

CIRCUIT MAGNETIQUE

3.1 INTRODUCTION

On appelle circuit magnétique au sens large tout système capable de produire un champ magnétique dont les conséquences seraient des forces magnétiques, des couples magnétiques et surtout des flux magnétiques (dont la variation se transformerait en une force électromotrice induite). Pour produire un champ magnétique, il est nécessaire d'avoir une source (courant ou aimant permanent) appelée force magnétomotrice (f.m.m). Le circuit magnétique est à la base de tous les appareils en électrotechnique: transformateurs, relais, contacteurs magnétiques, moteurs, alternateurs, machines à courant continu, ...etc. Il est important de bien en saisir les notions de base.

Les grandeurs tension et courant électriques interviennent parfois au sein de circuits électriques par le biais de phénomènes magnétiques : les grandeurs magnétiques sont donc fortement attachées aux comportements électriques. Dans ces conditions, pour revenir à l'étude strictement électrique, la connaissance des grandeurs magnétiques essentielles permet de comprendre leur influence et les relier aux tensions et courants dans un circuit.

*Les phénomènes magnétiques sont le fruit du mouvement des charges électriques. La grandeur vectorielle **champ d'induction magnétique** émane directement de ces mouvements grâce à la loi de Biot et Savart. L'autre grandeur importante, le **champ d'excitation magnétique**, vectoriel lui aussi, traduit l'influence du milieu. Dans les matériaux courants, ces vecteurs induction et excitation sont colinéaires. Enfin, on distingue une dernière grandeur, scalaire cette fois-ci, définie à partir de l'induction : le **flux d'induction magnétique**.*

*Les liens existants entre les grandeurs magnétiques et les grandeurs électriques sont définis au travers de deux relations importantes. Le **théorème d'Ampère** lie le **champ d'excitation magnétique** au **courant** circulant dans un circuit. **L'induction magnétique** découle de la tension telle que l'exprime la **loi de Faraday**.*

*Enfin une dernière catégorie de phénomènes montre les **effets mécaniques** des grandeurs magnétiques au travers des **lois de Lorenz** (lien induction–mouvement) et de **Laplace** (courant–effort) et dont les principes sont très largement utilisés dans les convertisseurs électromécaniques.*

3.2 GENERALITES SUR LE MAGNETISME

3.2.1. Présentation

L'électrocinétique donne les moyens de modéliser les phénomènes liant la tension et le courant dans un dipôle électrique :

- *Résistance*, $u(t) = r \cdot i(t)$, loi d'Ohm ;
- *Condensateur*, $i(t) = C \frac{du(t)}{dt}$, loi dérivée de l'électrostatique ;
- *Inductance*, $u(t) = L \frac{di(t)}{dt}$, loi dérivée du magnétisme.

Dans le cas d'un circuit bobiné sur un noyau, les phénomènes rendent dépendant la tension et le courant de grandeurs magnétiques qu'il faut éliminer pour trouver la relation $u = f(i)$. Pour introduire la notion de circuit magnétique, nous allons tout d'abord considérer une bobine comportant N spires enroulées autour d'un noyau toroïdal, figure (3.1).

Une grandeur magnétique, le flux Φ , intervient :

$i = f(\Phi)$ et $u = f(\Phi)$ donc en éliminant Φ des expressions paramétriques de u et i , on obtient $u = f(i)$. Remarque : cette élimination n'est pas toujours analytiquement aisée car les phénomènes sont non linéaires.

Pour étudier le comportement électrique du dipôle, il faut connaître sa représentation et son comportement magnétique. Pour cela, on décrit les grandeurs magnétiques qui entrent en jeu, les lois de leur comportement et l'influence des milieux matériels dans

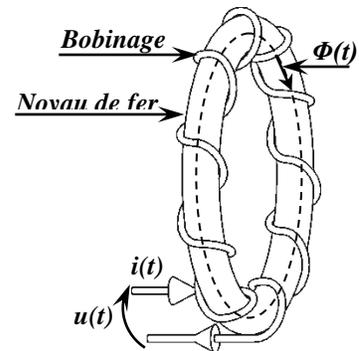


Figure (3.1) : Exemple du circuit Magnétique.

3.2.2. Grandeurs magnétiques

a- Champ d'induction magnétique (\vec{B})

Depuis l'antiquité, on a remarqué que la magnétite (aimant permanent naturel) attirait de petits morceaux de fer et l'expérience d'**Oersted** a révélé qu'un courant électrique agissait sur l'aiguille d'une boussole aimantée. Les effets de ces deux sources en un point de l'espace sont appelés « **Champ magnétique** »

D'un point de vue expérimental, Biot et Savart, deux professeurs et collègues d'Ampère, proposèrent en 1820 une loi qui porte leur nom et qui décrit le champ magnétique créé, en tout point de l'espace, par un circuit électrique filiforme parcouru par un courant i figure (3.2), à savoir :

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{d\vec{l} \wedge \vec{u}}{r^2}$$

