



Le chauffage par induction électromagnétique

Le chauffage par induction est une méthode électrothermique permettant de chauffer un élément conducteur sans contact direct avec celui-ci. Ce procédé est largement utilisé dans l'industrie, notamment pour le soudage, le brasage, la fusion, les traitements thermiques etc. C'est ce même procédé qui est utilisé pour les plaques à induction domestiques.

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Le procédé de chauffage par induction résulte de la combinaison de différents phénomènes physiques (voir figure 1) :

- 1) création d'un champ magnétique variable dans le temps à l'aide d'un bobinage appelé inducteur et parcouru par un courant à la fréquence souhaitée. L'inducteur peut prendre différentes formes adaptées à la géométrie de la pièce à chauffer ;
- 2) création d'un courant au sein de la pièce par induction électromagnétique. Ce phénomène se produit lorsqu'un élément conducteur est plongé dans un champ magnétique variable ;
- 3) échauffement de la pièce dû au passage de ce courant induit (effet Joule).

Un équipement de chauffage par induction comprend généralement un ou plusieurs

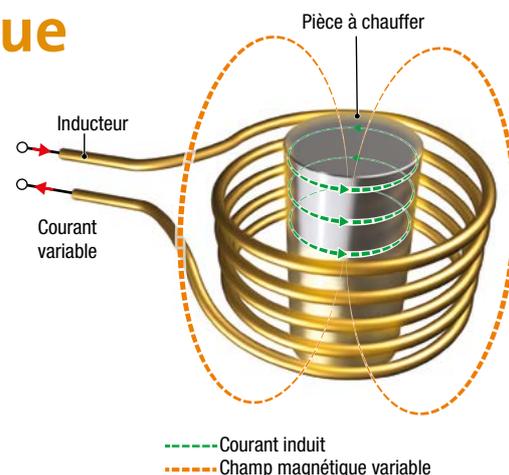


Figure 1. Schéma de principe du procédé de chauffage par induction

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

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...).

APPLICATIONS

Le chauffage par induction ne s'applique qu'aux matériaux conducteurs ayant une conductivité électrique comprise entre 10 S/m et 10⁸ S/m. La profondeur de pénétration du champ pour un matériau donné est inversement proportionnelle à la racine carrée de la fréquence et varie de quelques micromètres à plusieurs centimètres (voir tableau 1). De même, 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.

On trouve principalement des installations de chauffage par induction dans les domaines de la métallurgie et de la mécanique : fusion, chauffage avant formage, traitement thermique (trempe)...

Cependant, grâce à l'évolution des technologies de l'électronique et à l'apparition de composants de commutation plus rapides, des applications sont apparues dans d'autres domaines tels que la chimie (fusion directe de verres et d'oxydes...) et l'industrie agroalimentaire.

Ces installations génèrent des champs magnétiques prépondérants à proximité de l'inducteur et des câbles d'alimentation électrique. Ces champs sont d'autant plus

Tableau 1. Exemples d'applications du chauffage par induction

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

importants que l'intensité du courant parcourant l'inducteur est élevée.

Fusion

Les fours les plus répandus sont les fours à creuset à basculement, plutôt utilisés pour la fusion (voir figures 2 et 3), et les fours à canal, souvent réservés au maintien en température des métaux fondus.

Réchauffage avant formage et forgeage

Le réchauffage par induction est de plus en plus utilisé dans le milieu industriel. Il présente en effet des atouts majeurs :

- possibilité d'une productivité élevée ;
- faible consommation énergétique ;
- rapidité de chauffage ;
- réduction des pertes par oxydation ;
- bonne précision de température ;
- possibilité de chauffer une zone bien délimitée au niveau des pièces.

Traitement thermique superficiel

La fabrication mécanique de grandes séries – en particulier dans l'industrie automobile – a vu ces dernières années le développement d'un traitement thermique de qualité des aciers et des fontes. Celui-ci est constitué d'un chauffage superficiel par induction à basses (50 ou 60 Hz), moyennes (entre 100 et 20 000 Hz) ou à hautes fréquences

(supérieures à 20 kHz) en fonction des caractéristiques du matériau, suivi d'une trempe.

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

- 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.

Autres applications de l'induction

On peut citer entre autres :

- le brassage électromagnétique d'alliages métalliques ;
- le plasma entretenu par induction utilisé dans la production de poudre ou la synthèse de nanomatériaux ;
- le décapage de peinture.

Le phénomène physique de l'induction est de plus en plus utilisé pour le transfert d'énergie (recharge d'accumulateurs).



