

Chapitre III

Circuit magnétique

1. Définition et représentation des grandeurs magnétiques

— **Champ magnétique** \vec{B} , dite aussi **induction magnétique**, **densité de flux magnétique**, est une propriété physique de l'espace, traduit l'effet du mouvement des particules chargées, tels que les particules chargées dans un courant électrique ou le mouvement des particules chargées dans le noyau d'un atome. Ces mouvements créent des champs magnétiques qui interagissent avec d'autres champs magnétiques ou avec des particules chargées, générant des forces magnétiques. Le champ magnétique est souvent mesuré en teslas (T).

— **Lignes de champ magnétique** sont imaginaires et fournissent une représentation visuelle de la direction spatiale du champ magnétique associé. Elles s'étendent du pôle nord magnétique vers le pôle sud magnétique, formant des boucles continues.

— **Champ d'excitation magnétique** \vec{H} est le champ magnétique appliqué à un matériau magnétique pour l'aimanter ou pour modifier son état magnétique. Ce champ est généralement créé par un aimant permanent ou par un courant électrique circulant à travers une bobine. Lorsqu'un matériau magnétique est exposé à un champ d'excitation magnétique, les moments magnétiques des atomes ou des molécules qui composent le matériau peuvent s'aligner dans la direction du champ, provoquant ainsi l'aimantation du matériau. Ce processus peut également modifier l'orientation des domaines magnétiques dans le matériau, ce qui affecte ses propriétés magnétiques globales. Le champ d'excitation magnétique s'exprime en ampères par mètre (A/m).

— **Perméabilité magnétique** μ est une mesure de la facilité avec laquelle un matériau peut être magnétisé lorsqu'il est soumis à un champ magnétique. Elle décrit la capacité d'un matériau à conduire et à concentrer les lignes de champ magnétique.

Perméabilité magnétique du vide μ_0 est une constante physique qui représente la perméabilité magnétique dans le vide ou l'espace libre. Elle est utilisée pour décrire le comportement des champs magnétiques dans le vide ou l'espace libre, où il n'y a pas de matériaux magnétiques. Elle est mesurée en henrys par mètre (H/m) ou en teslas par ampère (T/A).

Sa valeur est approximativement égale à :

$$\mu_0 \approx 4\pi 10^{-7} \text{H/m}$$

Dans le vide, la relation entre le champ magnétique (\vec{B}) et le champ d'induction magnétique (\vec{H}) est donnée par :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (\text{III.1})$$

Perméabilité magnétique relative μ_r est une grandeur qui compare la perméabilité magnétique d'un matériau par rapport à celle du vide (ou de l'air), exprimée sans unité car elle est relative. Elle indique à quel point un matériau est plus ou moins magnétique que le vide.

La formule pour calculer la perméabilité magnétique relative est:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (\text{III.2})$$

La perméabilité magnétique relative peut être utilisée pour déterminer comment un matériau réagit à un champ magnétique appliqué. Les matériaux ferromagnétiques, comme le fer, le nickel, le cobalt et certains alliages, ont une perméabilité magnétique relative nettement supérieure à 1, ce qui signifie qu'ils sont fortement magnétiques et peuvent concentrer et amplifier les champs magnétiques.

Dans un matériau, la relation entre le champ magnétique (\vec{B}) et le champ d'induction magnétique (\vec{H}) est :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{III.3})$$

— **Susceptibilité magnétique d'un matériau \mathcal{X}** représente la facilité avec laquelle ce matériau peut être magnétisé en réponse à un champ magnétique extérieur. Cette grandeur est spécifique à chaque matériau et peut varier en fonction de sa composition, de sa structure cristalline et d'autres propriétés intrinsèques. Elle est directement liée à la perméabilité magnétique μ par la relation :

$$\mu = \mu_0(1 + \mathcal{X}) \quad (\text{III.4})$$

La relation montre que la perméabilité magnétique d'un matériau μ est directement influencée par sa susceptibilité \mathcal{X} . Ainsi, plus la susceptibilité d'un matériau est élevée, plus sa perméabilité sera élevée par rapport à celle du vide.

$$\mu_r = 1 + \mathcal{X} \quad (\text{III.5})$$

— **Flux magnétique Φ** Le flux magnétique est la quantité de champ magnétique vectoriel \vec{B} traversant une surface donnée S . Son unité est webers (Wb). Il est déterminé par le produit scalaire du champ magnétique \vec{B} et du vecteur normal au plan de la surface \vec{S} , voire la figure III.1

$$\phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = B S \cos(\alpha) \quad (\text{III.6})$$

Où α est l'angle entre les lignes du champ magnétique \vec{B} et le vecteur normal au plan de la surface S .

