

Matériaux en Electrotechnique

INTRODUCTION

Matériaux conducteurs

- conducteurs électriques
- le cuivre et l'aluminium pour les conducteurs électriques.

Matériaux semi-conducteurs

- Interrupteurs électroniques de puissance
- le silicium pour les composants d'électronique de puissance.

Matériaux magnétiques

- circuits magnétiques, aimants permanents
- le fer pour les circuits magnétiques.

Matériaux isolants

- isolants électriques
- la silice (oxyde de silicium), le bois et les dérivés du pétrole pour les isolants électriques.

Le choix de ces matériaux dépend, en premier lieu de leurs **propriétés électriques** (**résistivité, perméabilité, constante diélectrique...**) et de leur coût, mais aussi de leurs **propriétés physiques et mécaniques** (**densité, dilatation, point de fusion, sensibilité à la corrosion, dureté, élasticité...**).

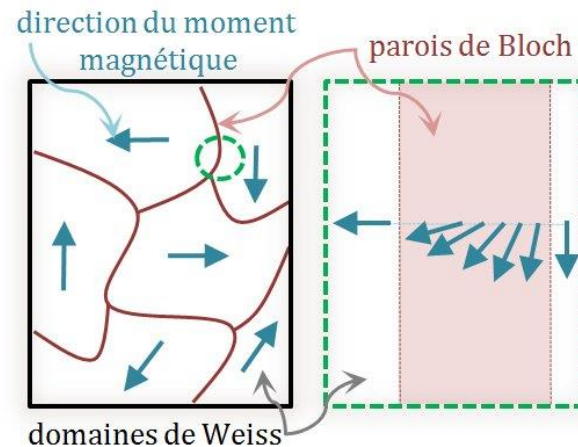
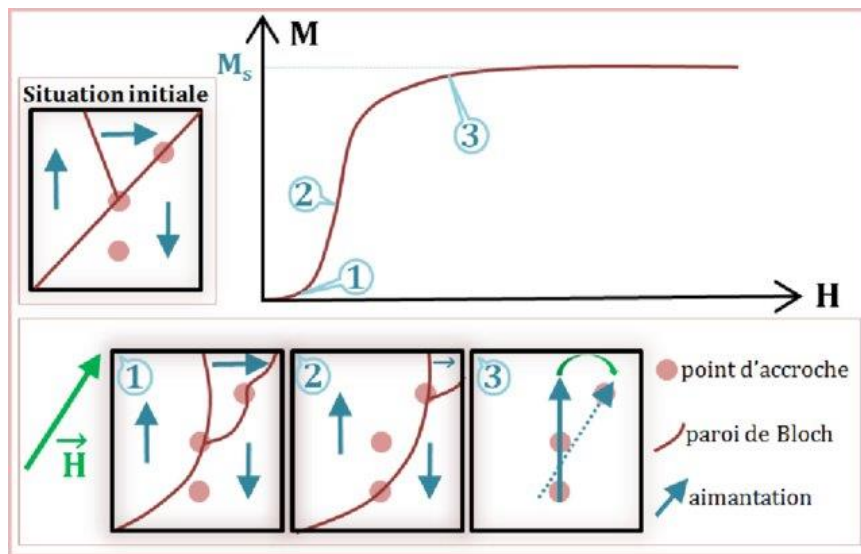
Matériaux en Electrotechnique

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES

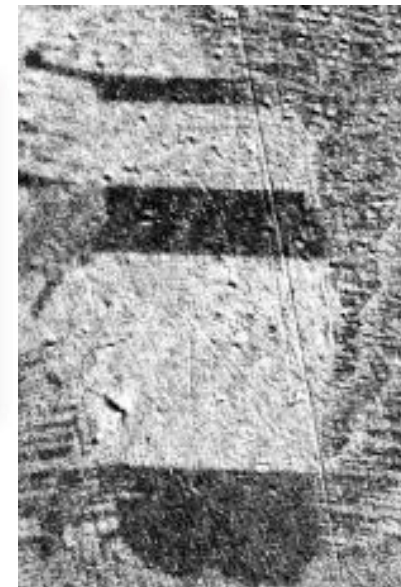
1) Rappels

B. Substance ferromagnétique

Ces matériaux leur perméabilité relative diminue fortement quand H augmente - **saturation** - et dépend des états magnétiques antérieurs - **hystérésis magnétique** .



Représentation schématique de la structure en domaines d'un matériau ferromagnétique



Matériaux en Electrotechnique

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES

1) Rappels

D. Hystérésis du circuit magnétique

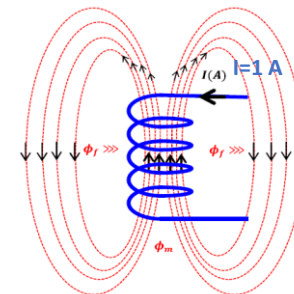
Nous avons constaté que l'importance du champ magnétique et donc l'induction était proportionnelle à l'intensité du courant électrique ainsi qu'au nombre de spires.

