

## Traitements par trempe superficielle des matériaux métalliques

### Principe

Le traitement par trempe superficielle consiste en un chauffage à haute énergie de la région proche de la surface à la température d'austénitisation (comprise entre 750 et 1200°C) appliquant une vitesse de chauffage très rapide. Le temps de chauffage est le plus faible possible afin de bien localiser la chaleur à la périphérie des pièces (2 à 50s). Le refroidissement rapide effectué à une vitesse supérieure à une vitesse critique dite vitesse critique de trempe permet de transformer par trempe cette région en martensite de dureté élevée en relation avec la teneur en carbone de l'alliage (Fig.1).

Cette trempe est éventuellement suivie d'un revenu. Le gradient de dureté obtenu est décroissant à partir de la surface. La surface est mise en compression vers la sous-couche. Tous les procédés de trempe superficielle ont pour objectif de générer une surface dure et résistante à l'usure sans modifier les propriétés à cœur. Ces procédés permettent également d'augmenter la résistance mécanique, la rigidité ainsi que la résistance à la fatigue.

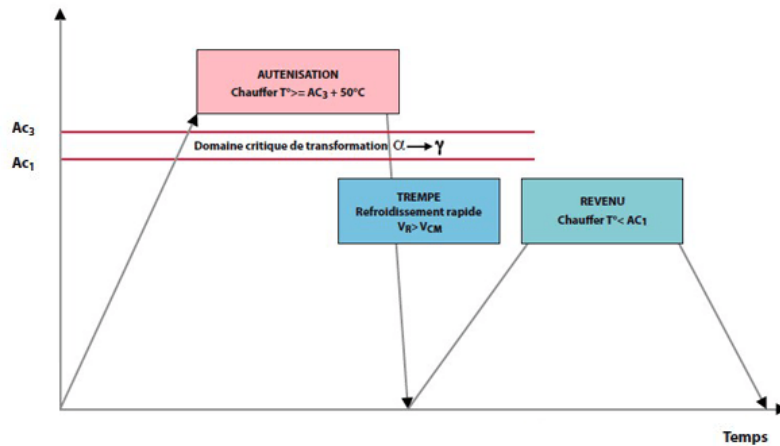


Fig.1.Cycle Thermique de la trempe superficielle [1].

### Différents procédés :

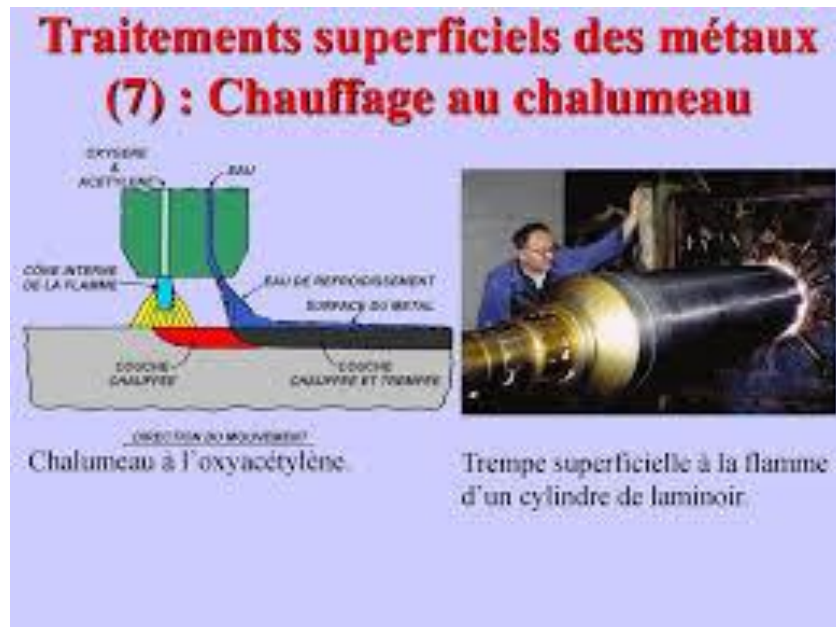
Ils existent différents procédés de traitements par trempe superficielle, en l'occurrence :

- trempe superficielle par chalumeau,
- trempe superficielle par induction,
- trempe superficielle par laser,
- trempe superficielle par bombardement électronique,
- trempe superficielle par plasma

Dans ce cours on va se limiter uniquement aux procédés les plus utilisés dans l'industrie, le principe est le même, la différence entre eux réside dans l'énergie fournie pour porter le matériau de l'ambiante au domaine austénitique à des temps de chauffage très courts. Les procédés à étudier sont les trempes superficielles par chalumeau, par induction et par laser. Des techniques de trempes superficielles rapides sont permises par l'emploi de moyens de chauffe plus récents comme le faisceau laser, le bombardement électronique ou la torche à plasma qui permet de passer d'une température de 1000 à 15000 C.