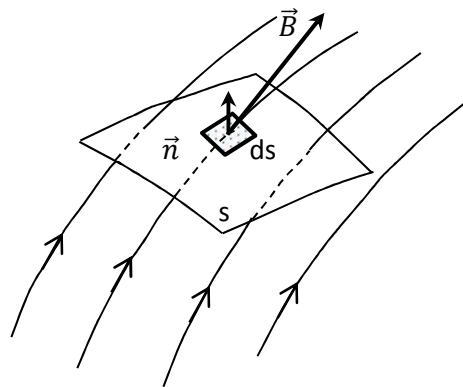


Figure III.1. Evaluation du flux magnétique sur une surface

Si $\alpha = 0$, le champ magnétique est perpendiculaire à la surface, dans ce cas le flux magnétique est maximal.

Si $\alpha = \frac{\pi}{2}$, le champ magnétique est parallèle à la surface, dans ce cas le flux magnétique est nul.

— **Force électromotrice (f.é.m.) ρ et Loi de Faraday** la f.é.m. est une grandeur électrique mesurée en volts (V). Elle représente la quantité d'énergie électrique fournie par une source d'alimentation, comme une pile, une batterie ou un générateur.

La loi de Faraday énonce le principe de l'induction électromagnétique, montrant comment une variation spatiale ou temporelle du flux magnétique traversant une surface entraîne la création d'une force électromotrice (FEM) induite dans un circuit.

La force électromotrice induite ρ dans un circuit est égale à moins la dérivée temporelle du flux magnétique Φ à travers une surface orientée par rapport au circuit :

$$\rho = -\frac{d\phi}{dt} \quad (\text{III.7})$$

Cette loi explique que lorsqu'il y a une variation du champ magnétique à travers une surface entourant un circuit, cela génère une force électromotrice induite dans ce circuit. Cette FEM induite peut provoquer un courant électrique si le circuit forme une boucle fermée.

— **Tubes de flux magnétique**, dite aussi **Tubes de l'induction magnétique**, ce sont des surfaces tubulaires dont la face latérale est limitée par les lignes du champ \vec{B} ; Le vecteur du champ magnétique \vec{B} est donc, en tout point, tangent à la surface latérale d'un tube de flux magnétique.

Le flux magnétique à travers toute section d'un tel tube est constant, d'après l'équation III.6 le flux magnétique à travers la surface latérale d'un tube de flux est nul, l'angle entre le vecteur du champ magnétique et la normale est $\alpha = \frac{\pi}{2}$, et le flux magnétique est donc canalisé à travers le tube, voire figure III.2.

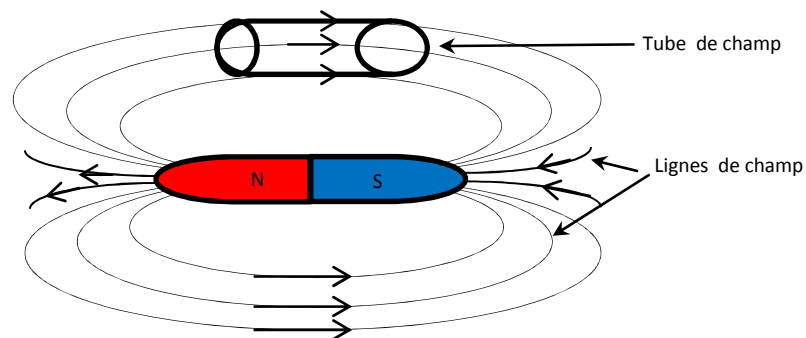


Figure III.2. Tube de flux magnétique

Rappelons que le concept de ligne d'un champ magnétique sert à visualiser la distribution spatiale du champ magnétique associé. Comme il y'a une infinité de lignes de champ, il est utile de grouper ces lignes en tubes de flux magnétique.

— **Conservation flux magnétique** La loi de conservation du flux magnétique, souvent appelée la loi de Lenz, est un principe fondamental en électromagnétisme qui stipule que le flux magnétique à travers une surface fermée reste constant à moins qu'il ne soit modifié par un courant électrique ou un changement dans le temps du champ magnétique.

Mathématiquement, la loi de conservation du flux magnétique peut être exprimée sous la forme d'une équation :

$$\vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \tag{III.8}$$

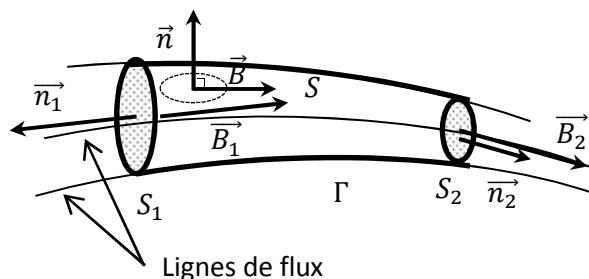


Figure III.3. Conservation de flux magnétique

Le flux magnétique traversant le tube de flux magnétique est nul :

$$\phi = \iint_{\Gamma} \vec{B} \cdot \vec{n} \, ds = \iint_{S_1} \vec{B}_1 \cdot \vec{n}_1 \, ds + \iint_{S_2} \vec{B}_2 \cdot \vec{n}_2 \, ds + \iint_S \vec{B} \cdot \vec{n} \, ds \quad (\text{III.9})$$

$$\phi = -B_1 S_1 + B_2 S_2 = 0 \quad (\text{III.10})$$

Par conséquent

$$\phi_1 = \phi_2 \quad (\text{III.11})$$

Nous en déduisant, d'après l'équation(III.11), que le flux magnétique se conserve et dépend, non pas de la forme de surface, mais de la forme du contour qui lui délimite.