Induction dans le vide (\approx air) :

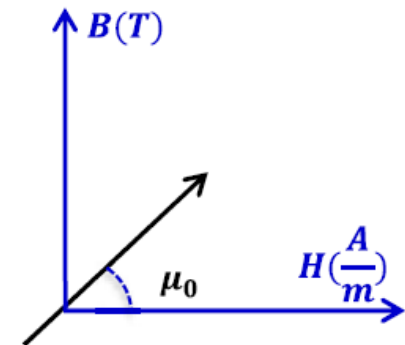
$$B_0 = \mu_0 \times N \times I / l_g$$

Induction dans le vide B_0 = Perméabilité du vide μ_0 \times Nombre de spires N \times Intensité I / longueur l_g du solénoïde

B s'exprime en Tesla (T)



$B = 0,63 \text{ mT}$
dans le vide

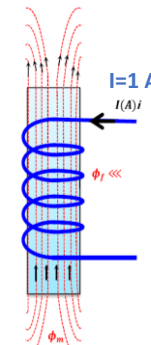


Avec un noyau :

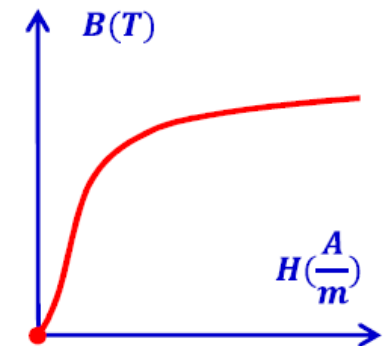
Un noyau magnétique est fourni avec son μ_r qui est une valeur relative donc sans unité. Un noyau de forte perméabilité (fer doux ≈ 10000 ; **Mu-métal** ≈ 150000)

$$B = B_0 \times \mu_r$$

Induction de la bobine avec noyau B = Induction dans le vide ou air B_0 \times Perméabilité relative du noyau μ_r



$B = 1 \text{ T}$ dans le
Fer doux



Matériaux en Electrotechnique

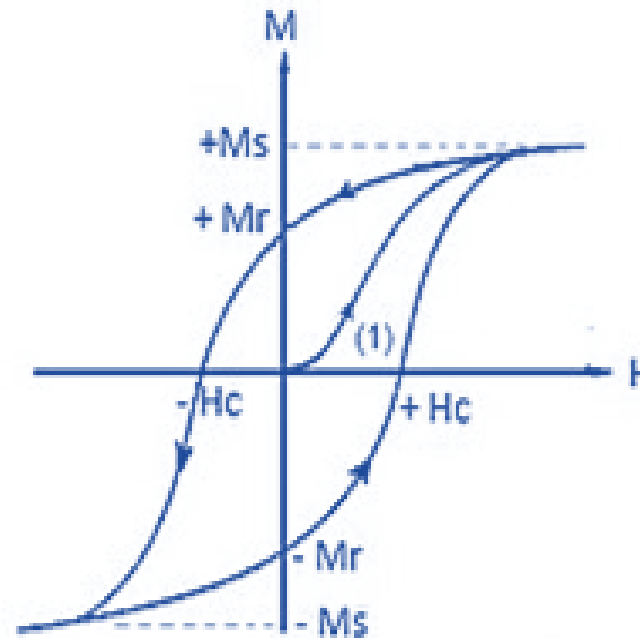
MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES

1) Rappels

D. Hystérésis du circuit magnétique

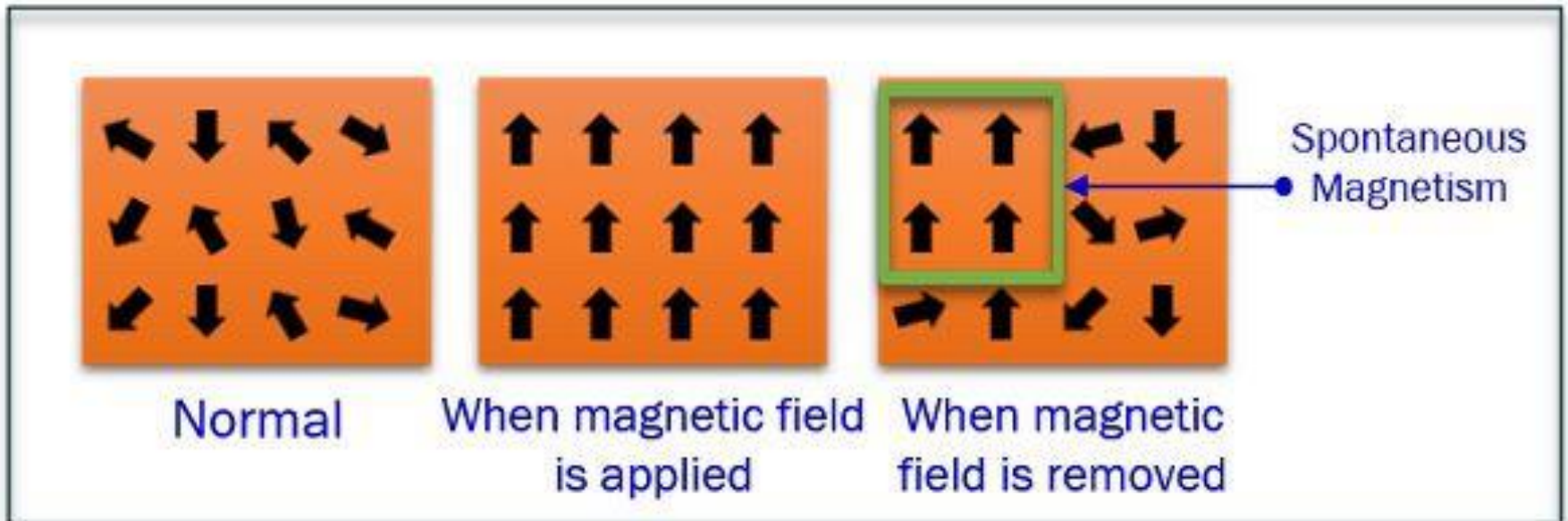
Lorsque l'on applique un champ magnétique externe sur un matériau ferromagnétique, les moments magnétiques s'orientent dans la même direction que le champ. Par la suite, même lorsque le champ est supprimé, une partie de l'alignement est conservée : le matériau s'est aimanté. En appliquant un champ magnétique opposé suffisamment intense, les moments magnétiques se renversent mais l'aimantation ne suit pas le chemin initial. Il y a un **cycle d'hystérésis**.

Cycle d'hystérésis d'un matériau ferromagnétique : (1) Courbe de 1^{re} aimantation. Les intersections H_c et M_r sont respectivement le champ coercitif et l'aimantation rémanente.



Matériaux en Electrotechnique

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES



Ferromagnetic Material

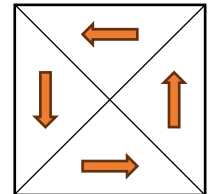
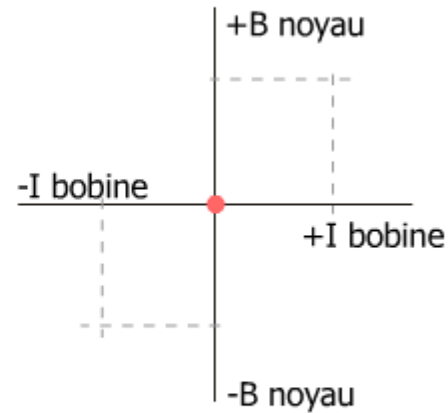
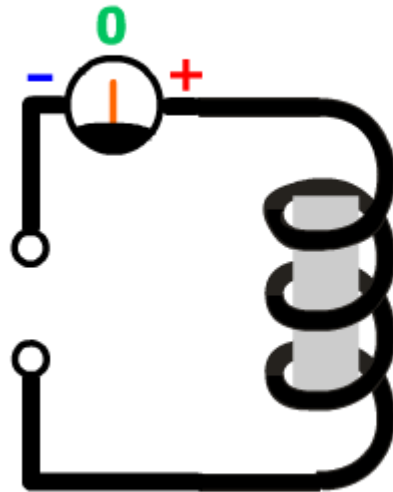
Circuit Globe

Matériaux en Electrotechnique

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES

1) Rappels

D. Hystérésis du circuit magnétique

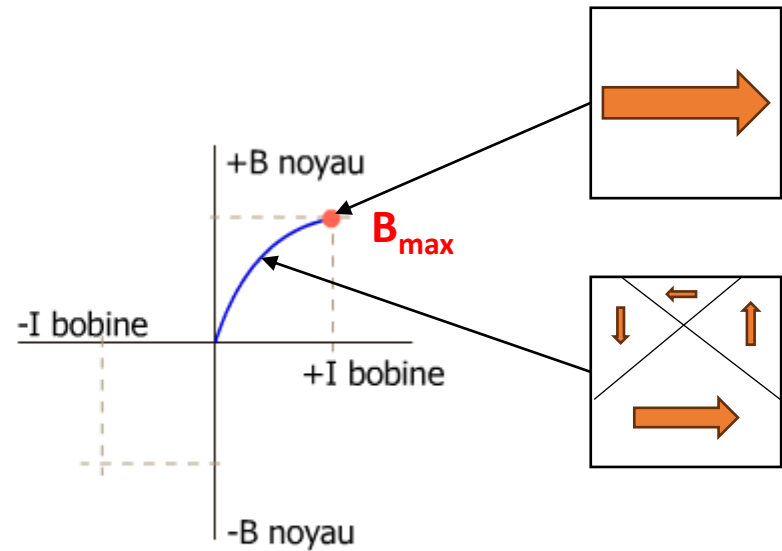
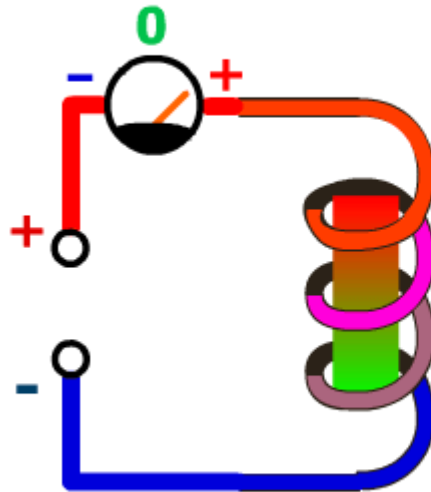


