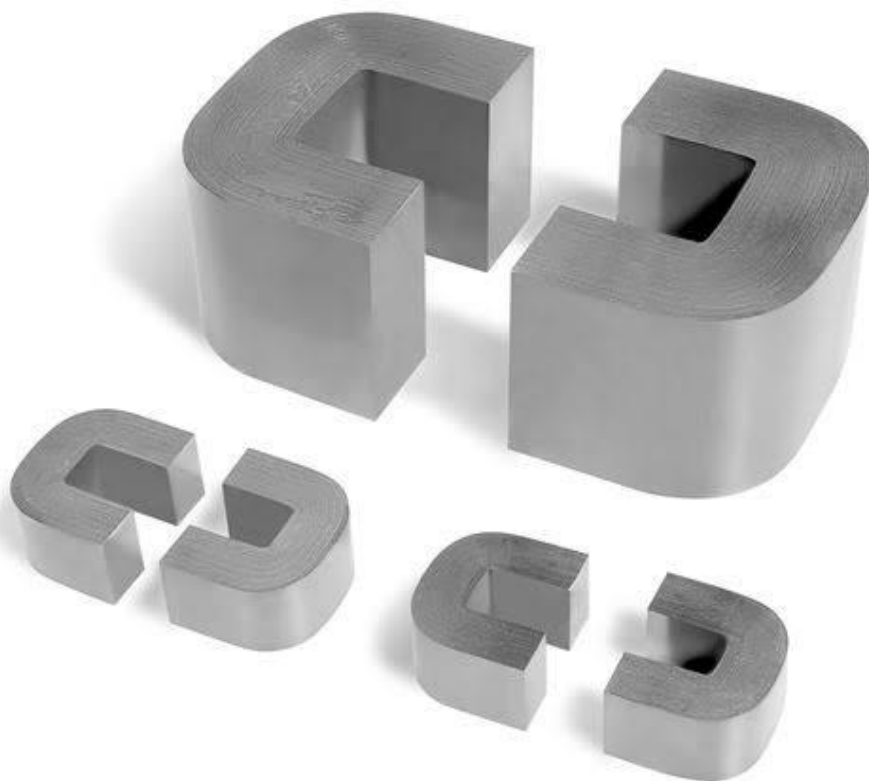


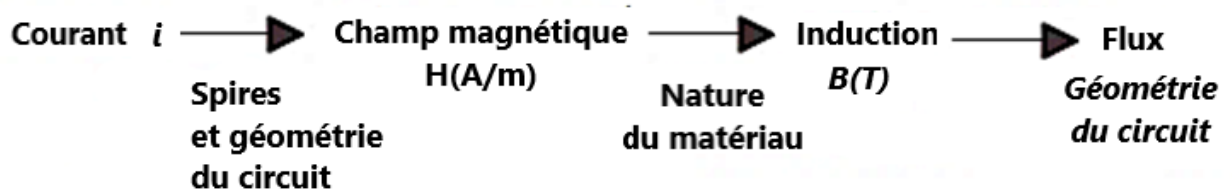
*Chapitre IV*

*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 :

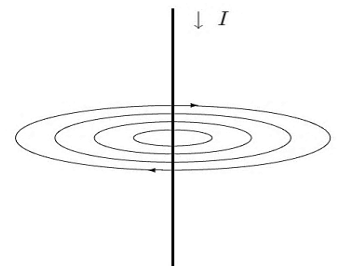
*Loi de Biot et Savard ou le théorème d'Ampère (circuits magnétiques-transformateurs)*

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

### IV.2.2 Production d'un champ magnétique

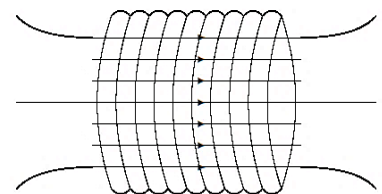
Si on considère un conducteur cylindrique droit dans lequel circule un courant  $I$ . *Ce courant crée un champ magnétique.* L'intensité de ce champ est donnée par la loi d'Ampère :

$$\int \mathbf{H} \, d\mathbf{l} = I \quad \text{théorème d'Ampère}$$



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 *s'additionnent* pour créer un *champ plus intense* et plus uniforme.

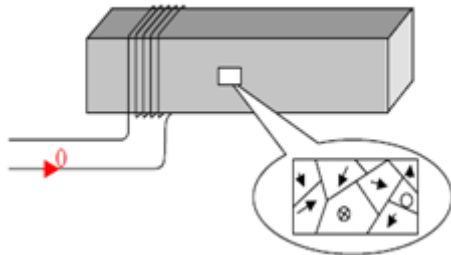


### IV.2.3 L'origine du champ magnétique

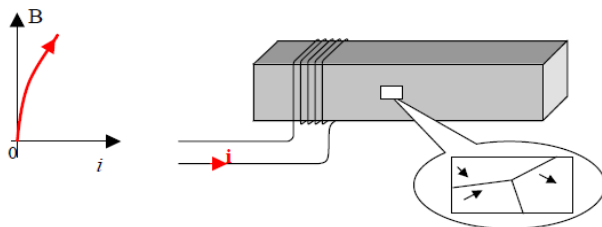
Dans le cas de l'existence d'un matériau sur le chemin du champ magnétique, les propriétés du matériau vont modifier la valeur du champ magnétique. Le champ sera canalisé et sera modifié. Dans ce cas on parle de l'induction magnétique (dans le matériau).

$$B = \mu H$$

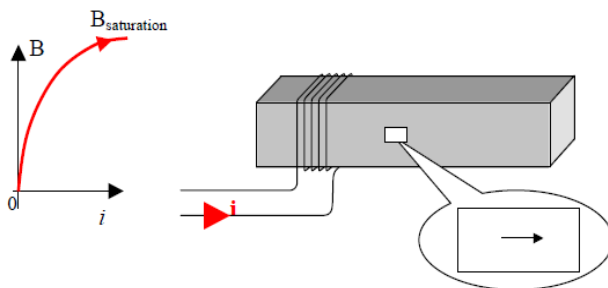
$\mu$  : la perméabilité magnétique



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  $B_1 \neq 0$

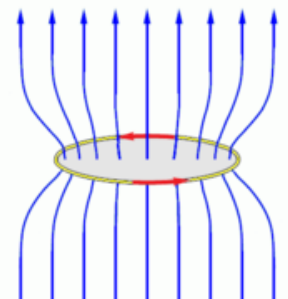


Si on augmente d'avantage  $H = H_2$  ( $H_1$  supérieur à  $H_2$ ), on aura une induction  $B_2$  supérieur à  $B_1$ .

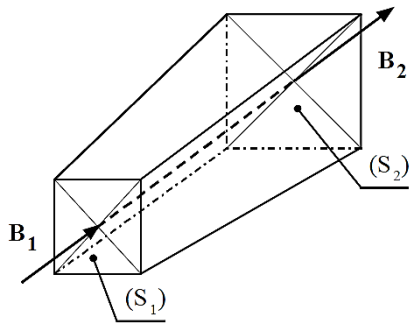
### IV.2.4 Le flux magnétique

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

$$\Phi = \int_S B \cdot ds = B S$$

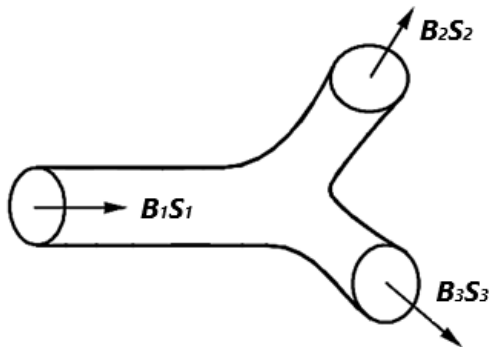


Le flux magnétique est conservé au sein d'un tube de champ.



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

$$\phi = B_1 S_1 = B_2 S_2$$



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

$$\phi_{Total} = \phi_1 + \phi_2$$

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

#### IV.2.5 Théorème d'Ampère

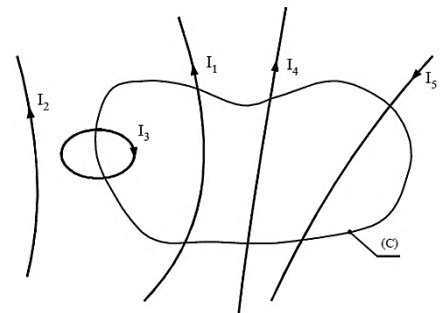
Le théorème d'Ampère permet de déterminer la *valeur du champ magnétique* grâce à la *donnée des courants électriques*. On prend l'exemple d'une bobine dans laquelle circule un courant  $I$ . La bobine crée alors une *force magnétomotrice* (fmm) qui *fait circuler un flux magnétique* dans le milieu.

