

## Le chauffage par induction électromagnétique

### PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Le chauffage par induction électromagnétique est une technique électrothermique permettant de chauffer des matériaux conducteurs d'électricité, sans contact matériel avec une source électrique.

Lorsqu'un conducteur électrique est déplacé dans un champ magnétique statique, un courant électrique s'établit dans cet objet. C'est le phénomène d'induction. De la même manière,

on induit un courant dans un conducteur fixe placé dans un champ magnétique variable. Un courant alternatif parcourant un bobinage (ou solénoïde) génère en effet un champ magnétique oscillant à la même fréquence dont l'intensité est maximale à l'intérieur de celui-ci (loi d'Ampère).

Si une pièce conductrice est placée à l'intérieur d'une bobine, les courants induits par le champ magnétique s'y développent (loi de Lenz) et chauffent la pièce par effet Joule.

Un équipement de chauffage par induction

comprend essentiellement un ou plusieurs inducteurs de chauffage (avec parfois un concentrateur de champ), une alimentation électrique, un système de refroidissement de l'inducteur et de l'alimentation électrique et un système de contrôle-commande.

Les configurations d'inducteurs, les fréquences (de 1 Hz à 5 MHz) et les puissances électriques mises en œuvre sont très variées et dépendent de l'application (chauffage dans la masse ou superficiel, cuisson, fusion...), du matériau et de sa forme (billettes, lopins, cuves...).

Le chauffage par induction entraîne successivement les trois phénomènes physiques suivants :

- transfert de l'énergie par voie électromagnétique de l'inducteur vers le matériau à chauffer ;
- transformation de cette énergie électrique en chaleur par effet Joule ;
- diffusion par conduction thermique de la chaleur au sein du matériau.

## APPLICATIONS

Le chauffage par induction ne s'applique qu'aux matériaux de résistivité électrique comprise entre  $10^{-8} \Omega.m$  (cuivre) et  $10^{-1} \Omega.m$  (verre fondu). La profondeur de pénétration thermique est inversement proportionnelle à la racine carrée de la fréquence et varie de quelques micromètres à plusieurs centimètres.

Les puissances mises en œuvre peuvent varier de quelques centaines de watts (petits fours à induction de laboratoire ou de prothésiste dentaire) à plusieurs mégawatts pour les grosses installations de fusion.



Figure 1. Four à induction utilisé en fonderie pour réaliser les alliages ferreux (acier, fonte).

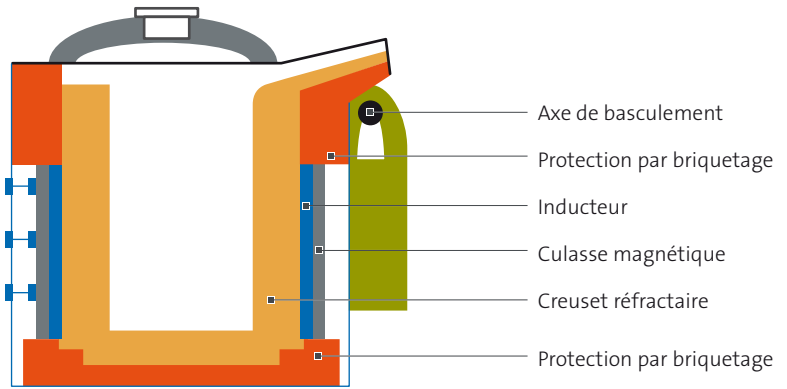


Figure 2. Schéma de principe d'un four de fusion à creuset.

On trouve principalement des installations de chauffage par induction dans les domaines de la métallurgie et de la mécanique : 45 % pour la fusion, 45 % pour le chauffage avant formage, 10 % pour le traitement thermique et les applications diverses.

Cependant, grâce à l'évolution des technologies de l'électronique et à l'apparition de composants de commutation plus rapides, des applications innovantes sont apparues dans d'autres domaines : chimie (fusion directe de verres et d'oxydes...), grand public (plaque chauffante de cuisine).

### Fusion

Les fours les plus répandus sont les fours à creuset à basculement, plutôt utilisés pour la fusion, et les fours à canal, souvent réservés au maintien en température des métaux fondus (figure 2).

### Réchauffage avant formage et forgeage

Le réchauffage par induction est de plus en plus utilisé dans le milieu industriel en raison de ses possibilités de productivité élevée, de sa faible consommation d'énergie, de sa rapidité de chauffage, de la réduction des pertes par oxydation, de la bonne précision de température permise et de la possibilité de chauffer une zone bien délimitée au niveau des pièces.