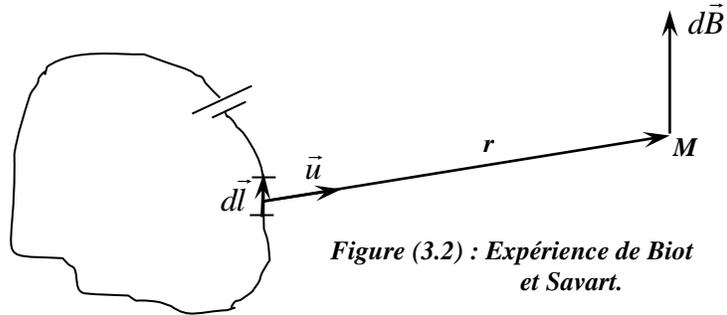


Figure (3.2) : Expérience de Biot et Savart.

Où μ_0 est la perméabilité du vide : $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m} = 1,25 \cdot 10^{-6} \text{ H/m}$, et \vec{u} est le vecteur unitaire dirigé de l'élément de circuit $d\vec{l}$ au point M où on évalue \vec{B} .

Si en prenant le cas d'une particule ponctuelle de charge électrique q , animée d'une vitesse constante \vec{v} et possède une densité de courant $\vec{j} = q \vec{v}$ la loi de **Biot et Savart** suggère d'écrire que cette charge (en mouvement, figure (3.3)) au point S crée un champ magnétique au point M :

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{q\vec{v} \wedge \vec{u}}{r^2}$$

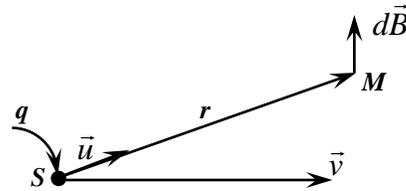


Figure (3.3) : Champ magnétique d'une charge en mouvement.

Le champ d'induction magnétique \vec{B} est une grandeur vectorielle dépendant de l'espace (position) et du temps. L'induction s'exprime en Tesla (T).

Si le vecteur champ d'induction est identique en tout point de l'espace, le champ est dit uniforme. Dans les problèmes technologiques que nous rencontrerons, l'induction magnétique sera une grandeur connue. Elle ne sera pas à déterminer par les relations précédentes.

La loi de Biot et Savart permet donc de déterminer le sens du champ magnétique en un point en considérant le sens du produit vectoriel $d\vec{l} \wedge \vec{u}$ pour ce point. Si on considère le plan contenant l'élément du circuit $d\vec{l}$ et le point M comme étant le plan de cette page. On place un tourne vis (ou tire-bouchon) au point N et on tourne de $d\vec{l}$ vers \vec{u} . On remarque que la vis fictive se desserre et le sens du champ est dirigé vers l'extérieur de la page, figure (3.4).

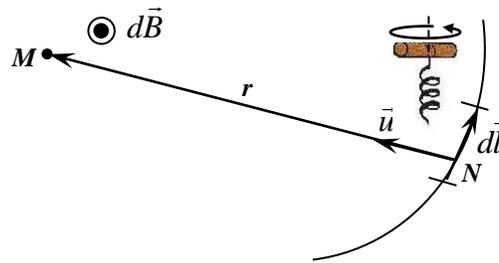


Figure (3.4) : Détermination du sens de \vec{B} par la méthode de tire-bouchon.

Une autre méthode basée sur le concept du bonhomme d'Ampère est l'usage de la main droite pour déterminer le sens du champ magnétique \vec{B} créé par un conducteur parcouru par un courant I . On détermine le plan contenant $d\vec{l}$, orienté dans le sens du courant et la distance r au point où on cherche le champ \vec{B} . On place sur le plan le pouce de la main droite suivant l'élément $d\vec{l}$ et le majeur sur le point où on cherche \vec{B} . Le champ magnétique est perpendiculaire au plan $(d\vec{l}, r)$ et le sens est sortant par rapport à la paume de la main, figure (3.5).

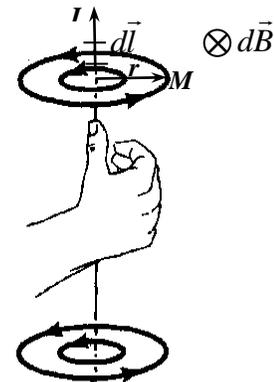


Figure (3.5) : Détermination du sens de \vec{B} par la méthode de la main droite.

b- Champ d'excitation magnétique (Intensité du champ magnétique \vec{H})

Le champ d'excitation magnétique \vec{H} rend compte de l'influence du milieu magnétique sur les grandeurs. Cet aspect sera particulièrement développé dans le cadre des « milieux magnétiques ». C'est une grandeur vectorielle dépendant de l'espace (position) et du temps. Le champ d'excitation magnétique s'exprime en ampères par mètre (A/m).