Figure 2. Four à induction utilisé en fonderie pour réaliser les alliages ferreux (acier, fonte)

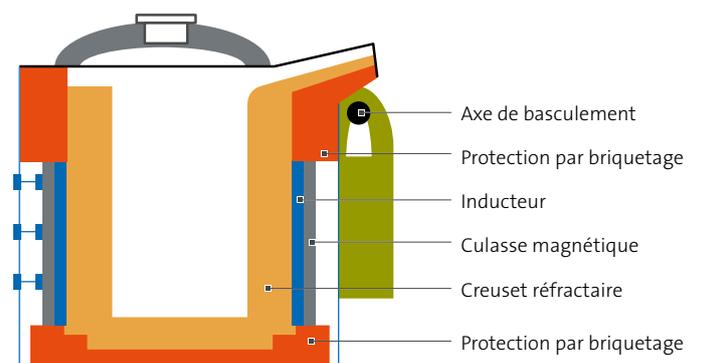


Figure 3. Schéma de principe d'un four de fusion à creuset

VALEURS RÉGLEMENTAIRES

Le Code du travail (articles R. 4453-3 et R. 4453-4) fixe des valeurs limites d'exposition (VLE) ainsi que des valeurs déclenchant l'action (VA : voir tableau 2) afin de limiter les risques liés à l'exposition des travailleurs aux champs électromagnétiques. Pour avoir une vue d'ensemble sur ces VLE et VA, on peut consulter la fiche INRS ED 4204, *La réglementation en milieu professionnel*.

RISQUES

Effets de l'exposition aux champs électromagnétiques

Jusqu'à des fréquences de 10 MHz, les effets des champs électromagnétiques sur le corps humain consistent en des stimulations du système nerveux central et périphérique ainsi que des effets sensoriels pour les fréquences allant de 1 Hz à 400 Hz. Pour les applications utilisant des fréquences supérieures à 100 kHz, s'ajoute un risque d'échauffement des tissus. Pour disposer de plus d'informations sur les effets, on peut se reporter à la fiche INRS ED 4350, *Les ondes électromagnétiques : actions et effets sur le corps humain*.

Le respect des VA permet de se prémunir de ces phénomènes.

Le parc français d'équipements de chauffage par induction est estimé dans l'industrie à plus de 10 000 unités.

Une étude réalisée par l'INRS et les Carsat sur plus de 200 postes de travail de différentes natures a montré que l'intensité du champ magnétique dépassait les VA applicables aux travailleurs sans risques particuliers pour un cinquième des cas. Concernant les travailleurs équipés de dispositifs médicaux implantés et les femmes enceintes, les VA pertinentes étaient dépassées dans les trois quarts des cas.

D'après cette étude, on constate que :

- 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 ;
- l'exposition est fonction de la puissance de l'installation et de la distance de l'opérateur avec la source ;
- ainsi, les petites installations peuvent s'avérer plus exposantes du fait de la proximité du travailleur avec l'inducteur.

Compatibilité électromagnétique avec les dispositifs médicaux

Il existe un risque de dysfonctionnement des dispositifs médicaux implantés actifs tels que les stimulateurs cardiaques, les défibrillateurs, les prothèses auditives, les pompes à insuline, etc. en raison des interférences possibles avec le champ électromagnétique. Ce risque est possible même si l'intensité de ce champ est inférieure aux valeurs réglementaires (voir la fiche INRS ED 4267, *Dispositifs médicaux implantables*).

Il existe aussi un risque d'échauffement des parties métalliques conductrices des dispositifs médicaux et, par conséquent, des tissus au contact.

Cas des travailleuses enceintes

Le niveau d'exposition des travailleuses enceintes doit être maintenu à un niveau aussi faible qu'il est raisonnablement possible d'atteindre en tenant compte des recommandations de bonnes pratiques existantes, et, en tout état de cause, à un niveau inférieur aux limites réglementaires fixées pour le public (voir ED 4216, *Grossesse et exposition professionnelle aux champs électromagnétiques*). Par ailleurs, la travailleuse enceinte demandera conseil au médecin du travail par rapport à son poste de travail.

Cas des jeunes travailleurs

Il est interdit d'affecter un jeune travailleur de moins de 18 ans à des travaux susceptibles de l'exposer au-delà des VLE relatives aux effets sur la santé mais également aux VLE relatives aux effets sensoriels.

Autres risques

D'autres risques professionnels non traités dans cette fiche existent avec l'utilisation des procédés de chauffage par induction magnétique, tels que les risques électriques, thermiques, mécaniques et chimiques.

