



Chauffage par induction

Jean Callebaut, Laborelec

Décembre 2006

1	<i>Introduction</i>	3
2	<i>Principes physiques</i>	3
2.1	Induction électromagnétique	3
2.2	L'effet Joule	4
2.3	Profondeur de pénétration.....	5
3	<i>Installations de chauffage par induction</i>	6
3.1	Aspects génériques	6
3.2	Alimentation énergétique et générateur	7
3.3	Inducteurs.....	7
4	<i>Propriétés du chauffage par induction</i>	8
4.1	Transfert de puissance : calcul simplifié	8
4.2	Rendement électrique	9
4.3	Facteur de puissance	9
4.4	Caractéristiques du chauffage par induction	9
5	<i>Applications industrielles</i>	10
5.1	Fusion de métal par induction dans les fours à creuset.....	10
5.2	Brasage	11
5.3	Durcissement de l'acier par induction.....	11
6	<i>Conclusions</i>	12
7	<i>Références et bibliographies</i>	12



European Copper Institute

L'European Copper Institute est une joint venture Européenne entre les principaux producteurs de cuivre mondiaux et les fabricants Européens de demi-produits. Créé en 1996, l'ECI assure la promotion du cuivre en Europe avec un réseau de 11 centres de développement basés en Allemagne, au Benelux, en Espagne, en France, en Grèce, en Hongrie, en Italie, en Pologne, au Royaume Uni, en Scandinavie et en Russie. L'ECI poursuit les efforts initialement engagés par le Copper Products Development Association, créé en 1959, et de l'INCRA (International Copper Research Association) créé en 1961.

Centre d'Information du Cuivre, Laiton & Alliages et Copper benelux

Ce sont les organisations professionnelles des producteurs et des transformateurs de cuivre chargées de promouvoir les applications du cuivre et de ses alliages sur les marchés français et du Benelux. Financés par les producteurs de cuivre du monde entier et par les sociétés fabricants de demi-produits, le Centre d'Information du Cuivre et Copper benelux mettent en oeuvre des programmes de développement sur leurs marchés respectifs en coordination avec les structures professionnelles internationales de leurs mandants : International Copper Association au niveau mondial, European Copper Institute au niveau Européen. Ils ont pour vocation de produire et de diffuser l'information technique relative au cuivre et à ses alliages, de faire connaître les meilleures méthodes de mise en oeuvre des produits dans chacun de leur domaine d'emploi et d'en promouvoir l'utilisation dans les grands secteurs d'application. Le Centre d'Information du Cuivre et Copper benelux sont les coordinateurs respectivement pour la France et le Benelux du programme européen Leonardo relatif à la formation en matière de «Power Quality».



COPPER BENELUX
a member of the European Copper Institute

Remerciements

Ce projet a été mis en oeuvre avec le soutien de la Communauté Européenne et l'International Copper Association Ltd.

Avertissement

Le contenu de ce projet ne reflète pas nécessairement la position de la Communauté Européenne. De même, il n'implique aucune responsabilité de la part de la Communauté Européenne. L'European Copper Institute, le Centre d'information du Cuivre et Copper benelux déclinent toutes responsabilités pour toutes conséquences directes ou indirectes ou les dommages qui pourraient résulter de l'utilisation du contenu ou de l'incapacité à utiliser les informations et les données de ce guide.

1 Introduction

L'induction électromagnétique est une technique de chauffage pour les matériaux conducteurs d'électricité (métaux), fréquemment utilisée pour de nombreux procédés thermiques tels que la fusion ou la chauffe des métaux.

L'induction électromagnétique a pour particularité de générer la chaleur directement à l'intérieur du matériau à chauffer. Cette particularité présente de nombreux atouts par rapport aux méthodes de chauffe plus standards, notamment la réduction des temps de chauffe et des rendements élevés, ou encore la possibilité de chauffer de façon très locale. Les hautes densités de puissance mises en jeu permettent d'obtenir des vitesses de chauffe très rapides.

