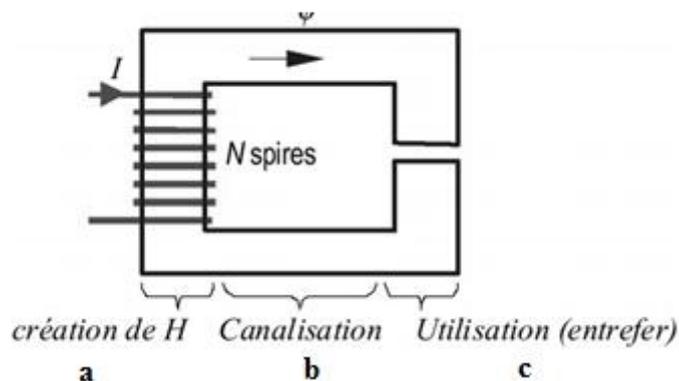


## **CIRCUIT MAGNETIQUE**

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).

### **I.1 Constitution**

On peut résumer un circuit magnétique à cette géométrie figure I.1 :



**Figure I.1** Constitution un circuit magnétique

On retrouve trois éléments :

**a-** Le bobinage :

Il génère l'excitation et donc le champ

**b-** la culasse :

Elle 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.

**c-** l'entrefer :

Où l'on souhaite utiliser le champ. L'entrefer est la zone d'interaction avec l'extérieur.

### **I.2 Mise en équation : cas parfait**

## Circuit Magnétique

La mise en équation se base sur les trois lois fondamentales que nous avons établies :  
Conservation du Flux – Théorème d'Ampère – Loi des matériaux

Dans le cas parfait, le circuit magnétique se confond avec un tube de champ. Tout le flux est canalisé par le circuit.

De plus, il a un comportement linéaire en tout point :

$$B = \mu H \quad (\mu = \mu_0 \mu_r). \quad (I.2)$$

Il en est de même dans l'entrefer :

$$B = \mu_0 H. \quad (I.3)$$

### I.2.1 . Exemple N°1 : Cas d'un circuit magnétique sans entrefer

D'après le théorème d'Ampère :

$$HL = NI \quad (I.4)$$

N : nombre de spires de la bobine

I : courant dans la bobine (A)

H : excitation magnétique (A/m)

L : longueur moyenne des lignes de champ (m)

$$(L = 2\pi R)$$

La valeur du champ magnétique est donc :

$$B = \frac{\mu_0 \mu_r}{L} NI$$

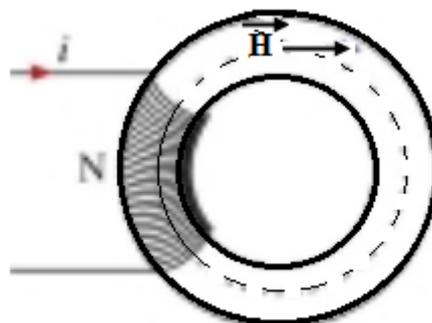


Figure I.2 Cas d'un circuit magnétique sans entrefer

### I.2.2 Exemple N°2 : Circuit magnétique avec entrefer

## Circuit Magnétique

D'après le théorème d'Ampère:

$$H(L - e) + H_0 e = NI \quad (I.5)$$

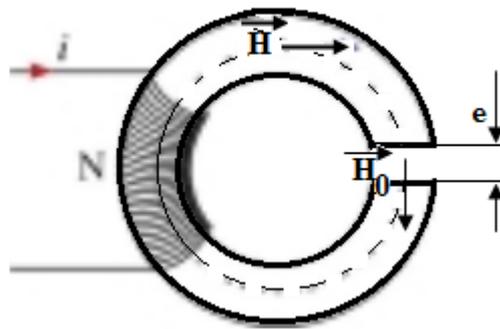
L : longueur moyenne des lignes de champ (m)

e : longueur de l'entrefer (m)

N : nombre de spires de la bobine

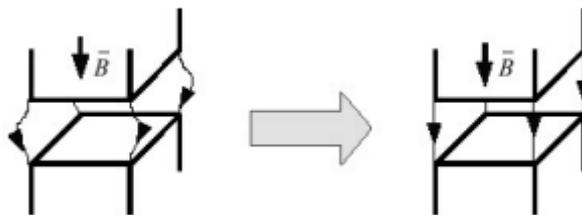
I : courant dans la bobine (A)

H : excitation magnétique dans la matière (A/m)  $H_0$  : excitation magnétique dans l'entrefer (A/m)



**Figure I.3** Cas d'un circuit magnétique avec entrefer

En considérant le circuit magnétique parfait, on peut considérer que les lignes de champ restent dans l'alignement du matériau magnétique :



**Figure I.4** Des lignes de champ réelles à leur simplification

## Circuit Magnétique

De plus, si  $e \ll L$ , les lignes de champs traversent l'entrefer sans trop de perte.

$$\text{Loi de conservation du flux} \Rightarrow B_{\text{mat}} = B_{\text{air}} \quad \Rightarrow \quad \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H = \mu_0 \cdot H_0 \Rightarrow \mu_r \cdot H = H_0$$

$\mu_r \approx 1000$  pour du fer.  $H_0$  est 1000 fois plus important que  $H$  !!!

