

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du Diplôme de Master
Spécialité : Ingénierie des matériaux et des surfaces (IMS)

Optimisation des paramètres opératoires d'un chauffage par induction

Proposé et encadré par :
PR. N. Bacha

Réalisé par :
Brahmia Mohammed Akram
Bouhouhou Ihab

Année universitaire 2023/2024

Remerciement

Tout d'abord, nous remercions le Dieu, notre créateur de nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.

Nous remercions profondément nos très chers parents qui se sont donnés beaucoup de peine dans la vie pour notre réussite, nous souhaitons que Dieu les protège et leur donne la santé et la vigueur.

Donc dans ce cadre nous adressons nos remerciements :

A monsieur Dr : Bacha Nacer, notre encadreur pour ses remarques et conseils qu'ils nous ont aidé énormément.

Nous remercions du fond du cœur, tous les enseignants du département de génie mécanique.

Les membres de jury d'avoir accepté de juger ce modeste travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A Mon Père qui m'a toujours guidé et soutenu

A Ma Mère qui a été toujours à mes côtés

A toute la Famille

A tous Mes amis Sans exception

A tous mes amis de Faculté de Technologie

ملخص

يعد تحسين معلمات التشغيل للتدفئة الحثية أمرًا بالغ الأهمية لزيادة كفاءة الطاقة إلى الحد الأقصى ، وتحسين جودة المنتجات النهائية وتقليل تكاليف التشغيل. تشمل المعلمات الرئيسية التي يجب مراعاتها الطاقة المطبقة ، وتواتر التيار ، ووقت التسخين ، والمسافة بين الملف والمادة ، وكذلك التكوين الهندسي للشريط المتحور نفسه. تؤثر كل من هذه المعلمات بشكل مباشر على توزيع الحرارة ، وتحولات الطور في المادة والخصائص الميكانيكية النهائية للمنتج ، مثل الصلابة ، ومقاومة التآكل والمتانة.

تم إجراء تبريد الماء على العينات المسخنة بالحث على أنواع مختلفة من الفولاذ الكربوني وفولاذ الأدوات من أجل تقييم استجابتها للمعالجات الحرارية التي خضعت لها. تم استخدام الفحص المجهرى الضوئي وصلابة روكويل لتوصيف العينات بعد التسخين بالحث.

أظهرت النتائج أن تصميم الأشرطة المتحورة له أهمية قصوى. كل قطعة ذات شكل معين تحتاج إلى شريط متحور يتناسب مع شكلها وحجمها. إن التحكم في قوة التسخين ووقت الانتظار يجعل من الممكن تحسين الخواص الميكانيكية للجزء بطريقة فعالة وسريعة.

Résumé

L'optimisation des paramètres opératoires du chauffage par induction est cruciale pour maximiser l'efficacité énergétique, améliorer la qualité des produits finis et réduire les coûts opérationnels. Les principaux paramètres à considérer incluent la puissance appliquée, la fréquence du courant, la durée de chauffage, la distance entre le serpentin et le matériau, ainsi que la configuration géométrique du serpentin lui-même. Chacun de ces paramètres influence directement la distribution de la chaleur, les transformations de phase dans le matériau et les propriétés mécaniques finales du produit, telles que la dureté, la résistance à l'usure et la ténacité.

Des trempes à l'eau sur les éprouvettes chauffées par induction ont été réalisées sur différents acier au carbone et acier outil afin d'apprécier leur réponse aux traitements thermiques subis. La microscopie optique, la dureté Rockwell ont été utilisées pour caractériser les éprouvettes après chauffage par induction.

Les résultats ont montré que la conception des serpentins est d'une importance capitale. Chaque pièce ayant une forme particulière nécessite un serpentin adapté à sa forme et à sa taille. Le contrôle de la puissance de chauffe et le temps de maintien permettent d'optimiser les propriétés mécaniques de la pièce d'une manière efficace et rapide.

Abstract

Optimizing the operating parameters of induction heating is crucial to maximize energy efficiency, improve the quality of finished products and reduce operational costs. The main parameters to consider include the applied power, the frequency of the current, the heating time, the distance between the coil and the material, as well as the geometric configuration of the coil itself. Each of these parameters directly influences the heat distribution, phase transformations in the material and the final mechanical properties of the product, such as hardness, wear resistance and toughness.

Water quenchants on the induction-heated test pieces were carried out on different carbon steel and tool steel to assess their response to the heat treatments undergone. Optical microscopy and Rockwell hardness were used to characterize the specimens after induction heating.

The results showed that the coil design is of paramount importance. Each piece with a particular shape requires a coil adapted to its shape and size. The control of the heating power and the holding time allow to optimize the mechanical properties of the part in an efficient and fast way.

Sommaire

Sommaire.....	
Liste des figures.....	
Liste des tableaux.....	
Introduction générale.....	1

Chapitre 1 Chauffage par induction

Chapitre I : Chauffage par induction	2
I.1 Introduction	3
I.1 Introduction	4
I.1 Introduction	5
1.2 Histoire	5
1.3 Les types des bobine.....	9
1.3 Les types des bobine.....	10
1.3 Les types des bobine.....	11
1.3 Les types des bobine.....	12

Chapitre 2 Procédures expérimentales

2.1 Introduction	16
2.2 Matériaux.....	16
2.3 Chauffage à l'induction.....	19
2.3 Chauffage à l'induction.....	20
2.3 Chauffage à l'induction.....	21
2.3 Chauffage à l'induction.....	22
2.4 Les étapes de fabrication d'un couteau fait d'acier de Bohler K100....	23

Chapitre 3 : Résultats de l'expérience

Chapitre 3 : Résultats de l'expérience.....	24
3.1 Chauffage à l'induction	25

3.2 Effet de peau	25
3.2 Effet de peau	26
3.3 Acier au carbone A60.....	26
3.3.1 L'effet de temps.....	26
3.3.1 L'effet de temps.....	27
3.3.1 L'effet de temps.....	28
3.3.1 L'effet de temps.....	29
3.3.1 L'effet de temps.....	30
3.3.1 L'effet de temps.....	31
3.3.1 L'effet de temps.....	32
3.3.1 L'effet de temps.....	33
3.3.1 L'effet de temps.....	34
3.3.2 L'effet de la puissance.....	35
3.3.2 L'effet de la puissance.....	36
3.3.2 L'effet de la puissance.....	37
3.3.2 L'effet de la puissance.....	38
3.3.3 L'effet de la mass.....	39
3.3.4 L'effet du serpentini.....	39
3.4 Chauffage par induction des aciers alliés.....	41
3.4 Chauffage par induction des aciers alliés.....	42
3.4 Chauffage par induction des aciers alliés.....	43
3.4 Chauffage par induction des aciers alliés.....	44
3.4 Chauffage par induction des aciers alliés.....	45
3.4 Chauffage par induction des aciers alliés.....	46
Conclusion générale	47
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE.....	48

Liste des figures

Figure 1.1 : Bobine d'induction

Figure 1.2 : Hystérésis magnétique

Figure 1.3 : L'effet de la fréquence haute et la fréquence basse sur l'échauffement d'un acier

Figure 1.4 : Bobine hélicoïdale multi-tours

Figure 1.5 : Bobine à un tour

Figure 1.6 : Bobine hélicoïdale à Positions Multiples

Figure 1.7 : Bobine de canal

Figure 1.8 : Bobine à canal incurvé

Figure 1.9 : Bobine de Pancake

Figure 1.10 : Bobine à hélicoïdale fendue

Figure 1.11 : Bobine interne

Figure 1.12 : Bobine de plaque concentratrice

Figure 1.13 : Bobine et convoyeur

Figure 1.14 : Bobine d'épingle à cheveux

Figure 2.1 : Courbe TTT de l'acier A60

Figure 2.2 : Diagramme TRC pour l'acier A60

Figure 2.3 : Courbe TTT de l'acier outil K100

Figure 2.4 : Courbe TRC de l'acier outil K100

Figure 2.5 : Source d'alimentation

Figure 2.6 : Bobine d'induction

Figure 2.7 : Barreau d'acier soumis au chauffage par induction

Figure 2.8 : Refroidisseur d'eau à température contrôlée.

Figure 2.9 : Thermomètre infra rouge

Figure 2.10 : Duromètre Rockwell.

Figure 2.11 : Microscope optique.

Figure 2.4 : Couteau fait d'acier K100

Figure 3.1 : Schéma de principe du chauffage lors du surfaçage par induction

Figure 3.2 : Serpentin choisi pour le chauffage inductif de l'acier A60

Figure 3.3 : Bouton de sélection de la puissance

Figure 3.4 : Effet du temps de chauffage sur l'étendue de chauffe de l'acier A60 (puissance 17 KW)

Figure 3.5 : Evolution de température en fonction du temps de maintien de l'A60 (P=17 KW)

Figure 3.6 : Evolution de la température en fonction de l'écart de chauffe (P=17 KW)

Figure 3.7 : Chauffage par induction de l'A60 avec 30 sec de maintien (P =17kW).

Figure 3.8 : Chauffage par induction de l'A60 avec 40 sec de maintien (P =17kW).

Figure 3.9 : Chauffage par induction de l'A60 avec 60 sec de maintien (P =17kW).

Figure 3.10 : Chauffage par induction de l'A60 avec 70 sec de maintien (P =17kW).

Figure 3.11 : Chauffage inductif de l'acier A60 chauffé durant 70 sec, à 12 cm du bout de barreau (Puissance = 17 KW)

Figure 3.12 : Chauffage inductif de l'acier A60 chauffé durant 70 sec, à 7.7 cm du bout de barreau (Puissance = 17 KW)

Figure 3.13 : Chauffage inductif de l'acier A60 chauffé durant 70 sec, à 6 cm du bout de barreau (Puissance = 17 KW)

Figure 3.14: Variation des degrés de chauffage en fonction de la puissance

Figure 3.15 : Chauffage par induction de l'A60 avec 20 sec de maintien (P =4.8 kW).

Figure 3.16 : Chauffage par induction de l'A60 avec 30 sec de maintien (P =4.8 kW).

Figure 3.17 : Chauffage par induction de l'A60 avec 20 sec de maintien (P =23.8 kW).

Figure 3.18 : Chauffage par induction de l'A60 avec 30 sec de maintien (P =23.8 kW).

Figure 3.20 : Influence du design du serpentín sur le chauffage par induction.

Figure 3.21: Variation des degrés de chauffage en fonction du temps de maintien pour l'acier K100 (P = 17 kW)

Figure 3.22 : Chauffage par induction du K100 avec 20 sec de maintien (P =17 kW).

Figure 3.23 : Chauffage par induction du K100 avec 30 sec de maintien (P =17 kW).

Figure 3.24 : Chauffage par induction du K100 avec 45 sec de maintien (P =17 kW).

Figure 3.25 : Chauffage par induction du K100 avec 55 sec de maintien (P =17 kW).

Figure 3.26 : Chauffage par induction du K100 avec 64 sec de maintien (P =17 kW).

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Composition chimique de l'acier A60

Tableau 2.2 : Composition de l'acier outil K100

Tableau 3.2.1.1 : Variation des degrés de chauffage en fonction du temps de maintien pour l'acier A60 pour $P = 17 \text{ KW}$

Tableau 3.19: Effet de la puissance de chauffe et du temps de maintien en fonction de la masse de l'échantillon

INTRODUCTION

Le chauffage par induction est une technologie révolutionnaire utilisant l'induction électromagnétique pour chauffer des matériaux conducteurs, tels que les métaux, sans contact direct. Cette méthode rapide, précise et efficace est idéale pour diverses applications, incluant les processus industriels, le travail des métaux et les plaques de cuisson à induction.

Le principe est simple : un courant alternatif (AC) traverse une bobine, généralement en cuivre, créant un champ magnétique alternatif autour de celle-ci. Lorsqu'un matériau conducteur, comme une pièce métallique ou une casserole sur une plaque de cuisson à induction, se trouve dans ce champ magnétique, des courants de Foucault sont induits dans le matériau. Selon la loi de Faraday sur l'induction électromagnétique, la force électromotrice (FEM) induite est proportionnelle à la variation du flux magnétique. Les courants de Foucault circulent en boucles fermées à l'intérieur du matériau et rencontrent une résistance électrique, convertissant ainsi l'énergie électrique en énergie thermique (chaleur). Cette chaleur est générée directement dans le matériau, rendant le processus hautement efficace. La possibilité de ne pas apporter la chaleur de l'extérieur présente des avantages évidents, notamment en matière d'économies d'énergie.

Nous avons entamé dans ce projet l'étude des paramètres opératoires qui régissent le chauffage par induction de pièces métalliques

Chapitre 1

Chauffage par induction

1.1 Introduction

Le chauffage par induction a pris sa place en tant qu'outil industriel moderne, et de nombreux produits familiers de l'industrie d'aujourd'hui dépendent, dans une certaine mesure, de lui. Les automobiles, les avions, les équipements de terrassement, les tracteurs, les munitions, les téléviseurs, les moteurs diesel et de nombreux autres articles contiennent des pièces qui ont été chauffées par induction à un certain stade de leur fabrication. Le but du chauffage par induction peut être de durcir une pièce, et ainsi de prévenir l'usure ; de rendre le métal plastique pour le forgeage ou le formage à chaud dans une forme désirée ; de braser ou souder deux pièces ensemble ; de fondre et mélanger les ingrédients qui entrent dans les alliages à haute température qui rendent possible les moteurs à réaction ; ou pour un nombre quelconque d'autres applications. Cependant, le chauffage par induction n'est pas une solution universelle. Certes, il y a des travaux qui peuvent être mieux réalisés par induction que par toute autre méthode. Il y a certaines choses qui sont faites tous les jours par induction que nous ne savons pas faire du tout par d'autres méthodes. L'induction doit soit se tenir sur ses propres mérites de manière compétitive, soit ne pas être utilisée. Elle doit soit coûter moins cher, soit avoir un autre avantage remarquable par rapport à d'autres méthodes possibles. Et il y a des applications où le chauffage par induction est définitivement inférieur. Aujourd'hui, il est pris pour acquis que les personnes clés dans les usines industrielles auront une certaine familiarité avec le chauffage par induction - ce qu'il peut et ne peut pas faire.

Le chauffage par induction est une méthode rapide, efficace, précise et reproductible de chauffage sans contact pour les métaux ou autres matériaux conducteurs d'électricité. Un système de chauffage par induction comprend une alimentation électrique qui convertit le courant du réseau en courant alternatif, le transmet à une tête de travail et à une bobine de travail créant un champ électromagnétique à l'intérieur de la bobine. La pièce à travailler est placée dans la bobine où ce champ induit un courant dans la pièce, générant ainsi de la chaleur.

La bobine, qui est refroidie à l'eau et froide au toucher, est placée autour ou à côté de la pièce à travailler. Elle ne touche pas la pièce, et la chaleur est uniquement générée par le courant induit circulant dans la pièce.

Le matériau de la pièce à travailler peut-être un métal tel que l'acier, le cuivre, l'aluminium ou le laiton, ou il peut s'agir d'un semi-conducteur tel que le carbone, le graphite ou le carbure de silicium. Pour chauffer des matériaux non conducteurs tels que les plastiques ou le verre, l'induction peut chauffer une pièce électriquement conductrice, typiquement du graphite, qui transfère ensuite la chaleur au matériau non conducteur. [1]

Le chauffage par induction est utilisé dans des processus où les températures vont de 100 °C à 3000°C. Il peut être utilisé dans des processus de chauffage brefs qui durent moins d'une demi-seconde et dans des processus de chauffage qui durent des mois.

Le chauffage par induction est utilisé dans la cuisson domestique et commerciale, et dans de nombreuses applications telles que la fusion, le traitement thermique, le préchauffage

pour le soudage, le brasage, le soudage tendre, le durcissement, le scellage, l'ajustement par rétrécissement dans l'industrie, et dans la recherche et le développement.

