

Master Spécialisé 1

Mécatronique

Faculté des Sciences de Tétouan

Février-Juin 2015

Actionneurs électriques

1. Introduction et rappels

Jaouad Diouri

Projet du cours, organisation

Les séances (S21→S35)

Rappel des notions de base, consolidation → Test 1 (mi-mars)

Principes de fonctionnement et caractéristiques comparées des actionneurs → Test 2 (fin avril)

Régulation, entraînement, freinage, asservissement → Test 3 (mi juin)

Evaluation

3 tests (séance en +) : S26 (fin mars), S31 (début mai), S36 (début juin)

S37 (mi juin) : Exposés des étudiants

Références complètes (*suivre le lien pour accéder au téléchargement*)

Fichiers Wildi

Electrotechnique, notions de base, Luc Lasne

Manuel de génie électrique, (groupe d'auteurs), Dunod, Col Sciences Sup

Exercices et problèmes d'électrotechnique, Luc Lasne, Col Sciences Sup

Aide mémoire électrotechnique, Pierre Mayé, usine nouvelle

Machines électriques, cours et problèmes Claude Chevasseau

Principes d'électrotechnique_Cours et exercices corrigés_Collectif_Dunod

Cahiers techniques Schneider

Collection Techniques d'ingénieurs

Contenu

Partie 1: Notions de base

Circuits magnétiques, transformateurs, systèmes triphasés et transport de l'électricité (S21→S25)

Partie 2: Principes et caractéristiques (S26→S30)

Moteur à CC

Moteur Asynchrone

Moteur Synchrone

Moteurs spéciaux

Partie 3: Commande et applications (S31→S35)

Régulation de vitesse, entraînement, freinage, asservissement de position, protection

Liens utiles

Fabricants, services, annuaires d'entreprises

[Directindustry](#)

[Groupe industriel](#)

[Recherche par item](#) (entreprises, produits, annonces)

[Annuaire électromécanique Maroc](#)

[Annuaire Construction Industrie Maroc](#)

[Moteurs Électriques - Documentations constructeurs](#)

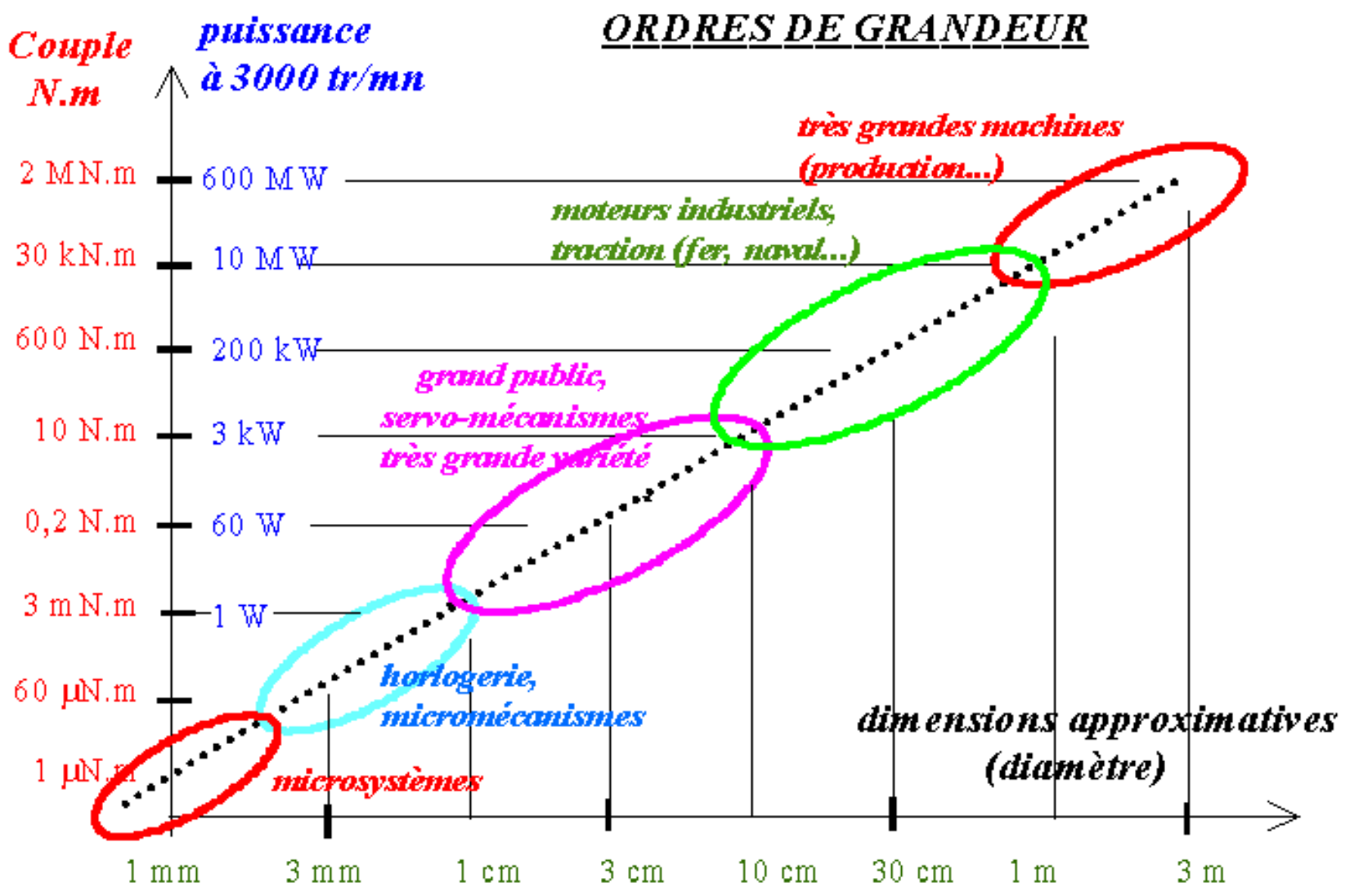
Cours et documentation en ligne

[Cahiers Techniques Schneider](#)