2. Matériaux magnétiques

Les matériaux magnétiques sont des substances qui montrent des propriétés magnétiques significatives. Ils peuvent être divisés en différentes catégories en fonction de la manière dont ils réagissent à un champ magnétique externe. Voici quelques types de matériaux magnétiques les plus courants :

2.1. Ferromagnétiques $\chi \gg 0$

Ce sont des matériaux fortement magnétiques. Ils ont des moments magnétiques atomiques qui s'alignent spontanément dans une même direction lorsqu'ils sont exposés à un champ magnétique, conservant cette aimantation même après que le champ externe a été supprimé. La perméabilité magnétique d'un matériau ferromagnétique est généralement beaucoup plus grande que la perméabilité du vide μ_0 . Cela signifie que ces matériaux ont une capacité accrue à concentrer et à conduire les lignes de champ magnétique à l'intérieur d'eux-mêmes, comme indique la figure III.4, ce qui les rend idéaux pour la fabrication d'aimants et d'autres dispositifs magnétiques.

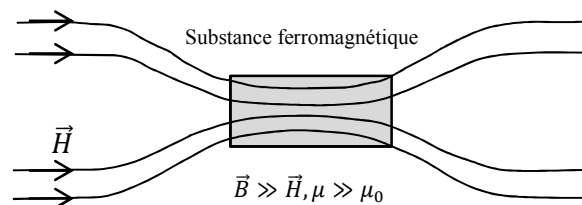


Figure III.4. Répartition de ligne de flux magnétique dans un matériau ferromagnétique

Voici quelques matériaux ferromagnétiques :

Le fer (d'où le terme ferromagnétique), le nickel, le cobalt.

Certains alliages, comme l'acier (fer avec des éléments d'alliage), qui peuvent avoir des propriétés ferromagnétiques en fonction de leur composition.

Les matériaux ferromagnétiques sont largement utilisés dans la fabrication d'aimants permanents, de transformateurs, de dispositifs électromagnétiques, dans les applications de stockage d'informations et dans de nombreuses autres applications de l'industrie et de la technologie en raison de leurs propriétés magnétiques uniques.

2.2. Paramagnétiques $\chi > 0$

Ces matériaux montrent une faible réponse magnétique en présence d'un champ magnétique externe. Les moments magnétiques atomiques s'alignent temporairement avec le champ appliqué mais perdent leur magnétisation une fois que le champ externe est supprimé. Contrairement aux matériaux ferromagnétiques, les

matériaux paramagnétiques n'ont pas d'aimantation permanente et ne conservent pas d'aimantation une fois que le champ magnétique externe est retiré. La perméabilité magnétique des matériaux paramagnétiques est légèrement supérieure à la perméabilité magnétique du vide μ_0 , mais elle est très proche de cette dernière.

En d'autres termes, elle est seulement légèrement différente de l'unité. Cette valeur proche de l'unité indique que ces matériaux permettent assez facilement le passage des lignes de champ magnétique à travers eux, mais leur réponse magnétique est relativement faible par rapport aux matériaux ferromagnétiques. Voir la figure III.5.

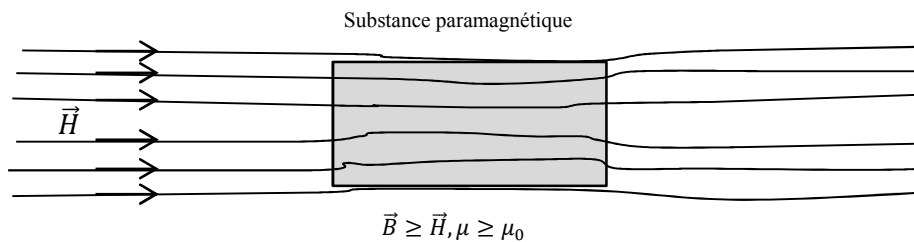


Figure III.5. Répartition de ligne de flux magnétique dans un matériau paramagnétique

Voici quelques matériaux paramagnétiques :

Certains sels de terres rares comme le sulfate de gadolinium.

L'aluminium, le magnésium, le platine et d'autres éléments peuvent également avoir des propriétés paramagnétiques à des degrés divers.

Les matériaux paramagnétiques sont souvent utilisés dans des domaines tels que la recherche en physique, la spectroscopie, la médecine (IRM) et d'autres applications où des propriétés magnétiques faibles ou temporaires sont nécessaires. Bien que leur réponse magnétique soit faible, ils jouent un rôle important dans diverses technologies et expériences scientifiques.