Donc si l'on a besoin d'une excitation donnée dans l'entrefer, on peut calculer le courant qui sera nécessaire. Celui-ci sera d'autant plus faible que  $\mu_r$  sera grand.

On en déduit la valeur du champ magnétique dans l'entrefer :

$$B = \frac{\mu_0}{\frac{L-e}{\mu_r} + e} NI \quad (I.6)$$

### I.3 Réductance Loi d'Hopkinson

#### I.3.1 Force magnétomotrice

De manière à simplifier l'étude des circuits magnétiques on définit  $\xi$ , la force magnétomotrice, à partir du théorème d'Ampère :

$$\xi = NI = \int_C \vec{H} d\vec{l} \quad (I.7)$$

Le sens de cette force magnétomotrice est donné par la méthode du tire-bouchon en rapport avec le sens de parcours de  $C$ .

#### I.3.2 Réductance

De même, en tenant compte de la loi constitutive du matériau, on peut établir en tout point  $M$  du parcours  $C$  :

$$\vec{H}_M = \frac{\vec{B}_M}{\mu_M}$$

On peut alors exprimer le théorème d'Ampère sous la forme :

$$NI = \int_C \frac{\vec{B}_M}{\mu_M} d\vec{l} = \int_C \frac{B_M}{\mu_M} dl = \int_C \frac{\phi dl}{\mu_M S_M} \text{ soit } NI = \phi \int_C \frac{dl}{\mu_M S_M}$$

On définit la réductance  $\mathfrak{R}$  :

## *Circuit Magnétique*

$$\int_C \frac{dl}{\mu_M S_M}$$

Ainsi, un barreau de longueur  $L$ , de section  $S$  et perméabilité  $\mu$  aura une réluctance  $\mathfrak{R}$

$$\mathfrak{R} = \frac{L}{\mu S} \quad (\text{I.8})$$

La réluctance dépend de la géométrie du circuit magnétique. Elle peut varier avec l'intensité du champ par l'intermédiaire de  $\mu_r$ .

### ***1.3.3 Loi d'Hopkinson***

En combinant la force magnétomotrice à la réluctance, on obtient alors la relation d'Hopkinson :

$$\xi = NI = \mathfrak{R} \phi \quad (\text{I.9})$$

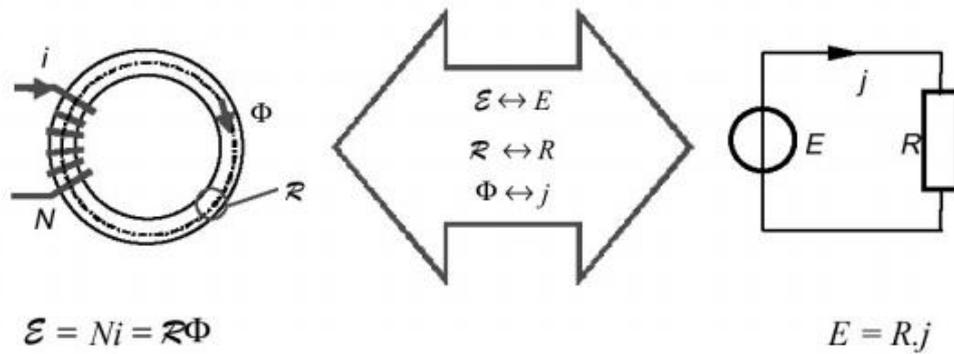
La réluctance  $\mathfrak{R}$  ne dépend que des caractéristiques géométriques du circuit. La force magnétomotrice  $\xi$  représente l'excitation qui va générer le flux au sein du circuit mais est indépendante de sa géométrie. On est donc typiquement dans le cas analogue du générateur de tension que l'on connecte à une résistance ce qui va engendrer un courant  $I$ .

$$U = RI \Leftrightarrow \xi = \mathfrak{R}\Phi$$

### ***1.4 Analogie magnétique – Electrique***

L'observation des relations d'Hopkinson permet d'effectuer une analogie avec les circuits électriques linéaires :

### Circuit Magnétique



$$U = RI \Leftrightarrow \xi = \mathfrak{R}\Phi \quad (\text{I.10})$$

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

Le tableau ci-dessous résume l'analogie Magnétique/Électrique :