Le chauffage par induction est particulièrement utile là où des opérations hautement répétitives sont effectuées. Une fois qu'une machine de chauffage par induction est correctement ajustée, pièce après pièce est chauffée avec des résultats identiques. Habituellement, aucune autre attention de la part de l'opérateur n'est requise, à part le chargement et le déchargement des pièces. La capacité du chauffage par induction à chauffer successivement des pièces de manière identique signifie que le processus est adaptable à une opération complètement automatique, où les pièces sont chargées et déchargées mécaniquement sans présence d'opérateur. Le chauffage par induction a rendu possible la localisation d'opérations, telles que le durcissement, dans les lignes de production avec d'autres outils de machine au lieu d'être dans des départements séparés et éloignés. Cela économise le temps de transport des pièces d'une partie de l'usine à une autre. Le chauffage par induction est propre ; il ne dégage pas de chaleur désagréable. Par conséquent, les conditions de travail autour des machines de chauffage par induction sont bonnes et comparables à celles autour d'autres outils de machine de métallurgie modernes. Elles ne dégagent pas la fumée et la saleté qui sont parfois associées aux départements de traitement thermique et aux ateliers de forge. Une autre caractéristique souhaitable du chauffage par induction est sa capacité à chauffer seulement une petite partie d'une pièce. Par exemple, dans la formation des extrémités des rotules utilisées dans les liaisons de direction des automobiles, il n'est pas nécessaire de chauffer toute la pièce. Seule l'extrémité à former est chauffée à la température de forgeage rouge vif. Elle est ensuite poussée dans une machine de forgeage, connue sous le nom « d'upsetter », où l'extrémité ronde est formée en 4 ou 5 coups. Pendant ce temps, une autre pièce est chauffée et est prête pour les opérations de formage. Il y a de nombreuses autres applications de haute production du chauffage par induction. Toutes les applications de chauffage par induction ne sont pas automatiques et n'impliquent pas une haute production. Un exemple est l'utilisation répandue de l'induction pour la fusion. Des alliages spéciaux, à la fois ferreux et non ferreux, sont brassés dans des fours de fusion par induction. La flexibilité et la propreté de la fusion par induction ne peuvent pas être dupliquées par les méthodes conventionnelles des aciéries et des fonderies.

Même si vous n'avez pas d'expérience directe avec les machines de chauffage par induction dans une usine industrielle, vous avez peut-être observé des preuves du processus de nombreuses fois - par exemple, le chauffage causé par les pertes magnétiques dans les noyaux de transformateurs et dans les laminations de moteur. Ce type de chauffage par induction est indésirable, et les concepteurs électriques font tout leur possible pour le décourager. Cependant, une industrie entière a été construite autour de l'utilisation ingénieuse et bénéfique d'un phénomène qui avait auparavant été considéré strictement indésirable.

Le chauffage par induction est souvent confondu avec le chauffage diélectrique par des personnes qui savent seulement que les deux processus impliquent une puissance électrique à haute fréquence. Mais il y a une grande différence entre le chauffage par induction et le

chauffage diélectrique. Chacun dépend de phénomènes électriques tout à fait différents. Le chauffage par induction est utile pour chauffer des matériaux conducteurs et dépend d'un champ magnétique variable ; mais le chauffage par induction ne nécessite pas toujours une haute fréquence. Le chauffage diélectrique, d'autre part, est utile pour chauffer des matériaux qui sont communément considérés comme non conducteurs. Il dépend des champs électriques à haute fréquence. Les fréquences utilisées sont généralement plus élevées (souvent beaucoup plus élevées) que celles utilisées dans le chauffage par induction. Le chauffage diélectrique est utilisé, par exemple, pour chauffer des préformes en plastique avant le moulage, sceller des pièces en plastique telles que des sacs à main et des jouets, sécher des noyaux de sable utilisés dans les fonderies, durcir la colle dans le contreplaqué, sécher des gâteaux de rayonne, et pour de nombreuses applications similaires. [1]

1.2 Histoire

L'histoire du chauffage par induction remonte à 1831, lorsque le scientifique britannique Michael Faraday découvre l'induction électromagnétique. Cependant, il faudra attendre 1891 pour voir la première application pratique de cette découverte avec le chauffage par induction utilisé pour la fusion des métaux.

Développements Clés

1950 : La société allemande Induktionserwärmung Fritz Düsseldorf GmbH (FDF) commercialise une machine universelle de trempe par induction, marquant le début d'une ère d'innovation industrielle dans ce domaine².

1981 : Un groupe d'ingénieurs norvégiens crée ELVA Induksjon AS, spécialisé dans les convertisseurs de fréquence pour le chauffage par induction, et lance la gamme Minac de convertisseurs de fréquence mobiles².

1991 : Une rencontre fortuite entre les directeurs généraux de FDF et d'ELVA ouvre la voie à la fusion des deux entreprises, combinant leurs forces pour explorer de nouvelles applications du chauffage par induction².

1996 : FDF et ELVA fusionnent pour devenir EFD Induction. La même année, IPT Technology devient le premier producteur européen de solutions pour la charge inductive sans fil et la transmission d'énergie sans contact².

2022 : EFD Induction et IPT Technology forment ENRX, un groupe de premier plan dans le domaine du chauffage par induction, de la charge inductive sans fil et de l'alimentation électrique sans contact pour la fabrication avancée et la mobilité. [2]

Les avantages du chauffage par induction

- Chauffage rapide
- Chauffage précis et reproductible
- Chauffage efficace
- Chauffage sûr car il n'y a pas de flamme
- Durée de vie prolongée des dispositifs de fixation grâce à un chauffage précis.

Comment fonctionne le chauffage par induction ?

Il est utile de commencer par les bases pour fournir une petite compréhension électrique.

L'induction crée un champ électromagnétique dans une bobine pour transférer de l'énergie à la pièce à chauffer. Lorsqu'un courant électrique passe le long d'un fil, un champ magnétique est créé autour de ce fil.

Lorsque le courant électrique change de direction (courant alternatif ou CA), le champ magnétique créé s'effondre et est créé dans la direction inverse, à mesure que le courant change de direction. Lorsqu'un second fil est placé dans ce champ magnétique alternatif, un courant alternatif est généré dans le second fil. Le courant dans le second fil est proportionnel au courant dans le premier fil et à l'inverse du carré de la distance entre eux.

Lorsque nous remplaçons le fil dans ce modèle par une bobine, le courant alternatif sur la bobine crée un champ électromagnétique et tandis que la pièce à chauffer est dans le champ, la pièce correspond au second fil et un courant alternatif est généré dans la pièce. La chaleur est générée dans la pièce en raison des pertes I^2R de la résistivité du matériau de la pièce. Cela s'appelle le chauffage par courants de Foucault.[3]

Comment fonctionne une bobine d'induction ?

La bobine de travail, montrée schématiquement dans la figure 1.1, est utilisée pour transférer de l'énergie à la pièce à l'aide d'un champ électromagnétique alternatif.

Le courant alternatif circulant dans la bobine génère le champ électromagnétique qui induit un courant circulant dans la pièce, en tant qu'image miroir du courant circulant dans la bobine de travail.

La bobine de travail, également connue sous le nom d'inducteur, est le composant dans le système de chauffage par induction qui définit à quel point et comment efficacement la pièce est chauffée.

Les bobines de travail varient en complexité d'une simple bobine hélicoïdale (ou solénoïde constitué d'un certain nombre de tours de tube de cuivre enroulé autour d'un mandrin) à une bobine usinée avec précision à partir de cuivre massif et brasée ensemble. [3]

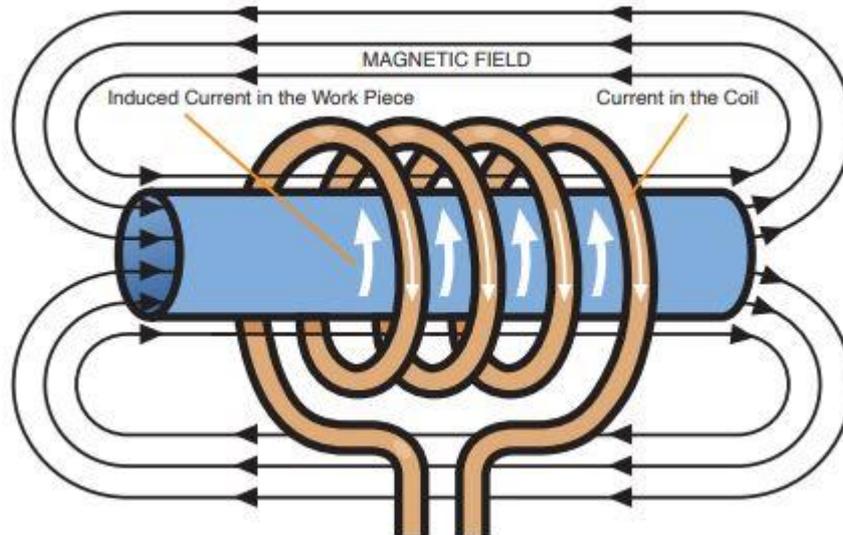


Figure 1.1 : Bobine d'induction [3]

Il existe deux méthodes de chauffage lors de l'utilisation de l'induction

Il y a deux méthodes de chauffage utilisées lors de l'induction :

Le chauffage par courants de Foucault, résultant des pertes I^2R dues à la résistivité du matériau de la pièce à travailler.

Le chauffage par hystérésis, où l'énergie est générée à l'intérieur de la pièce par le champ magnétique alternatif créé par la bobine, qui change la polarité magnétique de la pièce. Le chauffage par hystérésis se produit dans la pièce jusqu'à la température de Curie, moment où la perméabilité magnétique du matériau est réduite à 1 et le chauffage par hystérésis est minimisé. L'effet de chauffage par induction restant est dû au chauffage par courants de Foucault.

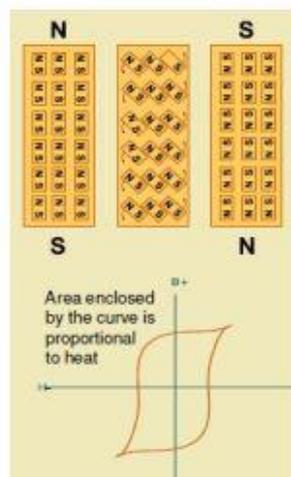


Figure 1.2 : Hystérésis magnétique [3]

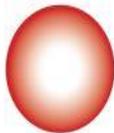
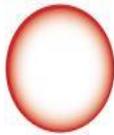
Qu'est-ce que la fréquence de résonance (Opératoire) ?

La fréquence de fonctionnement pour un système de chauffage par induction est dictée par la pièce à chauffer et le matériau dont elle est faite. Il est important d'utiliser un système d'induction qui délivre de la puissance sur la gamme de fréquences appropriée pour l'application.

Pour comprendre les raisons des différentes fréquences de fonctionnement, examinons une caractéristique connue sous le nom d'"effet de peau". Lorsque le champ électromagnétique induit un courant dans la pièce, celui-ci circule principalement à la surface de la pièce. Plus la fréquence de fonctionnement est élevée, plus la profondeur de pénétration (ou profondeur de peau) est faible ; plus la fréquence de fonctionnement est basse, plus la profondeur de pénétration est grande et l'effet de chauffage pénètre profondément.

La profondeur de pénétration dépend de la fréquence de fonctionnement, des propriétés du matériau et de la température de la pièce. Par exemple, dans le tableau ci-dessous, une barre d'acier de 20 mm peut être détendue par chauffage à 540 °C (1000 °F) en utilisant un système d'induction de 3 kHz. Cependant, un système de 10 kHz sera nécessaire pour durcir la même barre en la chauffant à 870 °C.

High frequency induction heating has a shallow skin effect which is more efficient for small parts.



Low frequency induction heating has a deeper skin effect which is more efficient for larger parts.

		Approximate smallest diameter for efficient heating at different induction frequencies			
Material	Temperature	1 kHz	3 kHz	10 kHz	30 kHz
Steel below curie	540 °C (1000 °F)	8.89 mm (0.35 in)	5.08 mm (0.20 in)	2.79 mm (0.11 in)	1.27 mm (0.05 in)
Steel above curie	870 °C (1600 °F)	68.58 mm (2.7 in)	38.10 mm (1.5 in)	21.59 mm (0.85 in)	9.65 mm (0.38 in)

Figure 1.3 : L'effet de la fréquence haute et la fréquence basse sur l'échauffement d'un acier [3]

En règle générale, le chauffage de petites pièces par induction nécessite des fréquences de fonctionnement plus élevées (souvent supérieures à 50 kHz), tandis que les pièces plus grandes sont chauffées plus efficacement avec des fréquences de fonctionnement plus basses.

Avec les alimentations électriques modernes à induction à semi-conducteurs dotées de systèmes de contrôle à microprocesseur intégrés, des processus de chauffage reproductibles et efficaces sont facilement réalisables tant que chaque pièce est placée de manière cohérente à l'intérieur de la bobine.

1.3 Les types des bobines

1.3.1. Bobine hélicoïdale multi-tours

L'hélice (solénoïde) est la bobine la plus courante et la plus efficace, le nombre de tours définissant la largeur du motif de chauffage. La pièce à usiner peut-être stationnaire dans la bobine pour fournir une bande de chauffage définie en "chauffage à un coup". "Ou, la pièce à usiner est déplacée à travers la bobine pour chauffer toute la pièce avec un motif de chauffage très uniforme appelé "chauffage par balayage." La figure 1.4 montre schématiquement une Bobine hélicoïdale multi-tours.

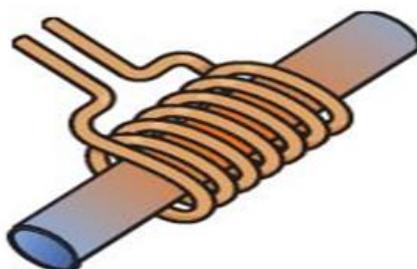


Figure 1.4 : Bobine hélicoïdale multi-tours [3]

1.3.2. Bobine à une spire

Les bobines à une spire (figure 1.5) sont idéales pour chauffer une bande étroite d'une pièce ou la pointe d'une pièce. Ces bobines peuvent également balayer la longueur d'une pièce et sont couramment utilisées pour le traitement thermique. Ces bobines sont souvent serrées contre la pièce pour fournir un motif thermique précis.

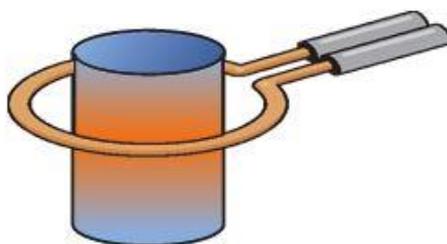


Figure 1.5 : Bobine à un tour [3]

1.3.3. Bobine hélicoïdale à Positions Multiples

Les bobines à positions multiples (figure 1.6) sont souvent utilisées pour produire plus de pièces en un temps donné tout en permettant le processus de chauffage complet. Pendant qu'une pièce est chauffée sur une position, l'autre bobine peut être déchargée et rechargée

pour le cycle de chauffage suivant. N'importe quel nombre de positions est possible, mais généralement jusqu'à 8 positions sont pratiques.

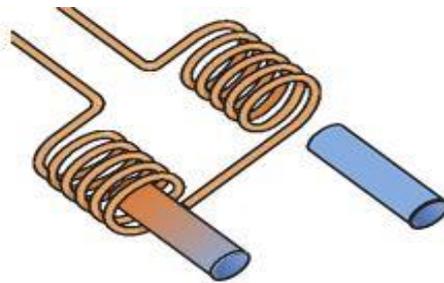


Figure 1.6 : Bobine hélicoïdale à Positions Multiples [3]

1.3.4. Bobine canal

Des bobines peuvent être formées de sorte que la pièce à usiner soit déplacée à travers le champ électromagnétique par un mécanisme de transport linéaire. La pièce est chauffée lorsqu'elle se déplace à travers la bobine de canal et la bobine peut être configurée pour chauffer toute la partie ou juste une seule bande. La figure 1.7 montre schématiquement un exemple de cette bobine.