2.3. Diamagnétiques $\chi < 0$

Les matériaux diamagnétiques sont une catégorie de matériaux qui montrent une faible réponse magnétique lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique externe. Contrairement aux matériaux ferromagnétiques et paramagnétiques, les matériaux diamagnétiques sont généralement repoussés par un champ magnétique externe plutôt qu'attirés par celui-ci, Voir figure III.6. La perméabilité magnétique des matériaux diamagnétiques est très proche de la perméabilité magnétique du vide μ_0 , et souvent légèrement inférieure à celle-ci. En d'autres termes, elle est généralement très proche de l'unité, voire légèrement inférieure. Comme leur perméabilité est proche de l'unité, cela signifie que les matériaux diamagnétiques offrent une résistance très faible au passage des lignes de champ magnétique à travers eux lorsqu'ils sont exposés à un champ magnétique externe. Cependant, leur réponse magnétique est faible et ces matériaux ne conservent pas d'aimantation significative une fois le champ magnétique externe retiré.

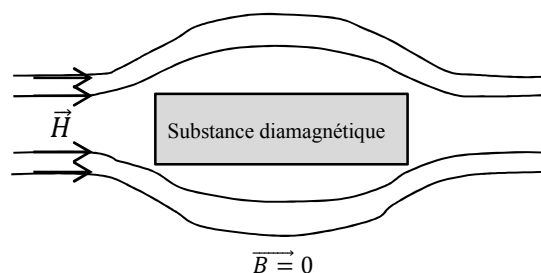


Figure III.6. Répartition de ligne de flux magnétique dans un matériau diamagnétique

Voici quelques matériaux diamagnétiques :

Le bismuth, le cuivre, l'eau, le graphite et certains autres matériaux présentent des propriétés diamagnétiques à des degrés divers.

Les propriétés diamagnétiques sont généralement faibles et les effets sont souvent masqués par les effets paramagnétiques ou ferromagnétiques des matériaux. Bien que leur réponse magnétique soit faible, les matériaux diamagnétiques sont toujours importants dans la recherche scientifique, notamment dans le domaine de la supraconductivité où la plupart des supraconducteurs montrent des propriétés diamagnétiques à température critique.

Comme les substances diamagnétiques et paramagnétiques ont une susceptibilité magnétique χ est beaucoup plus petite que 1, comme indiqué par le tableau III. 1, leur perméabilité relative μ_r est très voisine de 1 ; Autrement dit, la perméabilité μ de ces substances est pratiquement égale à celle du vide μ_0 .

3. Description et Mise en équations d'un circuit magnétique

3.1. Description

Un circuit magnétique, souvent composé de matériaux ferromagnétiques, est un ensemble de pièces ou d'éléments destinés pour canaliser et guider le flux du champ magnétique à travers un chemin spécifique. Ce concept est analogue au circuit électrique, mais pour le flux magnétique.

Les principaux éléments d'un circuit magnétique comprennent généralement, voire figure III.7 :

Noyaux magnétiques: Ces noyaux, souvent en matériau ferromagnétique, sont utilisés pour augmenter la perméabilité magnétique et diriger le champ magnétique à travers un chemin spécifique. Ils sont couramment utilisés dans les transformateurs, les inducteurs et d'autres dispositifs électromagnétiques.

Entrefer: C'est l'espace intentionnel laissé dans le circuit magnétique pour faciliter le mouvement du flux magnétique. Il est souvent présent dans les transformateurs et les moteurs électriques pour éviter la saturation du noyau magnétique.

Bobines de fil conducteur: Sont souvent enroulées autour des noyaux magnétiques pour créer des électroaimants ou des inducteurs. Lorsqu'un courant électrique traverse ces bobines, un champ magnétique est généré, influençant ainsi le flux magnétique dans le circuit.

Aimants permanents:

Dans certains cas, des aimants permanents peuvent être utilisés dans le circuit magnétique pour fournir un champ magnétique constant et stable sans nécessiter de courant électrique externe.

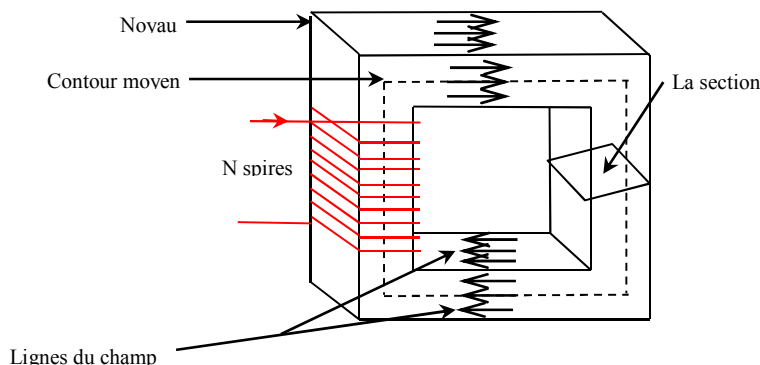


Figure III.7. Représentation de différents éléments constitutifs d'un circuit magnétique

3.2. Théorème d'Ampère et force magnétomotrice

Le théorème d'Ampère établit une relation entre le champ d'excitation magnétique \vec{H} et le courant électrique, permettant de calculer le champ d'excitation magnétique résultant autour d'un conducteur parcouru par un courant électrique. La version intégrale du théorème d'Ampère énonce que la circulation du vecteur d'excitation magnétique le long d'un contour fermé C est égal à la somme algébrique des intensités électriques traversant une surface quelconque supportée par ce contour.