### Traitement thermique superficiel

La fabrication mécanique de grandes séries – et en particulier l'industrie automobile – a vu ces dernières années le développement d'un traitement thermique de qualité des aciers et des fontes constitué d'un chauffage superficiel par induction à basse fréquence (50 ou 60 Hz), à moyenne fréquence (entre 100 et 20 000 Hz) ou à haute fréquence (supérieur à 20 kHz) suivi de trempe.

L'induction permet de chauffer la surface de la pièce sans affecter notablement le cœur, puis de durcir par refroidissement (trempe à l'eau ou à l'air) de manière à obtenir une structure hétérogène constituée :

- d'une couche superficielle dure (entre 0,3 et 6 mm d'épaisseur) afin d'assurer à la pièce une bonne résistance à la fatigue et à l'usure ;
- d'un cœur résilient assurant la sécurité de fonctionnement de la pièce.

On peut ainsi accroître les performances des pièces sollicitées.

### Industrie chimique

L'induction est utilisée comme moyen de chauffage des parois de réacteurs chimiques. On trouve ce type de réacteurs dans la fabrication des résines, des cosmétiques et dans l'industrie pharmaceutique.

### Plasma d'induction

Constitué de gaz partiellement ionisé, le plasma peut être assez conducteur pour entretenir une réaction thermique par induction.

### Autres applications de l'induction

- On peut citer entre autres :
- le brassage électromagnétique d'alliages métalliques ;
  - le confinement électromagnétique de plasma ;
  - le décapage de peinture ;
  - les plaques de cuisson ;
  - la recharge d'accumulateurs.

Figure 3. Exemples d'applications du chauffage par induction.

Type de chauffage	Fréquence	Applications
Pénétrant	1 Hz à quelques kHz pour les métaux 0,1 à 5 MHz pour les semi-conducteurs	Forge, fusion
Superficiel	10 à 500 kHz pour les métaux	Trempe superficielle, brasage
Pelliculaire	10 à 1 000 kHz pour les métaux	Soudage des tubes, scellement thermique

## VALEURS DÉCLENCHANT L'ACTION

La directive européenne 2004/40/CE du 29 avril 2004 sur les risques liés aux champs électromagnétiques définit les valeurs déclenchant l'action afin de limiter l'exposition des travailleurs. Le fait de ne pas dépasser ces valeurs garantit le respect des valeurs limites d'exposition.

Ces installations génèrent des champs électromagnétiques avec une très forte prépondérance du champ magnétique dans l'environnement du système à induction et des câbles d'alimentation électrique. Ce champ sera d'autant plus élevé que l'intensité du courant consommé par la machine sera importante.

## RISQUES

### Exposition aux champs électromagnétiques

Le parc français d'équipements de chauffage par induction est estimé dans l'industrie à 13 000 unités. Ces équipements peuvent être répartis en quatre sous-familles selon leur application à savoir :

- traitement de surface ;
- chauffage ;
- fusion et soudage ;
- autres applications.

Une étude réalisée par l'INRS sur 130 postes de travail a montré que la valeur du champ magnétique au poste de travail dépasse la VDA pour :

- plus de 50 % des applications de traitement de surface ;
- presque 40 % des applications de chauffage ;
- 20 % des applications de fusion et de soudage ;
- 20 % des applications n'entrant pas dans ces catégories (ajout de métal en particulier).

Des valeurs importantes de champ magnétique sont généralement mesurées non seulement dans les zones proches des inducteurs mais également à proximité de leurs câbles d'alimentation.

### Compatibilité électromagnétique avec les implants

Il existe un risque de dysfonctionnement des implants actifs tels que les stimulateurs cardiaques, les défibrillateurs, les prothèses auditives, les pompes à insuline, les valves cérébrales... (voir fiche ED 4206).

D'autres implants dits passifs (broches, plaques, par exemple) réalisés dans des matériaux ferromagnétiques sont sensibles au champ magnétique. Les conséquences de l'exposition peuvent être l'aimantation de l'implant, son déplacement par attraction, son échauffement par induction.

Figure 4. Valeurs déclenchant l'action (VDA) définies pour le champ magnétique par la directive 2004/40/CE dans la gamme de fréquences de 0 à 10 MHz.

