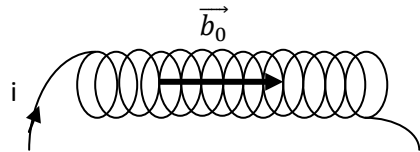


Le chauffage par induction

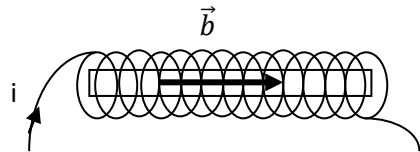
1. Les courants de Foucault

Nous avons vu qu'un courant alternatif i parcourant un solénoïde de longueur L comportant N spires donne naissance à un champ magnétique :



$$\text{avec : } b_0 = \mu_0 \frac{N}{L} i$$

Si on place un cylindre métallique de perméabilité magnétique μ_r suivant l'axe du solénoïde, on a :



$$\text{avec : } b = \mu_r \mu_0 \frac{N}{L} i$$

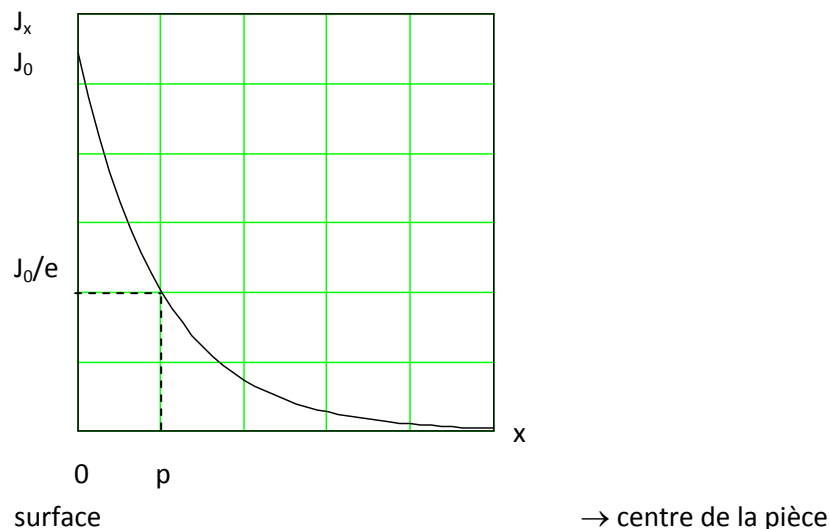
Ce champ magnétique variable provoque une variation du flux $\varphi = NbS$. La loi de Lenz dit qu'une fem apparaît $e = -\frac{d\varphi}{dt}$ qui entraînent le passage de courants induits d'intensité $i_F = \frac{e}{r}$ appelés courants de Foucault. D'après la loi de modération, ces courants créent un champ magnétique qui s'oppose au champ magnétique inducteur. D'où à un instant donné :



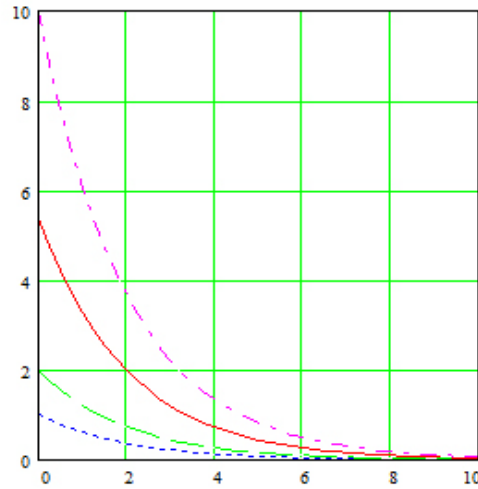
Ces courants sont concentrés sur la surface et provoquent un chauffage superficiel de la pièce.

2. La profondeur de pénétration

On admettra d'une part que le courant est de moins en moins dense en s'enfonçant dans le conducteur. Cela correspond à une loi de la forme : $J_x = \frac{di}{dx} = J_0 e^{-\frac{x}{p}}$ où J_0 est la densité de courant en surface. La densité de courant en fonction de la profondeur x est de la forme :



On appelle p la profondeur de pénétration définie telle que la densité de courant passe de J_0 en surface à J_0/e .
Cela justifie l'échelle rapportée à 5,4 puisque la valeur $5,4 / e = 2$ est facilement lisible :



On remarque que $\int_0^R J_x dx = I = \int_0^R J_0 e^{-\frac{x}{p}} dx = J_0 p \left[1 - e^{-\frac{R}{p}} \right]$. Si R est très grand devant p , $e^{-\frac{R}{p}} \rightarrow 0$, et donc $I = J_0 p$.

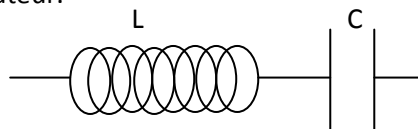
Par ailleurs, on admettra que $p = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu_r \mu_0 f}}$ où ρ est la résistivité du courant et f la fréquence.

Attention au fait que $\mu_r \gg 1$ pour les matériaux ferromagnétiques et donc à une température inférieure à la température de Curie. Sinon, le matériau est paramagnétique et $\mu_r = 1$.