Matériaux en Electrotechnique

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES

1) Rappels

D. Hystérésis du circuit magnétique

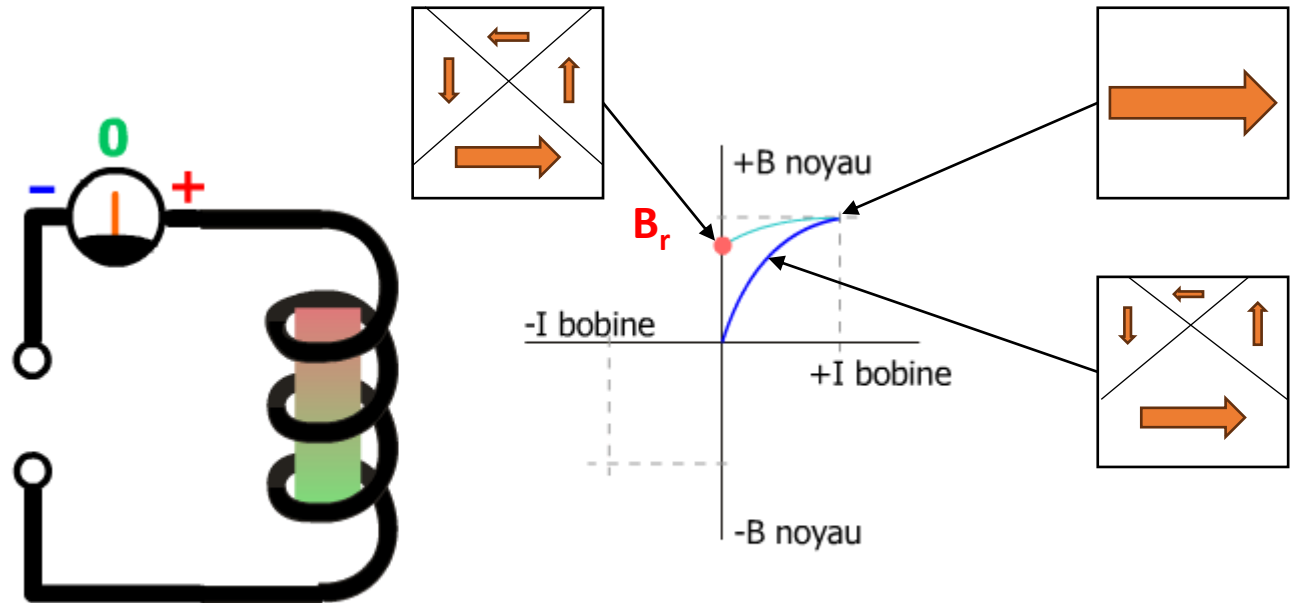


Matériaux en Electrotechnique

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES

1) Rappels

D. Hystérésis du circuit magnétique

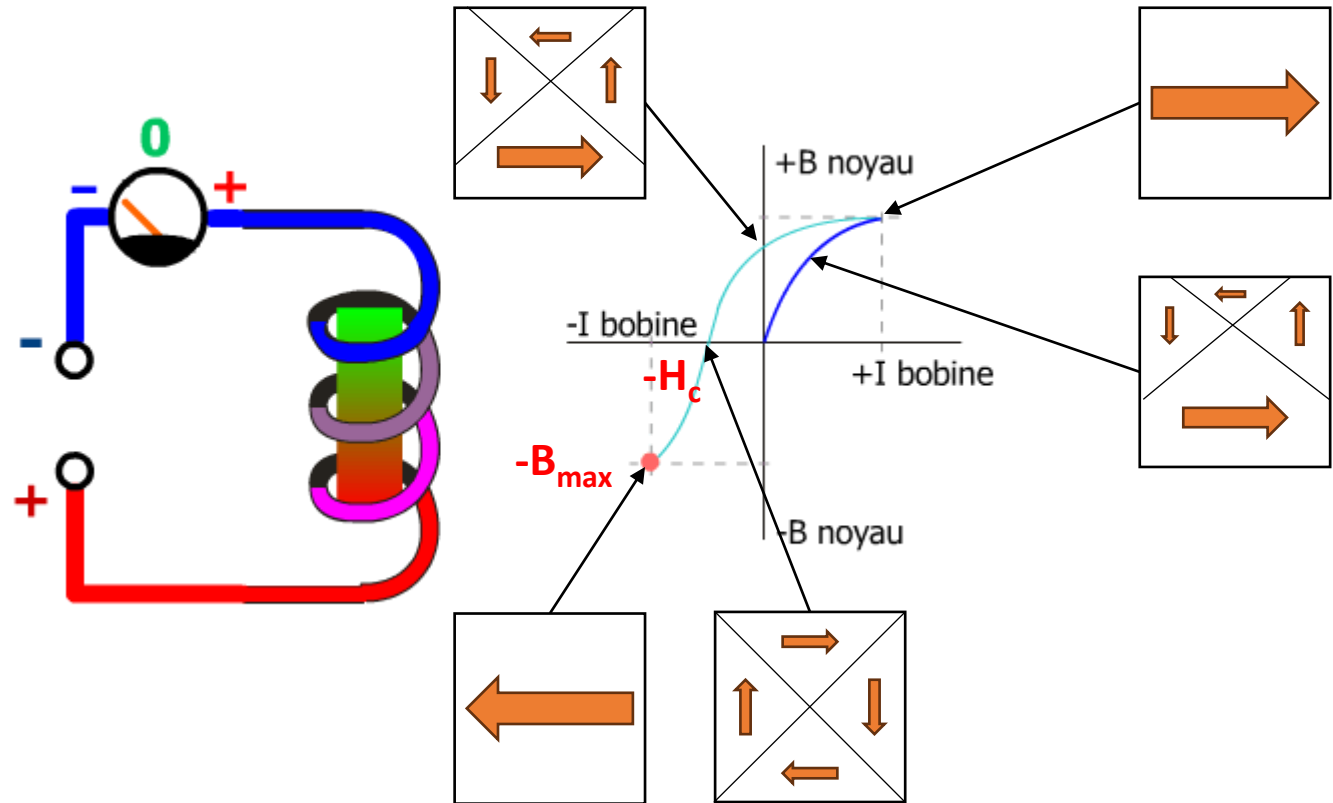


Matériaux en Electrotechnique

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES

1) Rappels

D. Hystérésis du circuit magnétique

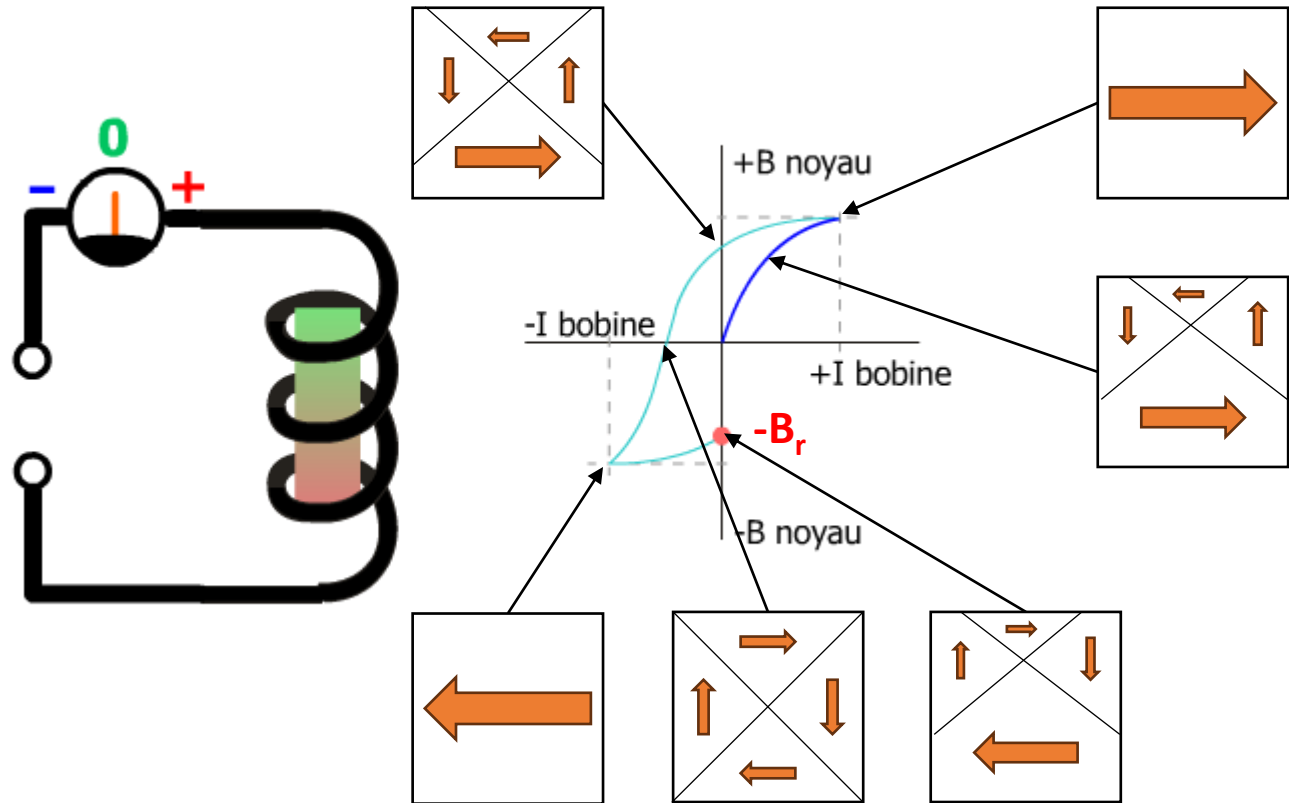


Matériaux en Electrotechnique

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES

1) Rappels