2 Principes physiques

Le principe du chauffage par induction électromagnétique est basé sur deux phénomènes physiques :

1. L'induction électromagnétique
2. L'effet joule

2.1 Induction électromagnétique

L'induction électromagnétique est le vecteur de transfert de chaleur depuis la source vers l'objet à chauffer.

Le transfert de l'énergie vers l'objet à chauffer est créé par induction électromagnétique. Quand une boucle d'un matériau conducteur (voir figure 1a) est placée dans un champ magnétique, on voit apparaître aux bords de la boucle une tension induite.

C'est ce qu'exprime la formule suivante :

$$E = \frac{d\Phi}{dt}$$

E	:	Tension induite [V]
Φ	:	Flux magnétique [Wb]
t	:	temps [s]

Quand la boucle est mise en court-circuit, la tension induite E va entraîner l'apparition d'un courant de court-circuit circulant dans le sens opposé au phénomène qui le génère. C'est la loi de Faraday-Lenz (voir figure 1b).

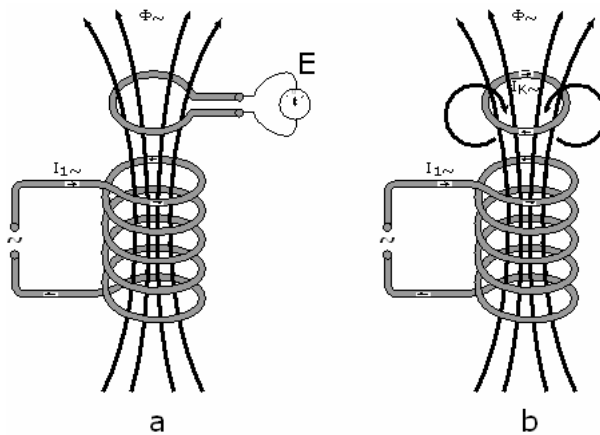


Figure 1: Loi de Faraday

Si un conducteur plein, (un cylindre par exemple), est soumis à une variation de flux magnétique (ou placé dans un champ magnétique alternatif), on voit apparaître, comme dans le cas de la boucle fermée, des courants induits. Ces courants sont dits courants de Foucault et circulent de façon non homogène dans le cylindre (voir figure 2). Les courants de Foucault, via la résistance électrique interne du cylindre, viennent chauffer le conducteur conformément à la loi de Joule.

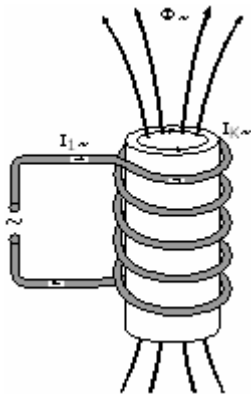


Figure 2: Courants de Foucault induits

Remarque: pour de nombreuses applications pratiques, un solénoïde est utilisé pour générer le champ magnétique. Il existe, toutefois, de nombreuses formes d'inducteur autres pour les applications de chauffage par induction.

2.2 L'effet Joule

Lorsqu'un courant [A] parcourt un conducteur électrique de résistance R [Ω], la puissance dissipée dans le conducteur est de type :

$$P = R \cdot I^2 \quad [\text{W}]$$

Pour la plupart des applications de chauffage par induction, la résistance R ne peut pas être facilement déterminée du fait de la distribution non uniforme des courants de Foucault dans le conducteur.

2.3 Profondeur de pénétration

Une caractéristique générale des courants alternatifs est de ne pas utiliser toute la surface utile des conducteurs pour circuler. Il apparaît, en effet, qu'ils se concentrent sur la périphérie des conducteurs : c'est l'effet de peau. Ainsi, les courants de Foucault induits dans le matériau à chauffer sont plus importants en périphérie qu'au cœur de l'objet. Il en résulte que la chaleur est principalement générée à l'extérieur. L'effet de peau est caractérisé par la profondeur de pénétration δ , qui se définit comme l'épaisseur de la couche superficielle dans laquelle circule 87% de la puissance générée (voir figure 3).