[Institut d'automatisation industrielle](#)

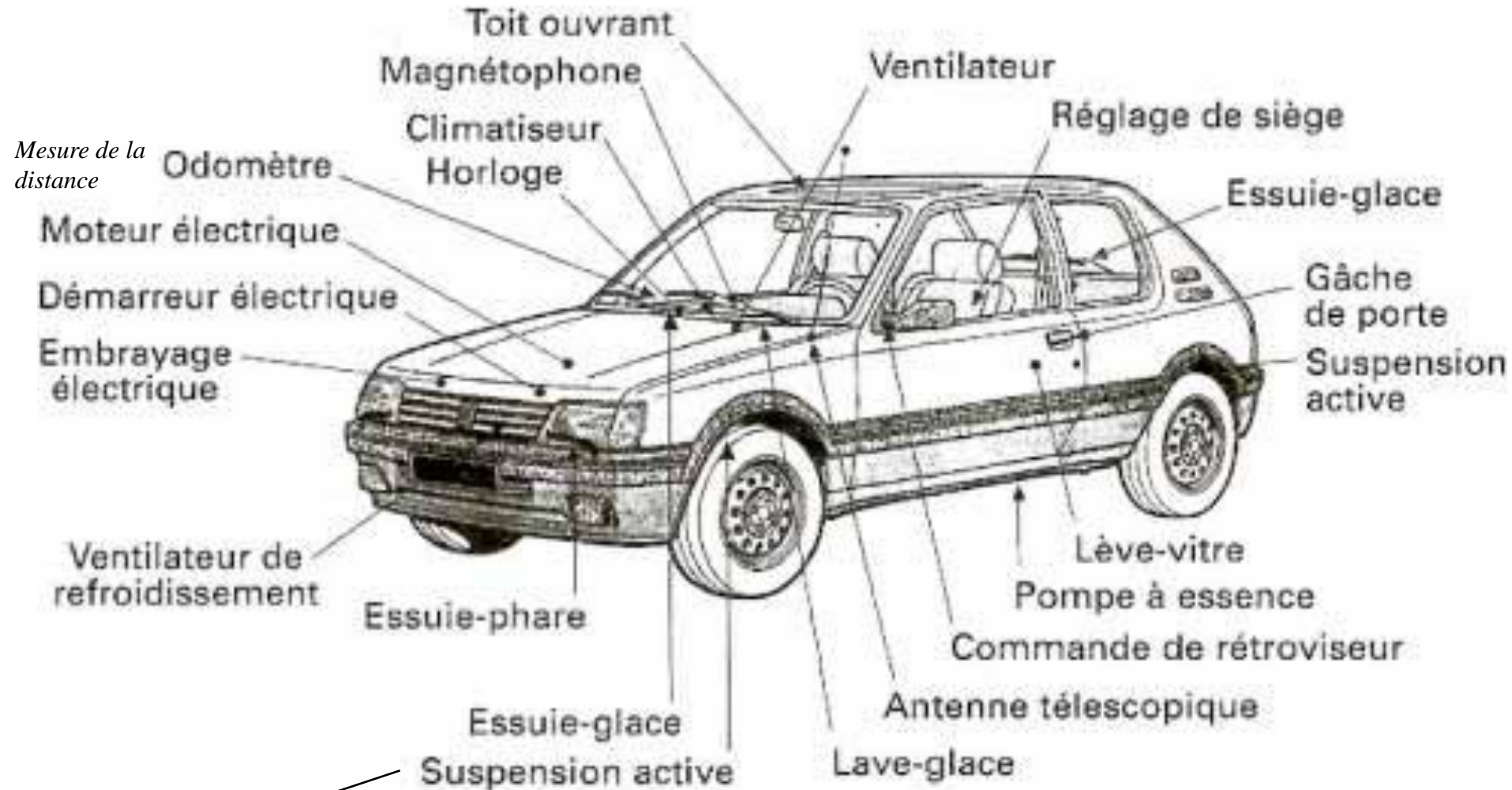
[Électrotechnique Sitelec \(cours et animations\)](#)

Panorama : domaines des puissances



Réf. Bernard MULTON, Hamid BEN AHMED, Nicolas BERNARD, Pierre-Emmanuel CAVAREC, [Les moteurs électriques pour les applications de grande série](#)