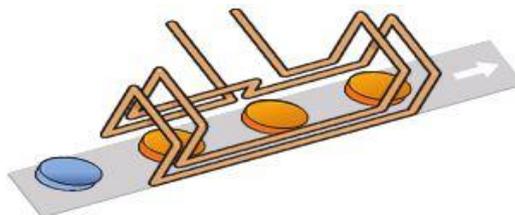


Figure 1.7 : Bobine de canal [3]

1.3.5 Bobine canal incurvée

Les bobines de canal sont souvent incurvées pour s'adapter à une table rotative et sont configurées pour occuper l'une des étapes d'un processus d'assemblage en plusieurs étapes

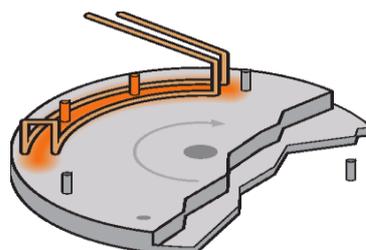


Figure 1.8 : Bobine à canal incurvé [3]

1.3.6. Bobine de Pancake

Les serpentins à Pancake (figure 1.9) sont utilisés lorsqu'il est nécessaire de chauffer la pièce d'un seul côté ou lorsqu'il n'est pas possible d'entourer la pièce.

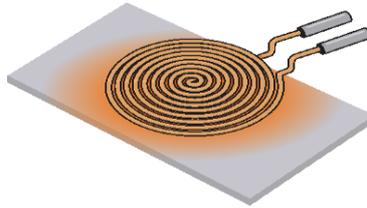


Figure 1.9 : Bobine de Pancake [3]

1.3.7. Bobine hélicoïdale Fendue

Des bobines hélicoïdales divisées à un ou plusieurs tours (figure 1.10) sont utilisées lorsqu'il n'est pas possible d'accéder à la zone de chaleur à l'aide d'une bobine hélicoïdale.



Figure 1.10 : Bobine à hélicoïdale fendue [3]

1.3.8 Bobine Interne

Les alésages internes (figure 1.11) peuvent être chauffés à l'aide de bobines internes à un ou plusieurs tours.

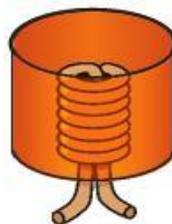


Figure 1.11 : Bobine interne [3]

1.3.9. Bobine de plaque Concentratrice

Les plaques concentratrices (figure 1.12) sont utilisées dans des bobines à un ou plusieurs tours pour concentrer le courant de la bobine afin de produire un effet de chauffage défini dans la pièce à usiner.

Ces bobines peuvent également avoir une bobine maîtresse avec des inserts conçus pour chauffer des pièces de formes différentes.

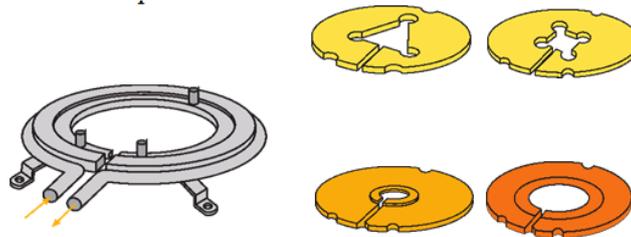


Figure 1.12 : Bobine de plaque concentratrice [3]

1.3.10. Bobines et Convoyeurs

De nombreuses pièces sont chauffées pendant leur transport par un système de convoyage. Tant que le matériau du convoyeur n'est pas électriquement conducteur, le champ magnétique passera à travers le convoyeur et chauffera la pièce à travailler lors de son passage à travers le champ. La figure 1.13 montre un exemple de bobines et convoyeur.

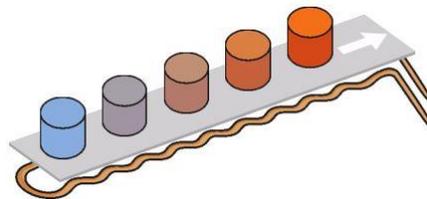


Figure 1.13 : Bobine et convoyeur [3]

1.3.11 Bobine d'épingle à Cheveux

Une longue bobine mince à un ou plusieurs tours est utilisée pour chauffer une longue zone mince sur une pièce, ou pour chauffer une bande mobile d'acier mince ou d'aluminium.



Figure 1.14 : Bobine d'épingle à cheveux [3]

La fréquence et la puissance utilisé dans le chauffage par induction :

La fréquence moyenne utilisée dans le chauffage par induction varie considérablement en fonction de l'application, de la taille de la pièce et des propriétés du matériau. Pour les pièces plus petites, des fréquences de fonctionnement plus élevées sont souvent nécessaires, qui peuvent être supérieures à 50 kHz. Pour les pièces plus grandes, des fréquences de fonctionnement plus basses sont plus efficaces, pouvant aller de 1 kHz à 10 kHz. [4]

Dans les applications industrielles, telles que le traitement thermique en métallurgie, les fréquences peuvent varier de 30 kHz à 5 kHz pour les matériaux plus épais.

Pour des applications telles que le durcissement superficiel, les fréquences peuvent varier de 5 kHz à 30 kHz en fonction de la profondeur de durcissement requise.

Pour le brasage par induction, la gamme de fréquences reste souvent comprise entre 15 et 300 kHz.

Pour les applications de fusion et de forgeage, la fréquence varie généralement de 3 kHz à 30 kHz. [5]

Dans le cas des machines de chauffage par induction à moyenne fréquence, qui sont utilisées pour de grands processus de revenu, de trempe et autres, la plage de fréquences est généralement comprise entre 1 kHz et 10 kHz.

Pour les pièces de très grande taille, telles que les billettes d'un diamètre compris entre 200 et 240 mm, les basses fréquences (50-120 Hz) peuvent convenir.

La puissance de sortie typique d'un système de chauffage par induction varie de 2 kW à 500 kW. [6]

Cette plage peut varier en fonction de l'application spécifique et de la taille des pièces chauffées. Pour les petites pièces et les applications telles que le durcissement par induction d'une soupape de moteur, des réchauffeurs à induction avec une plage de puissance de 2,5 kW à 40 kW sont utilisés, tandis que pour les composants de taille moyenne à grande et les applications comme le forgeage par induction, la plage de puissance comprend généralement 50 kW à 500 kW.

Pour les tables de cuisson à induction, un brûleur à induction typique consomme de 1500 à 3000 watts lorsqu'il fonctionne à puissance maximale. [7]

Cependant, la plupart des processus de cuisson utilisent des niveaux de puissance beaucoup plus faibles. Les exigences d'alimentation pour les tables de cuisson à induction peuvent également varier, la plupart nécessitant 30 à 40 ampères, ce qui indique la quantité maximale de courant que la table de cuisson peut tirer de l'alimentation électrique.

Il est important de noter que la puissance utilisée dans le chauffage par induction peut être influencée par plusieurs facteurs, notamment la fréquence de fonctionnement, les propriétés du matériau et la température de la pièce chauffée. Par exemple, chauffer une barre d'acier de 20 mm à 540 °C pourrait utiliser un système d'induction de 3 kHz, tandis que durcir la même barre à 870 °C nécessiterait un système de 10 kHz.[8]

L'énergie nécessaire pour chauffer une pièce donnée est exprimée par

$$W \times S \times T = \text{B.t.u} / \text{min.}$$

Où W = le poids du matériau,

S = le coefficient de chaleur spécifique du matériau

T = l'élévation de température nécessaire.

Cette formule ne tient pas compte des pertes de chaleur normales, qui peuvent aller de 25 à plus de 50 pour cent, mais en comparant la puissance approximative nécessaire avec la puissance disponible d'un générateur, il est possible de déterminer rapidement si l'équipement est approprié. [9]

Chapitre 2

Procédures expérimentales

2.1 Introduction

Dans cette partie du travail, nous décrivons brièvement les matériaux utilisés ainsi que les moyens employés pour leur traitement thermique et leurs caractérisations mécaniques et microstructurales.

2.2 Matériaux

Nous avons choisi deux matériaux de composition chimique différente, l'un un acier au carbone et l'autre un acier outil.

Pour l'acier au carbone, nous avons sélectionné l'acier A60 qui est l'équivalent d'un acier au carbone à 0.60 % C. C'est un acier hypoeutectoïde dont la courbe TTT est suffisamment à droite pour espérer éviter le nez de la transformation perlitique si on emploie un refroidissement suffisamment énergétique comme l'eau par exemple. La figure 2.1 montre la courbe TTT (Température Temps Transformation) de l'acier A60.

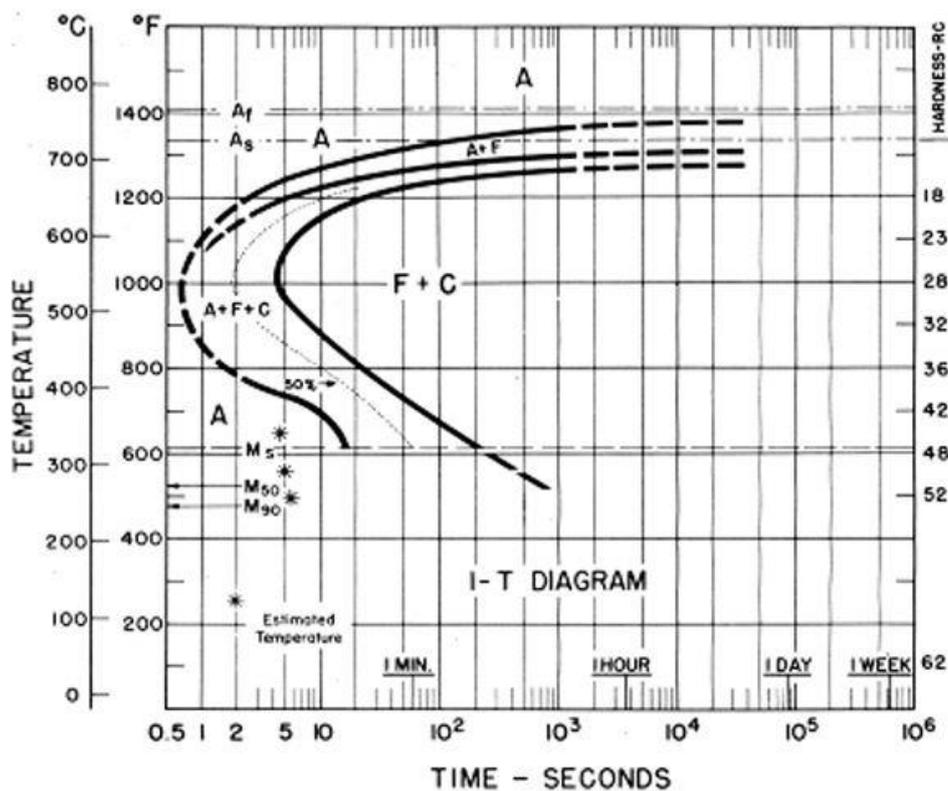


Figure 2.1 : Courbe TTT de l'acier A60 [10]

En refroidissant très rapidement (en plongeant l'acier dans l'eau), la température descend en dessous de la courbe de début de transformation sans atteindre les courbes de transformation de perlite ou bainite, ce qui conduit à la formation de martensite. La figure 2.2 montre la courbe TRC (Température en Refroidissement Continu) de l'acier A60. Le tableau 2.1 donne la composition nominale de l'acier A60.

Tableau 2.1 : Composition chimique de l'acier A60. [2]

C (%)	P (%)	S (%)	N (%)	Mn (%)	Cu (%)	Fe (%)
0.45 -0.60	0.055	0.055	0.014	1.70	< 0.45	Balance

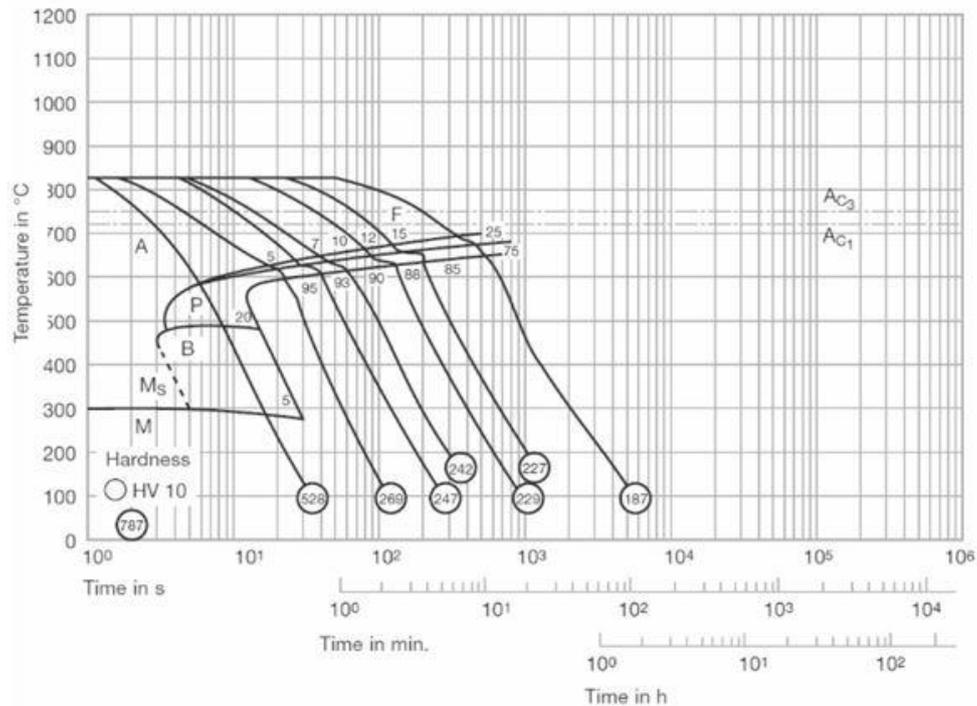


Figure 2.2 : Diagramme TRC pour l'acier A60 [10]

Pour l'acier outil, nous avons choisi l'acier K100 de Böhler, un acier outil à haute stabilité dimensionnelle. La composition nominale de l'acier donnée par la fiche technique du fabricant [19] est présentée au tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Composition de l'acier outil K100

C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Fe (%)
2.00	0.25	0.35	0.35	Balance

Les courbes TTT et TRC de l'acier outil K100 sont données respectivement aux figures 3 et 4. Dans le cas de l'acier outil K100, on remarque que les courbes TTT sont suffisamment à droite pour obtenir une trempe même à l'air.