### **Trempe superficielle par chalumeau (Chauffage à la flamme)**

Ce type de procédé utilise un chalumeau oxy-gaz (oxy- acétylénique, oxy - propane, oxy-méthane), il permet de porter la surface à une température élevée diffusant la chaleur jusqu'à la profondeur recherchée. Les profondeurs élevées requièrent une régulation du gradient de chauffage pour éviter la surchauffe superficielle. Le chauffage s'effectue de proche en proche ou par chauffage généralisé (single-shot). La figure 2 montre clairement ce procédé, le chauffage est assuré par des brûleurs à fente et multiflammes.



**Fig.2. Procédé de la trempe superficielle à la flamme [2].**

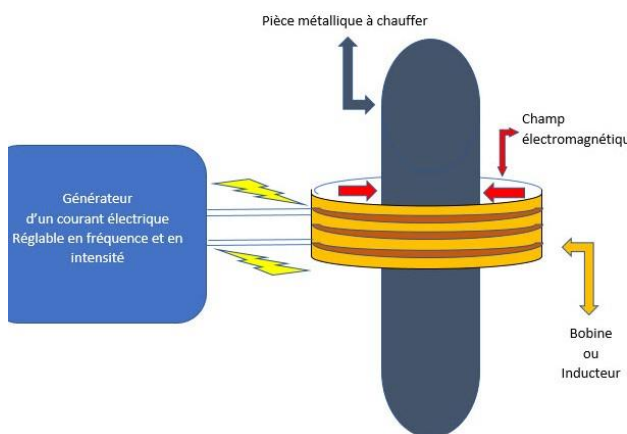
Ce procédé s'emploie pour les grosses pièces telles que les cylindres de laminoirs, arbres etc...), la température au niveau de la surface de la pièce atteint 2400-3150°C. L'apport de chaleur est très important ce qui conduit à un chauffage très rapide de la surface, et le cœur reste non affecté par la chaleur. L'épaisseur de la couche trempée varie entre 2 à 4mm et sa dureté allant de 50 à 56 HRC. La couche en extrême surface acquiert une structure martensitique, tandis que les couches sous jacentes une structure formée de troostite ( $\alpha$ +Carbures)+ Martensite.

Généralement la trempe est suivie par un revenu à basse température, et souvent un autorevenu, ainsi la chaleur conservée au cœur tend à se dissiper vers l'extérieur ce qui peut entraîner un chauffage de la couche trempée jusqu'à la température de revenu.

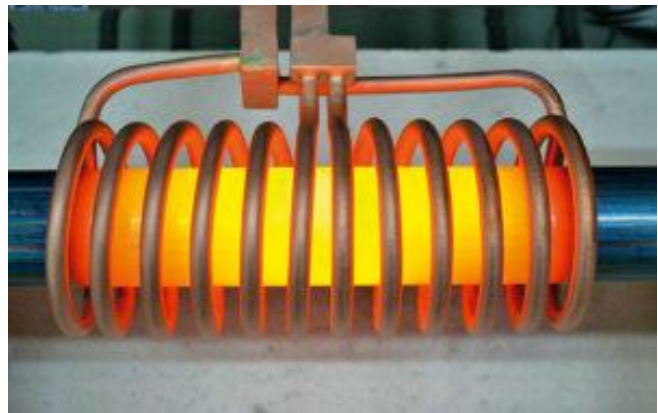
La trempe superficielle au chalumeau induit de très faibles déformations et une surface de faible rugosité. En la comparant à la trempe superficielle par induction et volumique, elle est très avantageuse surtout pour le traitement des pièces volumineuses.