Exemple de système intégrant des actionneurs électriques

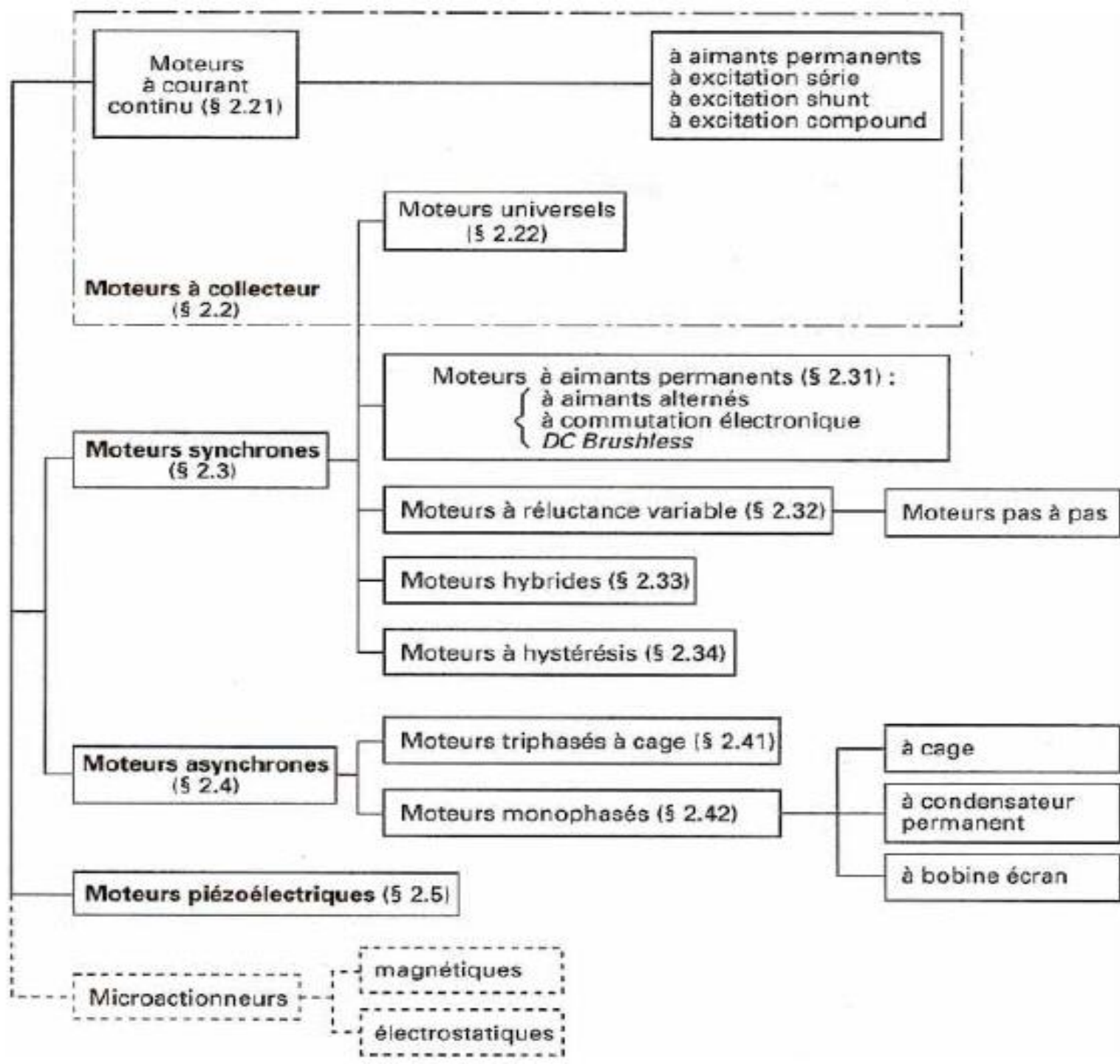


Voir
vidéo

[Vidéo : Automatismes industriels](#)

[Réf. Techniques de l'ingénieur, « Petits moteurs électriques » D-3 720, page 15](#)

Typologie



Rappel des lois fondamentales

Tout **mouvement de charges électriques** s'accompagne de l'apparition d'un champ de forces dites magnétiques qui agissent à distance même dans le vide.

Le champ magnétique est de nature électrique

Propriétés essentielles :

1. Conservation du flux à travers une surface fermée
2. Lignes de champ : des courbes fermées
3. Théorème d'Ampère

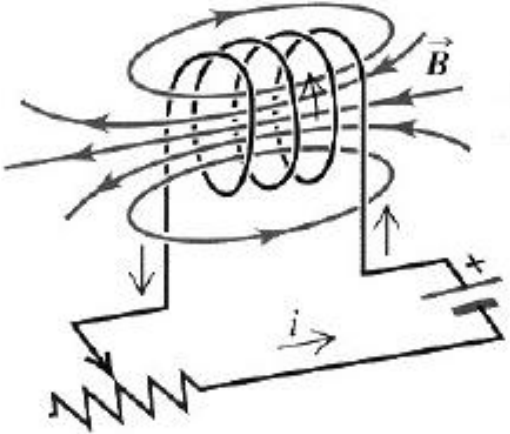
$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_C I \quad ; \quad \vec{B} = \mu(\text{matériau}) \vec{H}$$

Application au calcul des champs

$$\vec{H}_{\text{bobine}} = nI \quad ; \quad \vec{H}_{\text{fil}} = \frac{I}{2\pi r}$$

(*n spires / m*)

Bobine seule : auto-inductance



fém induite (Faraday, Lenz)

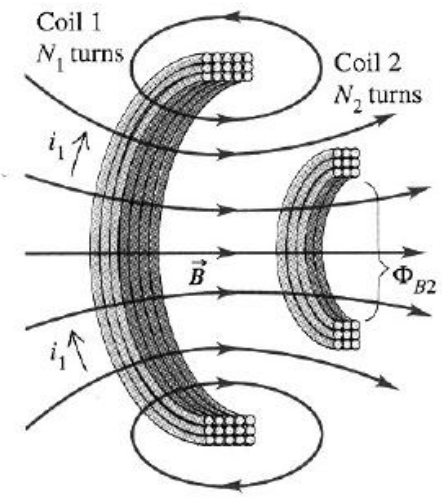
$$\varepsilon = -N_1 \frac{d\phi_B}{dt} = -L \frac{dI}{dt}$$

$$L = \frac{N \cdot \Phi_B}{i} \quad [\text{V}\cdot\text{s} / \text{A} = \text{Wb} / \text{A} = \text{H}]$$

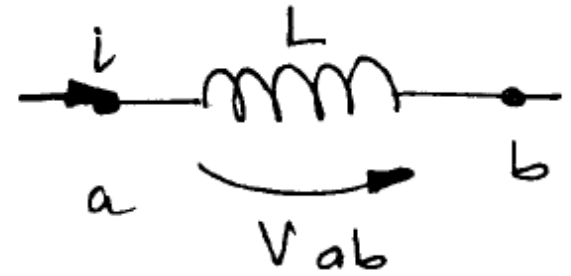
2 bobines ou plus : Inductances mutuelles

$$M = \frac{N_2 \cdot \Phi_{B2}}{i_1} = \frac{N_1 \cdot \Phi_{B1}}{i_2} \quad [\text{H} = \text{V}\cdot\text{s} / \text{A}]$$

$$\varepsilon_2 = -M \cdot \frac{di_1}{dt} \quad \varepsilon_1 = -M \cdot \frac{di_2}{dt} \quad [\text{V}]$$



Energie magnétique



Tension aux bornes : $V_{ab} = L \frac{di}{dt} + Ri$

Puissance consommée : $P = V_{ab}i = Li \frac{di}{dt} + Ri^2 = P_L + P_J$

Le signe de P_L dépend du sens de la variation du courant.