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  $\mathbf{H}$  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  $C$ ).

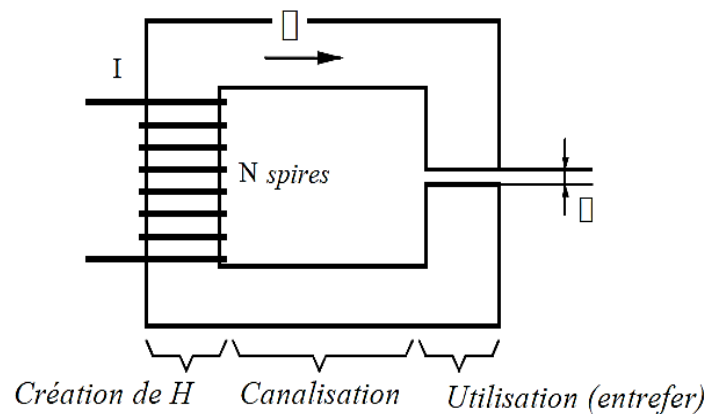


Le courant  $I_2$  n'intervient pas dans le calcul. L'application du théorème d'Ampère donne :

$$\oint \mathbf{H} \, d\mathbf{l} = I_1 - I_3 + I_4 - I_5$$

### 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

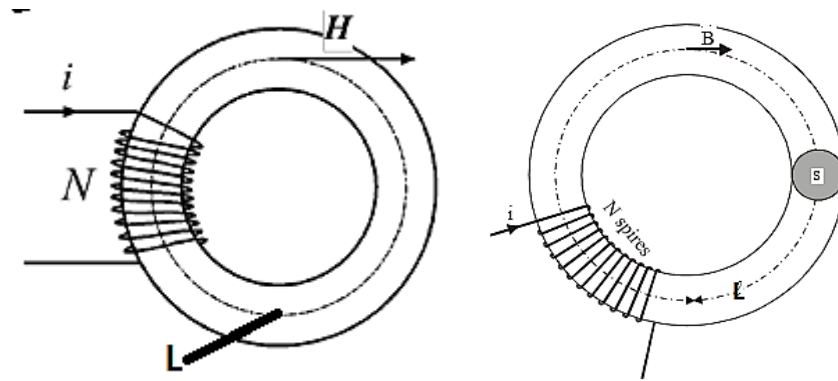
Le circuit est constitué par le *même matériau* en formant un circuit fermé. Dans ce cas le circuit magnétique se confond avec un tube de champ de *longueur L*.

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

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (\mu = \mu_0 \mu_r).$$

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

$\mu_r$  est la perméabilité relative du matériau



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

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

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* ( $\mu$ ) et *l'air* ( $\mu_0$ )

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

L : longueur moyenne des lignes de champ [m]

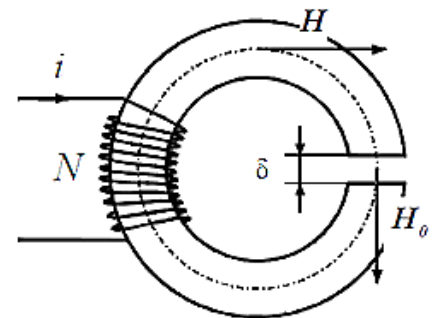
$\delta$  : longueur de l'entrefer [m]

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]

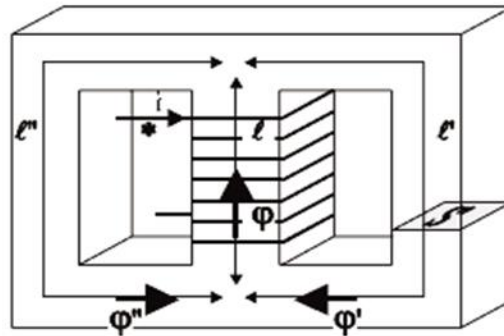


#### IV.3.3 Circuit parallèle (circuit magnétique avec des bifurcations)

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  $\Phi, \Phi'$  et  $\Phi''$ .

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 :

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



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

$$Ni = \frac{\phi \cdot l}{\mu S} + \frac{\phi' \cdot l'}{\mu' S'}, \quad Ni = \frac{\phi \cdot l}{\mu S} + \frac{\phi'' \cdot l''}{\mu'' S''}, \quad 0 = \frac{\phi' \cdot l'}{\mu' S'} - \frac{\phi'' \cdot l''}{\mu'' S''}$$

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 :

$$Ni = \frac{\phi \cdot l}{\mu S} + \frac{\phi' \cdot l'}{\mu' S'}, \quad Ni = \frac{\phi \cdot l}{\mu S} + \frac{\phi'' \cdot l''}{\mu'' S''} \quad \text{et} \quad \phi = \phi' + \phi''$$

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

$$Ni = \mathfrak{R} \phi + \mathfrak{R}' \phi', \quad Ni = \mathfrak{R} \phi + \mathfrak{R}'' \phi'' \quad \text{et} \quad \phi = \phi' + \phi''$$

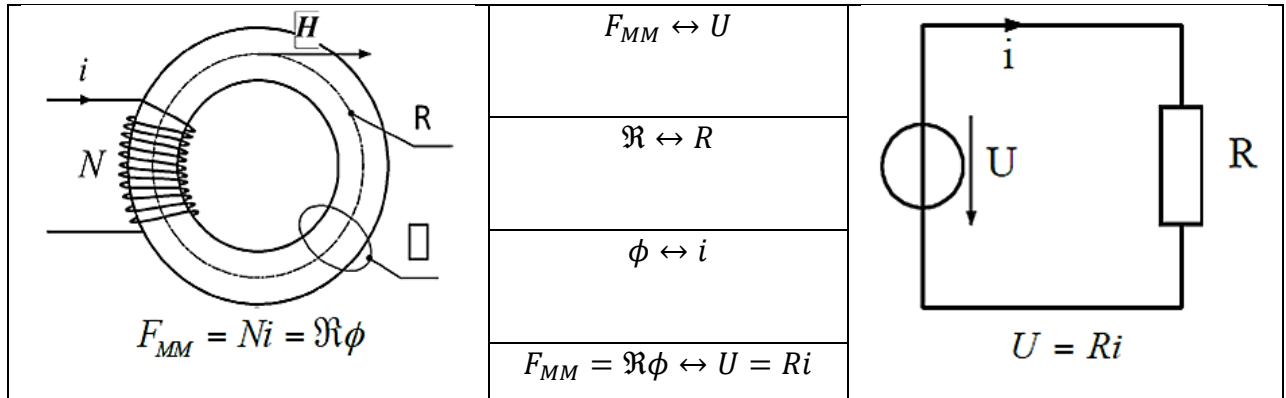
#### IV.4 Inductance d'une bobine

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  $\phi$ . Le flux magnétique total couplé à la bobine est  $\Lambda = N\phi$ . L'inductance de la bobine est définie

$$\text{par : } L = \frac{\Lambda}{I} = \frac{N\phi}{I} = \frac{N^2}{\mathfrak{R}}$$

### 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.



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



**Exercices sur le quatrième chapitre****Exercice 01**

Quel est le flux traversant une surface  $S = 20 \text{ dm}^2$  placée dans un champ d'induction uniforme  $B = 0.4$  Tesla.

1. Lorsque la surface est normale aux lignes d'induction.
2. Lorsque la normale à la surface fait un angle de  $60^\circ$  avec la direction de l'induction.

**Rép. 01**

$S = 20 \text{ dm}^2$ ,  $B = 0.4$  Tesla.

- $\Phi = B S = 0.4 \cdot 20 \cdot 10^{-2} \quad \Phi = 8 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}$ .
- $\Phi = B S \cos\theta = 0.4 \cdot 20 \cdot 10^{-2} \cos 60 \quad \Phi = 4 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}$

**Exercice 02**

Soit un tore magnétique (circuit fermé) de longueur  $L = 1 \text{ m}$  et de diamètre  $D = 5 \text{ cm}$ . La bobine excitatrice est parcourue par un courant  $I = 10 \text{ A}$ . Si le noyau du tore est en bois le flux est :  $\Phi_0 = 2.512 \cdot 10^{-6} \text{ Wb}$ . Si le noyau est en fer au silicium le flux atteint :  $\Phi_r = 2.74 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$ .

- Déterminer le nombre des spires de la bobine.
- Quelle est la perméabilité absolue du fer au silicium.