Mathématiquement, le théorème d'Ampère pour une courbe fermée C peut être exprimé comme suit, en utilisant la notation de l'intégrale de ligne :

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = N i \quad (\text{III.12})$$

La quantité qui intervient au second membre s'appelle la "force magnétomotrice" \mathcal{F} du circuit:

$$\mathcal{F} = N i \quad (\text{III.13})$$

Une force magnétomotrice \mathcal{F} se mesure en Ampère-tour (At).

Considérons la figure III. 8 et cherchons à appliquer le théorème d'Ampère au contour Γ . La question qui se pose immédiatement est la détermination du signe des intensités i_1 , i_2 et i_3 .

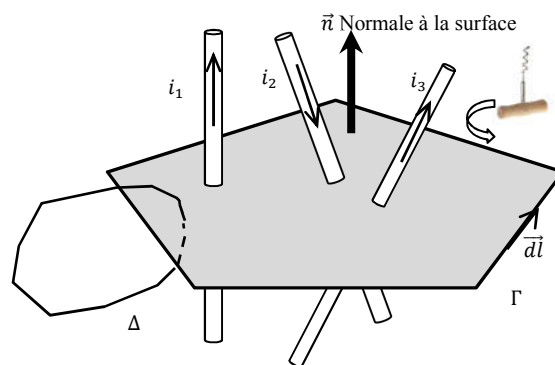


Figure III.8. Schéma illustratif du théorème d'Ampère

Dans la suite de cet ouvrage, nous définirons comme normale positive à une surface la normale obtenue par la règle du tire-bouchon de Maxwell : on tourne le tire-bouchon suivant le sens positif défini sur Γ , il s'enfonce dans le sens de la normale positive. Le signe d'une intensité est positif si l'intensité est dans le sens de la normale positive, négatifs sinon.

Ainsi, l'application du théorème d'Ampère à la courbe Γ de la figure III.8 donne :

$$\oint_{\Gamma} \vec{H} \cdot d\vec{l} = i_1 - i_2 + i_3 \quad (\text{III.14})$$

L'application du théorème d'Ampère à la courbe Δ , qui n'entoure aucun courant donne :

$$\oint_{\Delta} \vec{H} \cdot d\vec{l} = 0 \quad (\text{III.15})$$

3.3. Reluctance magnétique

Soit le circuit magnétique en forme de tore ou rectangulaire qui porte un bobinage de N spires, traversées par un courant d'intensité I .

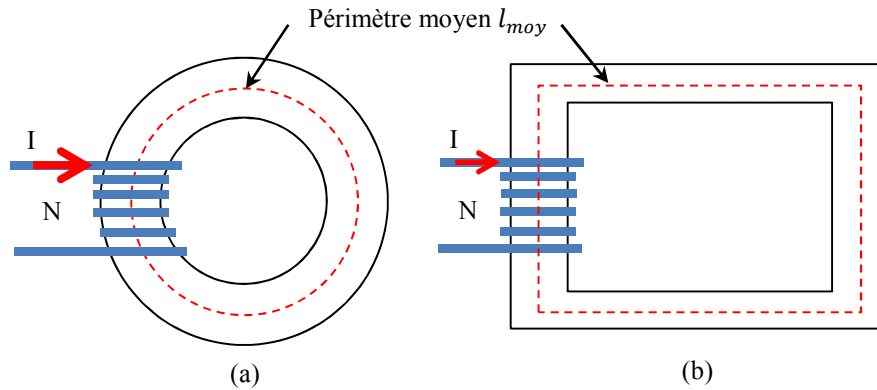


Figure III.9. Schéma d'un circuit magnétique a) en forme de tore b) en forme rectangulaire

L'application du théorème d'Ampère à la courbe Γ de la figure III.9 donne :

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = H l_{moy} = N i \quad (\text{III.16})$$

On sait que

$$H = \frac{B}{\mu_0 \mu_r} \quad (\text{III.17})$$

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (\text{III.18})$$

Finalement,

$$N i = \frac{l_{moy}}{\mu_0 \mu_r S} \Phi \quad (\text{III.19})$$

Elle est de la forme

$$\mathcal{F} = \mathcal{R} \Phi \quad (\text{III.20})$$

La reluctance magnétique est une mesure de la résistance qu'un matériau oppose au passage du flux magnétique à travers lui. Elle est l'analogue magnétique de la résistance électrique dans un circuit électrique. La reluctance est inversement proportionnelle à la perméabilité magnétique du matériau et directement proportionnelle à la longueur et à la section transversale du matériau.