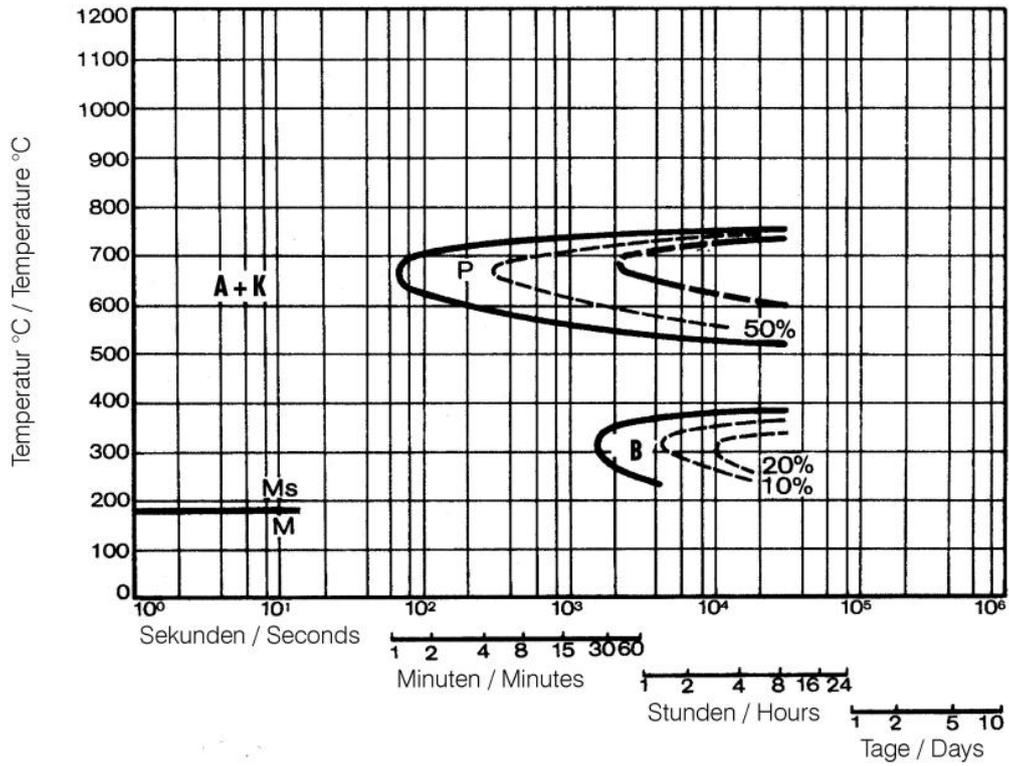


Figure 2.3 : Courbe TTT de l'acier outil K100 [11]

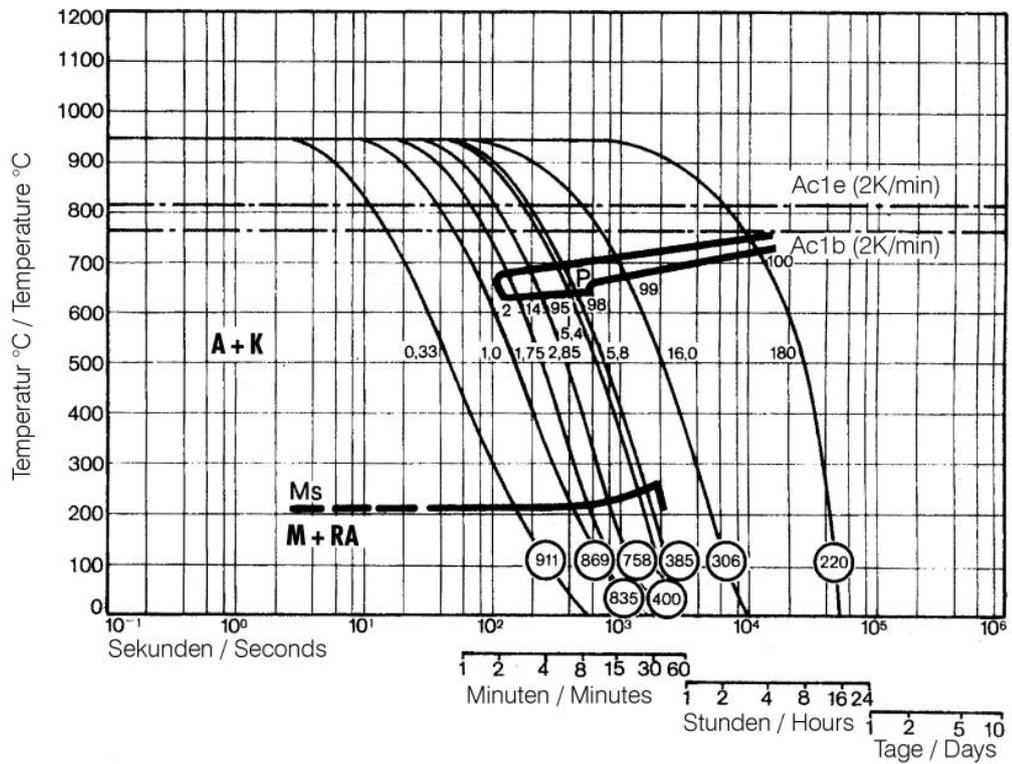


Figure 2.4 : Courbe TRC de l'acier outil K100 [11]

2.3 Chauffage à l'induction

Le traitement thermique des aciers a été réalisé à l'aide d'un chauffage par induction. La machine a une puissance de 25 KW et une puissance magnétique jusqu'à 15 Tesla. Le montage est composé d'une source d'alimentation, d'une bobine d'induction et d'un circuit de refroidissement à l'eau. Les principaux composants du système de chauffage par induction sont décrits ci-dessous.

2.3.1. Source d'alimentation (générateur de fréquence)

- Cette unité (figure 2.5) convertit le courant alternatif (CA) de la ligne électrique en courant à haute fréquence (HF) nécessaire pour le chauffage par induction.
- Elle génère un courant à haute fréquence qui est envoyé à la bobine d'induction.



Figure 2.5 : Source d'alimentation

2.3.2. Bobine d'induction

- Une bobine (ou inducteur) est faite (figure 2.6) de cuivre ou d'un autre matériau conducteur, souvent sous forme de spirale ou de forme adaptée à la pièce à chauffer.
- Elle permet de créer un champ magnétique oscillant autour de la pièce à chauffer lorsqu'un courant à haute fréquence passe à travers elle.



Figure 2.6 : Bobine d'induction

2.3.4. Pièce à chauffer (charge)

- Le matériau conducteur (généralement un métal) qui doit être chauffé par induction.
- Il absorbe l'énergie du champ magnétique, ce qui induit des courants de Foucault dans la pièce, générant ainsi de la chaleur. Un exemple est montré à la figure 2.7.



Figure 2.7 : Barreau d'acier soumis au chauffage par induction.

2.3.5. Circuit de refroidissement

- Un système de refroidissement par eau qui maintient la bobine d'induction et d'autres composants à une température optimale pour éviter la surchauffe.
- Il permet de dissiper la chaleur excessive générée par la bobine d'induction et d'autres composants électroniques.



Figure 2.8 : Refroidisseur d'eau à température contrôlée.

2.4. Mesure de la température

Durant le chauffage par induction, la température de la pièce à traiter était à l'aide d'un thermomètre infrarouge sans contact. Nous disposons de deux unités IR (infrarouge), une pour des plages de mesures allant de 0 à 550 °C et l'autre pour des plages de températures allant de 600 °C à 1600 °C. La figure 2.9 montre un thermomètre IR.



Figure 2.9 : Thermomètre infra rouge

2.5 Mesures de dureté

Afin de suivre l'évolution du changement microstructural de manière qualitative, nous avons pris des mesures de dureté sur la longueur des pièces traitées. Le duromètre Rockwell de Bohler, montré à la figure 2.10, a été utilisé à cette fin.



Figure 2.10 : Duromètre Rockwell.

2.6 Microscopie optique

Dans certaines situations, nous avons pris des micrographies de microstructures pour corrélérer la phase présente avec celle de la dureté. Un polissage métallographique a été opéré au préalable sur les éprouvettes d'essais avec des papiers abrasifs de 80, 220, 320, 400 et 600. Le polissage est achevé sur un feutre sur lequel un liquide chargé de particules d'alumine de 0.05 μm . La figure 2.11 montre un microscope optique.



Figure 2.11 : Microscope optique.

2.4 Les étapes de fabrication d'un couteau fait d'acier de Bohler K100 :

Nous découpons une colonne en acier K100 à l'aide d'une machine à découper en 3 morceaux d'une longueur de 10 cm. Ensuite, nous avons tracé de la lame et dessinez le contour du couteau sur la barre d'acier à l'aide d'une tronçonneuse

Ensuite nous avons réalisé le lame affûtage grossier utilisez une ponceuse à bande pour affiner les bords et obtenir un profil de lame plus précis.

Après nous avons polisse et lisser la surface de la lame à l'aide de papier abrasif de différents grains (de grossier à fin).

Ensuite, nous avons chauffé le couteau pendant 64 secondes utilisant un four d'un chauffage par induction et nous l'avons trempé dans l'eau pour le refroidir et obtenu une dureté élevée.

Enfin nous avons fait un autre polissage pour la lame avec des abrasifs fins ou un polissoir pour obtenir une finition lisse et brillante.



Figure 2.4 : Couteau fait d'acier K100 en forme biseautée

Chapitre 3

Résultats & Discussion

3.1 Chauffage à l'induction

Lors du surfaçage par induction, le chauffage et la fusion du métal d'électrode (d'apport) ainsi que le chauffage du métal de base sont effectués grâce à l'induction électromagnétique créée par le courant haute fréquence I_i de l'inducteur. En surface (figure 3.1), il y a deux sources d'énergie thermique :

- (1) Courants de Foucault I_e , apparaissant dans un circuit de conduction fermé d'une pièce métallique en raison du changement du flux magnétique ϕ_e .
- (2) Friction entre domaines magnétiques lorsque le métal est rapidement remagnétisé par un flux magnétique alternatif ϕ_e . Cet effet se produit exclusivement dans les métaux ferromagnétiques.

Des courants de Foucault se produisent sur la surface métallique. La densité de flux magnétique ϕ_e est également beaucoup plus élevée à la surface du métal. Par conséquent, lors du surfaçage par induction, la couche superficielle du métal est chauffée. Plus la fréquence du courant dans l'inducteur I_i est élevée, plus la couche de métal chauffée est fine.

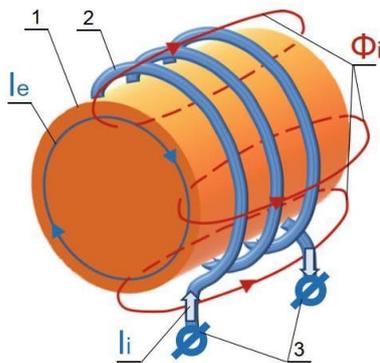


Figure 3.1 : Schéma de principe du chauffage lors du surfaçage par induction :
1 - noyau en cours de chauffage,
2-inducteur,
3-alimentation en courant [1]

Une fois le métal chauffé au-dessus du point de Curie (768 °C), la profondeur de pénétration des courants induits augmentera de 10 à 20 fois (en fonction de la fréquence). La répartition de la température dans le métal est uniforme. [1]

3.2 Effet de peau (profondeur de pénétration du courant)

La densité de courant diminue radialement du bord de la pièce vers l'intérieur. Cette diminution résulte de courants de Foucault qui se superposent et des résistances élevées qui en découlent à l'intérieur de la pièce.

Plus la fréquence est élevée, plus la couche superficielle traversée est fine. Dans les machines de chauffage par induction, les plages de fréquences sont :

- Basse fréquence 50 Hz à 500 Hz
- Fréquence moyenne 500 Hz à 50 kHz
- Haute fréquence 50 kHz à 27 MHz

Le processus, la profondeur de pénétration et le diamètre de la pièce déterminent le choix de la fréquence. La profondeur de pénétration ne doit pas dépasser $1/8$ du diamètre de la pièce, en fonction du processus. Malheureusement, dans notre cas, nous n'avons pas pu ni lire la fréquence ni choisir sa valeur.

Face à cette contrainte, nous n'avons d'autres choix que de choisir les paramètres opératoires suivants pour comprendre leur effet sur le chauffage inductif sur les aciers :

1. Puissance
2. Temps de chauffe
3. Choix du serpentin

Durant le chauffage des pièces, nous avons utilisé deux thermomètres infrarouge (IR), l'un avait une plage de mesure de 0° à 550°C et l'autre avait une plage de mesure de 600°C à 1600°C . Pour le premier thermomètre à faible intervalle, nous avons un pointrouge qui sortez du faisceau laser. Cela était très pratique pour nous car nous pouvionsle diriger à travers les spires de la bobine de cuivre. Par contre, pour le second thermomètre IR, il y avait deux faisceaux qui sortait de l'appareil, si bien qu'il était difficile pour nous de mesurer avec précision la température de la pièce lors du chauffage par induction car souvent un des points tombait sur le serpentin en cuivre et non pas sur la pièce chauffée.

3.3 Acier au carbone A60

3.3.1 L'effet de temps

Nous avons d'abord prospecté le chauffage par induction sur une barre d'acier au carbone A60. L'acier au carbone A60 que nous avons employé, contenait un pourcentage de manganèse assez élevé ce qui décalait ses courbes TTT vers la droite et permettait donc une transformation martensitique aisée lorsqu'il était refroidi rapidement à l'eau. Dans ces premières expériences, le serpentin utilisé dans ces opérations de chauffage était celui montré à la figure 3.2. Il avait une hauteur de 6 cm et un diamètre de 8 centimètres.

Le barreau d'acier A60 avait un diamètre de 4 cm et une longueur de 20 cm. La puissance de chauffage était fixée à 17 KW. Elle correspondait sur la machine à une position médiane de l'échelle qu'elle offrait sur l'appareil comme le montre la figure 3.3.



Figure 3.2 : Serpentin choisi pour le chauffage inductif de l'acier A60.



Figure 3.3 : Bouton de sélection de la puissance.

Pour une meilleure compréhension des résultats obtenus, le tableau 3.1 et la figure 3.4 donne regroupe les résultats du chauffage par induction de l'acier A60.

Ces premiers essais nous permis de sélectionner une puissance de 17 KW avec des temps de maintien variant de 20 à 70 secondes. Dans le tableau 3.1, les écarts de chauffe représentent la distance de début de l'apparition du rouge vers la fin de la disparition du rouge. Par rouge, nous entendons le chauffage inductif d l'acier A60. Nous constatons que ce 'rouge' commence à devenir 'blanc' à partir de 70 secondes de maintien.

Tableau 3.2.1.1 : Variation des degrés de chauffage en fonction du temps de maintien pour l'acier A60 pour P = 17 KW

Position	Temps de maintien (secondes)	Température (°C)	Ecart de chauffe
1	20 secondes	T= 545 °C	1.8
2	30 secondes	T= 662 °C	4.0
3	40 secondes	T= 686 °C	5.4
4	50 secondes	T= 711 °C	6.2
5	60 secondes	T= 735 °C	6.8
6	70 secondes	T= 770 °C	7.2

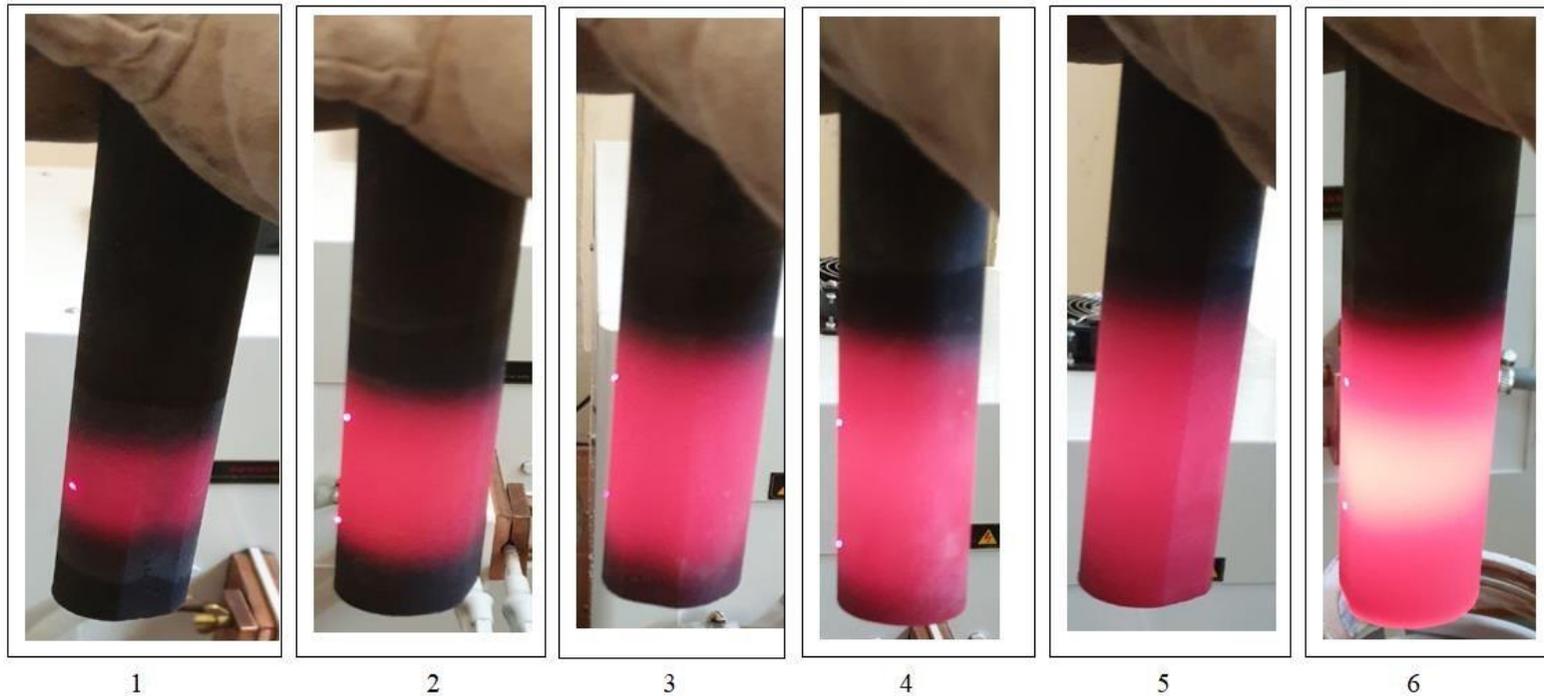


Figure 3.4 : Effet du temps de chauffage sur l'étendue de chauffe de l'acier A60 (puissance 17 KW)

Sur la figure 3.5 qui trace la montée en température de l'acier A60 en fonction du temps de maintien, nous remarquons que l'évolution de la température avec le temps est pratiquement linéaire. Ce phénomène était prévisible. Cependant, nous constatons qu'à partir de 70 secondes la couleur rouge de l'acier A60 vire au blanc en commençant par le centre. C'est là qu'il faut être attentif car un temps non contrôlé ou excessif conduira à une fusion partielle de l'éprouvette notamment au centre. Ceci montre que la conception du serpentin (longueur, diamètre et forme) doit être dictée par les besoins du client et des résultats attendus par le chauffage inductif. Cette étude doit être reprise en se concentrant sur la conception du serpentin, les techniques de sa fabrication ainsi que son positionnement vis-à-vis de la pièce à traiter.