Grandeurs magnétiques	Grandeurs électriques
force magnétomotrice : $\xi = NI$ A/m	force électromotrice : E en Volts (V)
flux d'induction : $\Phi$ en Webers (Wb)	Courant électrique : i en Ampères (A)
Réductance $\mathfrak{R} = \frac{L}{\mu_0 \mu_r S}$	Résistance : $R = \rho \frac{l}{S}$
dd p magnétique : $v = \mathfrak{R}\phi$	ddp électrique : $U = RI$
maille magnétique : $\sum v_{maille}$	Maille électrique : $\sum U_{maille}=0$
nœud magnétique : $\sum \phi_{nœud}$	nœud électrique : $\sum I_{nœud}=0$

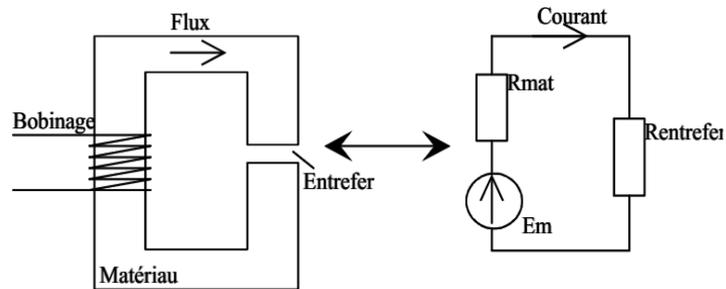
Remarque :

## Circuit Magnétique

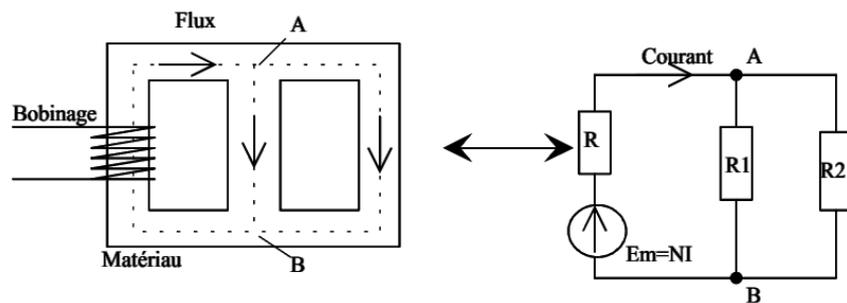
Plus la réluctance  $\mathfrak{R}$  d'un circuit est faible ( $\mu_r$  grand), plus il « attirera » le flux. Un circuit à forte perméabilité canalisera le flux et se comportera comme un tube de champ.

### I.5 Exemple d'application de l'analogie par schéma équivalent

#### I.5.1 Circuit avec entrefer



#### I.5.2 Circuit avec deux tronçons



### I.6 Calcul de l'inductance propre d'un circuit

L'inductance d'un circuit est définie par le rapport entre le flux total vu par le bobinage (composé de  $N$  spires) divisé par le courant d'excitation :

$$L = \frac{\Phi_T}{I} = \frac{N \Phi}{I} \quad \text{Avec } \Phi = \frac{NI}{\mathfrak{R}}$$

$$L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}} \quad (\text{I.11})$$

## Circuit Magnétique

Tout comme la réluctance, une inductance peut varier avec l'intensité du champ donc du courant.

### I.7 Exemple d'application numérique

Une tore de section circulaire (Figure I.2) : Rayon intérieur :  $r_i=10$  cm Rayon extérieur :  $r_e=15$  cm Nombre de spires : 500,  $I= 0.5$ A,  $\mu_r=2000=$  Cste

Calculez  $L$ ,  $\Phi$ ,  $L$ ,  $B$  et l'énergie stockée dans  $L$  ?

$$\text{Section du tore : } S = \pi r^2 \text{ avec } r = \frac{r_e - r_i}{2} = 2.5 \text{ cm} \Rightarrow s = 1.9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\text{Rayon moyen : } r_m = \frac{r_e + r_i}{2} = 12.5 \text{ cm} \Rightarrow \text{longueur moyenne du tore } L = 2\pi r_m = 0.785 \text{ m}$$

$$\text{Réluctance du circuit : } \mathcal{R} = \frac{L}{\mu_0 \mu_r S} = 1.59 \cdot 10^5 \text{ A/Wb}$$

$$\text{Flux : } \phi = \frac{NI}{\mathcal{R}} = 1.57 \text{ mWb}$$

$$\text{Inductance : } L = \frac{N^2}{\mathcal{R}} = 1.57 \text{ H}$$

$$\text{Champ moyen : } B = \frac{\phi}{S} = 0.8 \text{ T}$$

$$\text{Energie : } W = \frac{1}{2} LI^2 = 0.19 \text{ J}$$