Mathématiquement, la reluctance magnétique \mathcal{R} est définie comme :

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} \quad (\text{III.21})$$

On constate qu'il y'a analogie entre les circuits magnétiques et les circuits électriques telle que illustre le tableau III.1.

| Circuit électrique | Circuit magnétique |
|--|---|
| $E = F. E. M.$ (Force électromotrice) | $\mathcal{F} = F. M. M.$ (Force magnétomotrice) |
| I Intensité du courant électrique | Φ Flux magnétique |
| R Résistance électrique $R = \frac{\rho l}{s}$ | \mathcal{R} Réductance magnétique $\mathcal{R} = \frac{l}{\mu s}$ |
| $E = R I$ Lois d'Ohm | $\mathcal{F} = \mathcal{R} \Phi$ Lois d'Hopkinson |

Tableau III.1. Analogie entre le circuit électrique et magnétique

3.3.1. Reluctances magnétiques en séries

Le circuit magnétique représenté en figure III.10 est composé de trois parties différentes (l_1, S_1, μ_1) (l_2, S_2, μ_2) et (l_3, S_3, μ_3). Il porte un bobinage de N spires, parcourus par un courant I . On fait la circulation du champ magnétique H le long du contour moyen C

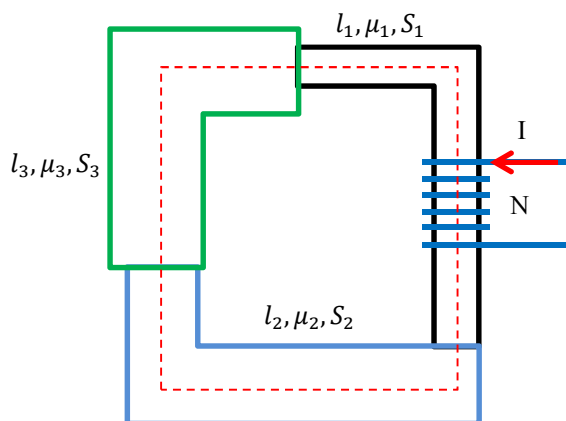


Figure III.10. Schéma d'un circuit magnétique composé de trois différentes parties en séries

L'application du théorème d'Ampère à la courbe Γ de la figure III.10 donne :

$$NI = \oint_C \vec{H} d\vec{l} = \int_{l_1} \vec{H}_1 d\vec{l}_1 + \int_{l_2} \vec{H}_2 d\vec{l}_2 + \int_{l_3} \vec{H}_3 d\vec{l}_3 \quad (\text{III.22})$$

$$= H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 \quad (\text{III.23})$$

$$NI = \frac{B_1}{\mu_1} l_1 + \frac{B_2}{\mu_2} l_2 + \frac{B_3}{\mu_3} l_3 \quad (\text{III.24})$$

$$NI = \frac{\Phi_1}{\mu_1} l_1 + \frac{\Phi_2}{\mu_2} l_2 + \frac{\Phi_3}{\mu_3} l_3 \quad (\text{III.25})$$

D'après le théorème de conservation de flux

$$\Phi = \Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3 \quad (\text{III.26})$$

On obtient :

$$NI = \Phi \left(\frac{l_1}{\mu_1 s_1} + \frac{l_2}{\mu_2 s_2} + \frac{l_3}{\mu_3 s_3} \right) \quad (\text{III.27})$$

Elle est de la forme

$$NI = \Phi (\mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_2 + \mathcal{R}_3) \quad (\text{III.28})$$

Avec

$$\mathcal{R}_1 = \frac{l_1}{\mu_1 S_1}, \quad \mathcal{R}_2 = \frac{l_2}{\mu_2 S_2} \quad \text{et} \quad \mathcal{R}_3 = \frac{l_3}{\mu_3 S_3}$$

Finalement ;

$$NI = \oint \mathcal{R} \quad (\text{III.29})$$

Telle que

$$\mathcal{R} = \mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_2 + \mathcal{R}_3 \quad (\text{III.30})$$

3.3.2. Reluctances magnétiques en parallèles

Le circuit magnétique représenté en figure III.11 est composé de deux parties différentes (l1, S1, μ1) (l2, S2, μ2) en parallèles associées avec une partie (l, S, μ). Il porte un bobinage de N spires, parcourus par un courant I. On fait la circulation du champ magnétique H le long du contour moyen C.