P_J est toujours positif.

Energie magnétique d'un système d'inductances : $W = \frac{1}{2} \sum_{i,j} L_{ij}(x_k) I_i I_j$

Actions mises en jeu : $A = \frac{\partial W}{\partial x_k}$

x_k est le degré de liberté du système, A (Force si translation ou couple si rotation selon le cas)

Elle est emmagasinée **dans l'unité de volume** avec la densité (dans le vide):

$$w = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad [\text{J/m}^3]$$

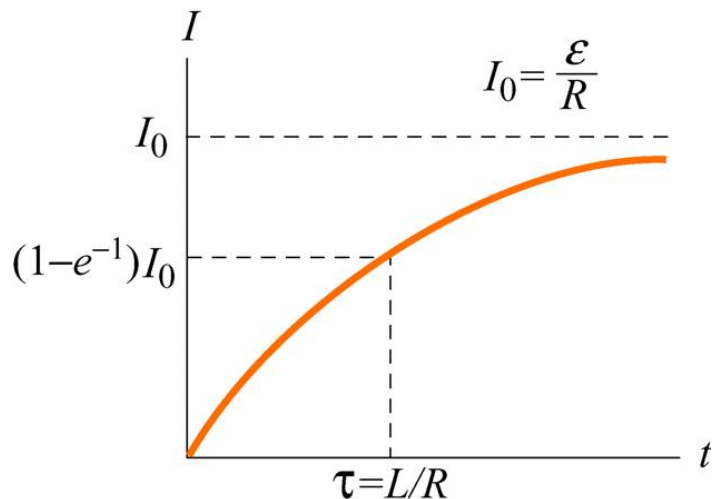
En présence de matière ?

Établissement et rupture du courant dans une inductance

Établissement

$$Ri + L \frac{di}{dt} = U$$

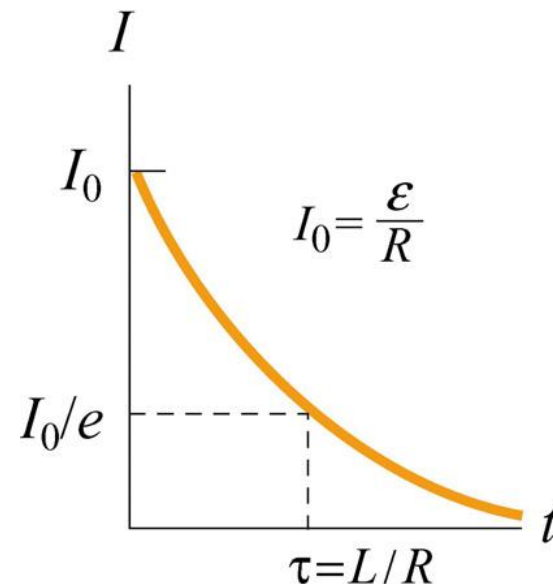
$$i(t) = I_0 (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$



Rupture

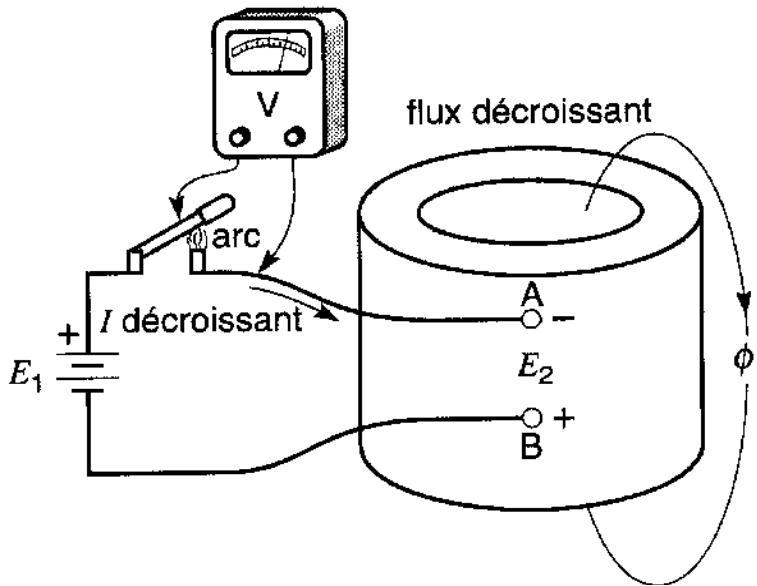
$$Ri + L \frac{di}{dt} = 0$$

$$i(t) = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$



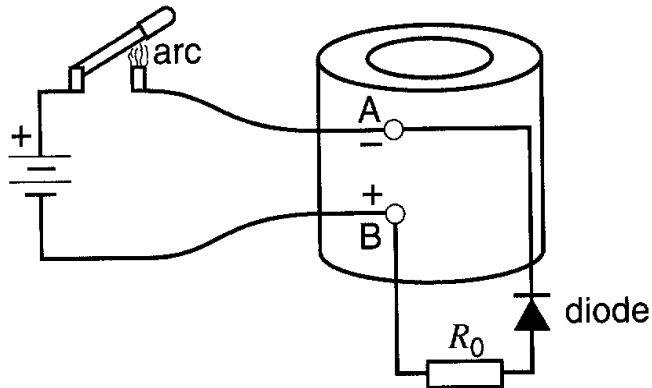
Inconvénient : arc électrique à l'ouverture des circuits inductifs (moteurs) \longrightarrow