Tableau 2. Valeurs déclenchant l'action (VA) définies pour le champ électrique et magnétique par le Code du travail pour les travailleurs sans risques particuliers

Exposition	Champ électrique		Champ magnétique	
	VA	VA basse	VA haute	Exposition des membres à un champ magnétique localisé
1 Hz ≤ f < 8 Hz	2*10 ⁴ V/m	$\frac{2 \times 10^5}{f^2} \mu\text{T}$	$\frac{3 \times 10^5}{f} \mu\text{T}$	$\frac{9 \times 10^5}{f} \mu\text{T}$
8 Hz ≤ f < 25 Hz		$\frac{2,5 \times 10^4}{f} \mu\text{T}$		
25 Hz ≤ f < 50 Hz		10 ³ μT		
50 Hz ≤ f < 300 Hz	$\frac{10^6}{f} \text{ V/m}$	$\frac{3 \times 10^5}{f} \mu\text{T}$	100 μT	300 μT (effet non thermique)
300 Hz ≤ f < 1,64 kHz				
1,64 kHz ≤ f < 3 kHz	610 V/m	$\frac{3 \times 10^5}{f} \mu\text{T}$	100 μT	300 μT (effet non thermique)
2,5 kHz ≤ f < 100 kHz				
100 kHz ≤ f < 1 MHz	610 V/m (effet thermique et non thermique)	100 μT (effet non thermique)	100 μT	300 μT (effet non thermique)
1 MHz ≤ f < 10 MHz	610 V/m (effet non thermique) $\frac{6,1 \times 10^8}{f} \text{ V/m}$ (effet thermique)	$\frac{2 \times 10^6}{f} \mu\text{T}$ (effet thermique)		

f est la fréquence exprimée en Hertz.

MOYENS DE PRÉVENTION

Sur la base des résultats de l'évaluation des risques, différents moyens de prévention et de protection peuvent être mis en place :

- choisir des équipements de travail moins rayonnants ;
- mettre en place un blindage adapté à la fréquence du champ autour de l'équipement ;
- optimiser la géométrie et l'orientation de l'inducteur lors de sa conception. Plus la surface de boucle est importante plus le champ rayonné l'est. Il convient également d'éloigner l'opérateur de l'axe de la bobine ;
- organiser l'activité pour que la puissance de l'équipement soit réduite lors de toute intervention à proximité. Si cela n'est pas possible, prévoir les interventions lors des phases à faibles puissances ;
- éloigner l'opérateur de la source.

Pour en savoir plus, on pourra se reporter à la fiche INRS ED 4214, *Champs électromagnétiques : moyens de prévention*.

Signalisation

Les zones où des travailleurs sont susceptibles d'être exposés à des niveaux de champs électromagnétiques supérieurs aux VA seront signalisées par un affichage de pictogrammes (voir figure 4) et éventuellement par un marquage au sol. L'accès à la zone peut être limité si besoin (barrière matérielle, organisation du poste de travail...).

INFORMATION ET FORMATION

En cas d'exposition au-delà des limites fixées pour le public, les travailleurs concernés doivent recevoir une information et une formation sur les effets potentiels en lien avec leur exposition, les moyens de protection mis en place et les précautions à prendre. De plus, s'il existe un risque de dépassement des VA ou d'effets indirects tels que des interférences avec les dispositifs médicaux, une notice de poste doit être rédigée et contenir les informations en rapport avec les risques, les dispositions prises pour les éviter et les règles de sécurité applicables.



Rayonnements non ionisants



Entrée interdite aux porteurs d'implants actifs



Entrée interdite aux porteurs d'implants métalliques

Figure 4. Signalisation à mettre en place à proximité des installations émettant des champs électromagnétiques importants

POUR EN SAVOIR PLUS

■ Fiches de la collection « Champs électromagnétiques », INRS.

■ Techniques de l'ingénieur : guides D 5935, *Électrothermie industrielle. Chauffage par induction électromagnétique*, et D 5936, *Chauffage par induction électromagnétique : technologie*.

■ Code du travail, articles R. 4453-1 à R. 4453-34. Consultables sur www.legifrance.gouv.fr.

■ Guides non contraignants de bonnes pratiques pour la mise en œuvre de la directive 2013/35/UE « Champs électromagnétiques ». Disponibles sur www.ec.europa.eu/social.

- Volume 1 : *Guide pratique*.
- Volume 2 : *Études de cas*.
- Volume 3 : *Guide à l'intention des PME*.

■ Décret n° 2002-775 du 3 mai 2002 relatif aux valeurs limites d'exposition du public aux champs

électromagnétiques émis par les équipements utilisés dans les réseaux de télécommunication ou par les installations radioélectriques.

■ Outil Oseray (outil simplifié d'évaluation des risques dus aux rayonnements électromagnétiques). Disponible sur www.inrs.fr.

Document INRS élaboré par un groupe de travail RNI Carsat-Cramif/INRS composé de :

C. Bisseriex, Carsat Auvergne ■ P. Laurent, Carsat Centre-Ouest ■ A. Deleau, Carsat Languedoc-Roussillon ■ J. Fortuné, Carsat Centre ■ L. Hainoz, Cram Île-de-France ■ G. Le Berre, Carsat Bretagne ■ S. Tirlémont, Carsat Nord-Picardie ■ N. Morais, Carsat Midi-Pyrénées ■ B. Gallin, Carsat Nord-Est ■ R. Mouillseaux, L. Hammen, A. Bourdieu, INRS

Contacts : R. Mouillseaux, L. Hammen, INRS

Services Prévention des Carsat, Cramif et CGSS