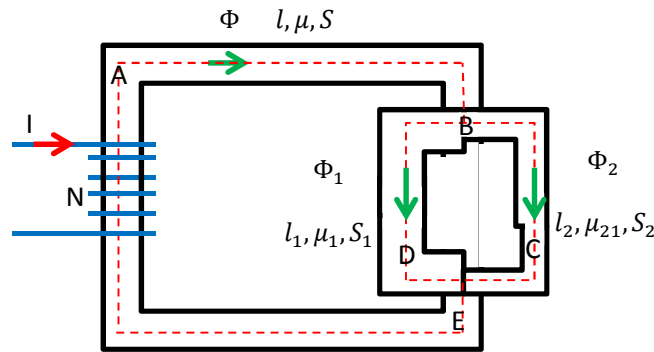


Figure III.11. Schéma d'un circuit magnétique composé de deux différentes parties en parallèles

On applique le théorème d'ampère pour le circuit de la figure III.11.

$$NI = \oint_C \vec{H} d\vec{l} \quad (\text{III.31})$$

Pour le contour fermé C on distingue deux chemins fermés possibles :

Premier chemin : Le contour fermé ABDEA

$$NI = \oint_C \vec{H} d\vec{l} = \int_l \vec{H} d\vec{l} + \int_{l_1} \vec{H}_1 d\vec{l}_1 \quad (\text{III.32})$$

$$= Hl + H_1 l_1 \quad (\text{III.33})$$

$$NI = \frac{B}{\mu} l + \frac{B_1}{\mu_1} l_1 \quad (\text{III.34})$$

$$NI = \frac{\Phi}{\mu} l + \frac{\Phi_1}{\mu_1} l_1 = \mathcal{R}\Phi + \mathcal{R}_1\Phi_1 \quad (\text{III.35})$$

Deuxième chemin : Le contour fermé ABCEA

$$NI = \oint_C \vec{H} d\vec{l} = \int_l \vec{H} d\vec{l} + \int_{l_2} \vec{H}_2 d\vec{l}_2 \quad (\text{III.36})$$

$$= Hl + H_2 l_2 \quad (\text{III.37})$$

$$NI = \frac{B}{\mu} l + \frac{B_2}{\mu_2} l_2 \quad (\text{III.38})$$

$$NI = \frac{\phi}{\mu} l + \frac{\phi_2}{\mu_2} l_2 = \mathcal{R}\Phi + \mathcal{R}_2\Phi_2 \quad (\text{III.39})$$

A partir des deux équations III.35 et III.39 on peut déduire :

$$\mathcal{R}_1\Phi_1 = \mathcal{R}_2\Phi_2 \quad (\text{III.40})$$

On peut dire

$$\frac{\Phi_1}{\frac{l}{\mathcal{R}_1}} = \frac{\Phi_2}{\frac{l_2}{\mathcal{R}_2}} = \frac{\Phi_1 + \Phi_2}{\frac{l}{\mathcal{R}_1} + \frac{l_2}{\mathcal{R}_2}} = \frac{\phi}{\mathcal{R}_{eq}} \quad (\text{III.41})$$

Avec

$$\frac{1}{\mathcal{R}_{eq}} = \frac{1}{\mathcal{R}_1} + \frac{1}{\mathcal{R}_2} \quad \text{et} \quad \mathcal{R}_{eq}\phi = \mathcal{R}_1\Phi_1 = \mathcal{R}_2\Phi_2$$

Finalement

$$NI = \mathcal{R}\Phi + \mathcal{R}_1\Phi_1 = \mathcal{R}\Phi + \mathcal{R}_2\Phi_2 = \mathcal{R}\Phi + \mathcal{R}_{eq}\phi \quad (\text{III.42})$$

4. Loi comportementale des milieux ferromagnétiques: courbes $B=f(H)$

Ces courbes montrent comment un corps ferromagnétique réagit à l'excitation magnétique H .

4.1. Courbe de première aimantation

Lorsque le corps ferromagnétique ne possède aucune aimantation. Le matériau est initialement démagnétisé (pas d'aimantation). On fait progressivement croître le champ d'excitation dans lequel est plongé le matériau. La courbe de la figure III.12 représente l'induction B . On distingue trois zones: la première est linéaire, puis le coude de saturation et la zone de saturation.

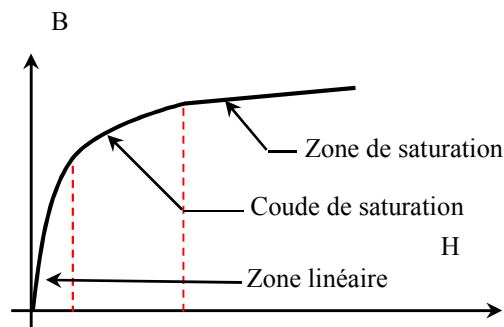


Figure III.12. Différentes zones de la courbe de la première aimantation

4.2. Cycle d'hystérésis

Lorsque le corps ferromagnétique possède déjà une aimantation. A partir d'un point (H, B) de la courbe de première aimantation, on diminue le champ H, l'induction B ne repasse pas sur la même courbe. En conséquence, B nulle ne correspond plus à une valeur nulle de H. Il subsiste une induction rémanente B_r (l'induction qui demeure après la disparition du champ). Le champ d'excitation doit s'inverser pour annuler B, c'est le champ coercitif H_c (le champ à appliquer pour annuler l'induction). L'induction maximale est l'induction de saturation B_{sat} .