Ouverture des circuits inductifs

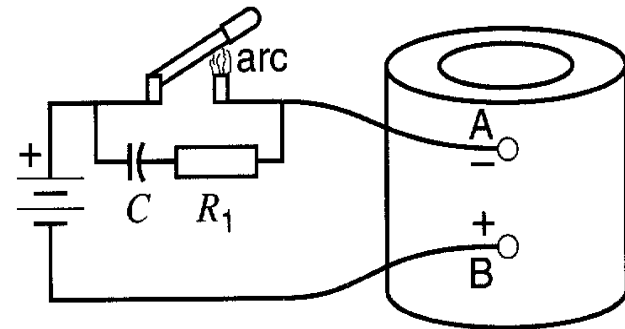


A l'ouverture : à E_1 s'ajoute $E_2 = L di/dt$ (grand) \rightarrow arc et usure des contacts. L'énergie emmagasinée dans la bobine est dissipée (Joule) dans l'arc.

Remèdes pour souffler l'arc



R_0 faible. En fonctionnement normal, aucun courant ne passe dans R_0 . A la coupure, tout le courant passe dans R_0



A l'ouverture, la capacité se charge par l'énergie emmagasinée dans la bobine, puis la libère dans le circuit. A la fermeture, la capacité se décharge dans R_1 .

Détermination graphique du courant dans une inductance

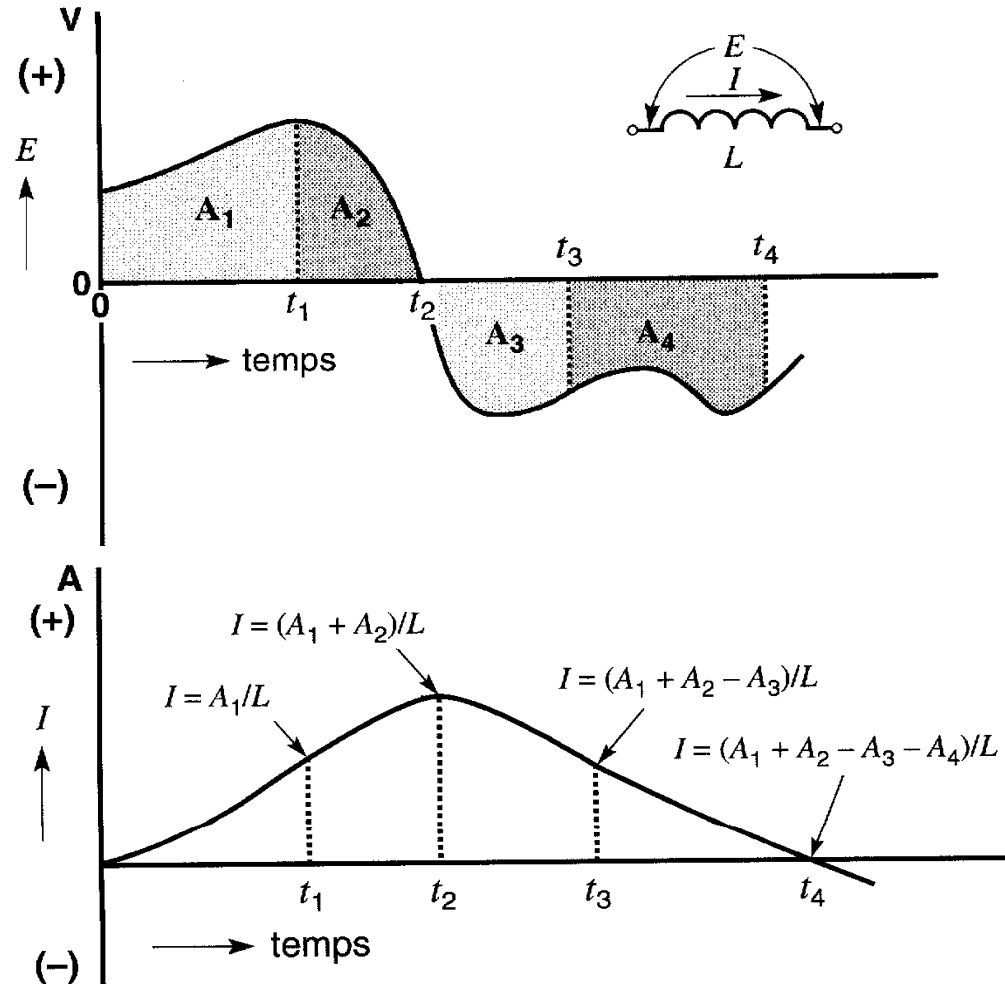
Méthode des Volts. Secondes

$$I = \int \frac{V dt}{L}$$

Il suffit de compter les surfaces algébriquement.

Ici, on a supposé :

$$A_1 + A_2 = A_3 + A_4$$



Voir : : [19. Inductance \(Wildi\)](#)