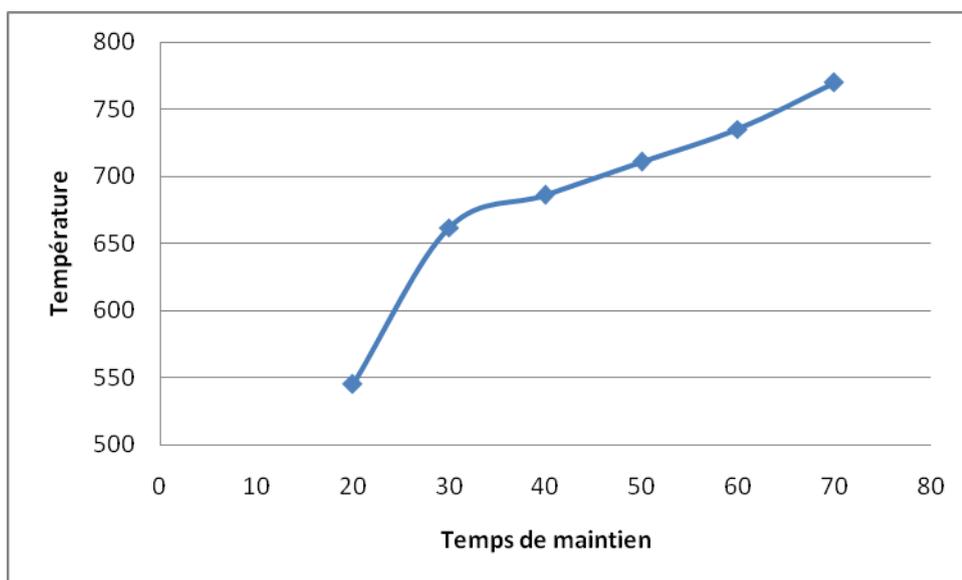


Figure 3.5 : Evolution de température en fonction du temps de maintien de l'A60 (P=17 KW)

Sur la figure 3.6 qui montre l'évolution de la température en fonction de l'écart de chauffe, nous remarquons que la tranche chauffée de la pièce évolue rapidement en fonction du temps de maintien. C'est quasiment une fonction monotone linéaire qui indique que pour une puissance donnée, la pièce chauffe d'abord en élargissant le rouge autour de la périphérie de la pièce ensuite vient le chauffage plus intense (couleur blanche) qui commence par le centre où est situé le serpentin.

Ces remarques sont très importantes car cela indique que la pièce chauffe d'abord uniformément puis il y a une augmentation rapide de la température qui commence au centre du serpentin et s'élargit rapidement vers toute la pièce. Une attention particulièrement doit être faite pour éviter une surchauffe et possiblement une fusion locale de la pièce.

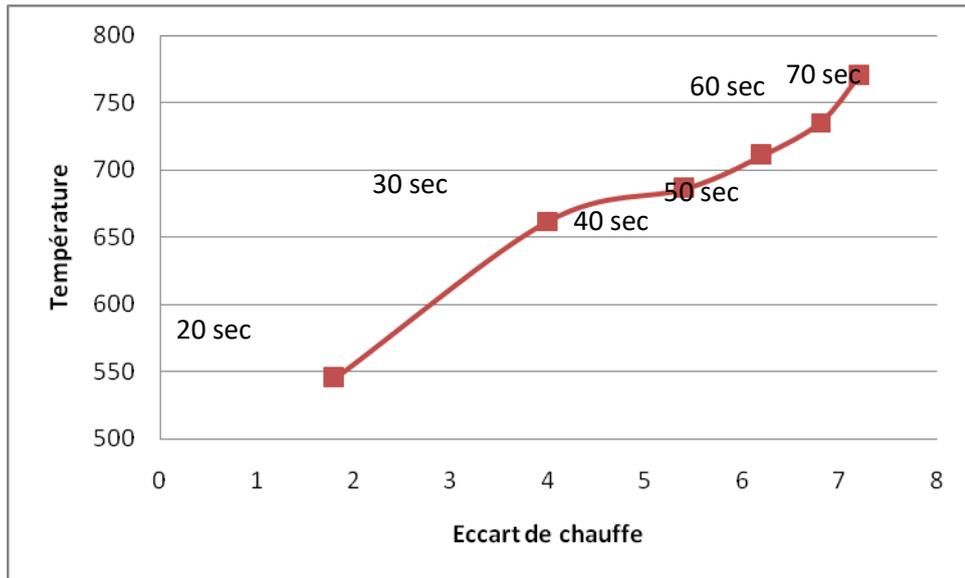


Figure 3.6 : Evolution de la température en fonction de l'écart de chauffe (P=17 KW)

Les premières constatations expérimentales permettent de dégager les observations suivantes et qui rejoignent prédites par la théorie :

- ✓ Un temps de maintien plus long permet à la chaleur de pénétrer plus profondément dans le matériau, assurant une température plus uniforme à travers l'épaisseur de l'acier. Cela peut être crucial pour des applications nécessitant une homogénéité thermique.
- ✓ Un temps de maintien trop court peut entraîner une surchauffe de la surface et une sous-chauffe du noyau, créant des gradients thermiques internes.

Dans les expériences suivantes, nous avons chauffé des barreaux d'acier A60 à une puissance de 17 KW avec différents temps de maintien. Nous avons pratiqué des méplats sur les éprouvettes et nous les avons polis avant le traitement thermique. Ceci a été fait pour faciliter la prise de mesure Rockwell après la trempe à l'eau. La trempe des éprouvettes a été faite immédiatement après le chauffage par induction. Les éprouvettes étaient plongées dans un bac d'eau suffisamment grand pour absorber toute la chaleur et assurer une trempe rapide uniforme. L'eau du bac était à chaque fois remplacé par une eau froide avant toute nouvelle trempe. Les figures 3.7, 3.8, 3.9 et 3.10 montrent les résultats de ces expériences de chauffage par induction des barreaux d'acier A60 pour des temps de maintien de 30, 40, 60 et 70 secondes respectivement à une puissance de chauffe de 17 KW. Les mesures de dureté HRC ont été pratiquées sur toute la longueur qui a été portée au rouge. Toutes les mesures en dessous de 20 HRC ne sont pas prises en compte car elles sont hors échelle.

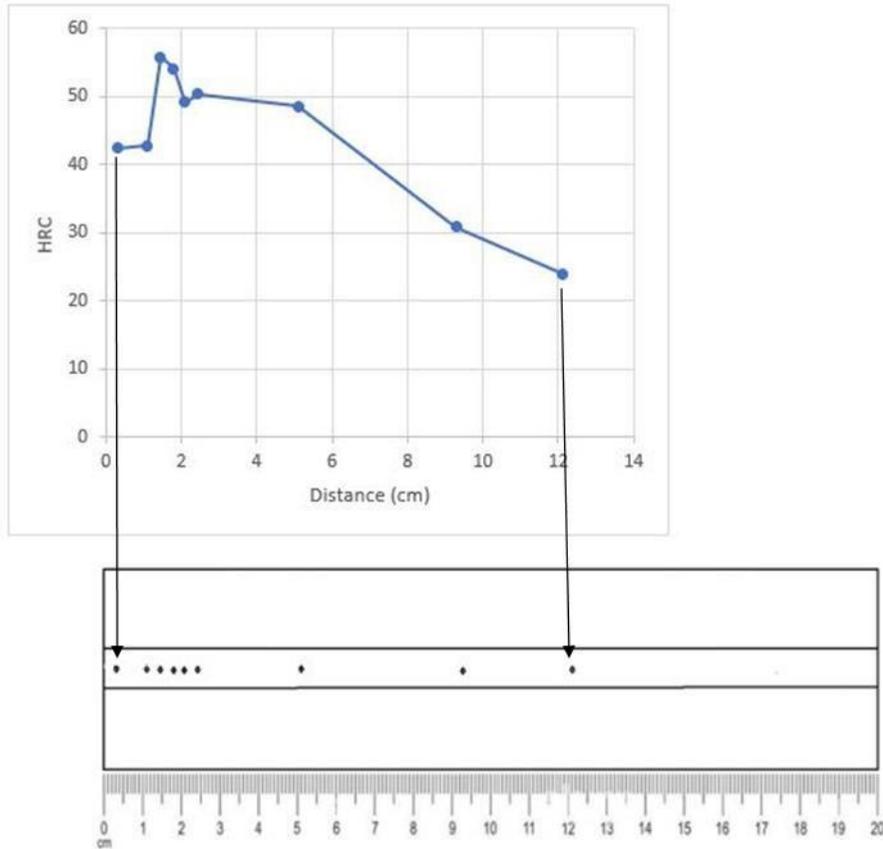


Figure 3.7 : Chauffage par induction de l'A60 avec 30 sec de maintien (P=17kW).

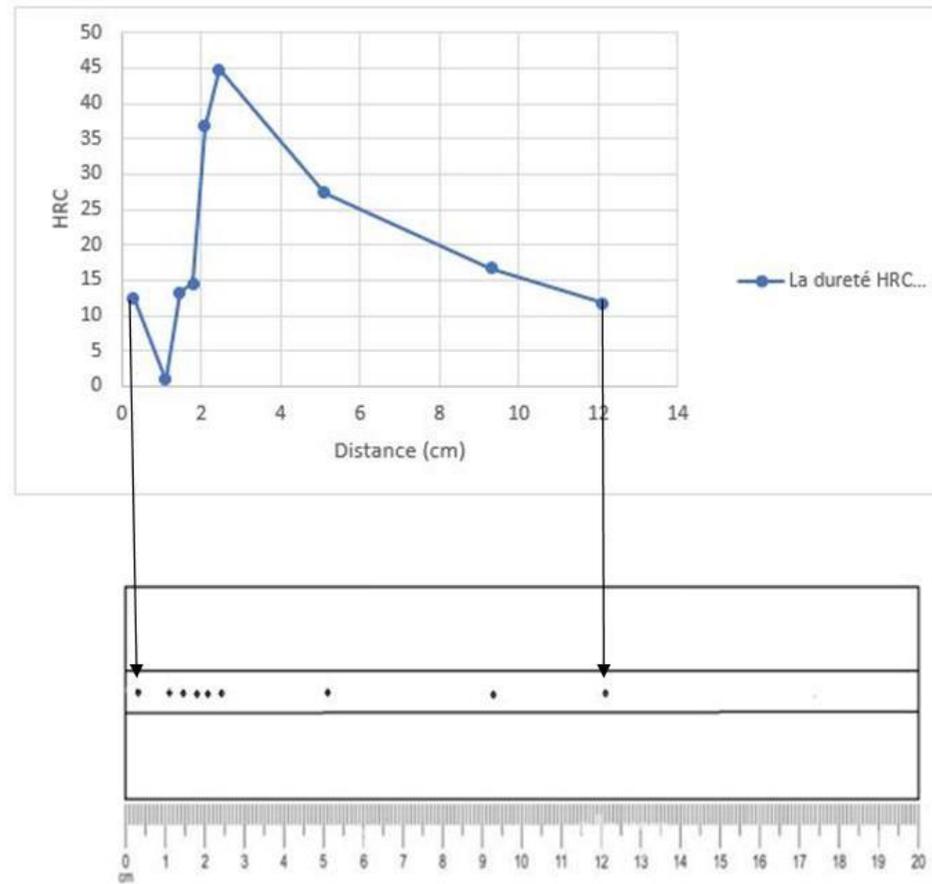


Figure 3.8 : Chauffage par induction de l'A60 avec 40 sec de maintien (P=17kW).

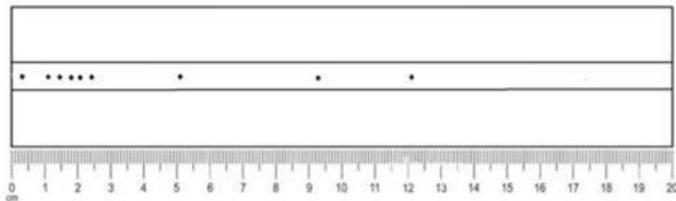
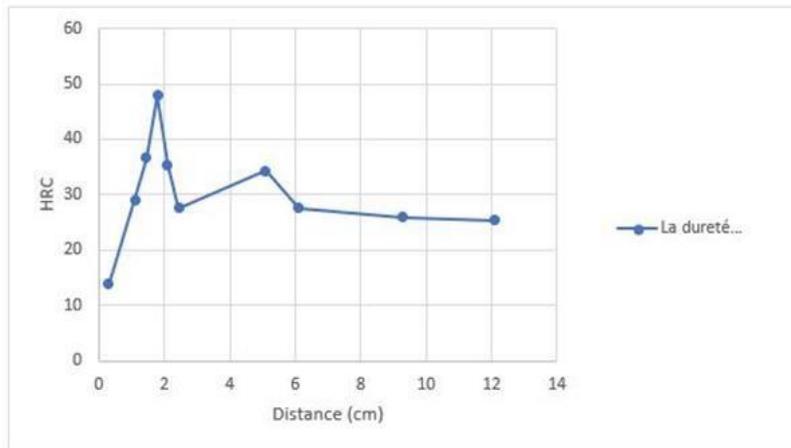


Figure 3.9 : Chauffage par induction de l'A60 avec 60 sec de maintien (P=17kW).