**Rép. 02**

- Cas du bois  $\Phi_0 = 2.512 \cdot 10^{-6} \text{ Wb}$  ,  $N = ?$

$$\Phi_0 = B_0 S \quad \text{alors } B_0 = \frac{\Phi_0}{S}$$

$$S = 1.96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2, B_0 = 1.27 \cdot 10^{-3} \text{ T}, H_0 = 1.01 \cdot 10^3 \frac{\text{Atr}}{\text{m}}, N = 102 \text{ spires}$$

- Cas du fer au silicium :  $B_1 = 1.4 \text{ T}$ ,  $\mu = 1.37 \cdot 10^{-3}$

**Exercice 03**

Soit un anneau en bois de longueur moyenne  $1.25 \text{ m}$ , pour obtenir  $B_0 = 1.4 \text{ T}$  ; la bobine doit fournir une force magnétomotrice de quelle valeur.

- Quel est le nombre de spires  $N$  ; si le courant  $I = 10 \text{ A}$ .
- Si on remplace l'anneau par une autre en fer doux, pour le même courant ; calculer le nombre de spires pour obtenir la même induction.
- Calculer la perméabilité relative.

De la courbe  $B(H)$  du fer au silicium on note pour  $B = 1.4 \text{ T}$ ,  $H = 1600 \text{ A.tr/m}$ .

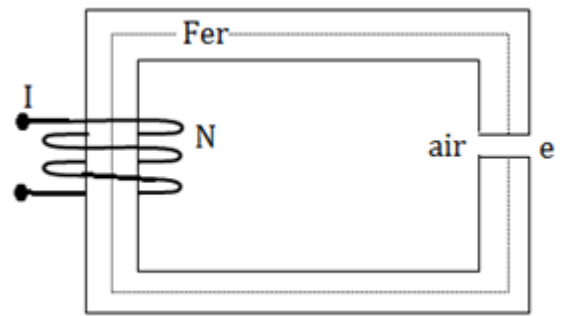
**Rép. 03**

- Cas d'un anneau en bois  $N = 14 \cdot 10^{-14} \text{ spires}$
- Cas d'un anneau en fer au silicium  $N = 200 \text{ spires}$
- La perméabilité du fer  $\mu_r = 696.3$

**Exercice 04**

Le circuit magnétique représenté dans la figure est constitué de fer. On donne  $S = 9 \text{ cm}^2$ ,  $l = 30 \text{ Cm}$ ,  $e = 0.5 \text{ mm}$ ;  $\mu_r = 7 \cdot 10^4$

1. Calculer la FMM pour que l'induction  $B$  soit de 1 Tesla.
2. Déterminer les ré reluctances du fer ainsi que l'inductance  $L$  lorsque  $N = 400$  spires.



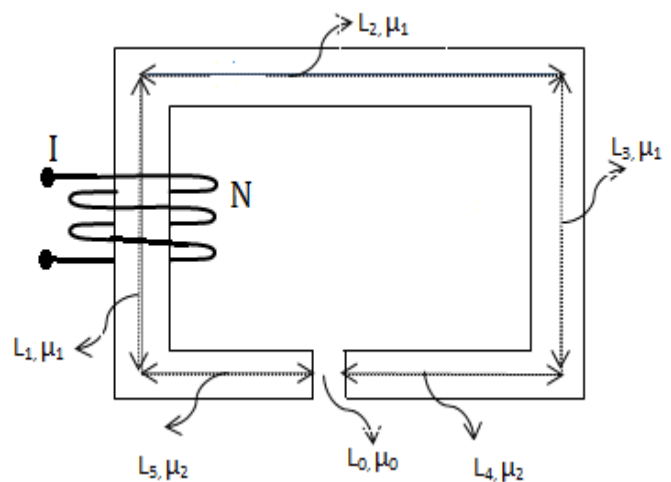
**Rép. 04**

La FMM = 401 Atrs,  $R_{fer} = 3.8 \cdot 10^4 \text{ Atrs/Wb}$ ,  
 $R_{air} = 4.4 \cdot 10^5 \text{ Atrs/Wb}$ ,  $L = 0.33 \text{ H}$ .

**Exercice 05**

Soit le circuit magnétique (représenté dans la figure) constitué de :

- Les tronçons 1, 2, 3 sont de même substance ferromagnétique F1, avec  $L_1 = 0.15 \text{ m}$ ,  $L_2 = 0.2 \text{ m}$ ,  $L_3 = 0.15 \text{ m}$ .  $S_1 = S_2 = S_3 = 0.003 \text{ m}^2$ .
- Les tronçons 4, 5 sont de même substance ferromagnétique F2, avec  $L_4 = 0.12 \text{ m}$ ,  $L_5 = 0.075 \text{ m}$ ,  $S_4 = S_5 = 0.004 \text{ m}^2$ .
- Entre fer avec  $L_0 = 0.005 \text{ m}$ ,  $S_0 = 0.004 \text{ m}^2$ .



Calculer le courant  $I$  pour avoir un flux  $\Phi = 36 \cdot 10^{-4} \text{ Wb}$ . On donne le nombre de spires est  $N = 200$ . de la courbe de magnétisation  $B=f(H)$  on donne ( $B=1.2 \text{ T}$ ,  $H = 800 \text{ Atr/m}$ ), ( $B=0.9 \text{ T}$ ,  $H = 500 \text{ Atr/m}$ ).

**Rép. 05**

$$B_1 = B_2 = B_3 = 1.2 \text{ T} \quad , \quad H_1 = H_2 = H_3 = 800 \text{ Atr/m}$$

$$B_4 = B_5 = B_0 = 0.9 \text{ T} \quad , \quad H_4 = H_5 = 500 \frac{\text{Atr}}{\text{m}}, \quad H_0 = 7.2 \cdot 10^5 \text{ Atrs/m}$$

$$i = 20.5 \text{ A}$$

**Exercice 06**

Soit le circuit magnétique (représenté dans la figure) constitué de tôle en fer doux. Ce circuit représente une symétrie par rapport au noyau central. Calculer le nombre des spires pour avoir dans le noyau  $B = 1 \text{ T}$ ,  $I = 100 \text{ mA}$ .

Les paramètres géométriques des différents tronçons sont comme suit ;  $S_1 = S_2 = 2.812 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ ,  $S_3 = 5.625 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ ,  $S_4 = 3.041 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$ .  $L_1 = L_3 = 43.75 \text{ mm}$ ,  $L_2 = 25 \text{ mm}$ ,  $L_4 = 38.5 \text{ mm}$ ,  $L_{01} = L_{02} = 0.15 \text{ mm}$ .

On donne la courbe de magnétisation :

<b>B (T)</b>	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8
<b>H (Atr/m)</b>	30	65	110	155	220	390	520	3500	13800

Rép. 06

$$\phi_1 = \phi_2 = 2.813 \cdot 10^{-4} \text{Wb}, \quad B_1 = B_2 = B_3 = 1 \text{ T},$$

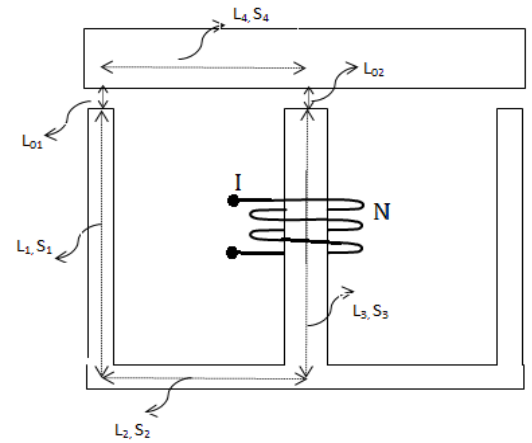
$$H_1 = H_2 = 220 \text{ Atrs/m}$$

$$B_3 = B_{02} = 1 \text{ T}, \quad H_3 = 220 \text{ Atrs/m}, \quad B_4 = 0.925 \text{ T},$$

$$H_4 = 175 \text{ Atrs/m}$$

$$H_{0.1,0.2} = 795774.7 \text{ Atrs/m}$$

$$N = 1514 \text{ spires}$$



*Chapitre V*

*Les transformateurs*



## V.1 Introduction

Le transformateur permet de *transférer de l'énergie* (sous forme alternative) *d'une source à une charge*, tout en *modifiant la valeur de la tension*. La tension peut être *soit augmentée ou abaissée* selon l'utilisation voulue. Le changement d'un niveau de tension à un autre se fait par *l'effet d'un champ magnétique*.