Dans le vide, l'induction et l'excitation sont colinéaires : $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$. C'est aussi le cas dans un matériau isotrope mais avec un coefficient différent. Le vecteur champ d'excitation magnétique est tangent en tous points à une courbe orientée appelée ligne de champ, figure (3.6).

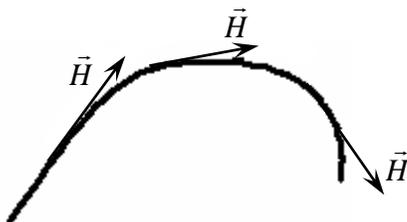


Figure (3.6) : Ligne de champ.

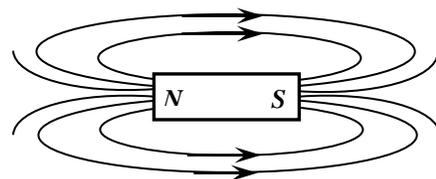


Figure (3.7) : Ligne de champ issu d'un aimant.

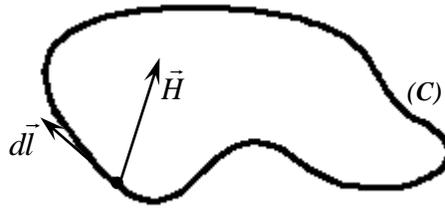


Figure (3.8) : La circulation du vecteur \vec{H} le long d'un contour fermé (C).

Dans le cas d'un aimant, les lignes de champ sont orientées du pôle nord vers le pôle sud à l'extérieur de la matière aimantée (ici le vide ou l'air), figure (3.7). La circulation du vecteur \vec{H} le long d'un contour fermé (C), figure (3.8) est définie de la manière suivante :

$$C_{\vec{H}} = \oint_{(C)} \vec{H} \cdot d\vec{l}$$

c- Flux d'induction magnétique $\vec{\phi}$

Définition du flux : quantité d'une grandeur scalaire qui traverse pendant l'unité de temps une aire donnée.

Le flux d'induction magnétique à travers une surface donnée est l'ensemble des lignes de force qui traverse cette surface, figure (3.9). Par conséquent, plus la surface considérée est grande, plus les lignes de force sont rapprochées et plus le flux d'induction magnétique est élevé. La valeur de ce flux dépend également de l'orientation de la surface considérée par rapport à nos lignes de force. Le flux est maximal quand la surface est perpendiculaire aux lignes de forces (la surface est traversée par un nombre maximal de lignes de force). Il sera minimal lorsque la surface sera parallèle aux lignes de forces (il sera nul). Entre ces deux extrêmes, le flux d'induction magnétique ne cessera de diminuer. On dit souvent que le flux d'induction magnétique est l'ensemble des lignes de forces présentes sur notre système qui relie les deux pôles magnétiques de ce dernier.

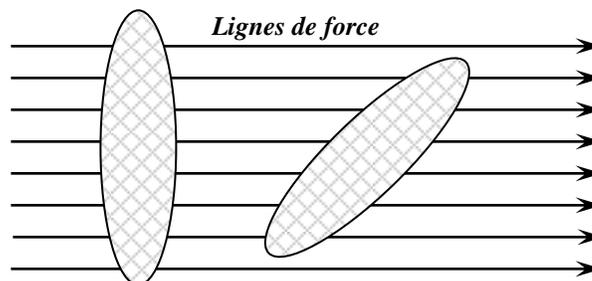


Figure (3.9) : Définition du flux d'induction magnétique.

Le flux du vecteur induction magnétique \vec{B} à travers une surface fermée (S), figure (3.10) est défini de la manière suivante :

$$\phi = \iint_{(S)} \vec{B} \cdot \vec{n} dS$$

Le flux magnétique s'exprime en weber (Wb).

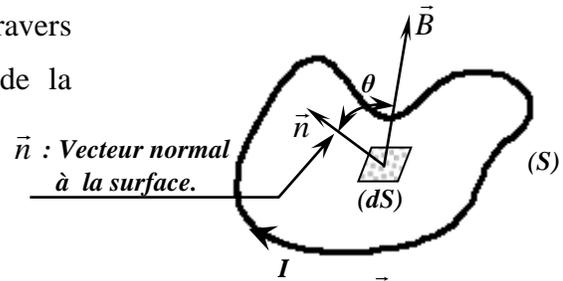


Figure (3.10) : Flux de \vec{B} à travers (S).

Exemple : Soit un circuit quelconque parcouru par un courant I et soit un élément dS placé dans un champ magnétique uniforme \vec{B} incliné de l'angle θ par rapport à \vec{n} , il sort une quantité de flux (suivant l'équation précédente) tel que :

- Si le circuit est plan (même vecteur normal \vec{n}), alors $\phi = BS \cos \theta$;
- Si B et S sont colinéaires ($\theta = 0^\circ$), alors $\phi = BS$;
- Si le flux est conservatif, alors $\oint \vec{B} d\vec{S} = 0$.