Magnétisme dans la matière

La fém. induite dans une inductance en présence de noyau de fer est plus grande que sans noyau :

$$B_{fer} \gg B_0 \quad \vec{B}_{fer} = \vec{B}_0 + \mu_0 \vec{M}$$

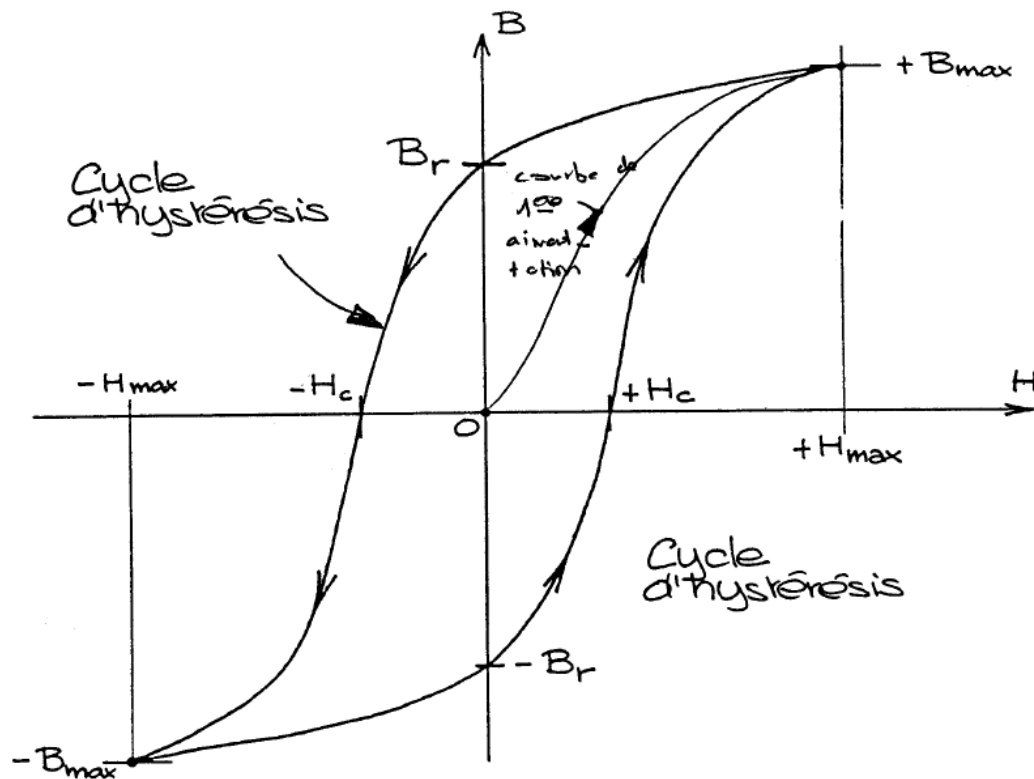
$$\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H} \quad \left\{ \begin{array}{l} \vec{H} = \text{Champ d'excitation magnétique créé par les courants} \\ \vec{M} = \text{Aimantation de la matière} \end{array} \right.$$
$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

Matériau linéaire isotrope $\vec{B}_{fer} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu_r \vec{B}_0$

μ_r Très grand dans les matériaux ferromagnétiques

B se mesure en Tesla ou V.s/m² ou en Wb/m²

Matériaux ferromagnétiques



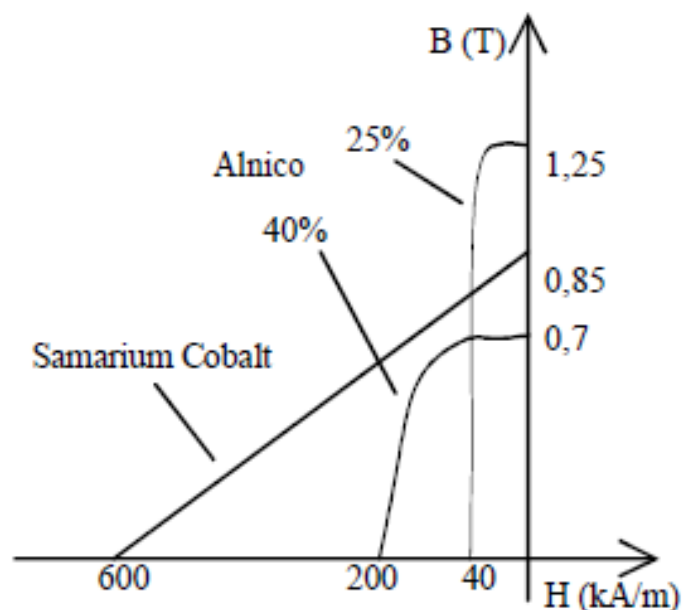
Matériau dur : Cycle large, aimants

Matériau doux : cycle étroit

Matériaux	Composition	B_r [T]	H_c [A / m]
Acier au carbone	98 % Fe ; 0.86 % Co ; 0.9 % Mn	0.95	3600
Alnico 2	55 % Fe; 10 % Al; 17 % Ni; 12 % Co; 6 % Cu	0.76	42000
Alnico 5	51 % Fe; 8 % Al; 14 % Ni; 24 % Co; 3 % Cu	1.25	44000

Applications

Aimants



Caractéristiques d'Aimant

Ferrite (oxyde de fer)

Saturation à $\approx 0,6$ T

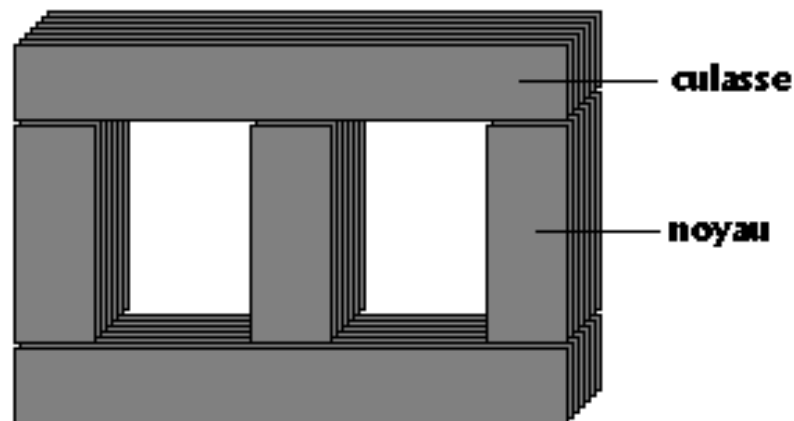
$B_r = 0,4$ T - $H_c = 200$ kA/m

Samarium-Cobalt (Sm-Co)