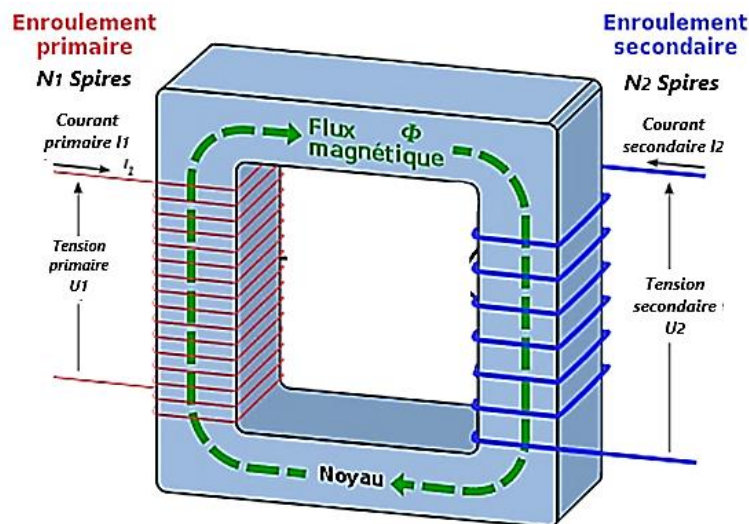
Parmi les applications des transformateurs, on note :

**Electronique** : alimentation à basse tension, adaptation d'impédances.

**Electrotechnique** : transformation de la tension pour le transport et la distribution d'électricité, alimentation à basse tension (par exemple, lampes halogènes).

## V.2 Principe de fonctionnement

Le transformateur est constitué de *deux enroulements* (ou plus) couplés sur un *noyau magnétique* (un matériau ferromagnétique)



Le côté de la *source* est appelé *primaire*. Le côté de la *charge* est appelée *secondaire*. Le flux  $\phi$  est le flux mutuel. Il faut remarquer *qu'il n'existe aucune connexion électrique* entre le primaire et le secondaire. Tout le *couplage* entre les deux enroulements est *magnétique*.

Lorsqu'on applique une *tension alternative* à la source, ceci *crée un flux alternatif* dans le noyau magnétique. Selon la loi de Faraday, ce flux crée des *forces électromotrices (fem)* dans les bobines. La *force électromotrice induite est proportionnelle au nombre de tours* dans la bobine et au taux de variation du flux.

Selon le *rapport du nombre de tours entre le primaire et le secondaire*, le secondaire alimente la charge avec une tension différente de celle de la source.

Si  $U_1 < U_2$ , le transformateur est dit *élévateur de tension* ;

Si  $U_1 > U_2$ , le transformateur est dit *abaisseur de tension* ;

Si  $U_1 = U_2$ , le transformateur est un *transformateur d'isolement* ;

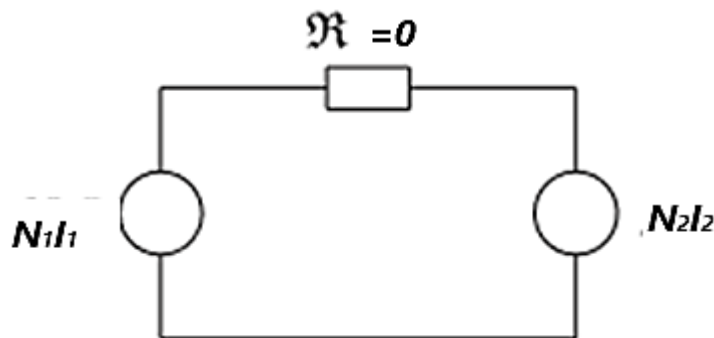
### V.3 Transformateur idéal

On définit un transformateur idéal ayant les caractéristiques suivantes :

1. La résistance dans les fils (au primaire et secondaire) est *nulle*.
2. Le noyau magnétique est parfait ( $\mu_r = \infty$ ).

Dans ce cas *la réluctance du noyau sera nulle*, et donc *il n'y a pas de fuite*. Le flux est donc totalement contenu à l'intérieur du noyau. Le couplage magnétique entre le primaire et le secondaire est parfait; *tout le flux du primaire se rend au secondaire*. Le rendement dans ce cas est égal à 100%.

Le circuit équivalent du transformateur idéal est donc



Circuit équivalent du transformateur idéal

Le rapport de transformation  $K = \frac{N_2}{N_1} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2}$

### V.4 Transformateur réel

Le transformateur réel ne possède pas des caractéristiques parfaites comme le transformateur idéal. On doit tenir compte de :

1. *Noyau magnétique*. Le noyau possède une caractéristique B(H) non-linéaire, avec *hystérésis*, et une perméabilité non-infinie ( $\mu_r \neq \infty$ ).
2. *Bobinages*. Les bobinages sont en cuivre, ayant une *résistivité non-nulle* ( $\rho \neq 0$ ).

Compte tenu de ces caractéristiques, on peut déduire *six sources de pertes* dans le transformateur :

1. Puisque la perméabilité du noyau est non-infinie, la réluctance du noyau ne sera pas nulle. Il y a par conséquent *des fuites de flux* : (a) au primaire (b) au secondaire
2. Pertes dans le *fer par Hystérésis et des fuites par courants de Foucault*.
3. La résistivité des fils de cuivre implique une résistance interne au primaire et au secondaire et se traduit par *pertes Joules*.

Les conséquences de ces phénomènes parasites sont :

- Le rendement du transformateur est *inférieur à 100%*.
- Le rapport de tension entre le primaire et le secondaire ne sera pas exactement égal au rapport du nombre de tours.  $K = \frac{N_2}{N_1} \neq \frac{U_2}{U_1} \neq \frac{I_1}{I_2}$

### V.4.1 Circuit équivalent du transformateur réel

Avec tous les *phénomènes parasites* vus dans la section précédente, on peut représenter ces pertes par des éléments de circuit équivalent.

- **Pertes dans le noyau**

Puisque la perméabilité du noyau est finie, la réluctance sera non-nulle. Par conséquent, *pour créer le flux  $\phi$  dans le noyau*, il faut un courant  $I_m$ . Ceci peut être représenté par une *inductance  $L_m$* , qu'on appelle une *inductance magnétisante*.

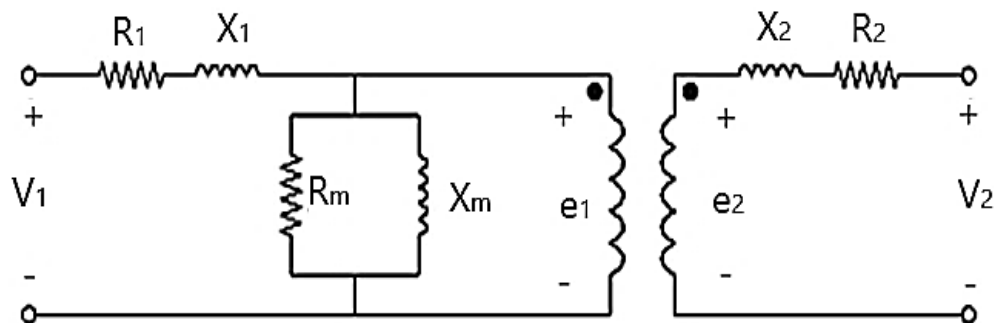
On représente les *pertes* dans le noyau par une *résistance  $R_m$*  en parallèle avec l'inductance magnétisante  $L_m$ .

- **Fuites au primaire et secondaire**

On représente ces pertes par des réactances inductives  $X_1$  et  $X_2$ , pour le primaire et le secondaire, respectivement.

- **Pertes par effet Joule**

On représente la résistance des fils de cuivre par des résistances  $R_1$  et  $R_2$  pour le primaire et le secondaire, respectivement.

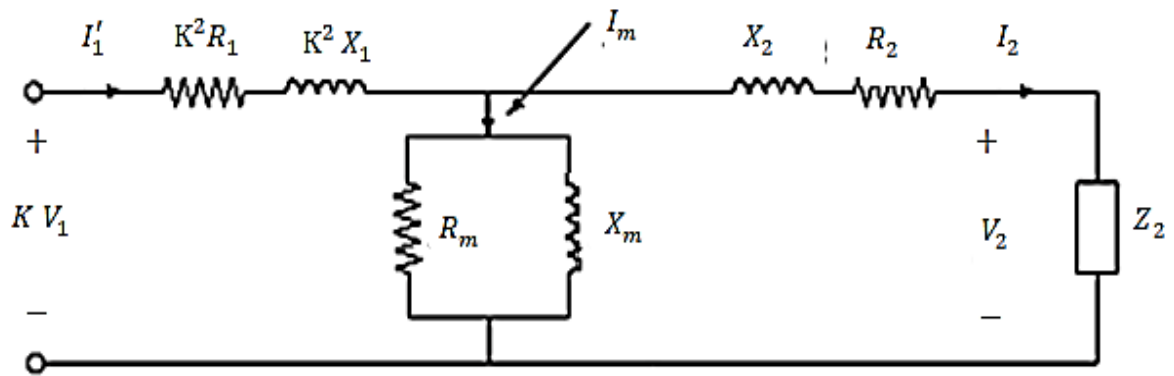


Pour faciliter l'analyse du circuit, on ramène les impédances du secondaire au primaire. Comme on peut ramener les paramètres primaires au secondaire. On obtient alors:

- **Paramètres primaires au secondaire**

$R_S = R_2 + k^2 R_1$  La résistance du transformateur ramenée au secondaire

$X_S = X_2 + k^2 X_1$  La réactance de fuites magnétiques ramenée au secondaire



De ce circuit, on définit :

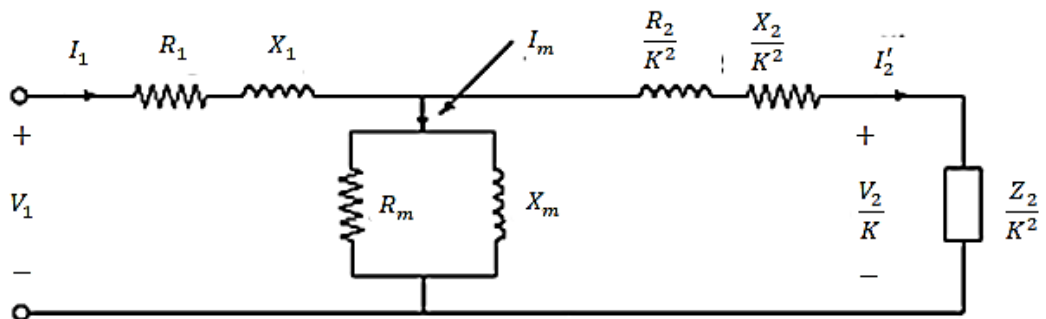
$$X'_1 = k^2 X_1 \quad R'_1 = k^2 R_1 \quad V'_1 = k V_1 \quad I'_1 = \frac{I_1}{k}$$

• Paramètres secondaire au primaire

$R_p = R_1 + \frac{R_2}{k^2}$  La résistance du transformateur ramenée au primaire

$X_p = X_1 + \frac{X_2}{k^2}$  La réactance de fuites magnétiques ramenée au primaire.

Le schéma équivalent dans le cas des paramètres secondaires ramenés au primaire :



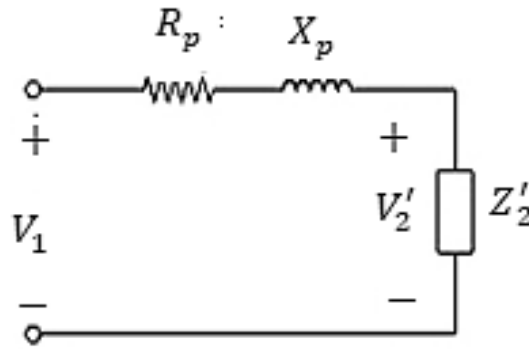
De ce circuit, on définit :

$$X'_2 = \frac{X_2}{k^2} \quad R'_2 = \frac{R_2}{k^2} \quad V'_2 = \frac{V_2}{k} \quad I'_2 = k I_2$$

Dans un transformateur typique, le courant  $I_0$  est *seulement* 2 à 4% de la valeur du courant  $I_1$ . Pour simplifier l'analyse, on peut donc négliger le courant  $I_0$ . On va donc supposer que le noyau a des pertes fer négligeables et une perméabilité élevée.



On obtient alors le circuit suivant :



Circuit équivalent simplifié du transformateur.

$$X_p = X_1 + \frac{X_2}{k^2}, \quad R_p = R_1 + \frac{R_2}{k^2}, \quad Z'_2 = \frac{Z_2}{k^2}, \quad V'_2 = \frac{V_2}{k}$$

On obtient alors les relations suivantes :

$$V_1 = R_p I_1 + jX_p I_1 + V'_2$$

$$I'_2 = I_1$$

et ainsi un diagramme vectoriel simplifié.

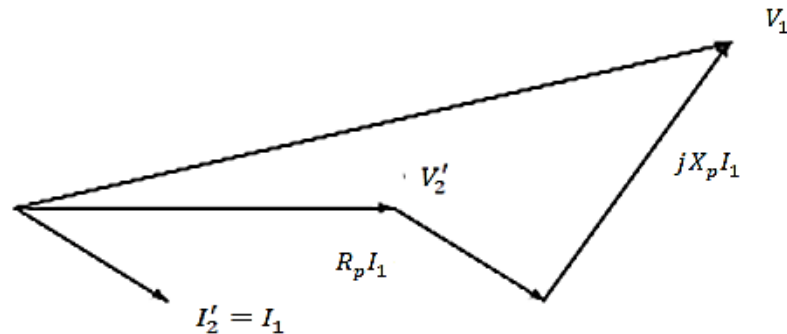


Diagramme vectoriel des tensions et courants du transformateur simplifié.

## V.5 Autres Transformateurs

### V.5.1 Transformateur d'isolement

Un transformateur crée une isolation galvanique entre son primaire et son secondaire, cette propriété est utilisée tout spécialement dans les transformateurs d'isolement. Ils servent à assurer la sécurité d'une installation en protégeant des électrocutions par exemple. La séparation galvanique permet aussi d'éliminer une partie du bruit électrique, ce qui est utile pour certains appareils électroniques sensibles. Ces transformateurs ont presque le même nombre de spires au primaire et au secondaire :

Ils sont, par exemple, largement utilisés dans les blocs opératoires : chaque salle du bloc est équipée de son propre transformateur d'isolement, pour éviter qu'un défaut dans un bloc n'affecte les autres.

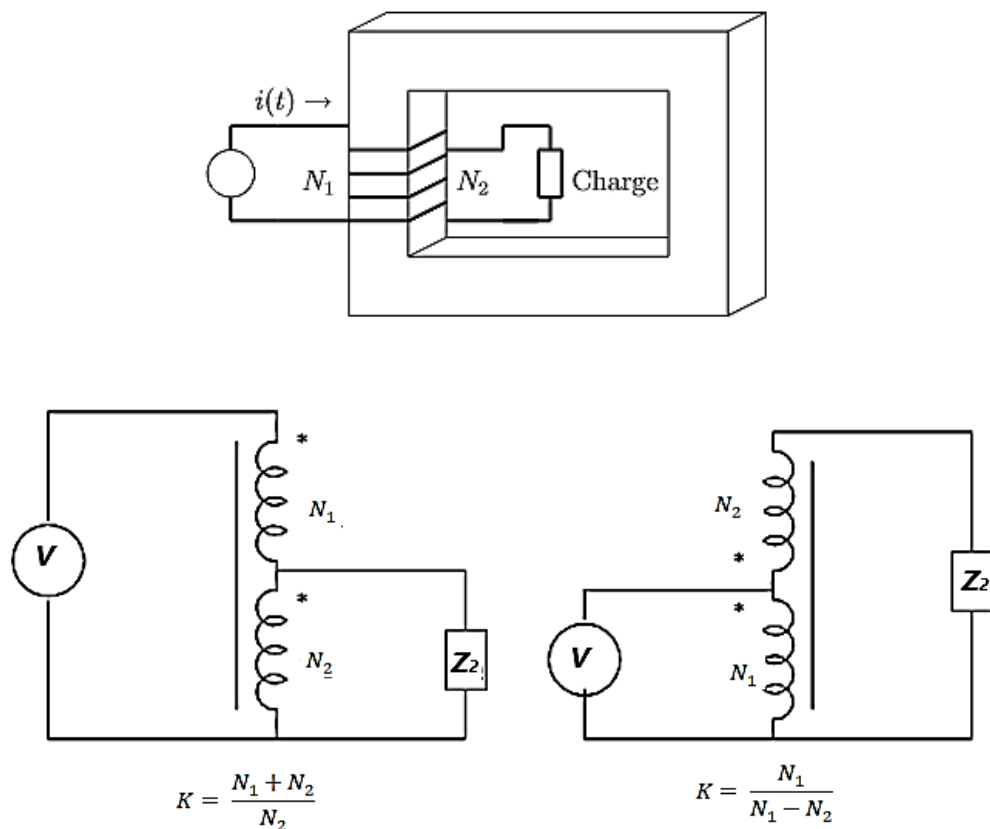
Un autre intérêt est de pouvoir changer de régime de neutre (cas d'utilisation de matériel informatique et/ou d'équipements électroniques sensibles dans une installation IT).

### V.5.2 Transformateur à impulsion

Ce type de transformateur est utilisé pour la commande des thyristors, triacs et des transistors. Il présente, par rapport à l'opto-coupleur, les avantages suivants : fonctionnement possible à fréquence élevée, simplification du montage, possibilité de fournir un courant important, bonne tenue en tension.