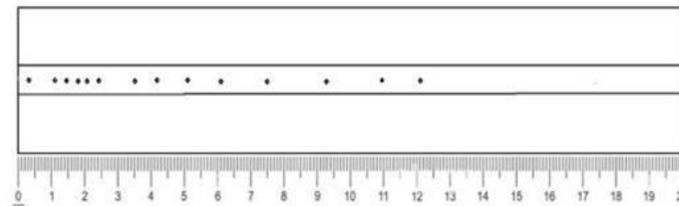
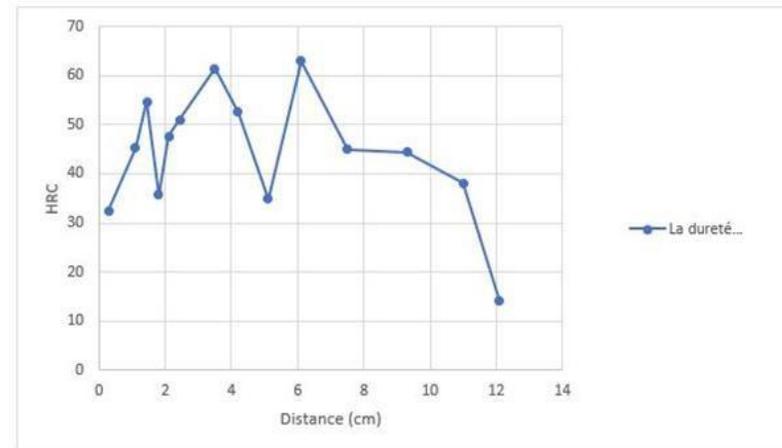


Figure 3.10 : Chauffage par induction de l'A60 avec 70 sec de maintien (P=17kW).

Nous pouvons tirer, qu'à travers ces expériences, les conclusions suivantes :

- Les duretés les plus élevées se situent, en général, entre 2.5 cm et 5 cm de la surface du barreau placée sur le porte échantillon (située vers le bas du montage).
- Les duretés sont basses en bout de l'éprouvette et au-delà de 8 cm à partir de la surface externe placée en bas du porte échantillon. Ces positions correspondent aux parties de l'éprouvette qui sont situées à l'extérieur du serpentin de cuivre.
- Lorsque les duretés des éprouvettes dépassent les 50 HRC, nous avons présence d'une structure martensitique. Entre 40 et 50 HRC, il y aura présence de bainite. Le reste des mesures correspondent à des structures perlite-ferritiques. Les figures 3.11, 3.12 et 3.13 montrent les photos des microstructures de perlite-ferritique, bainite et martensite trouvée dans les barreaux en fonction de leur degré de chauffe.

Ces résultats soulignent encore une fois l'importance de la conception du serpentin et de la position de la partie de l'éprouvette à chauffer et des résultats que l'on est censé attendre.

Enfin, que toutes ces expériences prennent beaucoup de temps : préparer les éprouvettes, faire les méplats, polir, chauffer, tremper, polir, prendre les mesures de dureté et éventuellement les métallographies. A titre d'exemple, les essais de la figure 3.4 nous ont pris une semaine.

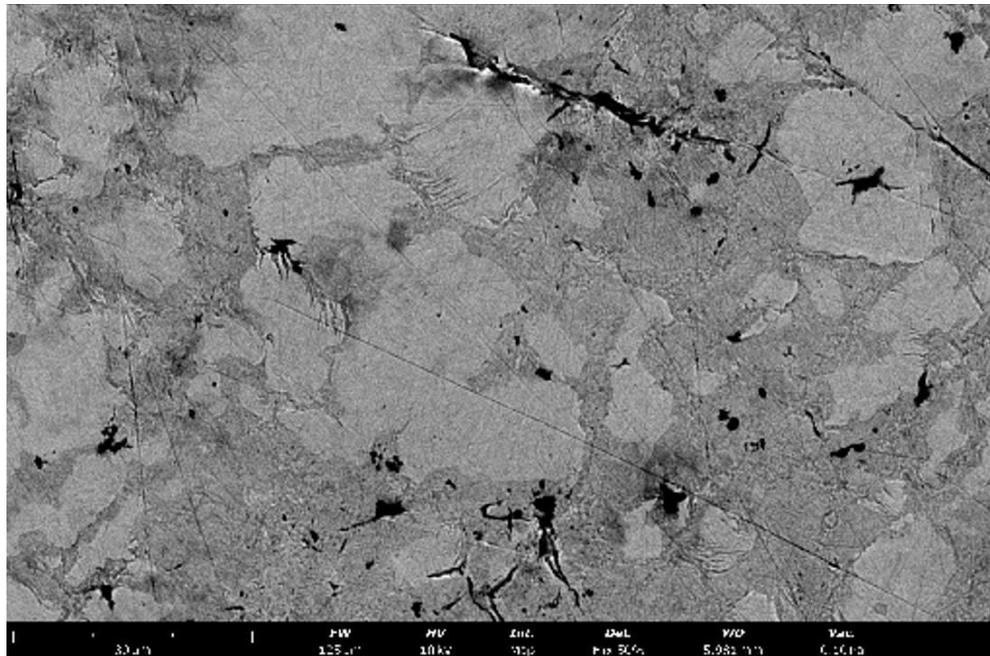


Figure 3.11 : Chauffage inductif de l'acier A60 chauffé durant 70 sec, à 12 cm du bout de barreau (Puissance = 17 KW)

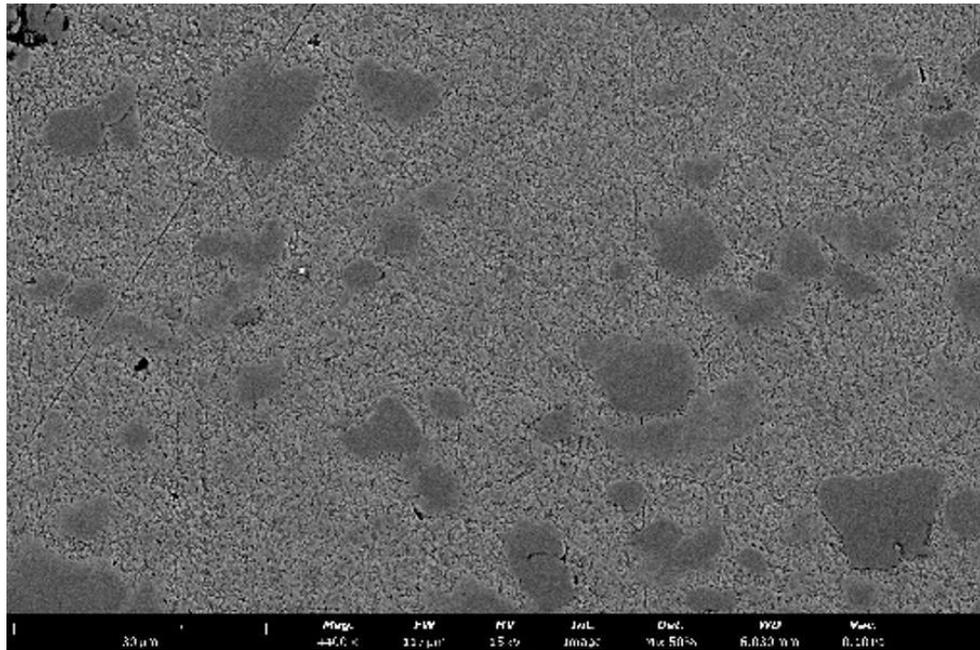


Figure 3.12 : Chauffage inductif de l'acier A60 chauffé durant 70 sec, à 7.7 cm du bout de barreau (Puissance = 17 KW)

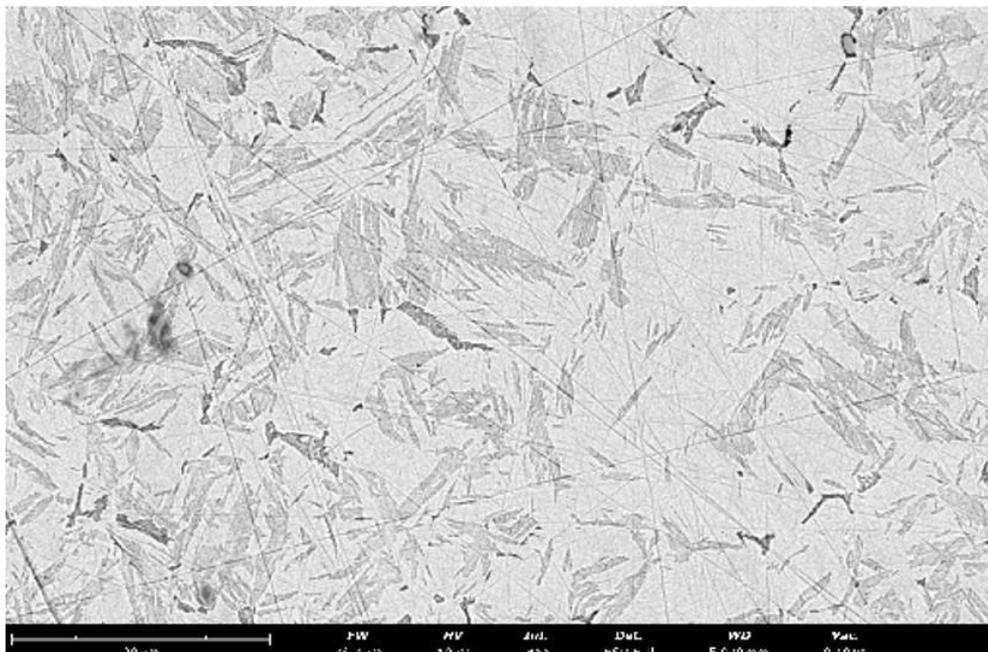


Figure 3.13 : Chauffage inductif de l'acier A60 chauffé durant 70 sec, à 6 cm du bout de barreau (Puissance = 17 KW)

3.3.2 L'effet de la puissance

Dans ces expériences, nous avons voulu connaître quel est l'effet de la vitesse de chauffe (dépend la puissance appliquée) sur le traitement thermique de l'acier A60. Lorsque la puissance de chauffe est de 4.8 KW (position du bouton de chauffe placé au minimum), l'étendue du chauffage par induction est relativement restreinte à une petite zone de l'éprouvette. A un temps de maintien plus long, la zone de chauffe s'étend mais la couleur blanche n'est pas visible. A l'inverse, lorsque la puissance de chauffe est à son maximum (position du bouton de chauffe placé au maximum) et qui correspond à 23.8 KW, le chauffage inductif est très rapide et l'étendue de la zone de chauffe est large. Dans les deux temps de maintien fixés, soit 20 et 30 secondes, l'apparition de la zone blanche est nette. Elle est d'autant plus étendue que le temps de maintien est plus long. Ces phénomènes sont illustrés à la figure 3.14.

Les éprouvettes de quatre expériences ont été trempées à l'eau et polies et leurs duretés Rockwell ont été mesurées. Les résultats de ces duretés sont portés aux figures 3.15 et 3.16 pour les éprouvettes chauffées par induction avec une puissance de 4.8 kW et maintenues respectivement à temps de 20 et 30 secondes. Les figures 3.17 et 3.18 montrent les résultats de dureté Rockwell pour les éprouvettes chauffées par induction avec une puissance de 23.8 kW et maintenues respectivement à temps de 20 et 30 secondes.

Il est remarquable de noter tout de suite, qu'une puissance appropriée permet de chauffer rapidement l'éprouvette et où la zone blanche est presque présente sur l'éprouvette chauffée avec une puissance de 23.8 kW et un temps de maintien de 30 secondes. Dans ce cas, la dureté est presque uniforme sur toute l'éprouvette et qu'elle atteint des valeurs de dureté quasiment toutes au-dessus de 50 HRC. Nous pouvons dire conclure que l'apparition de la zone blanche correspond à la mise en solution quasi parfaite et qui est atteinte en seulement en 30 secondes. Ce qui correspond à des temps de temps de traitement thermique assez incroyable. Un meilleur contrôle du processus permet donc d'augmenter la dureté substantiellement en des temps très courts et bien localisés. Le chauffage par induction est donc vraiment une technique très puissante qui peut être utilisée pour des traitements locaux avec des gains de temps extraordinaires.

Lorsque la puissance de chauffe est faible, il y a absence de zone blanche et les propriétés mécaniques de l'éprouvette sont alors très disparates. Cependant, dans ces deux expériences (puissance = 4.8 kW et des temps de maintien de 20 et 30 secondes) précisément, il apparaît clair que le temps de maintien le dessus sur la puissance. Un temps plus long aurait donné peut-être des résultats plus intéressants avec des propriétés mécaniques plus uniformes. Nous recommandons donc, que pour les faibles puissances de chauffe, il faudra opter pour des temps de maintien plus long et vérifier si les duretés, même si elles ne seront pas tellement élevées, auront des valeurs plus uniformes. En, qu'aux valeurs des duretés, c'est le client qui décide dans son cahier des charges, quelles valeurs de dureté il voudrait avoir.