D. Hystérésis du circuit magnétique

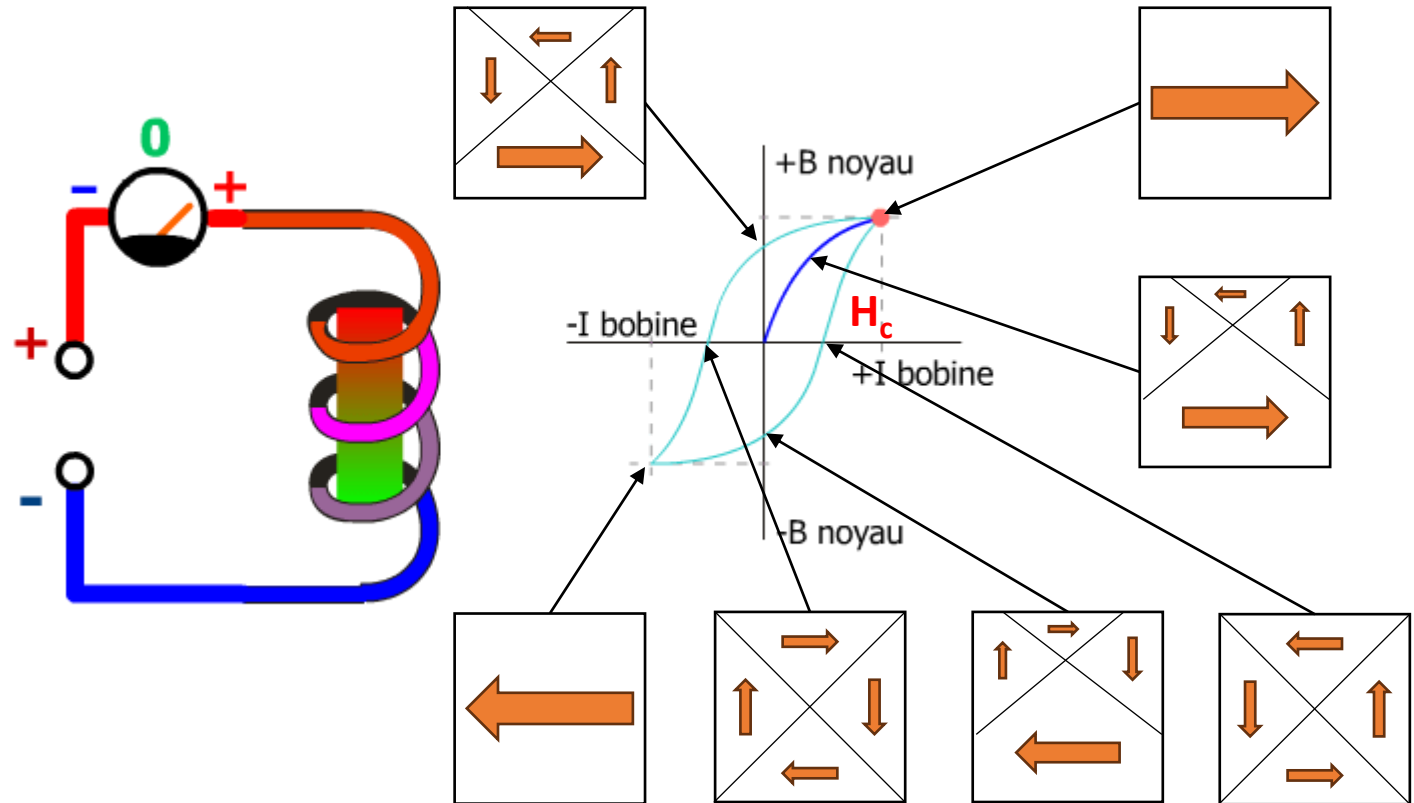


Matériaux en Electrotechnique

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES

1) Rappels

D. Hystérésis du circuit magnétique



Matériaux en Electrotechnique

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES

1) Rappels

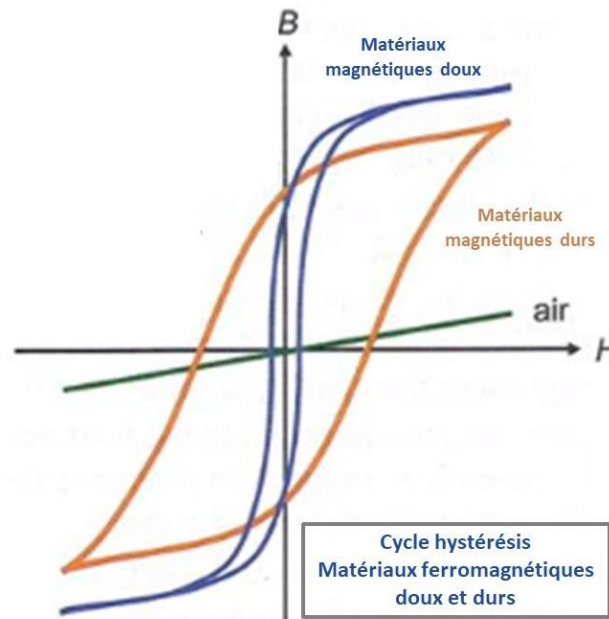
E. Cycle d'hystérésis - pertes par hystérésis

Si on applique à un matériau magnétique une excitation \mathbf{H} alternative, on obtient dans le plan « \mathbf{B}, \mathbf{H} » un ***cycle d'hystérésis***. La surface du cycle rend compte de la difficulté à réaimanter le circuit magnétique. Cela se traduit par des pertes proportionnelles à la fréquence \mathbf{f} de l'excitation \mathbf{H} :