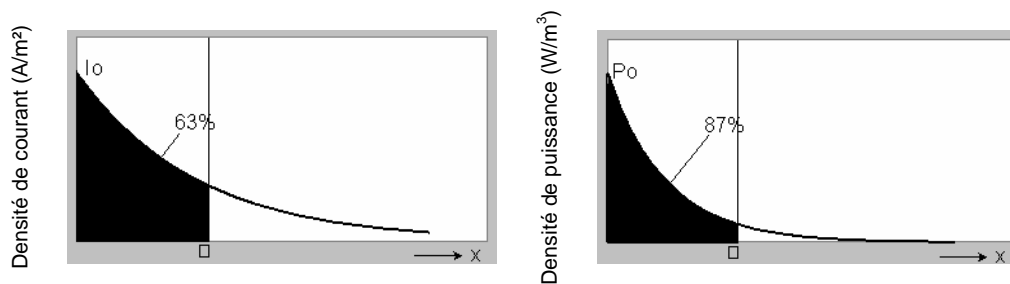


Figure 3: Profondeur de pénétration

La profondeur de pénétration peut être déduite des équations de Maxwell. Pour une charge cylindrique d'un diamètre très supérieur à δ , la formule est :

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu \cdot f}} \quad [\text{m}]$$

ρ	:	Résistivité [$\Omega \cdot \text{m}$]
μ	:	Permeabilité magnétique [H/m] ($\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$)
f	:	Fréquence [Hz]

Il apparaît que la profondeur de pénétration dépend à la fois des caractéristiques du matériau à chauffer (ρ , μ), et de la fréquence du courant alternatif le parcourant. La fréquence est donc un levier de contrôle de la profondeur de pénétration.

Le tableau suivant regroupe des ordres de grandeur de δ en fonction de plusieurs matériaux pour différentes fréquences.

δ en [mm]	Acier 20°C	Acier 20°C	Cuivre 20°C	Cuivre 900°C	Graphite 20°C
ρ [$\mu\Omega.m$] →	0,16	0,16	0,017	0,086	10
μ_r [-] →	40	100	1	1	1
Fréquence ↓					
50 Hz	4,50	2,85	9,31	20,87	225,08
100 Hz	3,18	2,01	6,58	14,76	159,15
1 kHz	1,01	0,64	2,08	4,67	50,33
10 kHz	0,32	0,20	0,66	1,48	15,92
100 kHz	0,10	0,06	0,21	0,47	5,03
1 MHz	0,03	0,02	0,07	0,15	1,59

Tableau 1: Profondeur de pénétration

D'après la formule ci-dessus, il apparaît que la profondeur de pénétration est inversement proportionnelle à la racine carrée de la perméabilité magnétique μ_r .

Pour des matériaux non magnétiques tels que le cuivre ou l'aluminium, le coefficient de perméabilité magnétique $\mu_r = 1$, alors que les matériaux ferro-magnétiques (tels que le fer et de nombreux types d'acier) ont, au contraire, un coefficient de perméabilité beaucoup plus élevé. Ces matériaux offrent donc des profondeurs de pénétration beaucoup moins importantes.

La perméabilité magnétique des matériaux ferromagnétiques dépend fortement de la nature du matériau et des conditions imposées (température, intensité du champ magnétique, saturation). Au-delà de la température de Curie, la perméabilité chute brutalement à $\mu_r=1$, ce qui engendre une hausse rapide de la profondeur de pénétration.

3 Installations de chauffage par induction

3.1 Aspects génériques

L'ensemble constitué de la bobine inductrice et de la charge se comporte, vu depuis la source d'alimentation, comme un circuit globalement inductif. Afin de réduire la consommation d'énergie réactive de ce circuit, il convient d'y adjoindre des condensateurs pour relever le facteur de déplacement.

L'alimentation est assurée par un convertisseur de fréquence permettant de faire varier la fréquence d'alimentation du circuit.

Les installations de chauffage inductif doivent inclure un système de refroidissement pour le convertisseur de fréquence et pour l'inducteur, ainsi qu'un système de transport de l'énergie et un système de commande et de mesure adapté.