	T en °C	ρ en $\Omega.m$	μ_r	f en Hz	p en mm
cuivre	20	$1,6.10^{-8}$	1	50	9
	20	$1,6.10^{-8}$	1	5000	0,9
acier	20	2.10^{-7}	300	50	1,84
	900	5.10^{-7}	1	50	50
	900	5.10^{-7}	1	37.400	1,84
	20	2.10^{-7}	300	870	0,5
	900	5.10^{-7}	1	500.000	0,5

3. Le convertisseur de fréquence

Le chauffage par induction nécessite un réglage de la fréquence durant la traitement thermique. Il est assuré par un circuit LC comportant une inductance et un condensateur.



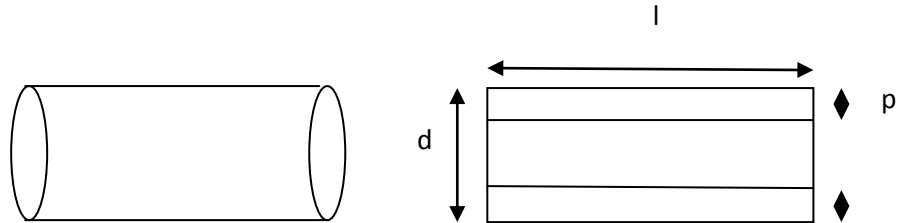
On peut écrire : $u_L + u_C = L \frac{di}{dt} + \frac{q}{C} = L \frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{q}{C} = 0$. La solution est de la forme $q = Q \sin \omega t$ avec $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ soit $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$. On peut ainsi régler la fréquence à la valeur que l'on souhaite suivant les valeurs de L et C .

4. Rendement du chauffage par induction

Le rendement est le rapport de la puissance fournie à la pièce sur la puissance reçue par l'inducteur. En première approximation, on peut considérer qu'elles diffèrent de la puissance perdue par effet Joule dans l'inducteur d'où $\eta = \frac{P}{P + P_J}$.

a. Calcul de la puissance P reçue par la pièce chauffée par induction

En prenant une pièce cylindrique, le courant passe dans la partie superficielle :



Sa résistance est donnée par la relation de la forme $R = \rho \frac{l}{s}$ qui correspond ici à $l = \pi d$ et $s = pl$ d'où $R = \rho \frac{\pi d}{pl}$. On a que $p = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu_r \mu_0 f}}$ en dessous de la température de Curie.

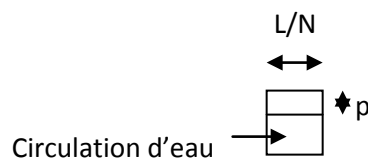
De plus, l'intensité des courants de Foucault est telle que $B_{\text{inducteur}} = B_{\text{indut}}$ d'où on

$$a : \mu_r \mu_0 \frac{N}{L} i = \mu_r \mu_0 \frac{1}{l} i_F \text{ donc } i_F = N \frac{l}{L} i.$$

$$\text{On obtient ainsi } P = r I_F^2 = \rho \frac{\pi d}{pl} \left(N \frac{l}{L} i \right)^2$$

b. Calcul de la puissance P_J perdue par effet Joule dans l'inducteur

L'inducteur ne doit lui ne pas chauffer ou en tout cas au minimum. Ses spires sont refroidies par une circulation d'eau. Le plus simple est de considérer des spires de diamètre D de forme carrée et jointives dont la partie parcourue par le courant a une épaisseur égale à la profondeur de pénétration du courant dans le cuivre et une largeur égale à la longueur de l'inducteur divisée par le nombre de spires N.



La résistance de la forme $R = \rho \frac{l}{s}$ est telle ici que $l = N \pi D$ et $s = p_{Cu} \frac{L}{N}$ avec

$$p = \sqrt{\frac{\rho_{Cu}}{\pi \mu_0 f}}.$$

La puissance perdue par effet Joule est donc $P_J = \rho_{Cu} \frac{N^2 \pi D}{p_{Cu} L} I^2$

c. Calcul du rendement

On a donc après transformations et simplifications :

$$\eta = \frac{P}{P + P_J} = \frac{1}{1 + \frac{P_J}{P}} = \frac{1}{1 + \rho_{Cu} \frac{N^2 \pi D}{p_{Cu} L} \frac{p L^2}{\rho \pi l D N^2}} = \frac{1}{1 + \frac{L}{l} \frac{D}{d} \sqrt{\frac{\rho_{Cu}}{\rho \mu_r}}}$$

On remarque que forcément $l < L$, $d < D$ et donc que μ_r joue un rôle déterminant.

Pour les aciers, le rendement est compris entre 40 et 90 %, pour un cuivreux le rendement est de l'ordre de 50 %.

5. Les différents traitements par induction

A basse fréquence jusqu'à 10 kHz, on réalisera un traitement dans la masse qui devra durer suffisamment longtemps. Il sera aussi adapté pour des traitements à l'état liquide.

A moyenne fréquence jusqu'à 1 MHz, on réalisera les traitements superficiels des métaux et en particulier les ferromagnétiques. Exemple typique : 35 CrMo4...

A haute fréquence, au-delà du MHz, on peut traiter des céramiques peu conductrices, des verres...