saturation à ≈ 1 T

$B_r = 0,8$ T - $H_c = 500$ kA/m

Tôles de Transformateurs



FeSi 3,5% de Si

Saturation à 2 T - $B_r = 0$ - $H_c = 0$

$\mu_r = 7000$ à 50 Hz

FeSi à grains orientés

saturation à 3 T - $B_r = 1,4$ T - $H_c = 8$ A/m

$\mu_r > 40\ 000$ à 50 Hz

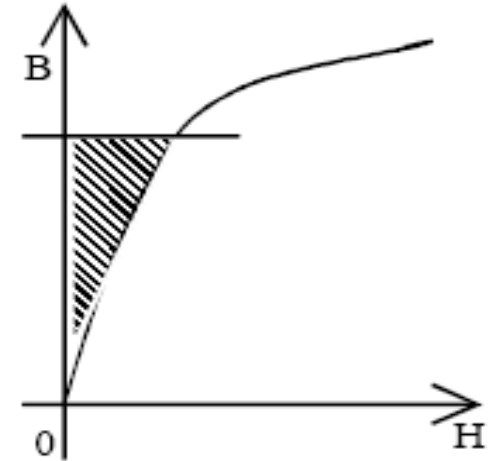
Energies magnétiques en présence de matière

Énergie magnétisante : énergie nécessaire pour produire B dans un matériau. Dans l'unité de volume :

$$w_m = \int_0^B H dB$$

Energie « stockable » dans un milieu de perméabilité μ
(Si le matériau est linéaire, loin de la saturation)

$$w_m = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu}$$



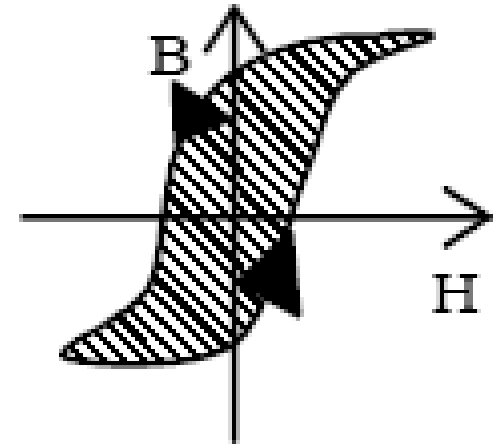
Pertes par Hystérésis :
 f fréquence

$$P_h = \alpha B_m^2 \cdot f$$

Pertes par courants de Foucault :
effet Joule des courants induits
(champ sinusoïdal) :

$$P_f = \beta B_m^2 \cdot f^2 \cdot e^2 \quad e = \text{épaisseur}$$

$$B = B_m \sin 2\pi ft$$



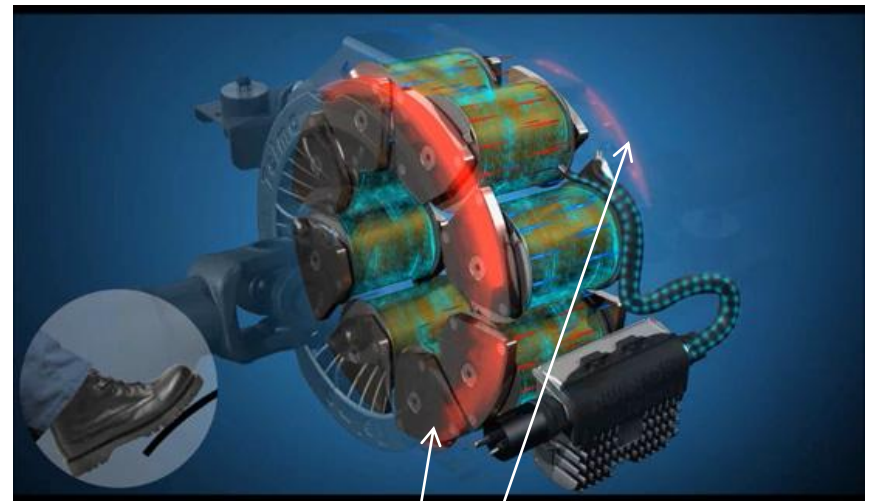
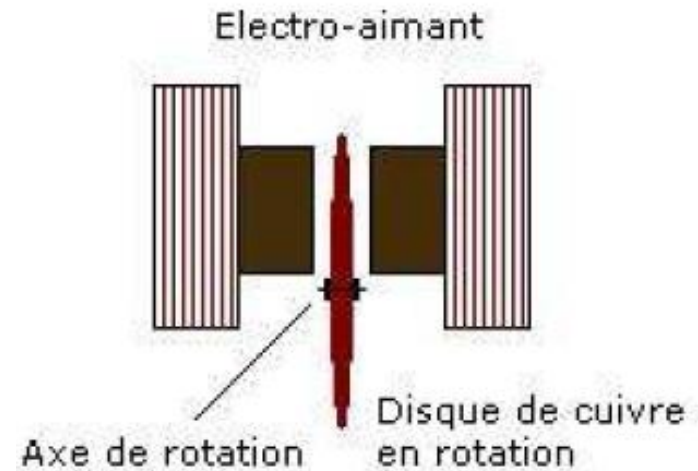
Circuit feuilleté dans les transformateurs

Applications des courants de Foucault

1. Freinage

Freinage

Lorsque l'électroaimant est sous tension : les courants qui prennent naissance (courants tourbillonnaires) dans le disque le ralentissent (force de Laplace). Application au freinage des camions et trains aux grandes vitesses (∞ vitesse qui diminue, donc frein complémentaire)..



