



Cours d'électrothermie

Chauffage par induction électromagnétique

Mathieu BARDOUX

IUT du Littoral Côte d'Opale
Département Génie Thermique et Énergie

1^{re} année

Rappel du plan

- 1 Introduction
- 2 Principe
- 3 Puissance
- 4 Applications
 - Fours à induction à creuset
 - Soudage par induction
 - Frettage par induction
 - Cuisson par induction

Intérêt du chauffage par induction

Le chauffage par conduction directe est efficace et rapide mais nécessite de très bons contacts entre la pièce et les électrodes d'amenée de courant.

À l'inverse, le chauffage par conduction indirecte présente un rendement bien moindre.

Le chauffage par induction électromagnétique permet de conserver l'avantage du chauffage par conduction directe, tout en se libérant des contacts électriques.

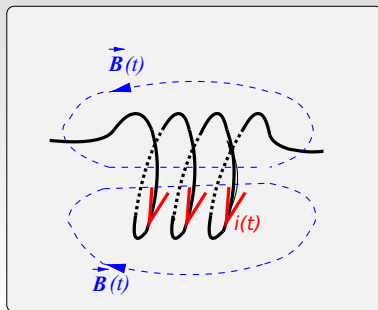
Rappel du plan

- 1 Introduction
- 2 Principe**
- 3 Puissance
- 4 Applications
 - Fours à induction à creuset
 - Soudage par induction
 - Frettage par induction
 - Cuisson par induction

Principe du chauffage par induction

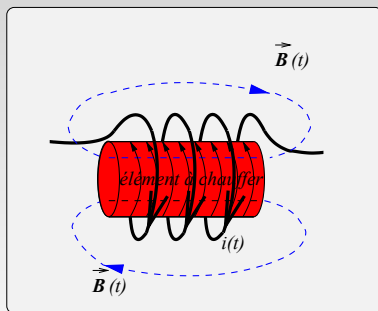
Génération de courants de Foucault

Si, dans un solénoïde, on fait passer un courant continu (flèche en trait plein) l'induction est dirigée dans le sens donné par la règle du tire bouchon. Si on applique aux bornes du solénoïde une différence de potentiel U alternative, le courant alternatif qui parcourt cette bobine va créer une induction magnétique alternative à la fréquence du courant.



Principe du chauffage par induction

Si on introduit un corps conducteur dans la bobine, il sera soumis à un flux magnétique variable. Ce flux va à son tour, d'après la loi de Lenz, induire une force électromotrice qui donnera naissance à des courants induits circulant dans le conducteur.



Ces courants induits sont les courants de **FOUCAULT**, qui par effet Joule chauffent le corps.

Rappel du plan

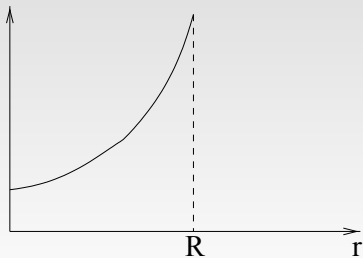
- 1 Introduction
- 2 Principe
- 3 Puissance**
- 4 Applications
 - Fours à induction à creuset
 - Soudage par induction
 - Frettage par induction
 - Cuisson par induction

Puissance transmise

Le calcul de la puissance transmise à la pièce doit être mené à partir des équations de Maxwell. Nous procédons dans ce cours à un calcul simplifié.

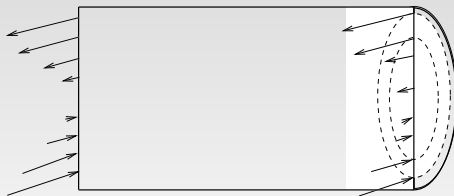
Nous supposons que la densité surfacique (quantité de courant traversant une surface élémentaire de la section droite du conducteur) décroît de la périphérie du conducteur vers le cœur du conducteur selon la loi :

$$j(r) = j_0 e^{-\frac{R-r}{d_0}}$$



Puissance transmise

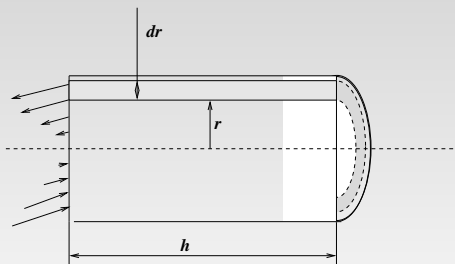
Dans un cylindre de révolution soumis à un champ magnétique axial, les lignes de courants de FOUCAULT sont des anneaux contenus dans un plan de section droite du cylindre. L'intensité dans un anneau est d'autant plus élevée que l'on s'éloigne de l'axe du cylindre.