Exemple (cas d'un flux conservatif) : Un tube d'induction est l'ensemble des lignes d'induction s'appuyant sur deux contours fermés (C_1) et (C_2) comme l'illustre par la figure (3.11). Le flux sortant d'un tube de champ est nul. Ceci traduit une propriété essentielle du flux, à savoir qu'il est conservatif (ceci se traduit par l'une des relations de Maxwell : $\text{div } \vec{B} = 0$).

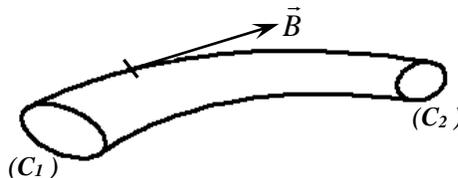


Figure (3.11) : Tube d'induction.

3.3 MATERIAUX MAGNETIQUES

Dans le vide, les grandeurs vectorielles champ d'induction magnétique et champ d'excitation magnétique sont liées par la perméabilité magnétique du vide, μ_0 , dans une relation linéaire. Dans un matériau isotrope une nouvelle grandeur vectorielle, l'aimantation, se superpose au champ d'excitation pour traduire l'influence du milieu. L'aimantation est liée à l'induction par la susceptibilité magnétique du matériau dans une relation linéaire, elle aussi. A terme, on observe une relation vectorielle linéaire entre l'induction et l'excitation : le coefficient de perméabilité absolue remplace la perméabilité du vide.

Observés par un regard magnétique, les matériaux se classent en trois grandes catégories. Dans les paramagnétiques les vecteurs champs et aimantation sont de même sens et l'aimantation disparaît avec l'excitation. Pour les diamagnétiques l'influence est similaire, mais champ et aimantation sont de sens contraires. Ces deux classes n'ont pas de propriétés magnétiques avantageuses en technologie. Les matériaux les plus intéressants sont ferromagnétiques : le coefficient de proportionnalité entre induction et excitation est important, mais non constant, ce qui procure à ces matériaux des comportements non linéaires.

L'observation microscopique des matériaux ferromagnétiques permet de les décrire par la théorie des domaines. Par ce biais, on peut justifier que l'induction résultant d'une excitation magnétique évolue de manière non linéaire. Ceci conduit à représenter le cycle d'hystérésis d'un matériau qui lie l'induction à l'excitation. Les caractéristiques de ces cycles (valeurs typiques, forme, surface) permettent une classification des matériaux ferromagnétiques : doux ou dur.

3.3.1. Relation entre l'induction magnétique \vec{B} et le champ d'excitation \vec{H}

Dans le vide les vecteurs champs d'induction magnétique \vec{B} et champ d'excitation magnétique \vec{H} sont colinéaires puisque ils sont liés par la relation $\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H}$ où μ_0 est la perméabilité magnétique du vide (T.m/A).

Remarque : dans l'air, le comportement est similaire. Dans un milieu magnétique quelconque mais isotrope (un élément est dit isotrope s'il possède les mêmes propriétés physiques dans toutes les directions), ces vecteurs restent colinéaires. Cependant, le coefficient de proportionnalité dépend du matériau.

On définit le vecteur aimantation \vec{J} qui indique l'influence du milieu. Champ d'excitation et aimantation se superposent pour exprimer le champ d'induction :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{J}$$

Or l'aimantation est proportionnelle au champ d'excitation, si bien que :

$$\vec{J} = \chi \vec{H} \text{ où } \chi \text{ est la susceptibilité magnétique du matériau.}$$

Il en résulte une nouvelle expression liant \vec{B} et \vec{H} :

$$\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu \vec{H}$$

Où μ est la perméabilité absolue et μ_r la perméabilité relative du matériau. Les matériaux peuvent être classés suivant leur comportement magnétique, c'est à dire suivant la susceptibilité magnétique χ .

3.3.2. Classification des matériaux d'un point de vue magnétique

a) Matériaux Paramagnétiques (Tableau -3.1a)

La susceptibilité χ est faible (donc $\mu_r \approx 1$), positive et pratiquement constante (variation en $1/T$). Les vecteurs \vec{H} et \vec{J} sont de même sens et l'aimantation disparaît avec le champ d'excitation. Dans ces matériaux, les moments magnétiques permanents s'alignent sous l'effet d'un champ magnétique. Mais cette orientation ne compense pas l'agitation thermique qui reste prépondérante. En conséquence l'aimantation globale reste faible. La plupart des gaz, certains métaux et quelques sels font partie de la catégorie des paramagnétiques.

b) Matériaux Diamagnétiques (Tableau -3.1b)

La susceptibilité χ est faible (donc $\mu_r \approx 1$), négative et pratiquement constante (variation en $1/T$). Les vecteurs \vec{H} et \vec{J} sont de sens contraires et l'aimantation disparaît avec le champ d'excitation. Dans ce cas, le champ magnétique provoque un mouvement orbital des électrons. Le comportement est alors similaire à une spire créant un courant qui s'oppose au champ : d'où le signe négatif de χ .