### V.5.3 Autotransformateur

L'autotransformateur est constitué d'un enroulement primaire et secondaire bobinés sur le même circuit magnétique. En d'autres termes, c'est un transformateur à un enroulement. Les deux enroulements ont une partie commune, et il n'y a pas d'isolation galvanique entre les deux enroulements.

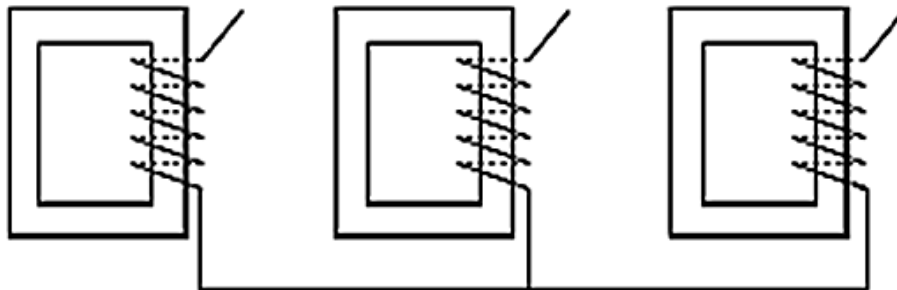


Un auto-transformateur est utilisé pour :  $K = \frac{N_1 + N_2}{N_2}$   $K = \frac{N_1}{N_1 - N_2}$

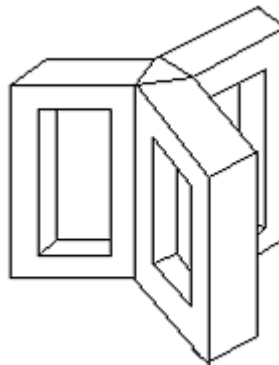
- Démarrer les moteurs à induction et les moteurs synchrones afin de fournir jusqu'à 50 à 60% de la tension totale au stator du moteur lors du démarrage.
- Donner un petit coup de pouce à la distribution d'un câble, en compensant les chutes de tension.
- Il est également utilisé comme régulateur de tension.

### V.5.4 transformateurs triphasés

Un transformateur triphasé peut être constitué de trois transformateurs monophasés. La figure représente les enroulements primaires couplés en étoile. Cette solution entraîne un encombrement important et une sous-utilisation du fer mais elle est parfois utilisée.



• Il est possible de réaliser le circuit magnétique ci-contre (les enroulements primaire et secondaire sont placés sur les colonnes verticales périphériques) : Chaque enroulement primaire comporte  $n_1$  spires, le secondaire  $n_2$  spires. Le circuit magnétique de chaque enroulement se referme dans la colonne centrale, les flux sont indépendants.



$$V_1 = jn_1\omega\Phi_1, \quad V_2 = jn_2\omega\Phi_2, \quad V_3 = jn_3\omega\Phi_3$$

D'où le flux dans la colonne centrale :  $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = \frac{1}{jn_1\omega} (V_1 + V_2 + V_3)$

Si  $V_1 + V_2 + V_3 = 0$ , il est possible de supprimer la colonne centrale. Ce type de transformateur se rencontre très rarement à cause de la complexité de la construction par rapport au bénéfice obtenu.

Pour simplifier la construction, on réalise des circuits magnétiques coplanaires (un seul enroulement par colonne est représenté sur le schéma ci-contre) : la somme des flux dans chacune des colonnes verticales est nulle ( $\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0$ ) si les fuites de flux sont négligées. Le circuit magnétique est à flux liés : les différents flux ne peuvent pas s'établir indépendamment les uns des autres.

**Exercices sur le cinquième chapitre****Exercice 01**

Un transformateur de commande et de signalisation monophasé a les caractéristiques suivantes :  
230 V/ 24 V 50 Hz , 630 VA

- 1- Les pertes totales à charge nominale sont de 54,8 W. Calculer le rendement nominal du transformateur pour  $\cos \varphi_2 = 1$  et  $\cos \varphi_2 = 0.3$ .
- 2- Calculer le courant nominal au secondaire  $I_{2N}$ .
- 3- Les pertes à vide (pertes fer) sont de 32,4 W. En déduire les pertes Joule à charge nominale. En déduire  $R_S$ , la résistance des enroulements ramenée au secondaire.

**Rép. 01**

$$\eta = 77.5 \%, I_{2N} = 26.25 \text{ A}, P_J = 32.4 \text{ W}, R_S = 32.5 \text{ m}\Omega$$

**Exercice 02**

Un transformateur monophasé porte les indications suivantes sur sa plaque signalétique :  
 $S=2200\text{VA}$ ,  $\eta = 0.95$ , Primaire  $V_{1n} = 220 \text{ V}$ , Secondaire  $V_{2n} = 127 \text{ V}$ .

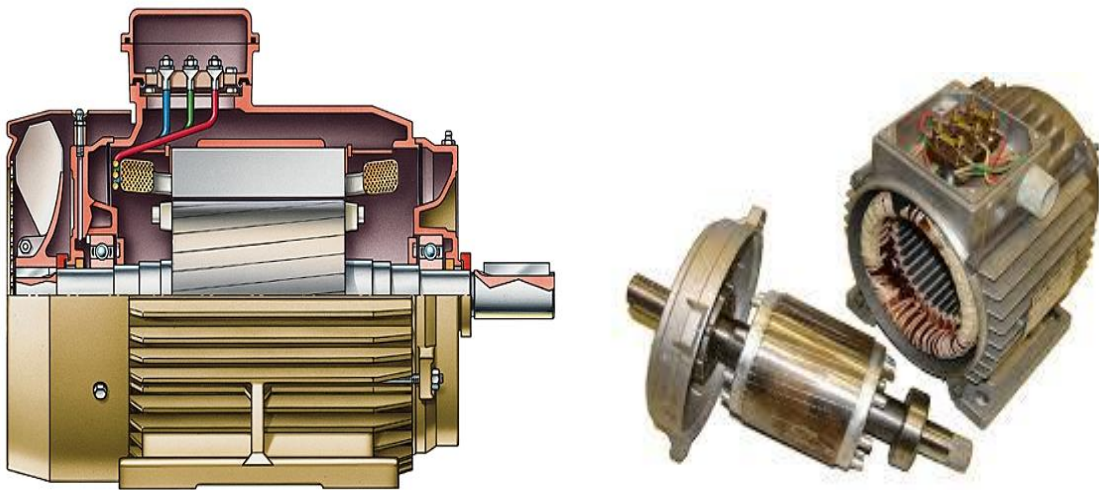
- 1) Calculer le courant primaire nominal  $I_{1n}$
- 2) Calculer le courant secondaire nominal  $I_{2n}$
- 3) Le rendement est précisé pour une charge absorbant le courant nominal sous tension secondaire nominale et présentant un facteur de puissance  $\cos\varphi = 0.8$ . Calculer la valeur des pertes dans le transformateur dans ces conditions.

**Rép. 02**

$$I_{1n} = 10 \text{ A}, I_{2n} 17.32 \text{ A}, \sum \text{pertes} = 92.63 \text{ W}$$