Pertes par hystérésis:

$$P_{hys} = k_h \cdot V \cdot f \cdot B_{max}^2$$

K_h dépend du matériau et est proportionnel à la surface du cycle : pour diminuer les pertes, il faut diminuer la surface du cycle.



Matériaux en Electrotechnique

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES

1) Rappels

F. Courants induits - pertes par courants de Foucault

Le circuit magnétique de la plupart des machines électriques « voit » une induction **B** variable (alternative). Les matériaux utilisés, très souvent métalliques (essentiellement du fer), sont aussi conducteurs de l'électricité. Ainsi, d'après la **loi de Faraday**, des courants induits **i_F**, appelés courants de Foucault, prennent naissance et génèrent dans le matériau des pertes par effet joule (**r × i_F²**):

Pertes par courants de Foucault:

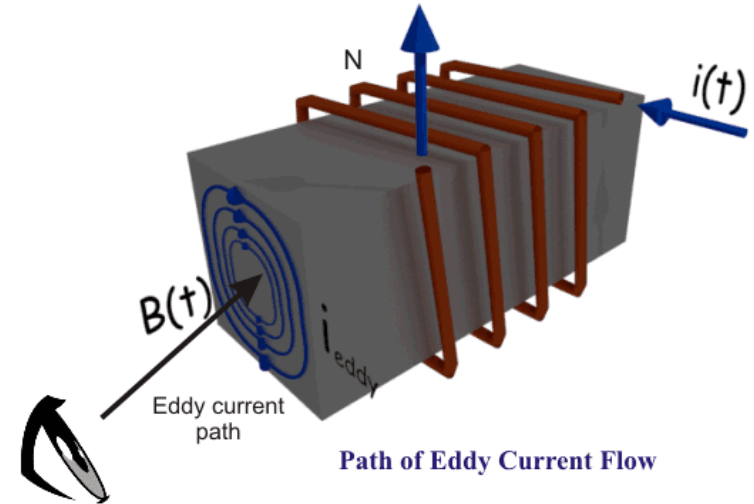
$$P_{CF} = k_{CF} \cdot \left(\frac{e \cdot f \cdot B_{max}}{\rho} \right)^2$$
$$P_{CF} = k_{CF} \cdot f^2 \cdot B_{max}^2 \cdot e^2$$

Où, **k** = constante dépend de la taille et inversement proportionnelle à la résistivité du matériau,

f = fréquence de la source d'excitation,

B_{max} = valeur de crête du champ magnétique et

e = épaisseur du matériau.