## Trempe superficielle par induction

Le chauffage par induction permet de chauffer la pièce métallique conductrice grâce au champ magnétique qui sera dégagé par l'inducteur. Le champ électromagnétique, dans lequel est mise la pièce métallique qui doit être chauffée, génère un courant électrique au sein de cette pièce, de manière très localisée, et les électrons de la matière métallique vont être mis en mouvement ; ce mouvement va générer de la chaleur (Fig.3a). L'inducteur traversé par un courant à haute fréquence entourant la zone à chauffer ou placé à proximité de celle-ci, développe des courants induits qui par effet joule porte la surface à une température d'austénitisation (Fig.3b)



a)



b)

Fig. 3(a, b). Schéma de principe de la trempe par induction, [1]  
b) configuration de la pièce à chauffer et la forme de l'inducteur [1]

La terminologie distingue :

- Les hautes fréquences comprises entre 1MHz et 100 KHz
- Les moyennes fréquences comprises entre 50KHz et 8 KHz
- Les basses fréquences comprises entre 6 et 1KHz

Ce classement n'est pas normatif, les bornes fixées peuvent être différentes selon l'usage dans les entreprises. Le choix de la fréquence est déterminé par la profondeur chauffée recherchée, l'épaisseur des courants induits étant inversement proportionnelle à la fréquence. Il faut toutefois noter que la profondeur chauffée se fait en grande partie par diffusion mais que le choix d'une fréquence adaptée réduit le gradient de chauffage. Le chauffage s'effectue de proche en proche ou par chauffage généralisé.

**Tableau 1.** Relation entre la fréquence utilisée et l'épaisseur chauffée [1].

| Epaisseur chauffée en mm | Haute fréquence (1MHz-100KHz) | Moyenne fréquence (8KHz-50 KHz)- | Basse fréquence (1KHz-6KHz) |
|--------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|
|                          | 0.5 à 2                       | 02 à 6                           | 4 à 20                      |

La profondeur de pénétration du courant ( $\epsilon$ ) est donnée par la relation 1[3]:

$$\epsilon = 5000\sqrt{\rho/\mu f} \text{ , (cm)} \quad (1)$$

$\rho$ - La résistivité de l'acier, (Ohms.mm<sup>2</sup>/m)

$\mu$ - La perméabilité magnétique de l'acier, (Gs/Oe)

f- La fréquence du courant, Hz

### **Avantages de l'induction**

L'induction présente de nombreux avantages :

Rapidité, précision de température, efficacité énergétique, reproductibilité, compacité, chauffage localisé, sécurité des opérateurs, économie énergétique, intégration facile dans les lignes de production.

Les inducteurs peuvent être de toutes les formes.

En fonction de l'intensité et de la fréquence du courant, on pourra chauffer différents métaux à différentes températures et différentes profondeurs, il s'agit alors du chauffage par induction dont les applications sont nombreuses.

### **Choix des aciers et des fontes**

Toutes les nuances d'acier ferromagnétiques peuvent être chauffées par induction, il conviendra d'apprécier leur comportement lors de la trempe. Les nuances d'aciers les plus couramment employées sont des nuances à faible ou moyenne trempabilité, avec des teneurs en carbone comprises entre 0,25 et 0,55% (centrées à 0,4 - 0,45%) non alliées ou faiblement alliées.

Le tableau 2 montre le niveau de la dureté en fonction de la composition chimique de l'acier. Effectivement, la dureté superficielle dépend essentiellement de la teneur en carbone du matériau tandis que la profondeur de trempe est dictée par les éléments d'alliage (Fig.4).

| <b>Tableau N2 : Duretés réalisables après trempe superficielle au chalumeau ou par induction : Cycle de traitements : Trempe énergétique à l'eau suivie d'un revenu à basse température (150-180°C) [1].</b> |            |                  |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|------------------|------------|
| Aciers non alliés                                                                                                                                                                                            |            | Aciers alliés    |            |
| Nuance                                                                                                                                                                                                       | Dureté HRC | Nuance           | Dureté HRC |
| C35                                                                                                                                                                                                          | 48         | 46Cr2            | 54         |
| C45                                                                                                                                                                                                          | 55         | 37Cr4-37CrS4     | 51         |
| C50                                                                                                                                                                                                          | 56         | 41Cr4-41CrS4     | 53         |
| C55                                                                                                                                                                                                          | 58         | 42CrMo4-42CrMoS4 | 53         |
|                                                                                                                                                                                                              |            | 50CrMo4          | 58         |

