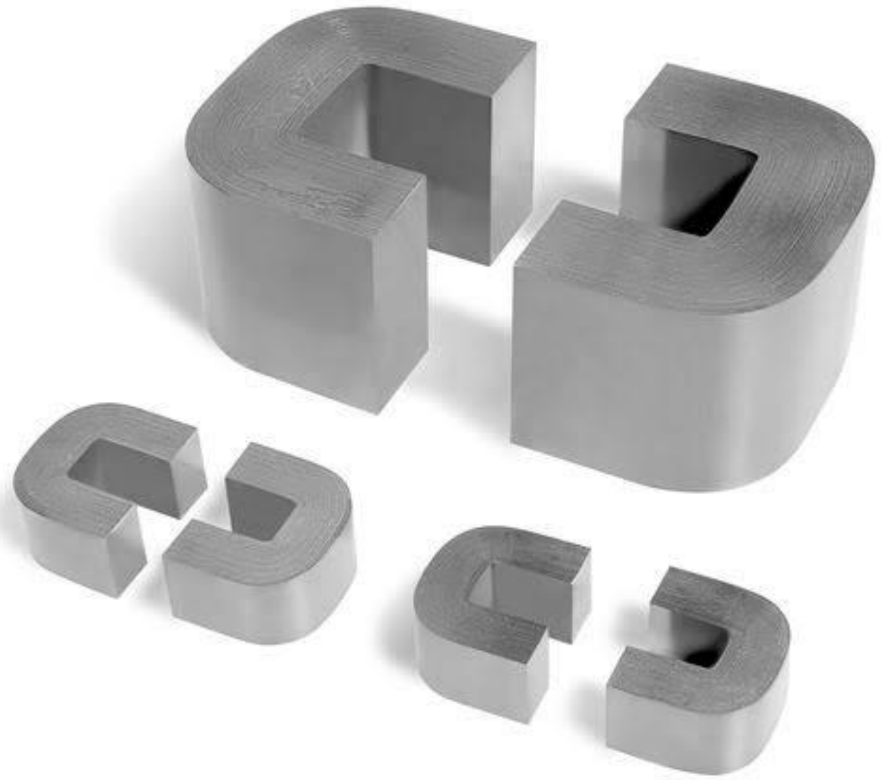
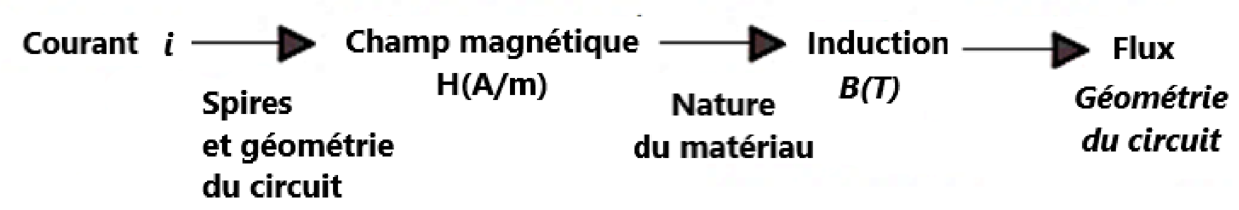
Chapitre IV

Les Circuits Magnétiques



IV. 1 Introduction

Les inductances, transformateurs, alternateurs, machines asynchrones, etc., sont basées sur l'utilisation de *circuits magnétiques*, c'est-à-dire de masses de matériaux dits «magnétiques» propres à canaliser une *induction magnétique*. Plus que de l'induction, on parle souvent du «flux» de cette induction. La *figure ci-dessous* présente un résumé des grandeurs mises en jeu dans les circuits magnétiques linéaires.



IV. 2 Notion sur les grandeurs magnétiques

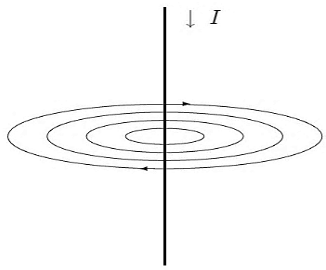
IV.2.1 Lois fondamentales en électromagnétisme

L'ensemble des phénomènes qui interviennent en électrotechnique et dans les machines est basé sur deux lois simples, à savoir :

Loi de Biot et Savard ou le théorème d'Ampère *(circuits magnétiques-transformateurs)*