*Chapitre VI*

*Introduction aux machines  
électriques*



## VI.1 Généralités sur les machines à courant continu (M CC)

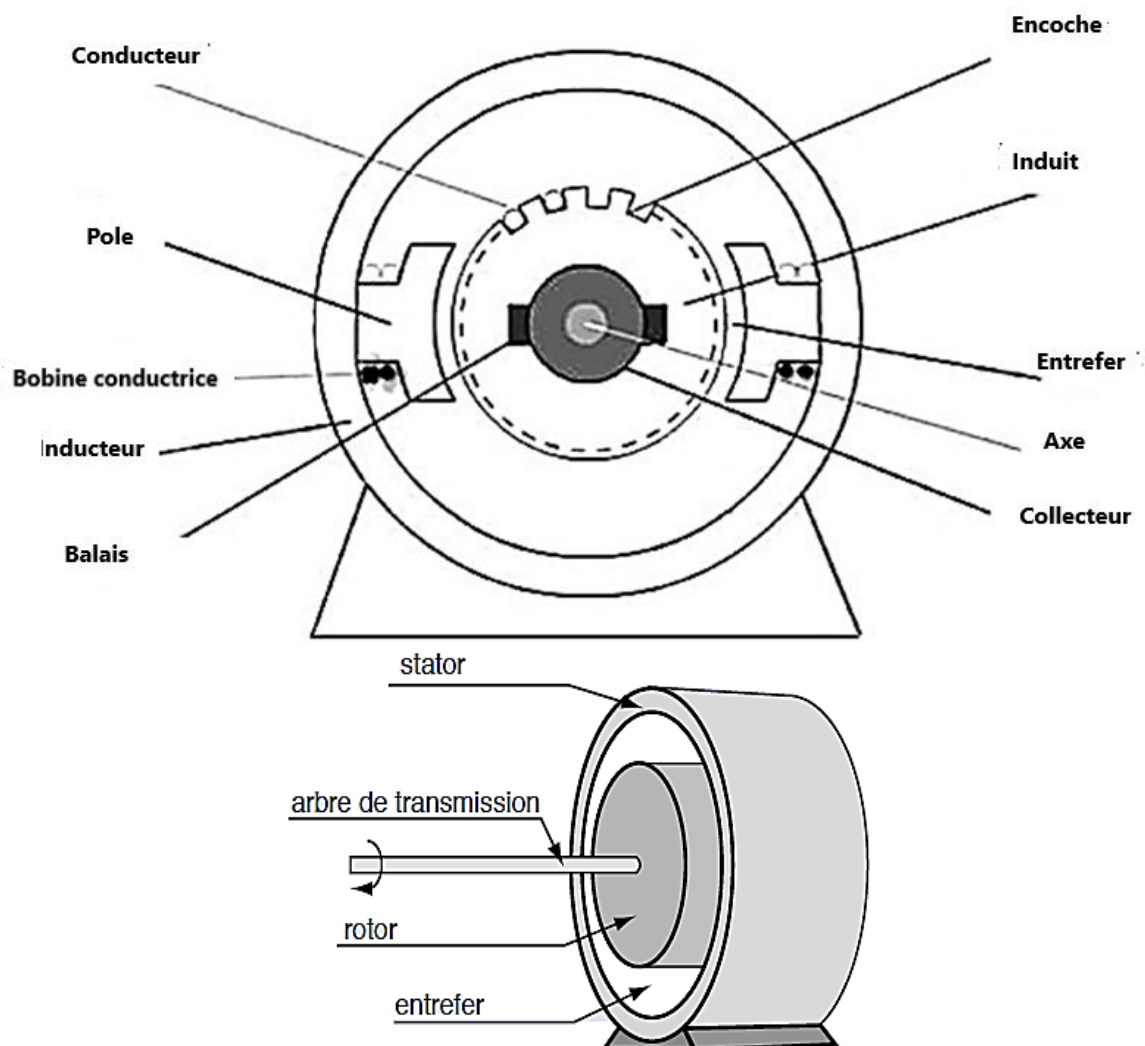
La machine à courant continu est un *convertisseur d'énergie*, totalement *réversible*, elle peut fonctionner soit en *moteur*, convertissant de l'énergie électrique en énergie mécanique, soit en *génératrice*, convertissant de l'énergie mécanique en énergie électrique. Dans les deux cas un champ magnétique est nécessaire aux différentes conversions. Cette machine est donc un *convertisseur électromécanique*.

## VI.2 Constitution de la machine

La machine à courant continu est constituée de trois parties principales:

1. Stator : partie fixe, statique (*c'est un circuit magnétique*)
2. Rotor : élément entrant en rotation (*c'est un circuit magnétique*)
3. Système collecteurs et les balais

Le rotor est lié à l'arbre de transmission. Le Stator et rotor séparés par l'entrefer



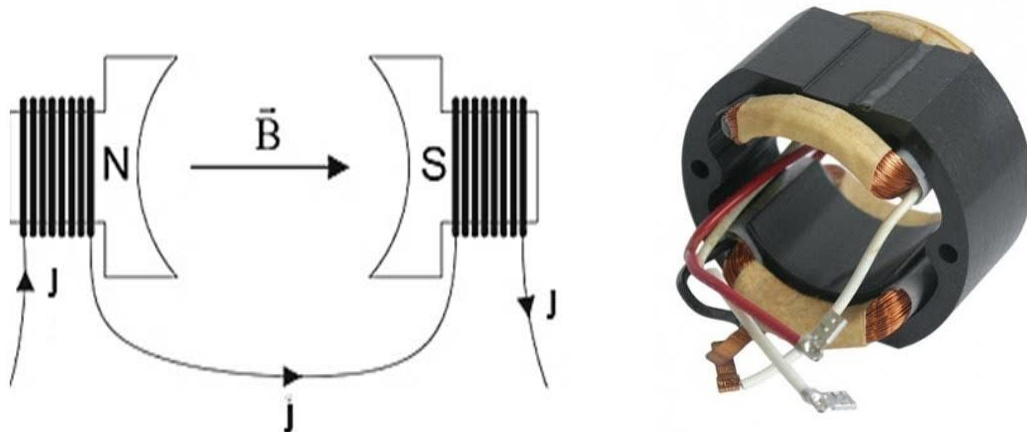
Le rôle du stator et du rotor dépend de la machine

Selon la machine :

- Stator = inducteur (contient le circuit d'excitation) ou induit (siège de la tension induite)
- Rotor = inducteur ou induit

### VI.2.1 l'inducteur (ou circuit d'excitation)

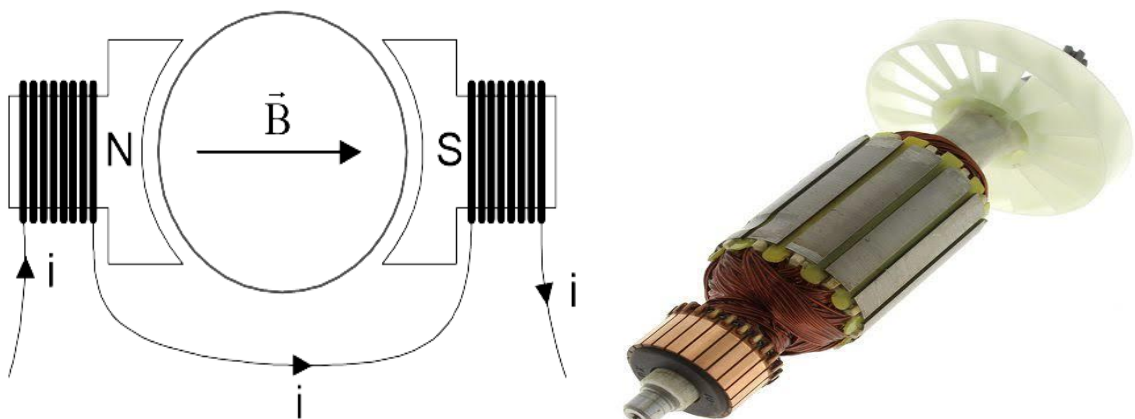
C'est un aimant ou un électroaimant (bobinage parcouru par un courant continu).



Dans une machine à courant continu, l'inducteur est situé sur la partie fixe de la machine (le stator). Il sert à créer un champ magnétique (champ "inducteur") dans le rotor.

### VI.2.2 L'induit (circuit de puissance)

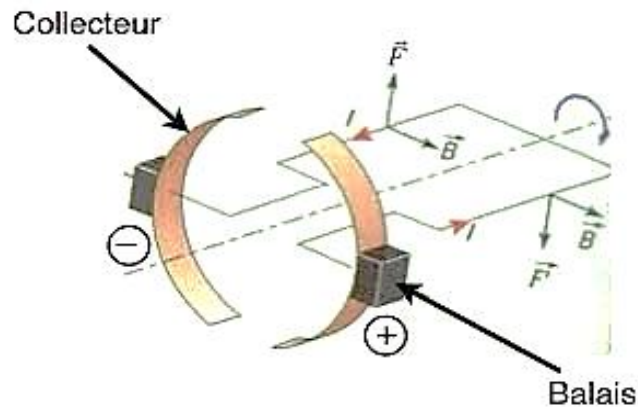
L'induit est situé au rotor (partie tournante de la machine), C'est un bobinage parcouru par un courant continu (courant d'induit).



L'induit est l'organe électromagnétique chargé de recevoir l'induction de l'inducteur et de la transformer en électricité (générateur) ou en force (moteur).

### VI.2.3-Le collecteur et les balais

Le système collecteur-balais sont des organes permettant de créer une connexion électrique entre la partie fixe (stator) et, la partie tournante (rotor). Dans ce cas le câblage entre les deux parties est impossible.



Le collecteur consiste en un anneau conducteur (généralement en cuivre), sectionné en un nombre pair de parties isolées entre elles, fixé avec une entretoise isolante sur l'axe de la machine. La connexion électrique est créée entre les parties conductrices et la partie fixée sur le stator (bornier), les balais réalisés à base de carbone. On alimente en électricité le bobinage du rotor par ces contacts (fonctionnement en moteur) ou au contraire on récupère l'électricité produite par le bobinage du rotor (fonctionnement en générateur).