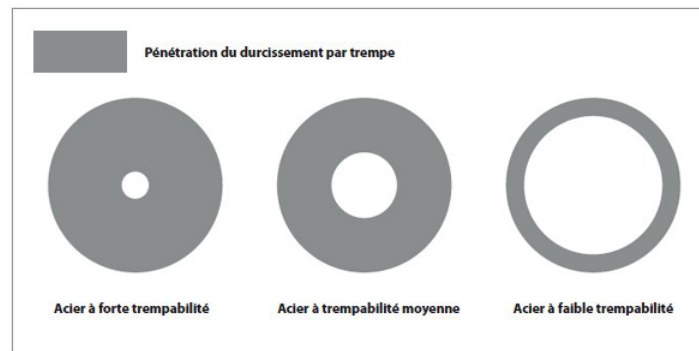


Fig. 4. Pénétration du durcissement par trempe [1].

### Choix des fontes

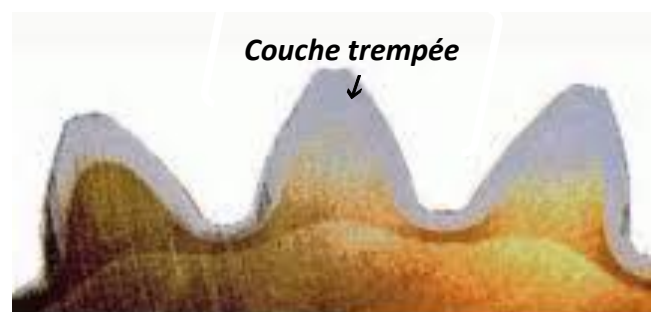
Les fontes grises lamellaires ou à graphite sphéroïdal à matrice ferrito-perlitique ou perlitique (la perlite doit être lamellaire) peuvent être durcies par trempe après chauffage superficiel. Les résultats obtenus sont directement en relation avec la quantité de carbone combiné (dans la matrice). Ces matériaux couramment durcis par trempe superficielle doivent cependant faire l'objet de précautions relatives à l'élaboration de la nuance (présence d'eutectique phosphoreux, morphologie du graphite, structure de la matrice...).

### Trempe superficielle par faisceau laser

Le durcissement des aciers au laser constitue l'une des approches les plus précises de l'industrie. Durant la dernière décennie, le laser a connu un essor de popularité auprès des traitements de surfaces grâce à sa grande précision, le contrôle de l'augmentation de la température, à la forme de transmission de l'énergie et à la vitesse de balayage. Ce procédé permet d'augmenter les capacités mécaniques et améliorer les caractéristiques tribologiques telles que la résistance à l'usure, la résistance à la corrosion et la diminution du coefficient de frottement [4].



a)



b)

Figure 4(a,b). a) Installation du procédé de la trempe par chauffage à laser [5].

b) Engrenage subissant une trempe superficielle par laser [1]

### **Mécanisme de la trempe par chauffage à laser**

Le mécanisme de la trempe par chauffage à laser d'un acier se réalise de la même manière qu'avec les procédés thermiques conventionnels : L'augmentation de la température jusqu'à la température d'austénitisation complète, maintien à cette température pendant une courte durée pour homogénéiser l'austénite suivi d'un refroidissement rapide pour former une couche martensitique.

#### **La méthode au laser offre plusieurs avantages [6]:**

1. Distorsions géométriques très faibles,
2. Elle constitue un traitement localisé,
3. Le cycle thermique est très rapide,
4. Une trempe autogène,
5. Le contrôle précis de la profondeur durcie,
6. Une application sans contact et sans aucun rejet environnemental,
7. Rapidité de l'application

### **Facteurs essentiels intervenant sur le durcissement des matériaux**

#### ***Ceux provenant de la composante traitée***

1. Matériau (alliage, microstructure, propriétés thermodynamiques)
2. Rugosité de surface
3. Géométrie de la pièce et sa masse

#### ***Ceux qui sont définis par le laser***

1. Longueur d'onde,
2. Polarisation,
3. Irradiance,
4. Distribution de l'irradiance,
5. Tache focale (taille et géométrie)

#### ***Les conditions de traitement***

1. Vitesse de traitement,
2. Angle d'incidence,
3. Gaz de protection

### **Applications**

Spécialement, pour les géométries complexes, les pièces cylindriques, les roues dentées de grandes dimensions etc...