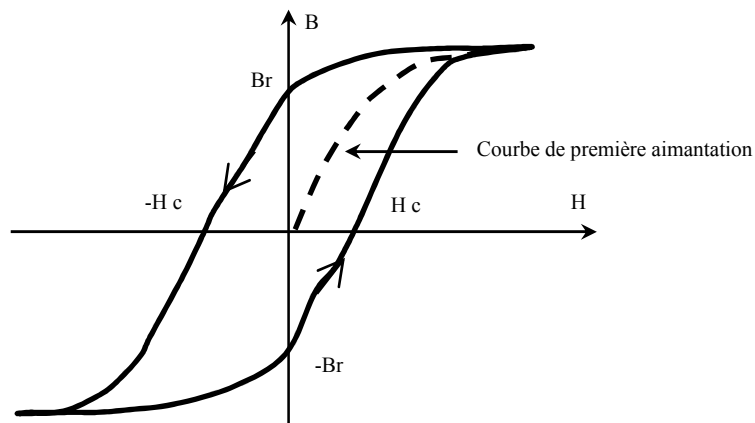


Figure III.12. Cycle d'hystérésis

On définit plusieurs zones dans la courbe $B=f(H)$:

— **Zone linéaire:** dans cette zone, $B = \mu \cdot H$ avec μ constante. C'est cette zone qui est généralement exploitée pour les transformateurs et les machines tournantes.

— **Saturation du milieu ferromagnétique:** lorsque H devient trop grand, B ne varie presque plus. Le matériau magnétique est dit saturé. On a toujours $B = \mu H$, mais μ n'est plus constant. B tend vers le champ de saturation B_{sat} .

— **Champ rémanent B_r :** champ qui subsiste lorsque $H = 0$.

— **Excitation coercitive H_c :** excitation H nécessaire pour annuler le champ rémanent B_r .

— **Hystérésis:** c'est le dédoublement de la caractéristique $B(H)$ du matériau magnétique. Donc B dépend non seulement de H , mais aussi de l'aimantation antérieure. Les substances ferromagnétiques sont donc douées de mémoire.

On sépare les matériaux magnétiques en deux familles qui se distinguent par leur courbe $B=f(H)$.

— **Matériaux durs:** Matériaux qui présentent une forte aimantation rémanente et difficile à annuler (H_c est grand). Ils sont utilisés pour faire des aimants permanents (ex : acier). Ce sont des matériaux qui présentent un cycle d'hystérésis très large.

— **Matériaux doux:** Matériaux qui possèdent une aimantation rémanente facile à annuler (H_c est petit). A l'opposé des matériaux durs, un matériau doux présente un cycle d'hystérésis très petit. C'est la base des machines tournantes.

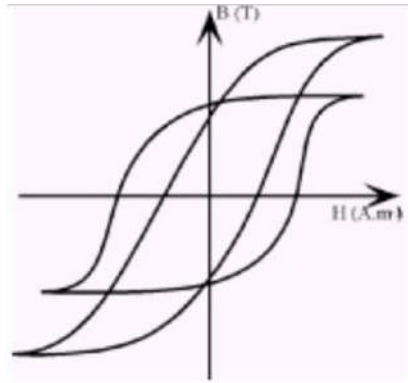


Fig.5 : Matériaux durs

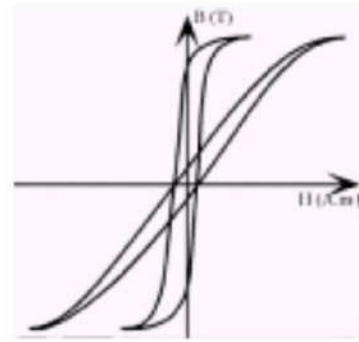


Fig.6 : Matériaux doux

5. Pertes dans la matière

5.1. Pertes par hystérésis

Ce type de perte est lié au cycle d'hystérésis du matériau. Le parcours du cycle B(H) fait apparaître une perte d'énergie qui correspond alors à un échauffement de la matière. Elles sont donc proportionnelles à la fréquence et sont liées à la structure du matériau.

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

Dans le cadre de transformateur, on utilise des matériaux doux pour cette simple raison.

5.2. Pertes par courants de Foucault

Les variations du champ magnétique dans la matière génèrent par induction des courants induits. Il y a donc échauffement par effet joule. Cette fois-ci ces pertes sont proportionnelles au carré de la fréquence:

$$P_h = \beta B_m^2 f$$

Afin de les limiter, on cherche à réduire le parcours des courants induits, c'est pour cette raison que l'on utilise des circuits magnétiques feuilletés isolés.