3.2 Alimentation énergétique et générateur

L'alimentation électrique peut être de différente nature selon la fréquence d'alimentation de l'installation.

Pour les installations à 50Hz

La charge est directement connectée au transformateur. Le transformateur peut être réglé pour ajuster le courant à l'impédance de la charge.

Convertisseur de fréquence à thyristors :

- Rendement: 90-97%
- Plage de fréquence : 100Hz-10kHz
- Plage de puissance : jusqu'à 10MW

Convertisseur de fréquence à transistors :

- Rendement: 75-90%
- Plage de fréquence : jusqu'à 500kHz
- Plage de puissance : jusqu'à 500kW

Convertisseur de fréquence à lampe à vide :

- Rendement: 55-70%
- Plage de fréquence : jusqu'à 3000kHz
- Plage de puissance : jusqu'à 1200kW

3.3 Inducteurs

Pour la plupart des applications, l'inducteur est un tube en cuivre creux se présentant comme un enroulement venant couvrir l'objet à chauffer. Toutefois, l'inducteur peut être placé de différentes façons selon l'application.

L'inducteur est le plus souvent en cuivre, afin de limiter les pertes électriques, et refroidi par eau, dans la plupart des cas.

4 Propriétés du chauffage par induction

4.1 Transfert de puissance : calcul simplifié

C'est l'effet Joule, dû aux courants de Foucault, qui est responsable de l'augmentation de température de l'objet à chauffer. La formulation simple de la puissance $P=R I^2$ ne peut pas être utilisée du fait de la non-uniformité de la distribution des courants dans le conducteur.

La puissance déposée peut être décrite comme :

$$P = \pi \cdot d \cdot h \cdot H^2 \cdot \sqrt{\pi \cdot \rho \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot f} \cdot C \cdot F$$

d	:	Diamètre du cylindre [m]
h	:	Hauteur du cylindre [m]
H	:	Intensité du flux magnétique [A/m]
ρ	:	Résistivité [$\Omega \cdot m$]
μ_0	:	Perméabilité magnétique du vide ($4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m)
μ_r	:	Perméabilité relative
f	:	Fréquence [Hz]
C	:	Facteur de couplage
F	:	Facteur de transmission de puissance

Les deux derniers termes de la formule sont des facteurs de correction :

- F (facteur de transmission de puissance) :
Prend en compte la relation entre la profondeur de pénétration et les dimensions externes de la charge (F dépend de la géométrie de la charge).
- C (facteur de couplage) :
Corrige les différences relatives des dimensions de la charge et de l'inducteur. Cette correction diminue avec la longueur de l'inducteur et l'écart entre l'inducteur et la charge.

Conclusions

- La puissance peut être augmentée en augmentant l'intensité du flux magnétique H, c'est-à-dire en augmentant le nombre d'ampères tours de l'inducteur.
- Une forte augmentation de la fréquence ne résulte qu'en une petite augmentation de la puissance. De plus, plus la fréquence augmente et plus les pertes dans l'alimentation sont importantes et plus la profondeur de pénétration diminue.

- Les caractéristiques mécaniques de la charge jouent un rôle important (ρ et plus particulièrement μ_r). Pour les matériaux ferromagnétiques, au-delà de la température de Curie, la puissance déposée diminue fortement ($\mu_r = 1$ si $T > T_{\text{Curie}}$).

4.2 Rendement électrique

Le rendement électrique est défini comme suit:

$$\eta_e = \frac{P}{P + P_i}$$

P	:	Puissance transmise à la charge
P _i	:	Puissance dissipée dans l'inducteur

Le rendement dépend fortement du ratio diamètre/profondeur de pénétration (dans le cas de charge cylindrique) et de la conception de l'inducteur. Les règles de base à respecter pour un meilleur rendement sont :

- pour l'inducteur, utiliser un matériau de faible résistance, en règle général du cuivre électrolytique.
- minimiser la distance entre les enroulements.
- établir une bonne connexion entre l'inducteur et la charge (limitation de l'entrefer, et la taille de l'inducteur suffisamment longue).