Matière	χ	Matière	χ
Na	$8,6 \cdot 10^{-6}$	Pt	$1,2 \cdot 10^{-5}$
Al	$7,7 \cdot 10^{-6}$	U	$3,3 \cdot 10^{-5}$
Mn	$1,2 \cdot 10^{-4}$	CoO	$0,75 \cdot 10^{-3}$
Ta	$1,1 \cdot 10^{-6}$	Fe ₃ C*	$3,7 \cdot 10^{-3}$
W	$3,5 \cdot 10^{-6}$	Fe ₇ *	$2,5 \cdot 10^{-5}$

Matière	χ	Matière	χ
Si	$-1,2 \cdot 10^{-6}$	Se	$-4,0 \cdot 10^{-6}$
Cu	$-1,08 \cdot 10^{-6}$	Ag	$-2,4 \cdot 10^{-6}$
Zn	$-1,9 \cdot 10^{-6}$	Pb	$-1,4 \cdot 10^{-6}$
Ge	$-1,5 \cdot 10^{-6}$	Al ₂ O ₃	$-3,5 \cdot 10^{-6}$

Tableau (3.1) : Susceptibilité de différents matériaux à température ambiante.

c) Matériaux Ferromagnétiques

Dans cette catégorie essentielle pour l'électrotechnique, la susceptibilité χ est élevée ($\mu_r \gg 1$), positive et variable avec l'excitation magnétique, figure (3.12). D'autre part la température influence particulièrement χ : au delà de la température de Curie, un matériau ferromagnétique se comporte comme un matériau paramagnétique. Enfin, notons aussi que l'induction magnétique dépend du sens de variation de \vec{H} , ce qui introduit la notion de rémanence et de cycle d'hystérésis. Exemples de matériaux ferromagnétiques : fer, cobalt, nickel et leurs alliages.

Notons enfin ces matériaux ferromagnétiques particuliers, les ferrimagnétiques (ferrites) ne sont pas conductrices du courant électrique. Ils sont intéressants car ils ne favorisent pas la création des courants de Foucault (courants apparaissant dans les masses magnétiques soumises à des champs variables et générateurs de pertes électromagnétiques). Les pertes se trouvent donc diminuées ce qui les destine à des applications en haute fréquence (selfs radiofréquences, alimentations à découpage, etc.).

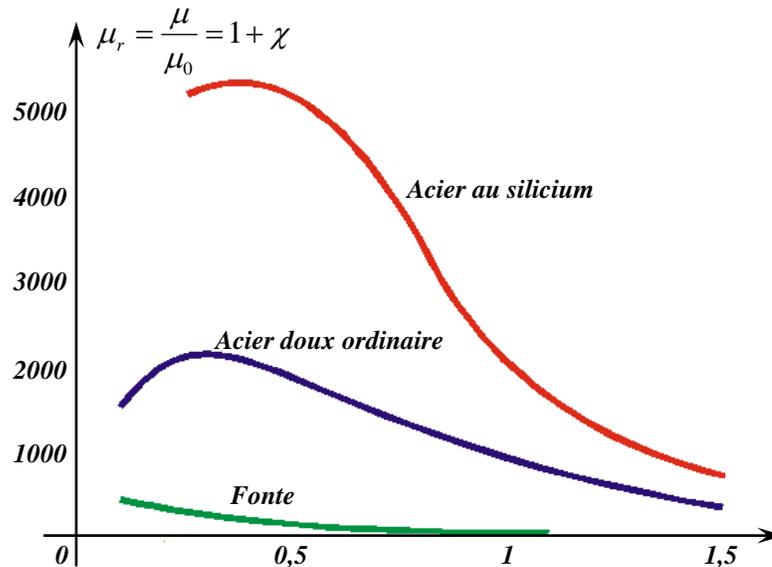


Figure (3.12) : Perméabilité relative $\mu=1+\chi$ en fonction de B pour trois matériaux courants.

d) Résumé

Les différents comportements magnétiques des trois catégories de matériaux peuvent être illustrés par le graphe de la figure (3.13).

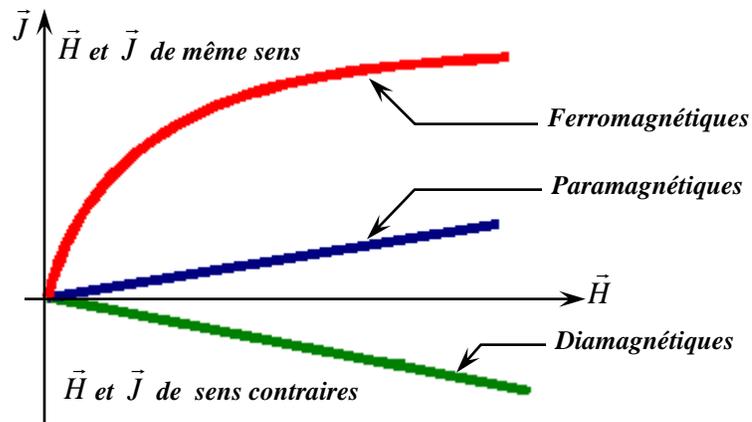


Figure (3.13) : Illustration des comportements magnétiques.

