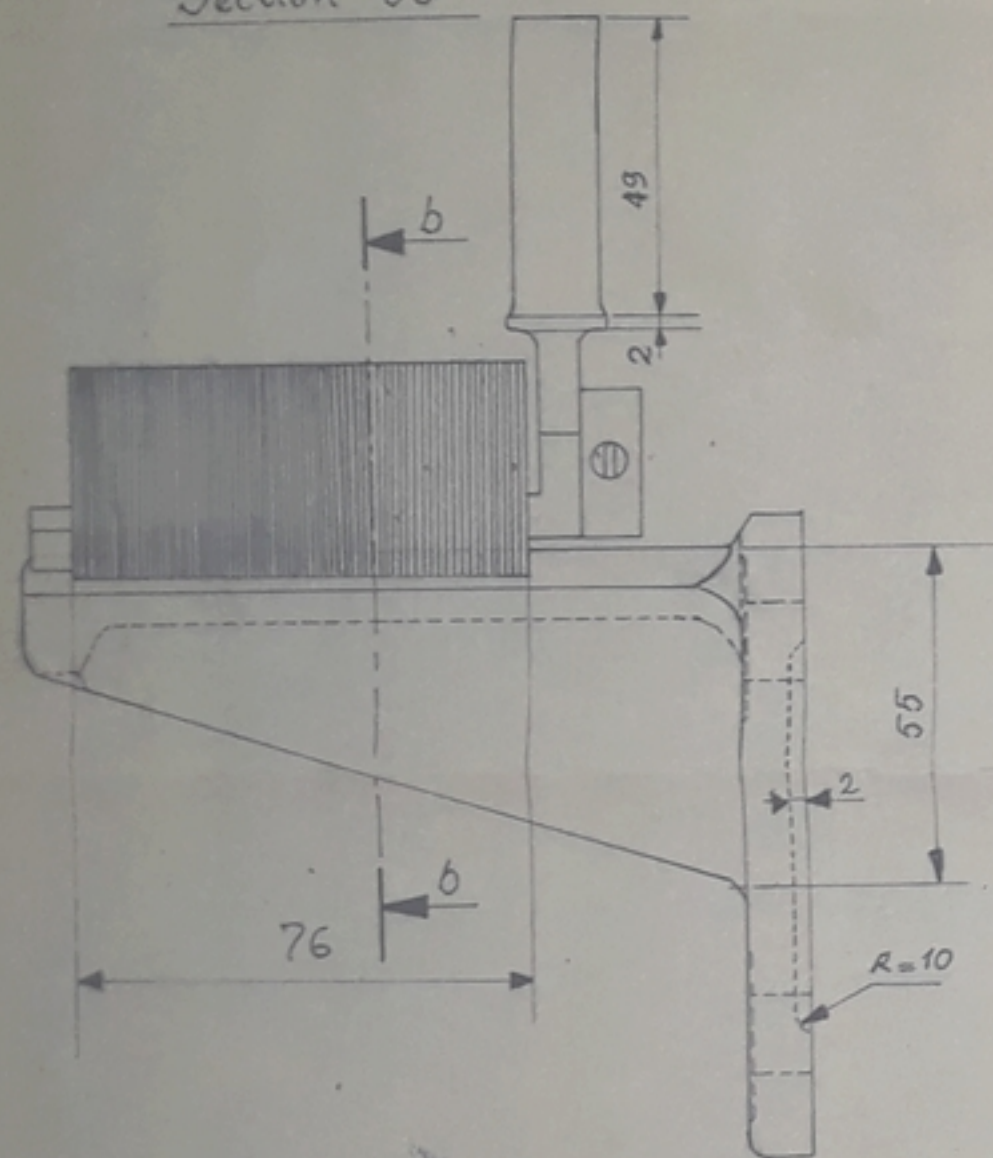
PLANCHE 1

4	Eau pour la douche
3	Douche
2	Eau pour refroidir l'inducteur
1	Embranchement (Electricité)

Ecole Nationale Polytechnique	
Echelle	INDUCTEUR POUR
Etudiant	CAME N° 192074
Promoteur	
Chef dept	Departement de Mines et Metallurgie