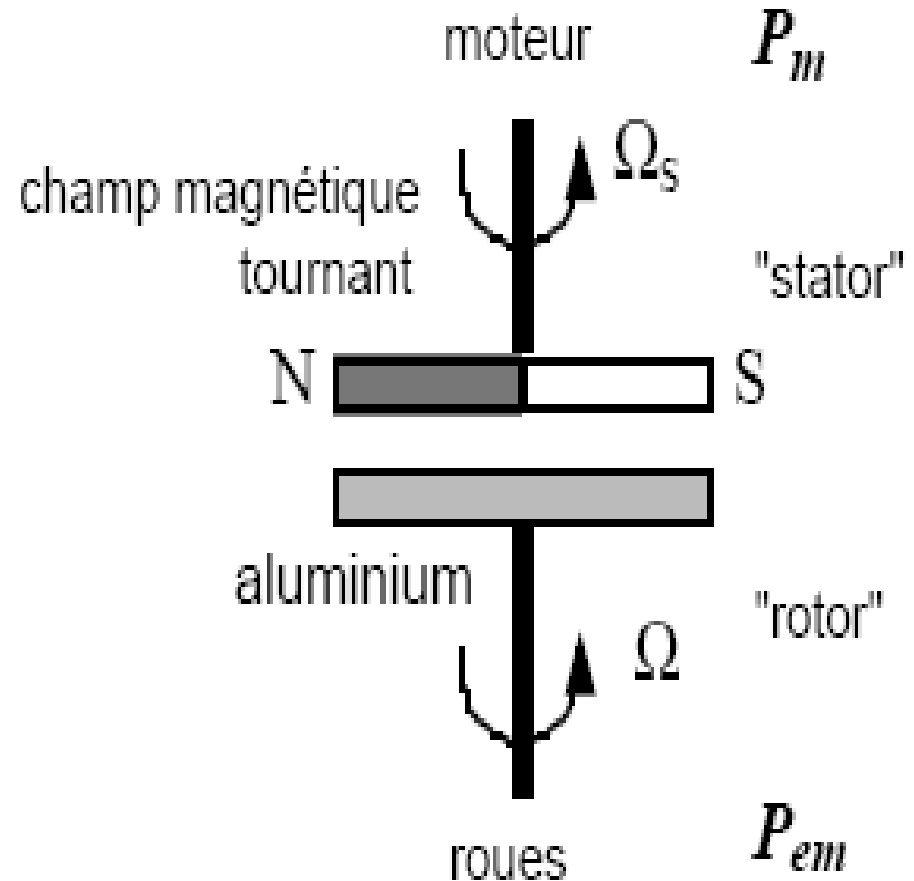
Ralentisseur Telma

Parties tournantes

Applications des courants de Foucault

2. Entraînement, engrenage magnétique

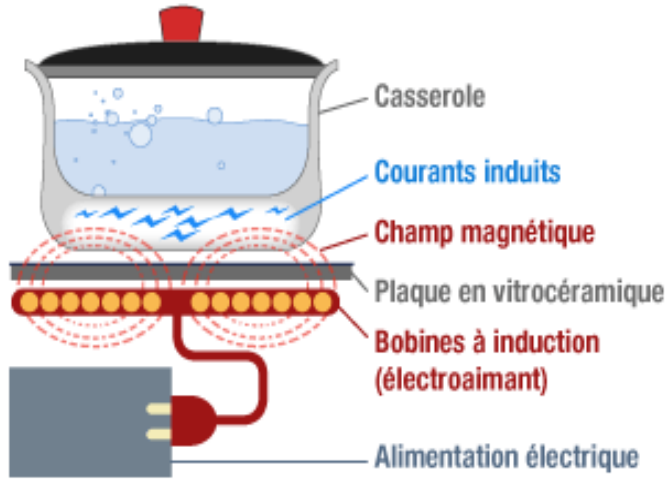
Si le disque est immobile et l'aimant tourne, les courants induits prennent naissance et sont soumis à la force de Laplace qui fait tourner le disque dans le même sens (pour s'opposer au mouvement relatif qui est la cause de ces courants (Lenz))
→ Transmission de mouvement sans frottement mécanique : *engrenage magnétique* (→ *Moteur asynchrone*)



[Voir animation](#)

Applications des courants de Foucault

3. Four à induction 4. Contrôles non destructifs

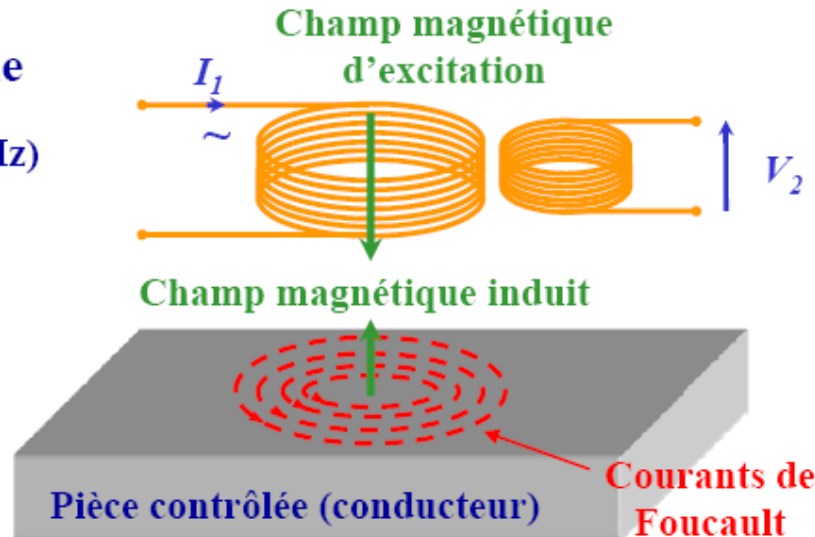


Fonte,
métallurgie,
haute
fréquence

Cuisson

Emetteur : bobine

(100 Hz < fréquence < 10 MHz)



Détection et caractérisation de défauts : Fissuration (fissure, délaminage...)
Mesure de paramètres dimensionnels ou constitutifs (épaisseur, état de contraintes..)

[Voir modélisation](#)