**Matériaux métalliques** : Les aciers à outils, les aciers inoxydables martensitiques, les aciers dont la teneur en carbone varie entre 0.1 et 1%, les fontes grises et les fontes malléables. Les aciers inoxydables ferritiques et les fontes ferritiques ne sont pas adaptés à la trempe au laser [7,8]. Les aciers à haute teneur en carbone sont sujets à des taux d'austénite résiduelle plus élevés, lorsqu'ils sont traités au chauffage par laser [9].

### **Bibliographie**

- [1]. Fiche technique, [www. a3ts.org](http://www.a3ts.org) (Association de traitement thermique et de traitement de surfaces).
- [2]. Document publié par Nedine Sergerie sur les traitements thermiques, site google, Slideplayer.
- [3]. I. Lakhtine, Métallographie et Traitements thermiques des métaux, Edition Mir. Moscou, 1986, p.253-258.

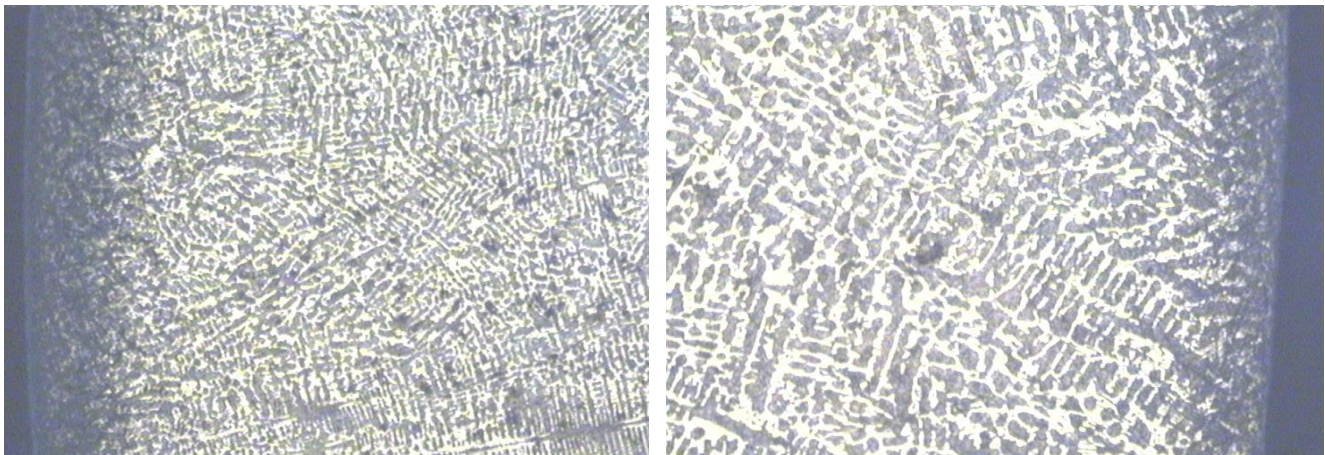
- [4]. ASM International Handbook Committee.1991, Heat treating, Collection Metals Handbook, Vol.4,Cleveland: American Society for Metals,P.2173.
- [5]. Trempe superficielle au laser Gerster.ch.
- [6]. G. Caron Guillenette, Thèse de l'université de Québec, 2013, sur la modélisation du procédé de trempe laser appliqué à des composants mécaniques complexes. [
- [7]. Ion , John C.2005.Laser Processing of Engineering Materials: Principles procedure and Industrial application: Amsterdam /Elsevier Butterworth. Heinemann, p. 556.
- [8]. LIA.2001.Handbook of Laser Materials Processing .Orlando, FL : LIA Magnolia Publishing, p. 741.
- [9]. KOU, Sindo, D. Sun , Y. Le 1983,Metallurgical and Materials Transactions A,Vol.14 ,N°3,p.643-653.

**[Le vous dirige vers un site, il montre en détail un film vidéo d'un procédé de trempe par induction](#)**

*Le chauffage par induction. Voilà comment cela fonctionne ...*  
*[www.efd-induction.com](http://www.efd-induction.com) › fr-fr › about › induction-heating-technology*

### **Annexes**

Microstructures d'une fonte blanche alliée au chrome (G= x100) montrant une couche trempée (zones sombres)



**Conditions de la trempe superficielle par induction**

a).  $I=0.3 \text{ mA}$  ,  $f=2.3\text{Hz}$  , $t=10\text{s}$

b)  $0.5 \text{ mA}$  ,  $f=5\text{Hz}$  , $t=10\text{s}$