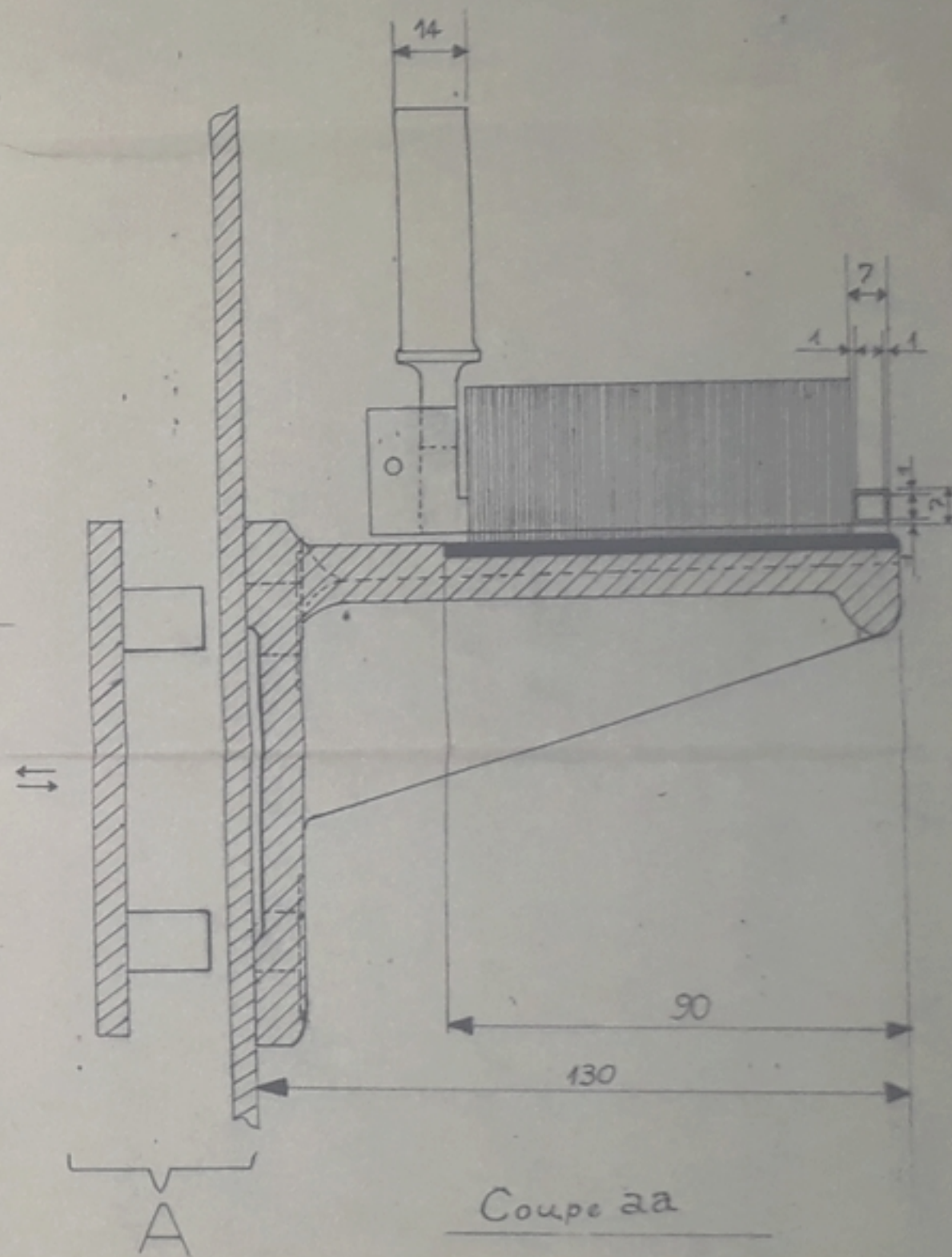


Section bb



4 lamages $\Phi 27$

4 trous $\Phi 13$



Coupe aa

- 1 Branchement (Electricité)
- 2 Entrée d'eau pour refroidir l'inducteur
- 3 Cavalier magnétique
- 4 Spire refroidie

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHEQUE

INDUCTEUR POUR

BUTEE N° 5.003.108

Echelle 1:1

Etudiant Belabbas

Promoteur Bouabdallah

Chef dep. Saâda

PL00185

PLANCHE 2

Département de Mines et Métallurgie