L'expression de la force de Laplace, ou Lorentz *(machines électriques)*

IV.2.2 Production d'un champ magnétique

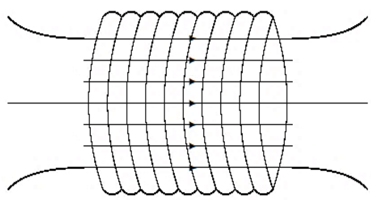


Si on considère un conducteur cylindrique droit dans lequel circule un courant I. ***<u>Ce courant crée un champ magnétique</u>***. L'intensité de ce champ est donnée par la loi d'Ampère :

$\int \boldsymbol{H}\, \boldsymbol{dl} = \boldsymbol{I}$ théorème d'Ampère

Afin de créer un champ uniforme, on utilise une bobine pour concentrer les lignes de champs en un même endroit.

A l'intérieur de la bobine, les champs magnétiques ***<u>s'additionnent</u>*** pour créer un ***<u>champ plus intense</u>*** et plus uniforme.

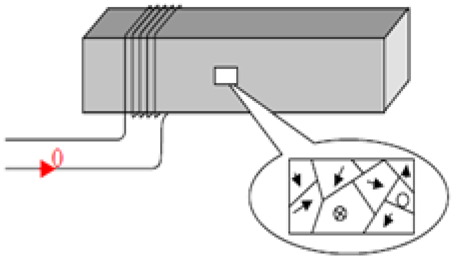


IV.2.3 L'origine du champ magnétique

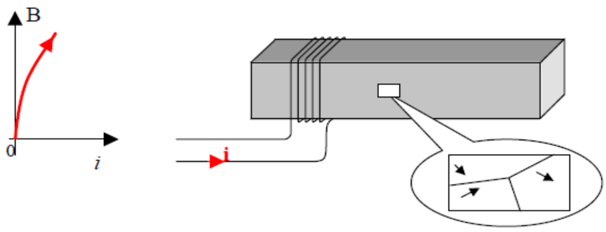
Dans le cas de l'existence d'un matériau sur le chemin du champ magnétique, les propriétés du matériau vont modifier la valeur du champ magnétique. Le champ sera canalisé et sera modifié. Dans ce cas on parle de l'induction magnétique (dans le matériau).

$$B = \mu H$$

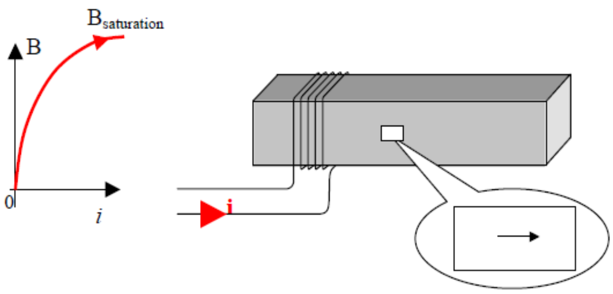
μ : la perméabilité magnétique



Lorsque le matériau n'est pas magnétisé **(H = 0)** les effets des petits domaines (Domaines de Weiss) s'annule entre eux. Il n'en résulte aucune induction **B_0 = 0.**



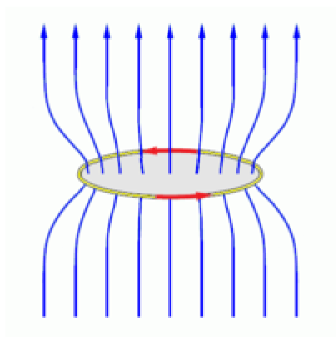
Si **on augmente H = H_1** (on augmente le courant qui circule dans la bobine) on aura une **induction $B_1 \neq 0$**



Si on **augmente d'avantage H = H_2** (H_1 supérieur à H_2), on aura une induction **B_2 supérieur à B_1.**

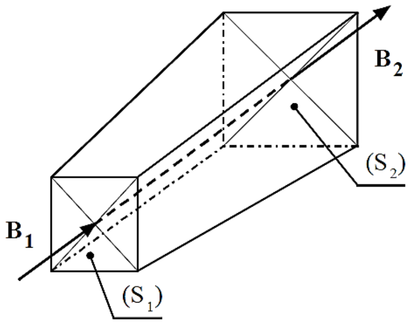
IV.2.4 Le flux magnétique

Le flux magnétique circulant dans une surface S est l'ensemble des lignes de force qui traversent la surface :



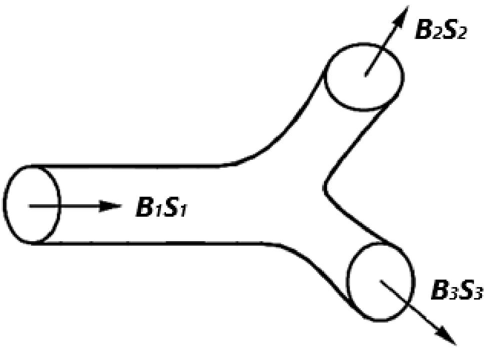
$$\emptyset = \int_S B \,.ds = B\, S$$

Le flux magnétique est conservé au sein d'un tube de champ.