Matériaux en Electrotechnique

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES

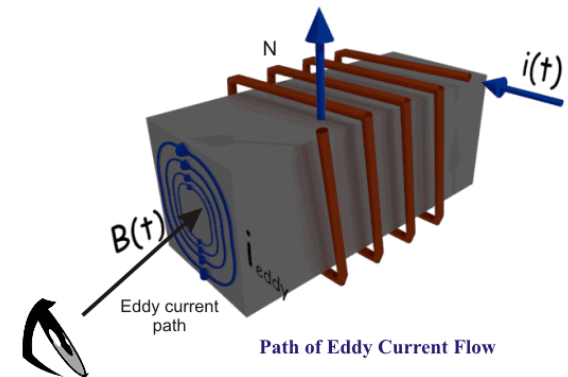
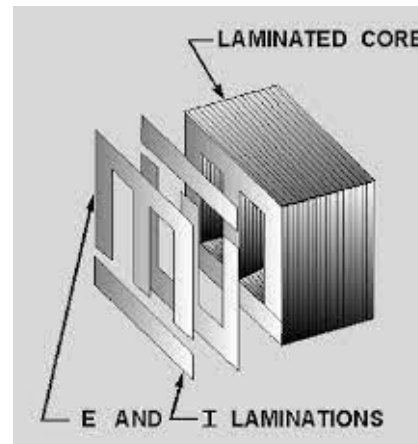
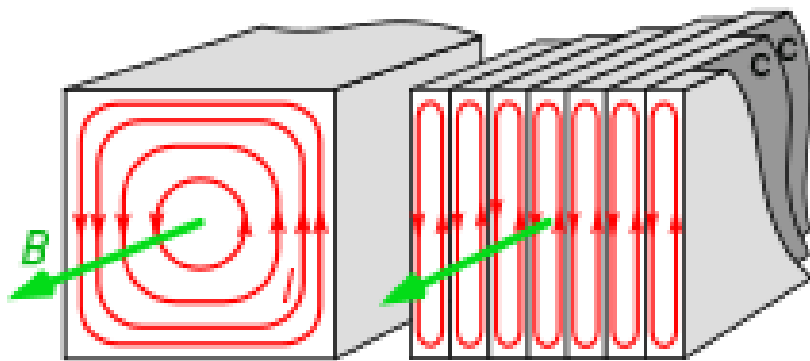
1) Rappels

F. Courants induits - pertes par courants de Foucault

Remarques :

Pour réduire les pertes par courants de Foucault, on peut :

- ✓ diminuer l'épaisseur e en utilisant un assemblage de tôles de faible épaisseur (35/100 ou 50/100) isolées entre elles : **circuit magnétique feuilleté**
- ✓ utiliser des matériaux magnétiques à résistivité plus élevée : **tôles d'acier au silicium , ferrites** (à fréquence élevée)



Matériaux en Electrotechnique

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES

2) Matériaux magnétiques doux

Matériaux à cycle d'hystérésis étroit pour minimiser les pertes par hystérésis, ils sont en général feuilletés et à base de fer (le fer pur a une résistivité trop importante). On distingue essentiellement :

- les aciers électriques (au silicium) --> basses fréquences : $f = 50 \text{ Hz}$
- les alliages fer nickel ou cobalt --> moyennes fréquences : $f < 100 \text{ kHz}$
- les ferrites (oxydes de fer) --> hautes fréquences : $f < 1000 \text{ kHz}$

1) *Aciers électriques :*

Ils sont essentiellement utilisés, dans les machines électriques travaillant aux fréquences industrielles (transformateurs et machines tournantes).

Ils sont constitués de tôles en acier allié à du silicium (1 à 5 %), ce qui a l'avantage d'augmenter la résistivité mais l'inconvénient de rendre les tôles cassantes.

On distingue :

- **les tôles classiques à grains non orientés.** $C_{FER} = 5 \text{ W / kg}$
- **les tôles à grains orientés.** $C_{FER} = 1 \text{ W / kg}$

Matériaux en Electrotechnique

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES

2) Matériaux magnétiques doux

2) *Alliages Fe/Ni ou Fe/Co :*

Le nickel et surtout le cobalt sont des métaux onéreux et sont alliés au fer dans des proportions importantes (30 à 80 %) ce qui rend ces alliages beaucoup plus chers que les aciers électriques.

Ils sont essentiellement utilisés en moyenne fréquence (< 100 kHz) et généralement dans des domaines où la puissance mise en jeu est plutôt faible :

- électrotechnique miniaturisée (appareils de mesure, tachymètres, certains relais...),
- Téléphonie,
- dispositifs de sécurité (disjoncteurs différentiels, blindage magnétique).

3) *Ferrites douces:*

Elles sont très utilisées en Electronique de Puissance et plus particulièrement dans les alimentations à découpage où la fréquence de fonctionnement est élevée ($f > 100$ kHz).

Ce sont des céramiques ferromagnétiques à base d'oxydes de fer ($X.Fe_{12}O_{19}$ -- $X = Mn$ ou Ni, Zn).

Elles sont fabriquées sous atmosphère inerte : Après mélange et broyage des composants, les poudres sont assemblées par frittage à haute température ($=1200$ °C). On obtient ainsi un matériau de grande résistivité, massif, mais malheureusement très cassant.