3.4 ANALOGIE ENTRE CIRCUIT ELECTRIQUE ET CIRCUIT MAGNETIQUE

La force magnétomotrice, le flux et la réluctance d'un circuit magnétique correspondent à la différence de potentiel, au courant et à la résistance d'un circuit électrique. La loi des boucles et la loi des nœuds peuvent s'y appliquer. Ainsi, la somme algébrique des chutes de potentiel magnétique (mesurées en ampères-tours) dans les réluctances d'une boucle est égale à la somme des gains de potentiel magnétique ou des forces magnétomotrices. La somme des flux rentrant dans un nœud est égale à la somme des flux qui en sortent. La loi d'ohm des circuits magnétiques s'exprime ainsi : $F = \mathfrak{R} \varphi$.

Il existe toutefois une différence importante entre les circuits électriques et les circuits magnétiques : dans un circuit électrique, s'il y a coupure, il n'y a pas de courant, puisque la résistance de l'air tend vers l'infini ; par contre, dans un circuit magnétique, la réluctance de l'air est grande par rapport à celle de l'acier, mais loin d'être infinie et, s'il y a coupure, il y a quand même un flux qui circule.

Le tableau (3.2) décrit d'autres aspects de l'analogie entre l'électricité et le magnétisme. Le tableau (3.3) fait un survol des symboles et des unités utilisés en magnétisme.

	<i>Electricité</i>	<i>Magnétisme</i>
<i>Source</i>	E	$F = N I$
<i>Impédance</i>	$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{l}{\gamma S}$ ρ : résistivité γ : conductivité l : longueur	$\mathfrak{R} = \frac{\nu l}{S} = \frac{l}{\mu S}$ ν : réluctivité μ : perméabilité S : section
<i>Loi d'Ohm</i>	$E = R I$	$F = \mathfrak{R} \varphi$
<i>Gradient de potentiel</i>	$\varepsilon = \frac{E}{l}$	$H = \frac{F}{l} = \frac{N I}{l}$
<i>Chute de potentiel</i>	$E_{ab} = I_{ab} R_{ab}$	$U_{ab} = \varphi_{ab} \mathfrak{R}_{ab}$
<i>Densité de courant et de flux</i>	$J = \frac{I}{S} = \frac{E}{S R}$ $= \frac{\varepsilon l}{S \frac{\rho l}{S}} = \frac{\varepsilon}{\rho}$	$B = \frac{\varphi}{S} = \frac{F}{\mathfrak{R} S}$ $= \frac{H l}{S \frac{l}{\mu S}} = \mu H$

Tableau (3.2) : Analogie entre l'électricité et le magnétisme.

<i>Quantité</i>	<i>Symbole</i>	<i>Unités SI</i>
<i>F.m.m</i>	<i>F (NI)</i>	<i>ampère - tour (At)</i>
<i>Flux</i>	<i>ϕ</i>	<i>weber (Wb)</i>
<i>Intensité de champ</i>	<i>H</i>	<i>ampère - tour/mètre (At/m)</i>
<i>Perméabilité (vide)</i>	<i>μ μ_0</i>	<i>weber par ampère - tour - mètre (Wb/At .m) $4\pi 10^{-7}$ Wb/At.m</i>
<i>Densité de flux</i>	<i>B</i>	<i>tesla (T)</i>
<i>Longueur</i>	<i>L</i>	<i>mètre (m)</i>
<i>Section</i>	<i>S</i>	<i>mètre carré (m²)</i>
<i>Réductance</i>	<i>\mathcal{R}</i>	<i>-</i>

Tableau (3.3) : Symboles et unités utilisés en magnétisme.

3.5 RELATION DE BASE

Dans un circuit électrique, la résistance est en général constante, d'où l'utilisation courante de la loi d'ohm. Dans le cas des circuits magnétiques, la perméabilité est constante pour le vide, on peut appliquer la relation : $B = \mu_0 H$. Elle est aussi constante, à toutes fins utiles, pour l'air et les matériaux non ferromagnétiques comme le cuivre, l'aluminium, le laiton, le bois, le plastique, etc. et la plupart des aciers inoxydables. Par contre, pour les matériaux ferromagnétiques qu'on utilise habituellement en raison de leur grande perméabilité, cette perméabilité n'est pas constante, on peut appliquer la relation : $B = \mu \mu_0 H$.

3.6 LOI D'AMPERE

Lorsqu'un courant I traverse un conducteur de longueur l placé dans champ magnétique de densité B faisant un angle θ par rapport à l , on obtient une force de déplacement donnée par la relation :

$$F = B l I \sin \theta$$

Si on exprime B en tesla, l en mètres et I en ampères, alors l'unité de F est le newton. Une façon simple de déterminer la direction de la force par rapport à la direction du flux et du courant est d'utiliser la règle de la main droite, selon laquelle :

- les doigts représentent la direction du flux,

- le pouce représente la direction du courant,
- la paume représente la direction de la force.