Le même flux qui traverse la surface S_1 traverse la surface S_2

$$\varphi = B_1 S_1 = B_2 S_2$$



Cas de bifurcation ou un nœud (où le flux rencontre deux chemins différents)

$$\emptyset_{Total} = \emptyset_1 + \emptyset_2$$

$$B_1 S_1 = B_2 S_2 + B_3 S_3$$

IV.2.5 Théorème d'Ampère

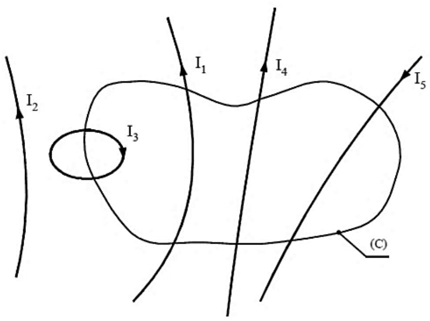
Le théorème d'Ampère permet de déterminer la *valeur du champ magnétique* grâce à la *donnée des courants électriques*. On prend l'exemple d'une bobine dans laquelle circule un courant I. La bobine crée alors une *force magnétomotrice* (fmm) qui *fait circuler un flux magnétique* dans le milieu.

C'est semblable au même phénomène que les circuits électriques : une force électromotrice déplace des électrons qui circulent dans le milieu.

La circulation du vecteur **H** le long d'une courbe fermée (C) quelconque est égale à la *somme algébrique des courants* traversant la surface s'appuyant sur le contour (C).

$$FMM = \oint_C H\, dl = \sum_k \mp I_k$$

- Le courant sera pris positivement s'il est dans le sens de la normale à la surface (règle du tire-bouchon par rapport au sens de parcours du contour C).
- Le courant sera pris négativement s'il est dans le sens contraire de la normale à la surface (règle du tire-bouchon par rapport au sens de parcours du contour C).

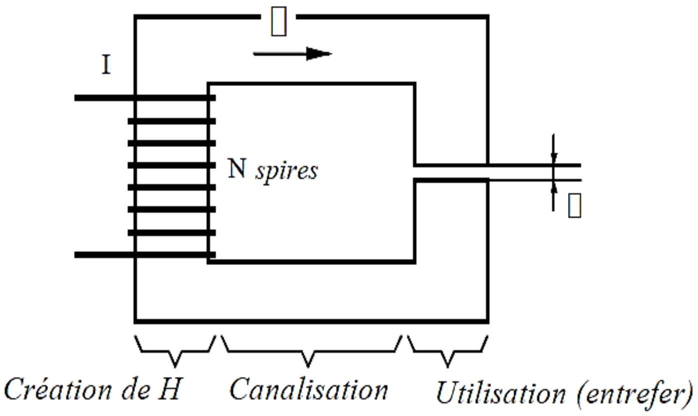


Le courant I_2 n'intervient pas dans le calcul. L'application du théorème d'ampère donne :

$$\oint \boldsymbol{H\,dl} = \boldsymbol{I_1 - I_3 + I_4 - I_5}$$

IV.3 Calcul du circuit magnétique

Ils sont basés sur l'utilisation de *matériaux ferromagnétiques* avec comme but d'obtenir un champ d'induction B dans une *zone précise (entrefer).* Pour ce faire, on crée un champ d'excitation H à l'aide de bobinage puis on le *canalise vers la zone d'utilisation* (entrefer).