Calcul de l'intensité totale

La densité surfacique de l'intensité ayant le même module pour tous les points distants de l'axe du cylindre d'une même distance r , nous choisissons comme élément de surface :

$$dS = h dr$$



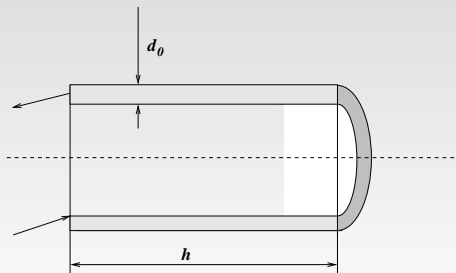
$$I_{total} = \int_0^R j(r) dS = \int_0^R h dr j_0 e^{-\frac{R-r}{d_0}}$$

Calcul de l'intensité totale

Si $R \gg d_0$, en posant $I_0 = h j_0 d_0$ on obtient alors l'expression suivante :

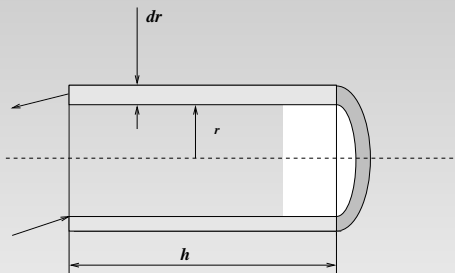
$$I_{total} = I_0$$

Dans ces conditions, la répartition des courants est équivalente à un courant d'intensité I_0 passant dans une couche d'épaisseur d_0



Calcul de la puissance dissipée par effet JOULE

Considérons un anneau de rayon r et d'épaisseur dr



La puissance élémentaire dissipée dans cet anneau a pour expression :

$$dP(r) = (dR) (di)^2$$

Expression de dR : $dR = \rho \frac{2\pi r}{h dr}$

Calcul de la puissance dissipée par effet JOULE

Expression de di : l'épaisseur de l'anneau étant un infiniment petit, la densité surfacique est constante dans une bande d'épaisseur dr et l'on a :

$$\begin{aligned} di &= j(r)dS = j(r)dS \\ &= j_0 e^{-\frac{R-r}{d_0}} h dr \end{aligned}$$

L'expression de la puissance devient :

$$\begin{aligned} dP &= \rho \frac{2\pi r}{h dr} \left[j_0 e^{-\left(\frac{R-r}{d_0}\right)} h dr \right]^2 \\ &= \rho h 2\pi j_0^2 r e^{-2\left(\frac{R-r}{d_0}\right)} dr \end{aligned}$$

Si l'on peut considérer que $R \gg d_0$, on a finalement :

$$P_{\text{tot}} = \rho h 2\pi j_0^2 \frac{R d_0}{2} = \frac{\rho}{h} \pi I^2 \frac{R}{d_0} = \frac{2\pi^2 R}{h} \sqrt{10^{-7} \rho \mu_r f} I^2$$

Validité de l'hypothèse $R \gg d_0$

L'épaisseur de peau est calculée à partir des équations de Maxwell :

$$d_0 = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu_0 \mu_r f}} = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}}$$

- d_0 épaisseur de peau en mètre
 ρ résistivité du conducteur en $\Omega \cdot m$
 μ_0 perméabilité du vide ($\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$)

Épaisseur de peau d_0 (en mm) pour différents matériaux

$f(Hz)$	Acier	Cuivre	Aluminium
50	5,03	9,35	11,9
10^3	1,12	2,09	2,66
10^6	0,035	0,066	0,266

Maximiser la puissance dissipée

- ▶ augmenter le champ magnétique (augmentant par conséquent le courant induit I);
- ▶ augmenter la fréquence (attention cependant : plus la fréquence augmente et plus l'impédance augmente, ce qui diminue I)

Puissance réelle transmise

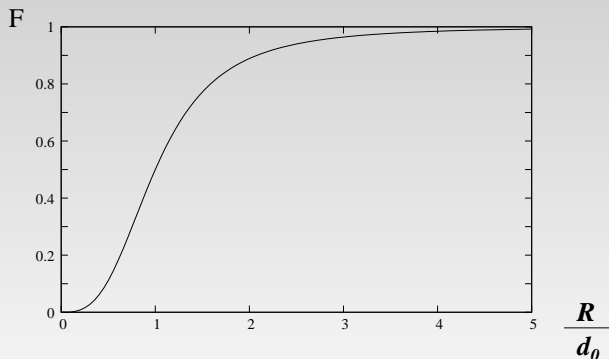
Hypothèses simplificatrices :

- ▶ Champ magnétique uniforme
- ▶ Répartition uniforme des courants
- ▶ Pièce cylindrique pleine
- ▶ ...