4.3 Facteur de puissance

L'ensemble constitué de l'inducteur et de la charge est assimilable à une charge globalement inductive gourmande en énergie réactive. Ce caractère inductif est dû, d'une part à l'entrefer (entre l'inducteur et la charge) et d'autre part, au comportement inductif de la charge elle-même selon le rapport d/d (dans le cas d'un cylindre).

Le facteur de puissance de l'inducteur et de la charge se situe entre 0,05 et 0,6. Dans tous les cas, un relèvement du facteur de déplacement par condensateurs est requis.

4.4 Caractéristiques du chauffage par induction

Procédé technique:

- Grâce à la haute densité de puissance, une installation à induction peut être compacte et réaliser un chauffage rapide.
- L'induction permet d'obtenir des températures de chauffe très élevées
- L'induction peut être appliquée de façon très locale
- Les installations à induction sont compatibles avec les automatismes

Consommation énergétique

- Les installations à chauffage par induction ont en règle générale un bon rendement. Toutefois, le rendement dépend aussi de la nature du matériau à chauffer.
- Une part importante des pertes calorifiques peut être récupérée.

Qualité

- Une pureté extrême peut être obtenue en travaillant sous vide ou dans des atmosphères inertes
- L'endroit de chauffe peut être déterminé avec précision
- Le chauffage peut être régulé précisément

Environnement et conditions de travail

- Pas de production de fumée

Limites

- Une installation à induction requiert un investissement important qui ne peut être considéré qu'après comparaison avec d'autres techniques de chauffage
- Le chauffage par induction est utilisé principalement pour le chauffage de formes simples

5 Applications industrielles

Les applications industrielles types pour le chauffage par induction sont : la fusion de métal, le chauffage de métal pour en faciliter la formabilité, le brasage, le soudage et toutes sortes de traitements de surface. Toutefois, en utilisant des conducteurs électriques spécifiques (tels que le graphite) d'autres matériaux peuvent être chauffés (verre...).

5.1 Fusion de métal par induction dans les fours à creuset

La surface intérieure du creuset est constituée d'un revêtement réfractaire (brasque), qui contient le matériau à porter à la fusion et est entouré par la bobine inductrice.

L'inducteur est refroidi par eau et entouré d'un noyau de fer pour améliorer le couplage magnétique.

Il existe des applications à 50Hz mais aussi à moyennes fréquences. Les gammes de puissance, jusqu'à 10MW pour des applications standards, et jusqu'à 1200kW/ton pour des applications spécifiques, sont très élevées, et permettent de réduire considérablement les temps de fusion.

Les fours à creuset basse fréquence (50Hz) sont dédiés aux applications de taille importante (en termes de puissance et de capacité). Les applications à fréquences moyennes sont de taille plus modeste, mais offrent de plus grandes flexibilités de production et sont plus compactes.

On observe un remplacement progressif des applications basses fréquences par des applications moyennes fréquences.

5.2 Brasage

Le brasage est une technique d'assemblage de deux pièces jointes par action d'un matériau tiers porté à température de fusion. A la zone de connexion, les deux pièces sont portées à une température plus élevée que la température de fusion du troisième matériau.

L'induction est souvent utilisée pour chauffer les pièces localement. De plus, l'augmentation de température étant rapide, cela permet de mieux contrôler d'éventuels problèmes d'oxydation et de changement de structure ou de composition du matériau. Le brasage sous atmosphère inerte est également possible.

Le chauffage par induction correspond bien à des vitesses de production élevées sur des lignes de production automatisées.

5.3 Durcissement de l'acier par induction

Les aciers dont le pourcentage de carbone est supérieur à 0,3% sont adaptés aux traitements de durcissement de surface. La pièce est d'abord portée à une température de 900°C puis brusquement refroidie. Cette technique est utilisée pour le durcissement des aciers des pignons de boîte de vitesse, des vilebrequins, des soupapes, des lames de scie, des bèches, des rails et bien d'autres applications.