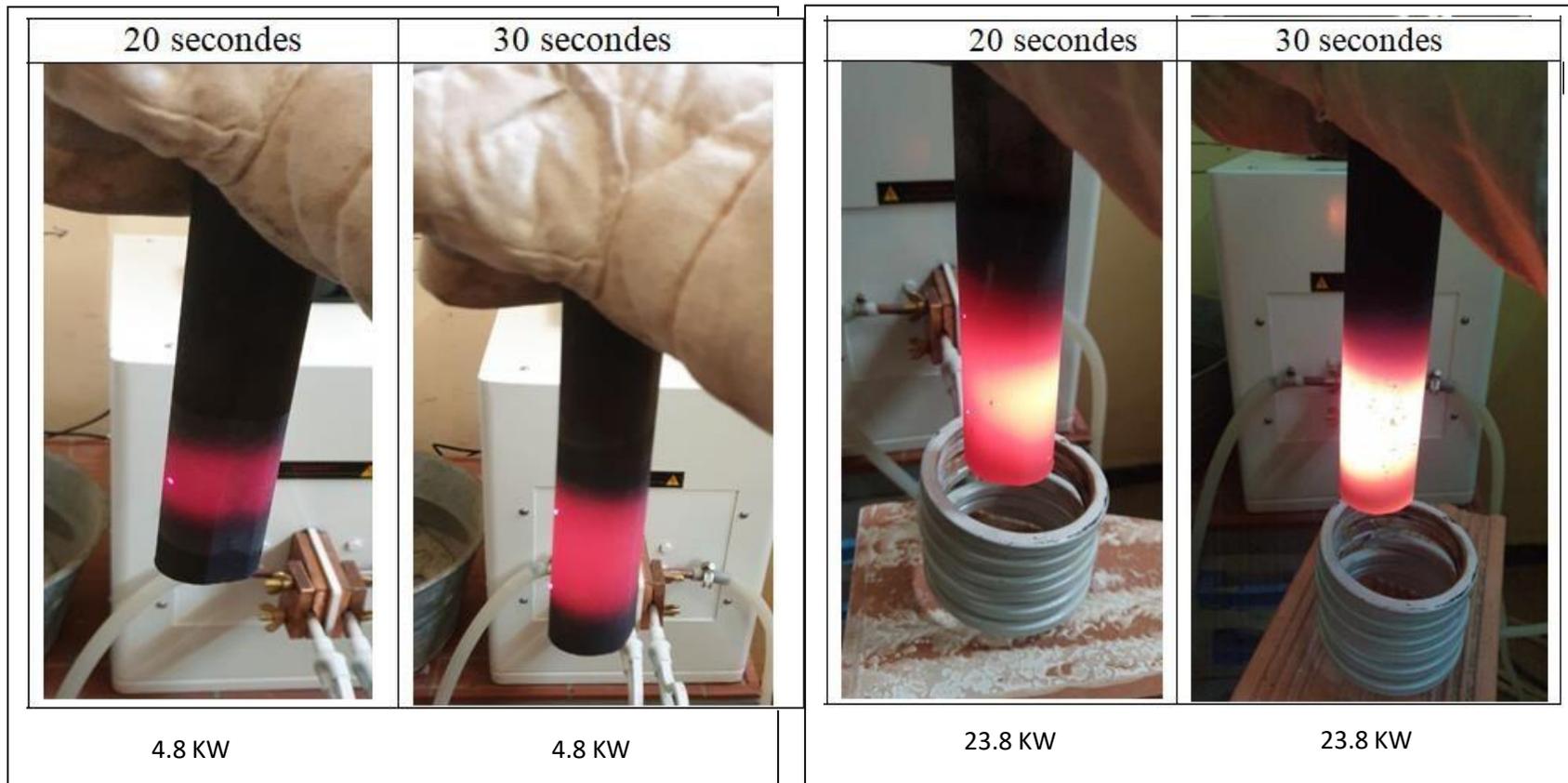


Figure 3.14: Variation des degrés de chauffage en fonction de la puissance

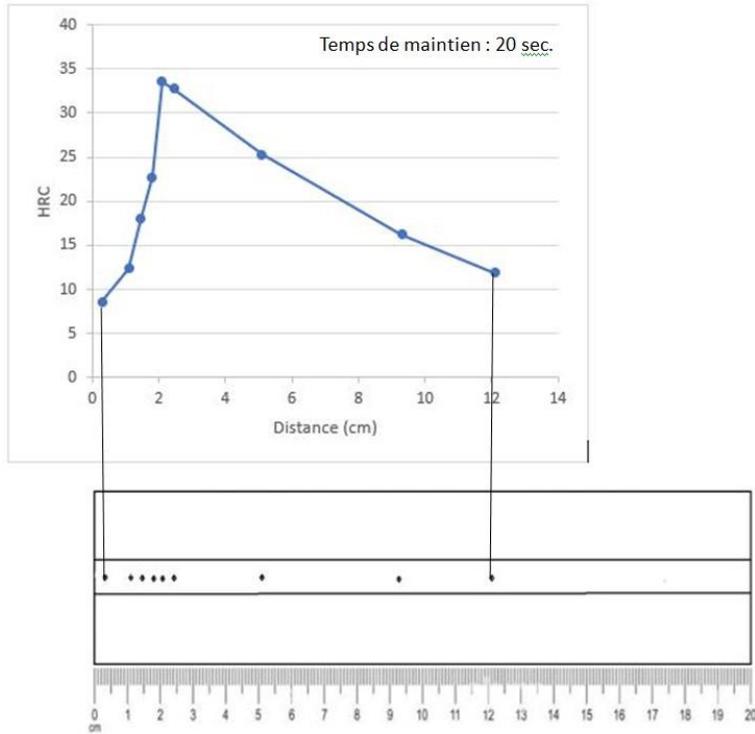


Figure 3.15 : Chauffage par induction de l'A60 avec 20 sec de maintien
(P=4.8 kW).

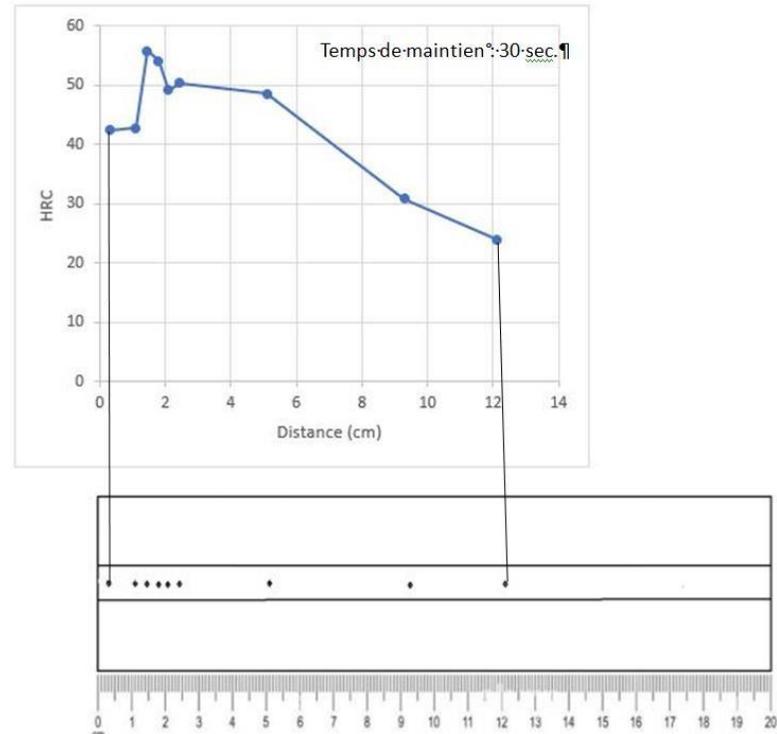


Figure 3.16 : Chauffage par induction de l'A60 avec 30 sec de maintien
(P=4.8 kW).

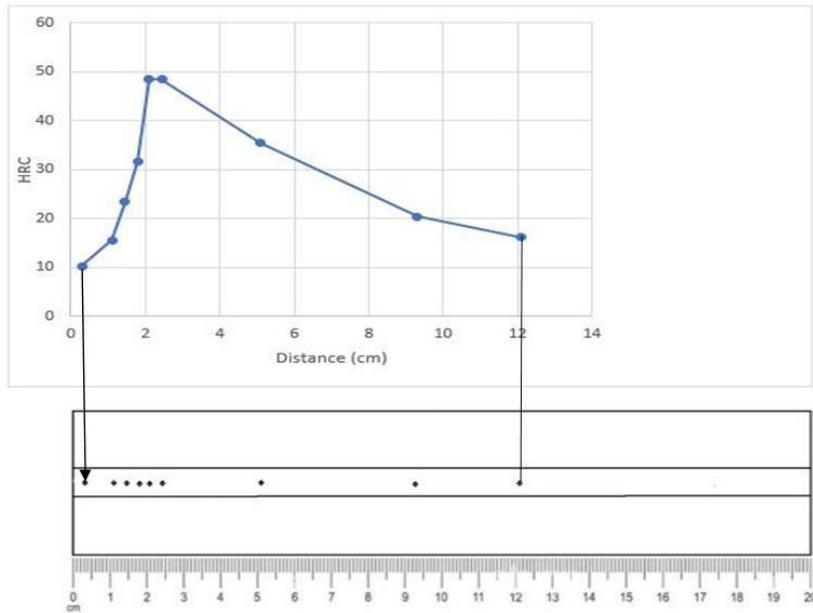


Figure 3.17 : Chauffage par induction de l'A60 avec 20 sec de maintien
(P =23.8 kW).

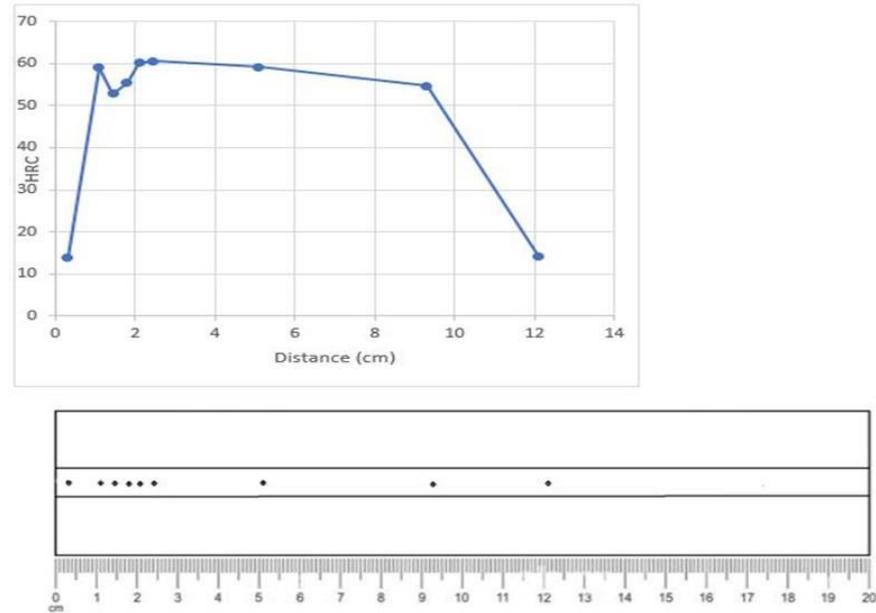


Figure 3.18 : Chauffage par induction de l'A60 avec 30 sec de maintien
(P =23.8 kW).

3.3.3 L'effet de la masse

Des expériences ont été réalisées sur des disques d'acier au carbone de différents diamètres, probablement des aciers à faible teneur en carbone que nous avons récolté du laboratoire de soudage. Ces disques avaient des diamètres de 18, 25, 30 et 40 mm de diamètre avec une hauteur de 12 mm. Le but était de savoir quelle est l'influence de la puissance et du temps de maintien sur une surchauffe des disques qui conduirait à un début de fusion. Les résultats de ces expériences sont présentés à la figure 3.19.

Il intéressant ici de noter que lorsque la puissance de chauffe est relativement basse, le temps est d'autant plus long que la masse de l'éprouvette est massive. En revanche, lorsque la puissance de chauffe est relativement élevée, le temps de la première fusion est à peu près le même quel que soit la masse de l'éprouvette (ici pour les diamètres de 20, 30, 35 et 40 mm). La pénétration de la chaleur est tellement élevée que même pour des éprouvettes de masse différentes (dans la limite de ceux que nous avons essayé) le chauffage par induction est rapide et efficace.

Dans cette expérience à puissance moyenne, plus la masse de la pièce est grande, plus le chauffage est vite.

Eprouvette				
Diamètre	18 mm	25 mm	35 mm	40 mm
	Expériences avec une faible puissance (5.1 kW)			
Puissance faible	5.1 kw	5.1 kw	5.1 kw	5.1 kw
Temps de maintien	16.90 s	10.18 s	9.51 s	5.10 s
	Expériences avec une forte puissance (19.8 kW)			
Puissance forte	19.8 kw	19.8 kw	19.8 kw	19.8 kw
Temps de maintien	5 s	4 s	4.72 s	4 s

Tableau 3.19: Effet de la puissance de chauffe et du temps de maintien en fonction de la masse de l'échantillon

3.3.4 L'effet du serpent

Enfin, nous avons, pour l'acier A60, essayé de voir son comportement au chauffage par induction en fonction de la forme, de la taille et de la hauteur du serpent.

Nous remarquons que lorsque le diamètre du serpent approche celui de l'éprouvette (diamètre 5 cm), le chauffage est rapide et intense. La zone blanche est atteinte après 40 secondes de maintien à une puissance de 17 KW pour le serpent de diamètre de 6 cm. Il faut noter toutefois que la hauteur de chauffe est limitée à celle de la hauteur du serpent.

Pour le même temps de maintien et la même puissance, lorsque le diamètre du serpent est de 8 cm, le chauffage du barreau est relativement faible. La hauteur de chauffe est plus importante car le serpent est plus haut que le premier mais la zone blanche est absente.

De ces expériences apparaît encore l'importance de la conception du serpent en fonction de la forme de la pièce et du cahier des charges du client.

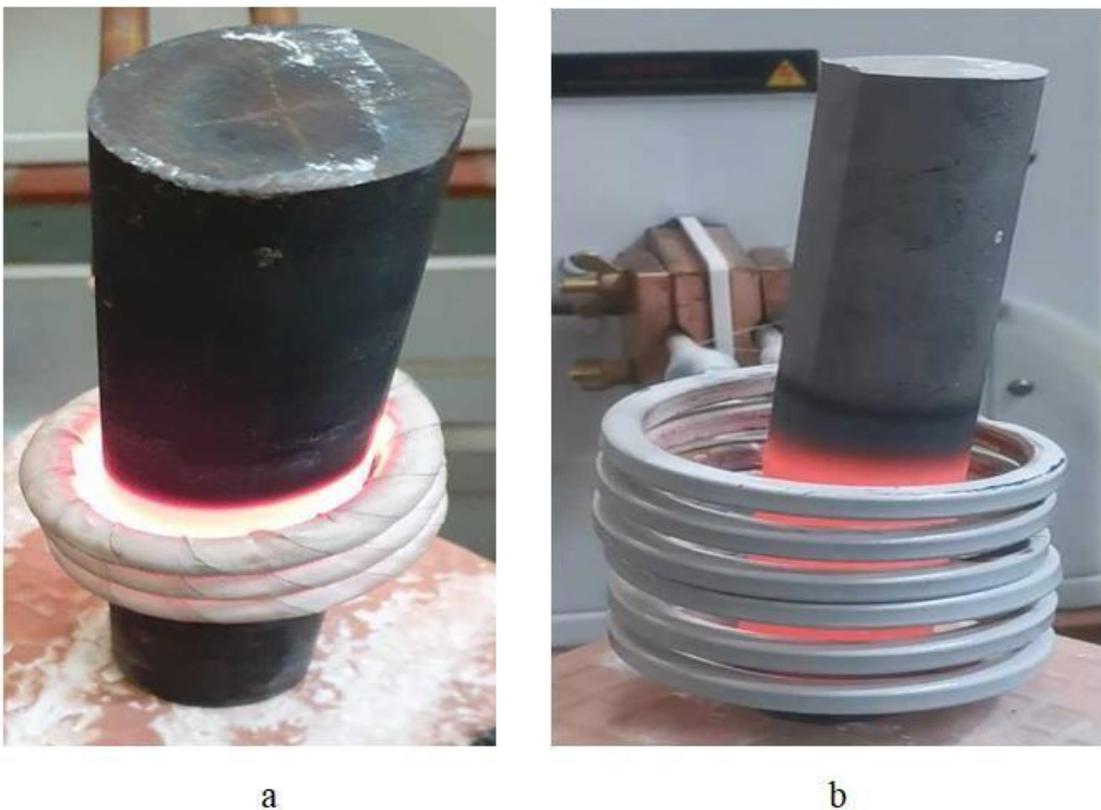


Figure 3.20 : Influence du design du serpent sur le chauffage par induction.

3.4 Chauffage par induction des aciers alliés

Le chauffage par induction a aussi été employé pour traiter l'acier allié à haute stabilité dimensionnelle le K100. Cet acier a été chauffé avec une puissance de 17 kW sous différents temps de maintien. Il était prévu que l'on conçoit nous même le serpentín qui s'adapterait à la forme de l'éprouvette qui était sous une forme parallélépipède de 12 cm de long et 1 cm d'épaisseur. A cause d'un manque d'outillage spécialisé, nous avons contenté d'employer de forme carrée de 14 cm de côté. L'acier K100 était biseauté en forme de lame d'un couteau et c'est cette partie de l'acier K100 qui était visée par le traitement thermique. Des photos de ces lames sont montrées à la figure 3.21. La puissance de chauffe était fixée à 17 kW et les temps de maintien variés de 20 à 64 secondes.

Nous remarquons qu'à cause d'une brique comme matériau réfractaire, la position de l'acier K100 n'est pas toujours rigoureuse qu'à son éloignement du serpentín ou bien à son centrage. Par conséquent, les résultats obtenus ne sont pas si rigoureux qu'ils devraient l'être. Cependant, nous aurons une bonne appréciation qu'à la réponse d'un allié vis-à-vis d'un traitement thermique réalisé par chauffage par induction.

Nous pouvons dire qu'en première remarque, que plus le temps de chauffe est élevé plus la zone blanche est grande. Elle est intense et complète pour l'acier K100 maintenu à 64 secondes. Cette intensité diminue plus ou moins avec la diminution du temps de maintien et ce pour la puissance de chauffe soit 17 kW.