⇒ coefficient correctif

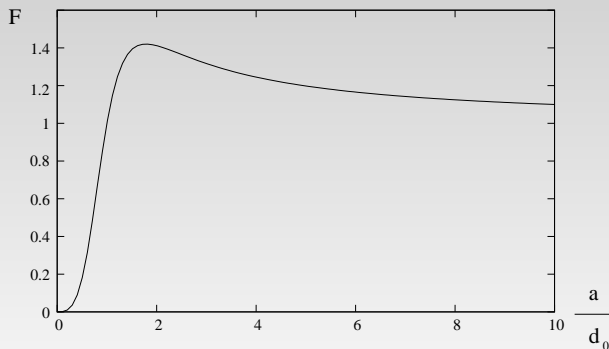
Puissance réelle transmise

Pièce cylindrique



Puissance réelle transmise

Pièce parallélépipédique dont a est la plus petite dimension :



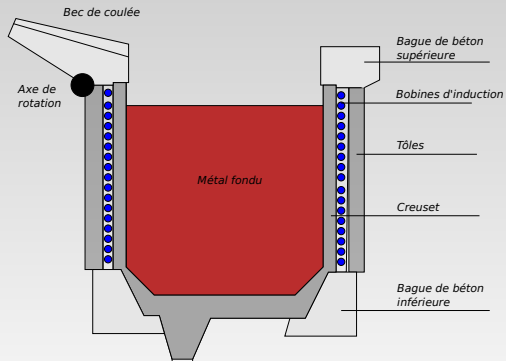
Rappel du plan

- 1 Introduction
- 2 Principe
- 3 Puissance
- 4 Applications
 - Fours à induction à creuset
 - Soudage par induction
 - Frettage par induction
 - Cuisson par induction

Applications industrielles du chauffage par induction

- 1 Fusion des métaux (fours à creuset, fours à canal...)
- 2 Soudage
- 3 Frettage
- 4 Cuisson
- 5 ...

Fours à induction à creuset



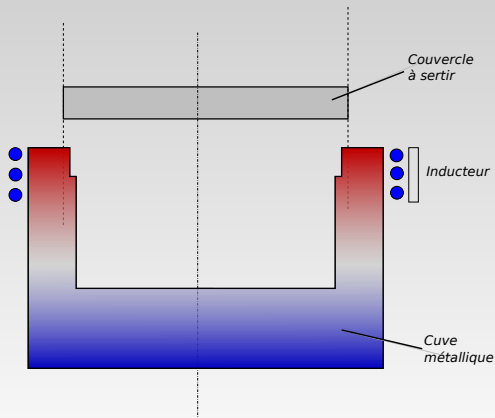
Soudage par induction

Souder : assembler par fusion les bords adjacents de deux pièces ou de deux constituants métalliques.

- ▶ localisation du chauffage
- ▶ rendement énergétique élevé
- ▶ facilité de contrôle, régulation et automatisation

Frettage par induction

Frettage : assemblage mécanique, emmanchement en force et à chaud.



Dilatation puis rétreint localisé.

Table de cuisson par induction

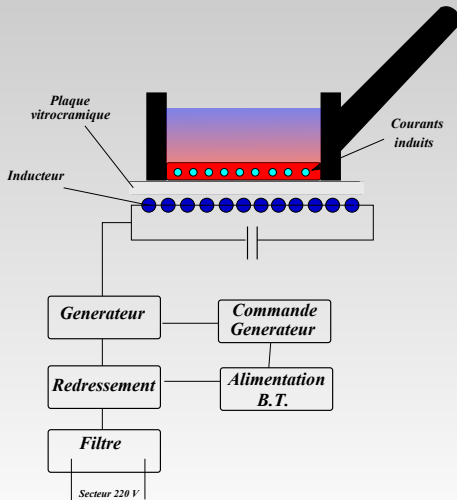
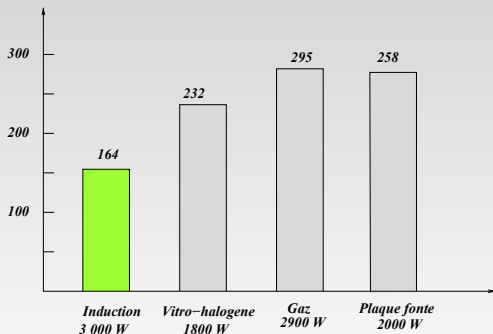


Table de cuisson par induction

Consommation d'énergie nécessaire pour élever à 95 °C l'eau d'une casserole de 1,5 l. de contenance et de 200 mm de diamètre.

Consommation (Wh)



Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons vu :

- ▶ Le principe de fonctionnement du chauffage par induction
- ▶ Les lois gouvernant la puissance et l'épaisseur de peau
- ▶ Quelques exemples d'applications

contenu...