Gamme de fréquences	Intensité de champ magnétique (A/m)
Jusqu'à 1 Hz	$1,63 \cdot 10^5$
1-8 Hz	$1,63 \cdot 10^5 / f^2$
8-25 Hz	$2 \cdot 10^4 / f$
0,025-0,8 kHz	$20 / f$
0,82-65 kHz	24,4
65-100 kHz	$1 600 / f$
0,1-10 MHz	$1,6 / f$

*f est la fréquence exprimée dans l'unité précisée dans la première colonne.*

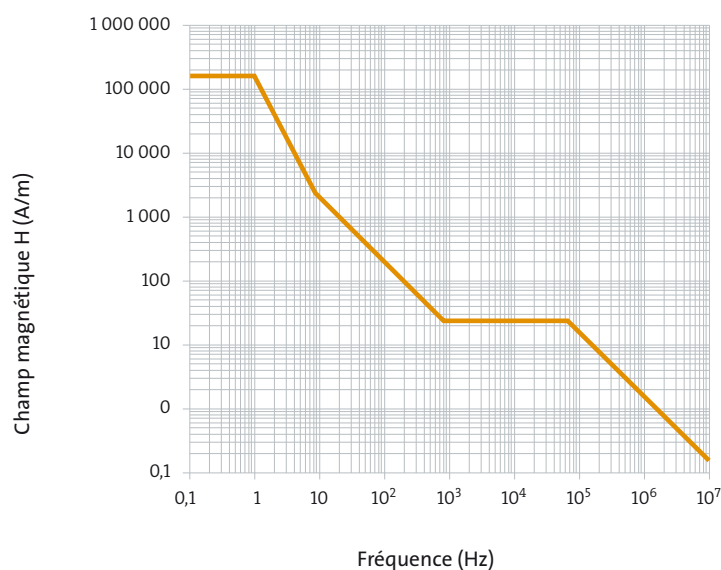


Figure 5. Représentation graphique des valeurs déclenchant l'action concernant le champ magnétique entre 0 et 10 MHz.

### Autres risques

D'autres risques non traités dans cette fiche existent, tels que les risques électriques, thermiques, mécaniques et chimiques.

## MOYENS DE PRÉVENTION

Il convient en premier lieu de choisir des équipements de travail moins rayonnants. Par exemple, l'amélioration du rendement d'un inducteur utilisé pour le chauffage par induction permet, pour la réalisation de tâches équivalentes, une diminution de la valeur du champ magnétique au poste de travail.

L'organisation de l'activité doit être telle que la puissance de l'équipement soit réduite lors de toute intervention à proximité. Enfin, le moyen de protection le plus fréquent contre l'exposition aux rayonnements électromagnétiques est l'éloignement.

## POUR EN SAVOIR PLUS

■ *Technique de l'ingénieur* : guides D 5935 et D 5936.

■ Directive 2004/40/CE du Parlement européen et du conseil du 29 avril 2004 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques).

■ Directive 2008/46/CE du Parlement européen et du conseil du 23 avril 2008 modifiant la directive 2004/40/CE.

■ Stephan M., *Inducteur à culasse moulée pour le chauffage par induction, 33<sup>e</sup> congrès du traitement thermique et de l'ingénierie des surfaces* (juin 2005).

■ Fiches « Champs électromagnétiques » de l'INRS :

– *Généralités sur les rayonnements non ionisants jusqu'à 300 GHz*, ED 4201.

– *Les sources de rayonnements non ionisants (jusqu'à 60 GHz)*, ED 4202.

– *Les effets des rayonnements non ionisants sur l'homme*, ED 4203.

– *La réglementation en milieu professionnel*, ED 4204.

– *Les stimulateurs cardiaques*, ED 4206.

– *Les mécanismes d'interaction avec le corps humain*, ED 4215.

– *Grossesse et champs électromagnétiques*, ED 4216.

■ *Guide pour l'établissement de limites d'exposition aux champs électriques, magnétiques et électromagnétiques. Champs alternatifs (de fréquence variable dans le temps, jusqu'à 300 GHz)*, INRS, ND 2143.

■ Site [www.inrs.fr](http://www.inrs.fr)

### Auteurs :

Groupe RNI Carsat/Cram/INRS

Ch. Bisserieux, Carsat Auvergne

P. Laurent, Carsat Centre-Ouest

Ph. Cabaret, Carsat Languedoc-Roussillon

Ch. Bonnet, Carsat Centre

E. Marteau, Cram Île-de-France

G. Le Berre, Carsat Bretagne

S. Tirlemont, Carsat Nord-Picardie

M. Castro, Carsat Midi-Pyrénées

Y. Ganem et P. Moureaux, INRS Paris

A. Becker, Ph. Demaret, P. Donati, INRS Lorraine

### Contacts :

Ph. Demaret : INRS 03 83 50 85 32

Services Prévention des Carsat et Cram