On retrouve trois éléments :

1. le *bobinage* qui *génère l'excitation* et donc le champ ;
2. la *culasse* qui *dirige le champ H* vers la zone utile. La culasse impose le parcours du champ magnétique de part sa *grande perméabilité* par rapport à l'air. Le matériau qui compose la « culasse » se comporte comme un tube de champ ;
3. l'entrefer où l'on souhaite utiliser le champ. L'entrefer est la zone d'interaction avec l'extérieur

La mise en équation se base sur les trois lois fondamentales

Conservation du Flux – Théorème d'Ampère – Loi des matériaux

IV.3.1 Cas d'un circuit série homogène

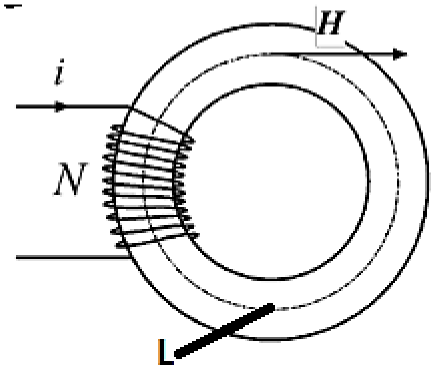
Le circuit est constitué par le *même matériau* en formant un circuit fermé. Dans ce cas le circuit magnétique se confond avec un tube de champ de *longueur L*.

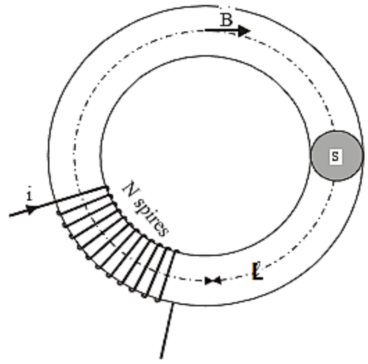
Tout le flux est canalisé par le circuit. De plus, il a un comportement linéaire en tout point

$$B = \mu H \qquad (\mu = \mu_0 \mu_r).$$

μ_0 est la perméabilité du vide. $\mu_0 = 4\,\pi\,10^{-7}$

μ_r est la perméabilité relative du matériau





D'après le théorème d'Ampère $\sum_i^n H_i L_i$ dans notre cas H L = NI

$$B = \frac{\mu_0 \mu_r N I}{L}$$

L : longueur moyenne des lignes de champ [m]

N : nombre de spires de la bobine

I : courant dans la bobine [A]

H : excitation magnétique [A/m]

IV.3.2 Cas d'un circuit série hétérogène (circuit magnétique avec entrefer)

Dans ce cas le circuit magnétique est constitué par le même circuit ci-dessus, sauf que dans ce cas nous avons créé un *vide (entrefer).* Alors nous avons deux matériaux : un *ferromagnétique (μ) et l'air (μ_0)*

$$H(L - \delta) + H_0 \delta = NI$$

L : longueur moyenne des lignes de champ [m]

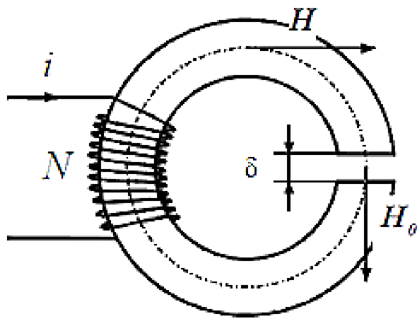
δ : longueur de l'entrefer [m]

N : nombre de spires de la bobine

I : courant dans la bobine [A]

H : excitation magnétique dans la matière [A/m]

H_0 : excitation magnétique dans l'entrefer [A/m]

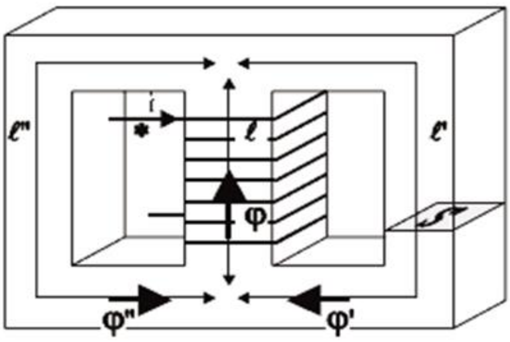


IV.3.3 Circuit parallèle (circuit magnétique avec des bifurcations)

Ce circuit magnétique est constitué de trois morceaux de longueur $l, l' et\ l''$ de section $S, S' et\ S''$ de perméabilité $\mu, \mu' et\ \mu''$ et traversés par des flux $\emptyset, \emptyset' et\ \emptyset''$.