3.7 CALCULS DE CIRCUITS MAGNETIQUES

Selon les informations dont on dispose et celles qu'on recherche, on peut rencontrer deux situations qui sont à l'opposé l'une de l'autre : soit qu'on doive définir la source requise pour un flux spécifique en un endroit du circuit ou, à l'inverse, qu'on doive déterminer le flux circulant dans les différentes branches du circuit pour une source définie. Les exemples suivants permettent de visualiser ces deux cas :

Exemple 3.1 : Calcule de la source requise lorsqu'on connaît le flux

Soit un tore de section de $0,002 \text{ m}^2$ formé de trois matériaux ferromagnétiques différents figure (3.?). Le matériau a est un alliage fer-nickel et sa longueur moyenne est de $0,4\text{m}$. Le matériau b est en acier au silicium et sa longueur moyenne est de $0,2 \text{ m}$. Le matériau c est en acier coulé et sa longueur moyenne est de $0,1\text{m}$.

- a) Calculer la force magnétisante requise pour obtenir un flux de $0,001 \text{ Wb}$,
- b) Calculer le courant requis dans un enroulement de 200 tours,
- c) Calculer la perméabilité relative et la réluctance de chacun des trois matériaux pour ce point d'opération.

Solution :

Pour obtenir la force magnétisante totale requise, il s'agit d'appliquer la loi des boucles :

$$F = U_a + U_b + U_c = H_a l_a + H_b l_b + H_c l_c$$

On connaît déjà les valeurs de l_a , de l_b et de l_c .

On peut obtenir les valeurs de H_a , de H_b et de H_c sur les courbes respectives des matériaux à partir des valeurs de B_a , de B_b et de B_c , déterminées à parti des valeurs du flux et des sections.

Puisque le flux et la section sont les mêmes pour les trois parties, on obtient :

$$B_a = B_b = B_c = \frac{0,001}{0,002} = 0,5T$$

Sur la courbe de l'alliage fer-nickel, pour $B = 0,5T$, on trouve que $H_a = 7,5 \text{ At/m}$.

De même, on obtient :

$$H_b = 72 \text{ At/m}$$

$$H_c = 330 \text{ At/m}$$

On peut maintenant résoudre l'équation :

$$\begin{aligned} F &= H_a l_a + H_b l_b + H_c l_c \\ &= 7,5 \cdot 0,4 + 72 \cdot 0,2 + 330 \cdot 0,1 \\ &= 3,0 + 14,4 + 33,0 = 50,4 \text{ At.} \end{aligned}$$

On peut résumer dans un tableau la séquence des opérations précédentes. On y inscrit d'abord les valeurs connues, puis les valeurs recherchées et obtenues à partir des précédentes.

Branche	Matériau	φ	A	B	H	L	HI
a	Fe-Ni	0,001	0,002	0,5	7,5	0,4	3,0
b	Acier-Si	0,001	0,002	0,5	72	0,2	14,4
c	Acier coulé	0,001	0,002	0,5	330	0,1	33,0

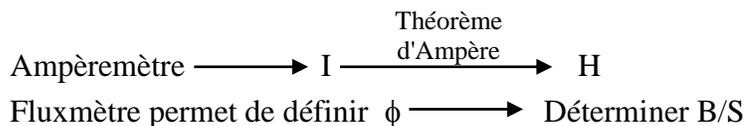
Il est intéressant de noter que pour un même flux, une même section et un ^{$F = 50,4 \text{ At}$} longueur quatre fois plus courte, il faut près de dix fois plus d'ampères-tours pour l'acier coulé que pour l'alliage fer-nickel.

Le courant requis pour produire ces ampères-tours dans un enroulement de 200 tours est:

Courbe d'aimantation des matériaux

En fonction de $\vec{H} \rightarrow \vec{B}$ $B = f(H)$

Considérons un matériau neutre exemple (tore) et plaçant un bobinage tout autour.



- Principe du tracé

L'échantillon est une couronne cylindrique ferromagnétique sur laquelle sont enroulées N spires traversées par un courant I. Si l est la longueur de la ligne du champ moyen, nous pouvons

calculer l'excitation magnétique H et la champ B_0 qui serait obtenu en l'absence de noyau ferromagnétique.

$$H = \frac{NI}{l} \quad \text{et} \quad B_0 = \frac{\mu_0 NI}{l}$$

Le module B , du champ obtenu à l'intérieur du noyau, sera mesuré

- Tableau des valeurs

Pour un acier doux nous avons calculé H et mesuré B . Dans le tableau suivant on trouve aussi $B_0 = \mu_0 H$ qui serait obtenu dans l'air et qui permet une comparaison directe avec B . Pour la quatrième colonne $\mu = \frac{B}{B_0}$, voir le paragraphe suivant:

Considérons la 5^{ème} ligne du tableau.