Position	Temps de maintien (secondes)
1	20
2	30
3	45
4	55
5	64

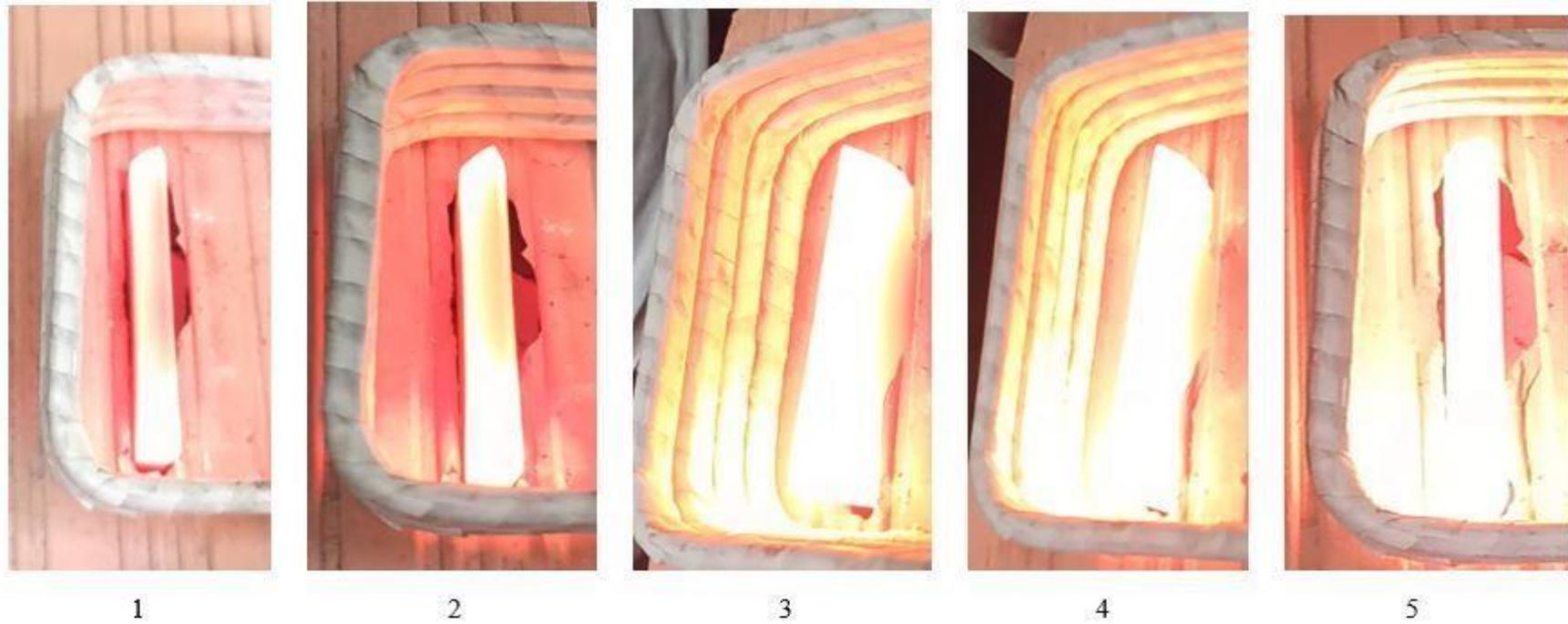
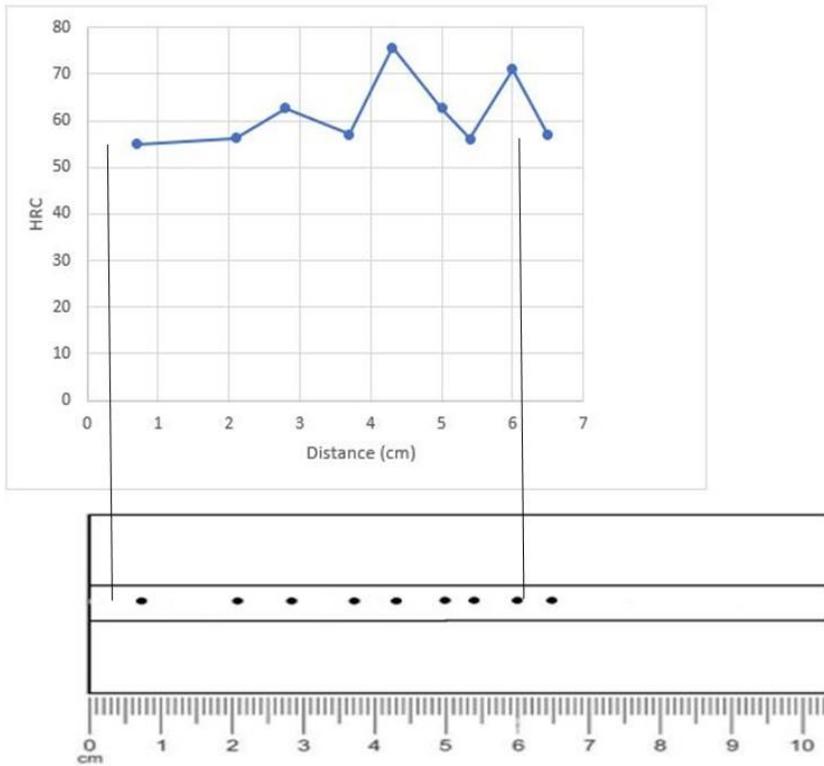
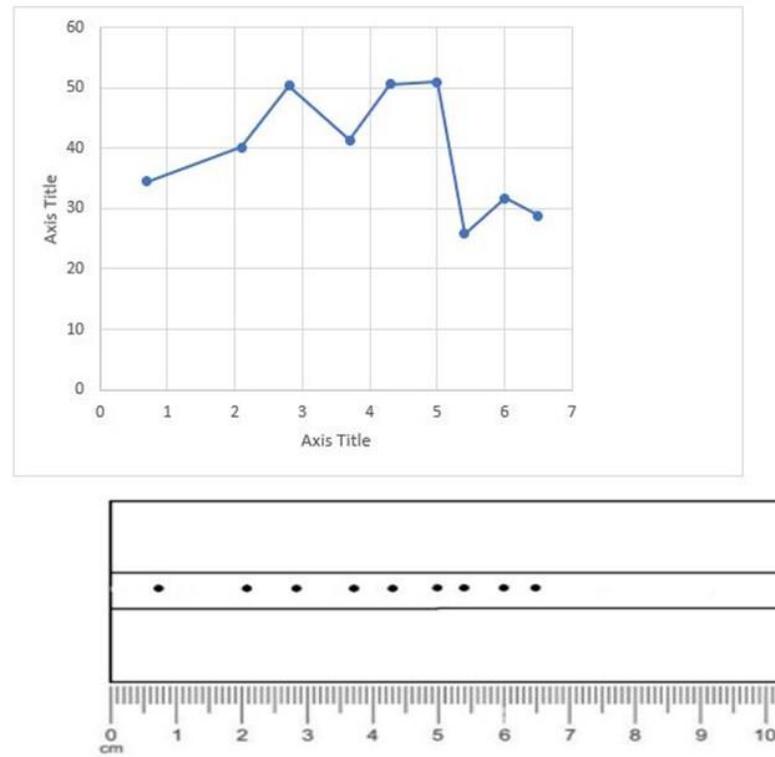


Figure 3.21: Variation des degrés de chauffage en fonction du temps de maintien pour l'acier K100 (P = 17 kW)



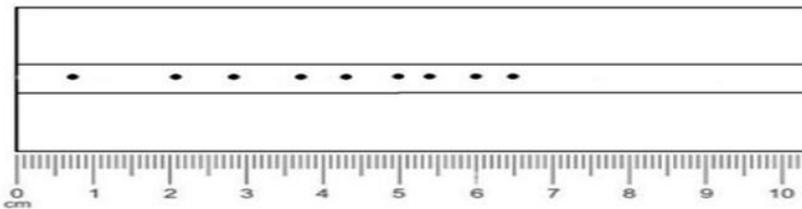
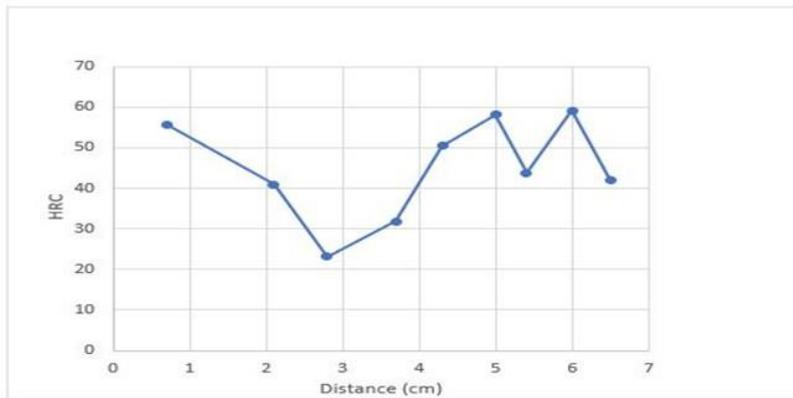
20 sec

Figure 3.22 : Chauffage par induction du K100 avec 20 sec de maintien (P=17 kW).



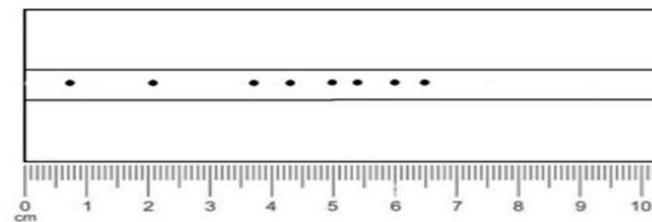
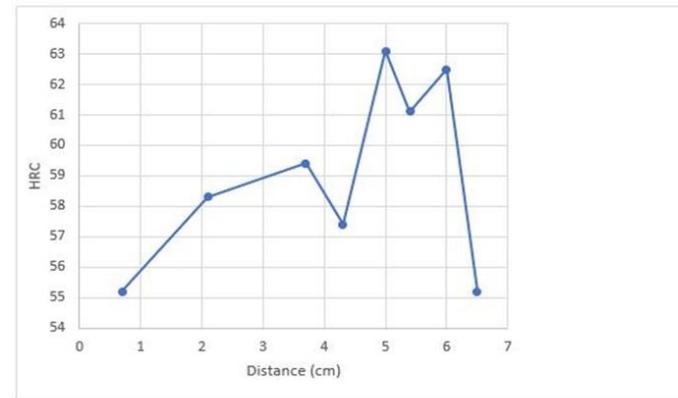
30 sec

Figure 3.23 : Chauffage par induction du K100 avec 30 sec de maintien (P=17 kW).



45 sec

Figure 3.24 : Chauffage par induction du K100 avec 45 sec de maintien (P =17 kW).



55 sec

Figure 3.25 : Chauffage par induction du K100 avec 55 sec de maintien (P =17 kW).

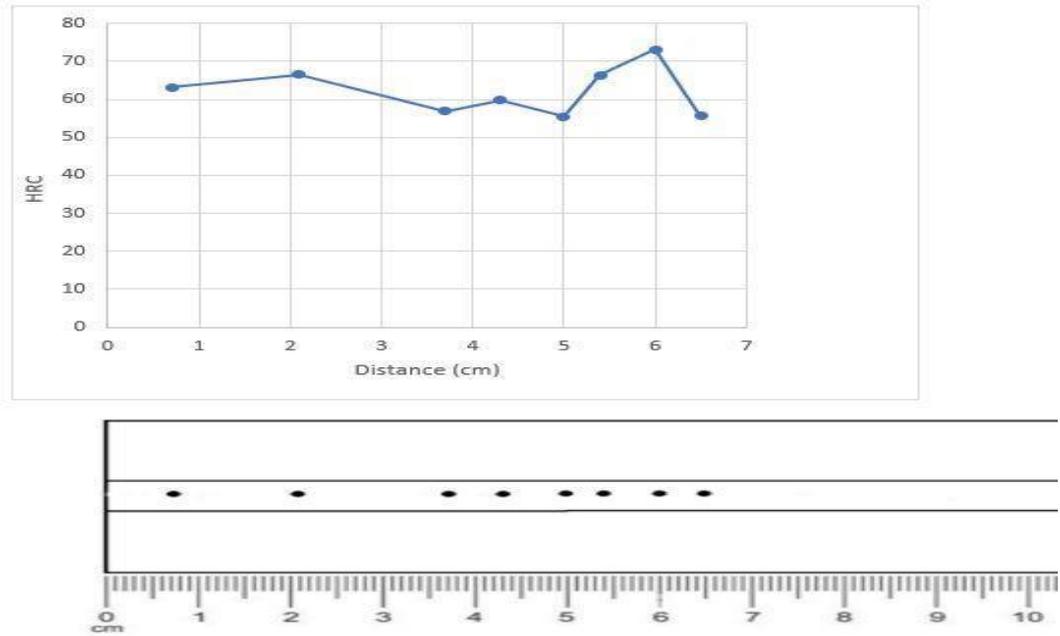


Figure 3.26 : Chauffage par induction du K100 avec 64 sec de maintien et P = 17 kW.

CONCLUSION

Des essais expérimentaux ont été réalisés sur une machine de chauffage par induction. Le processus, la profondeur de pénétration et le diamètre de la pièce déterminent le choix de la fréquence selon les recommandations des fabricants de ces machines. Face à cette contrainte, nous n'avons d'autres choix que de choisir les paramètres opératoires suivants pour comprendre leur effet sur le chauffage inductif sur les aciers : la puissance de chauffe, le temps de chauffe et le choix de la forme et taille du serpentin. Nous pouvons, à travers ces expériences, tirer les conclusions suivantes :

- La zone de chauffe d'une pièce à traiter dépend largement de la puissance de chauffe, du temps de maintien et de la forme et taille du serpentin.
- Les duretés sont les plus basses se retrouvent en général en dehors de la zone du serpentin.
- Des disparités microstructurales sont constatées lorsque le temps de chauffe de la pièce n'est pas uniforme. La température de mise de la pièce n'est pas la même partout.
- Une structure martensitique peut être facilement obtenue en ajustant adéquatement la puissance et le temps de maintien de la pièce.
- Avec des puissances élevées de chauffe, on atteint très rapidement les températures de mise en solution mais le contrôle du temps de maintien devient très délicat car on peut facilement avoir une fusion partielle de la pièce à traiter.
- Avec des puissances basses, les temps de maintien sont plus longs mais on peut l'utiliser pour un brasage par exemple, un traitement de relaxation ou autre. On n'a pas toujours besoin de faire une trempe.
- La conception des serpentins est très importante. Elle affecte la qualité du traitement thermique et du résultat final que l'on voudrait obtenir.
- Lorsque la puissance de chauffe est relativement basse, le temps est d'autant plus long que la masse de l'éprouvette est massive. En revanche, lorsque la puissance de chauffe est relativement élevée, le temps de la première fusion est à peu près le même quel que soit la masse de l'éprouvette.

References bibliographies

- [1] CHESTER A. TUDBURY, M.S. *basics of induction heating*, JOHN F. RIDE, 1960, 265pages.
- [2] Historique : <https://www.enrx.com/fr-FR/Company/History>.
- [3] Ambrell, 'Chauffage par induction Bobines d'induction', pp 1-4, 2023, | Precision Induction Heating Equipment & Solutions |.
- [4] ED 4211 - Le chauffage par induction électromagnétique – INRS.
- [5] Pourquoi choisir le chauffage par induction et quels sont ses avantages.
- [6] Les bases du chauffage inductif – Himmelwerk.
- [7] Détails de base du chauffage d'Induction haute fréquence.
- [8] Chauffage par induction, son fonctionnement et son utilité.
- [9] FRANK W. CURTIS. *High-Frequency Induction Heating*, Massachusetts, McGraw-Hill Book Company, 1944, 235 pages.
- [10] (PDF) Beer, Blood and Urine - Mythological Quenchants of Ancient Blacksmiths (researchgate.net).
- [10] (PDF) Beer, Blood and Urine - Mythological Quenchants of Ancient Blacksmiths (researchgate.net).
- [11] https://www.bohlerturkiye.com/app/uploads/sites/92/2021/12/productdb/api/k100_en.pdf.
- [12] Igor Ryabtsev · Serhii Fomichov, Valerii Kuznetsov, Yevgenia Chvertk and Anna Banin, 'Induction Surfacing', p. 123, chapter 6 in Surfacing and Additive Technologies in Welded Fabrication, Springer 2023, ISBN 978-3-031-34389-6.