Nous pouvons appliquer le théorème d'ampère sur trois circuits fermés différents en utilisant les fibres moyennes de longueur $l\ et\ l', ou\ l' et\ l''$ ou encore$l' et\ l''$. On en déduit :

$$Ni = H\,l + H'\,l', \qquad Ni = H\,l + H''\,l'' \quad 0 = H'\,l' - H''\,l''$$



En appliquant les relations $H = \frac{B}{\mu} = \frac{\varphi}{\mu\, S}$ sur chacun des trois morceaux du circuit magnétique, les équations précédentes deviennent :

$$N\,i = \frac{\emptyset.\,l}{\mu\,S} + \frac{\emptyset'.\,l'}{\mu'\,S'} \;,N\,i = \frac{\emptyset.\,l}{\mu\,S} + \frac{\emptyset''.\,l''}{\mu''\,S''} \quad ,0 = \frac{\emptyset'.\,l'}{\mu'\,S'} - \frac{\emptyset''.\,l''}{\mu''\,S''}$$

Ces trois équations sont dépendantes, c'est-à-dire qu'on peut déduire l'une des trois à partir des deux autres. Donc, si on souhaite faire un calcul sur ce circuit magnétique, seulement deux de ces trois équations pourront être retenues car la troisième n'apporte aucune information supplémentaire.

Le problème se ramène à la résolution d'un système de trois équations à trois inconnues :

$$N\,i = \frac{\emptyset.\,l}{\mu\,S} + \frac{\emptyset'.\,l'}{\mu'\,S'} \;,N\,i = \frac{\emptyset.\,l}{\mu\,S} + \frac{\emptyset''.\,l''}{\mu''\,S''} \quad et\ \emptyset = \emptyset' + \emptyset''$$

Si on appelle $\Re$ la réluctance $\frac{l}{\mu\,S}$, $\Re'$ la réluctance $\frac{l'}{\mu'\,S'}$ et $\Re''$ la réluctance $\frac{l''}{\mu''\,S''}$, ces équations deviennent :

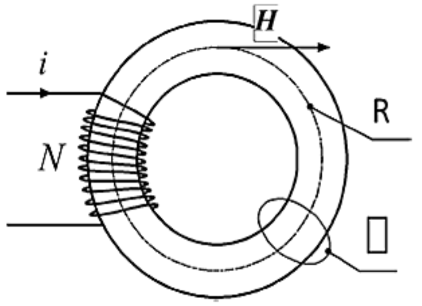
$$N\,i = \Re\,\emptyset + \Re'\emptyset' \;,N\,i = \Re\,\emptyset + \Re''\emptyset'' \;\; et\;\; \emptyset = \emptyset' + \emptyset''$$

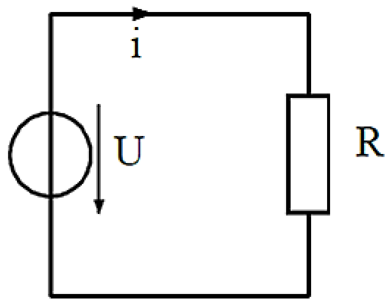
IV.4 Inductance d'une bobine

On considère une bobine de N tours dans laquelle circule un courant I. La bobine se trouve dans un milieu magnétiquement linéaire (comme l'air). Le flux magnétique produit par la bobine est $\emptyset$. Le flux magnétique total couplé à la bobine est $\wedge = N\emptyset$ L'inductance de la bobine est définie par :$L = \frac{\Lambda}{I} = \frac{N\emptyset}{I} = \frac{N^2}{\Re}$

IV.5 Analogie magnétique – Electrique

A tout circuit magnétique, on peut affecter une représentation électrique permettant d'étudier le comportement du circuit à l'aide de relations électriques.

<table>
<tr><td rowspan="4">

$F_{MM} = Ni = \Re\phi$</td><td>$F_{MM} \leftrightarrow U$</td><td rowspan="4">

$U = Ri$</td></tr>
<tr><td>$\Re \leftrightarrow R$</td></tr>
<tr><td>$\phi \leftrightarrow i$</td></tr>
<tr><td>$F_{MM} = \Re\phi \leftrightarrow U = Ri$</td></tr>
</table>

Grandeurs magnétiques		***Grandeurs électriques***	
Force magnétomotrice	$F_{MM} = NI$	*Force électromotrice*	$F_{EM} = U(V)$
Flux magnétique	$\phi(Wb)$	*Courant électrique*	$I(A)$
Réluctance	$\Re = \frac{1}{\mu_0\mu_r}\frac{L}{S}$	*Résistance*	$R = \rho\frac{L}{S}$
ddp magnétique	$F_{MM} = \Re\,\phi$	*ddp électrique*	$U = R\,I$
Maille magnétique	$\sum_{Maille} F_{MM}$	*Maille électrique*	$\sum_{Maille} U$
Nœud magnétique	$\sum_{Noeud} \phi$	*Nœud électrique*	$\sum_{Noeud} I$