Le procédé de chauffage par induction présente l'avantage d'appliquer le traitement localement, de ne pas changer la composition chimique de la couche surfacique et d'éviter les déformations. Grâce à la précision de chauffe, les consommations d'énergie sont moindres que pour d'autres techniques pour lesquelles le chauffage global du produit est nécessaire.

Les densités de puissance mises en jeu pour les applications de durcissement par induction sont de l'ordre de 1.5 à 5kW/cm², et le temps de traitement de 2 secondes.

La figure 4 représente des inducteurs. Certains sont équipés d'un système de spray permettant de refroidir la pièce juste après la chauffe.

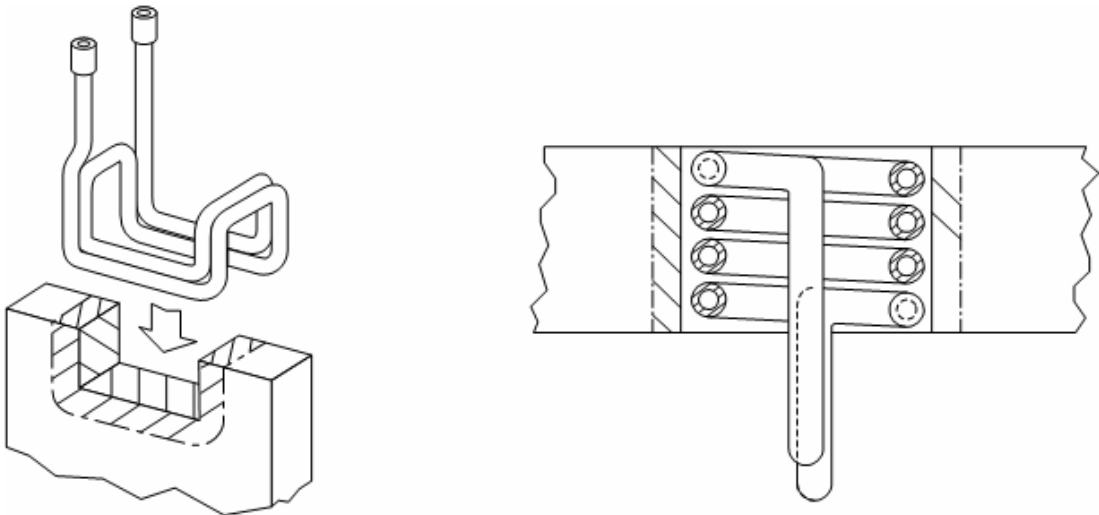


Figure 1: Inducteurs pour durcissement

Le durcissement par induction est particulièrement appliqué pour les process automatisés avec des volumes de production élevés. Grâce au chauffage par induction, une production constante et de bonne qualité peut être atteinte. La consommation énergétique et les pertes de production sont plus faibles que pour les techniques de chauffage conventionnelles.

6 Conclusions

Ce guide présente les avantages d'une technique de chauffage assez peu conventionnelle. Comme nous l'avons vu dans ce document, l'avantage principal du chauffage par induction est que la chaleur est directement générée dans le matériau devant être chauffé. Cela permet de réduire fortement les temps de réponse et d'obtenir de très bons rendements et des possibilités de chauffe localisées.

Des précautions doivent toutefois être prises en compte notamment en ce qui concerne le couplage entre l'inducteur et la charge, ainsi que la taille et la géométrie des objets à chauffer.

Quoi qu'il en soit, de nombreuses applications sont possibles dans le domaine du chauffage et de la fusion.

7 Références et bibliographies

- [1] V. Rudnev, D. Loveless, R. Cook, M. Black, Handbook of Induction Heating, Marcel Dekker, New York, 2003.
- [2] P. A. Davidson, An Introduction to Magnetohydrodynamics, Cambridge University Press, Cambridge, 2006.
- [3] Proceedings of the 5th International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials, The Iron and Steel Institute of Japan, 2006.
- [4] A.C. Metaxas, Foundations of Electroheat. A Unified Approach, John Wiley & Sons, Chichester, 1996