$$H=1600\text{A/m} \quad \text{et} \quad B=1.4\text{T} = 1400\text{mT}$$

$$\text{Cela donne: } B_0 = \mu_0 H = 4 \pi 10^{-7} \cdot 1600 \cong 0.002\text{T} = 2\text{mT}$$

$$\text{Et donc: } \mu_r = 1400/2 = 700$$

- courbe

Nous avons tracé la courbe d'aimantation $B(H)$ entre 0 et 500 A/m, la courbe est une droite passant par l'origine des axes: le champ est proportionnel à l'excitation, Ensuite le champ croît de moins en moins vite, on dit que la substance se sature: il y a saturation

En générale: la variation de \vec{H} et \vec{B} est complexe, cette courbe est divisé en 3 zone

- de 0 à a : branche très peu exploitable (faible valeur de H)
- de a à b : zone linéaire $\Rightarrow \mu = \text{cte}$ (zone non saturé)
- de b à c : zone non linéaire (zone saturé) c'est-à-dire que les moments magnétiques du matériau sont orientés dans le même sens que le champ

Tôles électriques

Les tôles utilisées dans les machines électriques doivent avoir une grande perméabilité. Cette dernière est obtenue par du fer additionné avec de silicium, éventuellement, un orientation des gains de matière, on obtient 1T pour 150 A/m ($\mu_r > 5000$) pour des tôles d'usage courant.

Force magnétomotrice

a- Problème posé: les problèmes du calcul des circuits magnétiques se présentent toujours ainsi: un circuit magnétique étant donné (dimensions et substances), calculer le nombre NI d'Ampères (ou ampères-tours) qu'il faut placer sur le circuit pour obtenir un champ (ou un flux) déterminé au voisinage de l'utilisation (l'entrefer) le plus souvent. Ce nombre d'Ampères est appelé force magnétomotrice

$$F = N I$$

b- Détermination pour un circuit homogène: Le module du champ souhaité étant donné, repérer l'excitation correspondante sur la courbe d'aimantation B(H) fournie par le fabricant du circuit magnétique (ou des tôles employées)

Avec cette excitation lue, qui est aussi $H = \frac{NI}{l}$, trouver la force magnétomotrice

$F = NI = Hl$; les opérations sont donc:

$$B \xrightarrow{\text{Courbe}} H \text{ puis } F = Hl$$

Exemple numérique : Déterminé la force magnétomotrice qui permet d'obtenir un champ magnétique de 1.4 T dans un anneau de fer doux (voir courbe, précédente (B=f(H)) de 1.25m de longueur.

Sur la courbe, pour B=1.4T, nous lisons H= 1600 A/m donc :

$$F = Hl = 1600 * 1.25 = 2000A.$$

Application immédiate pour l'anneau de l'exemple numérique qui précède, déterminer F pour avoir B= 1.54 T (soit 10% de plus). De quel pourcentage F a-t-elle augmenté ? Combien de spires doit-on installer sur la bobine magnétisante si l'intensité du courant est imposée : I= 2A ?

Circuits magnétiques

On appelle circuit magnétique au sens large tout système capable de produire un champ magnétique dont les conséquences seraient des forces magnétiques, des couples magnétiques et surtout des flux magnétiques (dont la variation se transformerait en une force électromotrice induite)

Pour produire un champ magnétique, il est nécessaire d'avoir une source (courant ou aimant permanent) appelée force magnétomotrice (F.m.m)

$$F.m.m = \int \vec{H} \cdot d\vec{l} \quad \text{où} \quad \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I$$

Pour engendrer un flux à travers ces lignes de forces, il est nécessaire d'y placer un corps de grande perméabilité et de section appropriée.

$$\phi = \iint_s \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (\text{flux magnétique})$$

Le rapport entre la force magnétomotrice (f.m.m) et le flux magnétique définit la réluctance:

$$\mathfrak{R} = \frac{F.m.m}{\phi}$$

Et qui exprime la capacité du flux magnétique à traverser une section du circuit magnétique. Pour un corps magnétique de longueur L et de section S. La réluctance est exprimée par une relation similaire à celle de la résistance électrique et se comporte comme telle lorsqu'elle est associée en série ou en parallèle avec d'autres réluctances; à savoir

$$R = \frac{l}{\sigma_c S} (\Omega) \quad \text{où } \sigma_c \text{ est la conductivité du corps}$$

et $\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu S} (A.t/Wb)$ où μ est la perméabilité du corps.

$$Hl = NI \quad B = \mu H \rightarrow \frac{Bl}{\mu} = NI$$

$$\phi = B.S \rightarrow \frac{\phi l}{\mu S} = NI$$

$$\text{or } \left(\mathfrak{R} = \frac{F.m.m}{\phi} = \frac{NI}{\phi} \right) \Rightarrow \mathfrak{R} = \frac{l}{\mu S} = \frac{\text{longueur parcouru par le flux}}{\text{perméabilité du corps} \cdot \text{Section traversé par le flux}}$$