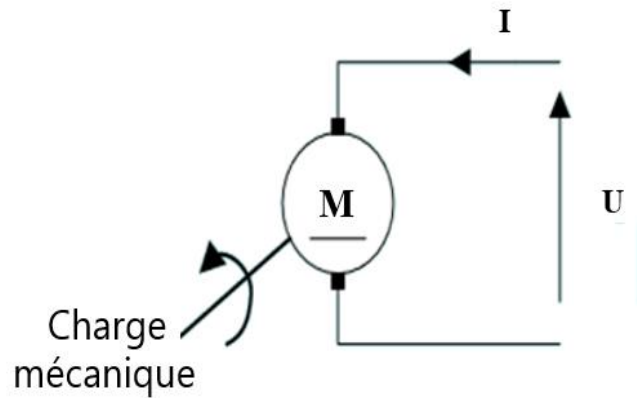
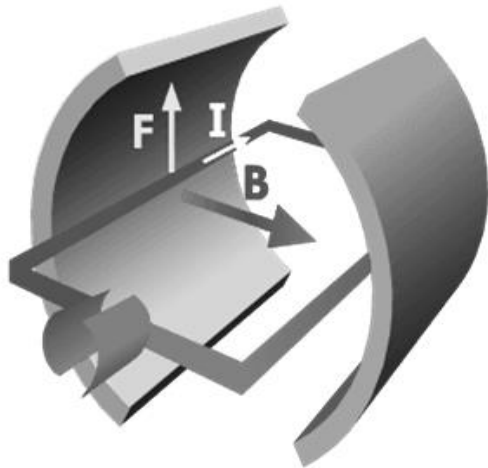
### VI.3 Principe de fonctionnement

Une machine à courant continu possède un nombre  $N$  de conducteurs actifs. Si on alimente le circuit inducteur (stator dans notre cas), ces conducteurs sont plongés dans un champ magnétique.

Si on considère le rotor (induit dans notre cas), deux possibilités peuvent avoir lieu :

1. **Fonctionnement en moteur** : les conducteurs du rotor sont à la fois *traversés par un courant électrique* et *plongés à l'intérieur d'un champ magnétique*, ils sont alors soumis à une *force électromagnétique  $F$* .

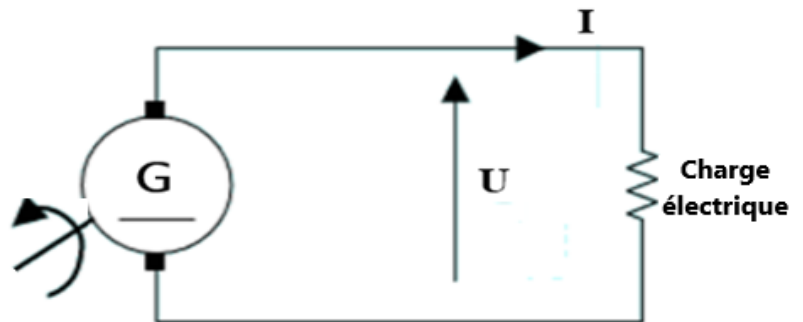
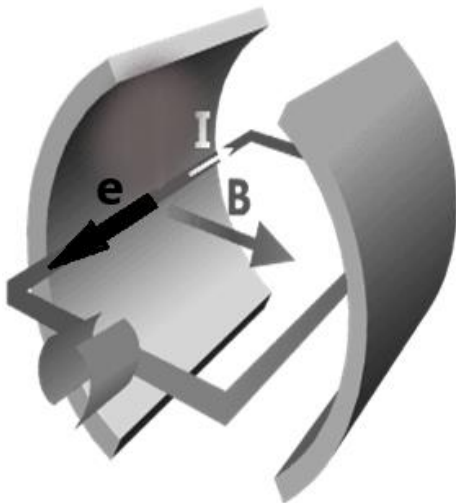




Champ magnétique inducteur  $B$  + courant d'induit donnent :

- Forces électromagnétiques (forces de Laplace)
- Couple électromagnétique
- Rotation du rotor

2. **Fonctionnement en génératrice (dynamo):** les conducteurs du rotor sont à la fois *en mouvement de rotation* et *plongé à l'intérieur d'un champ magnétique*, ils sont alors le siège d'une force électromotrice FEM (une tension).



Champ inducteur  $B$  + rotation de la spire donnent :

- variation du flux magnétique
- création d'une fem induite ( $e$ ) alternative

#### VI.4 Schéma équivalent des machines à courant continu.

Les bobinages du stator et du rotor sont parcourus par un courant continu, alors le seul composant électrique qui entre en jeu dans le circuit électrique équivalent est la résistance électrique.

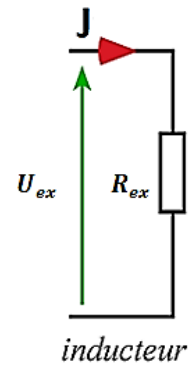
**VI.4.1 Schéma équivalent de l'inducteur**

La bobine de l'inducteur est alimenté par une tension dite *tension d'excitation*  $U_e$  (pour produire le flux magnétique). Alors elle est parcourue par un *courant d'excitation*  $J$ .

L'inducteur présente une résistance dite résistance de l'inducteur ou *résistance d'excitation*  $R_e$ .

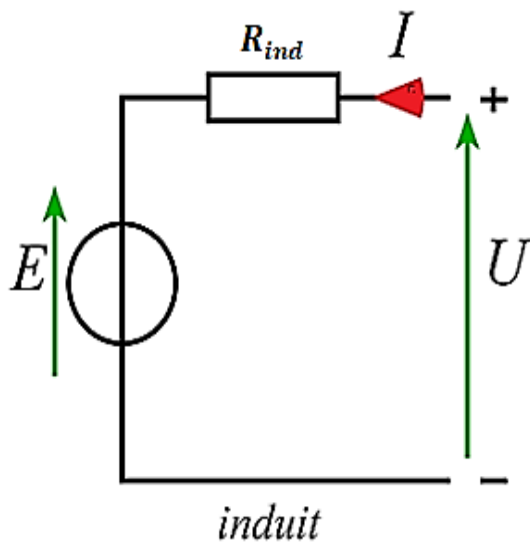
La tension aux bornes de l'inducteur est :

$$U_{ex} = R_{ex} J$$

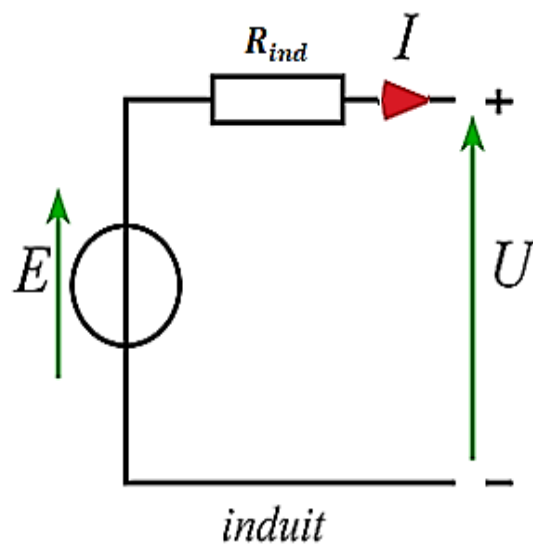


**VI.4.2 Schéma équivalent de l'induit**

Dans les deux cas, génératrice ou moteur, la bobine de l'induit se trouve parcouru par un courant électrique appelé *courant d'induit*  $I$ . Le sens de ce courant est entrant dans le cas du moteur et sortant dans le cas d'une génératrice. La tension aux bornes de l'induit est  $U$ . Aussi, dans les deux cas, le rotor est en rotation dans un champ magnétique. Alors l'induit est toujours siège d'une tension  $E$ .



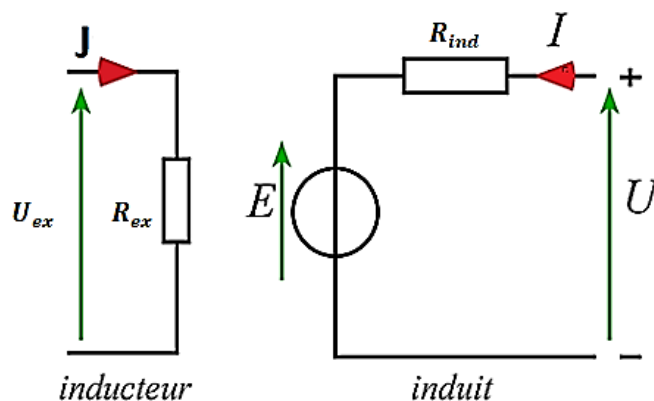
Cas du moteur



cas de la génératrice

Alors le schéma équivalent sera :

Cas du moteur



$$-U + R_{ind} I + E = 0$$

Alors

$$U_{ex} = R_{ex} J$$

$$U = E + R_{ind} I$$

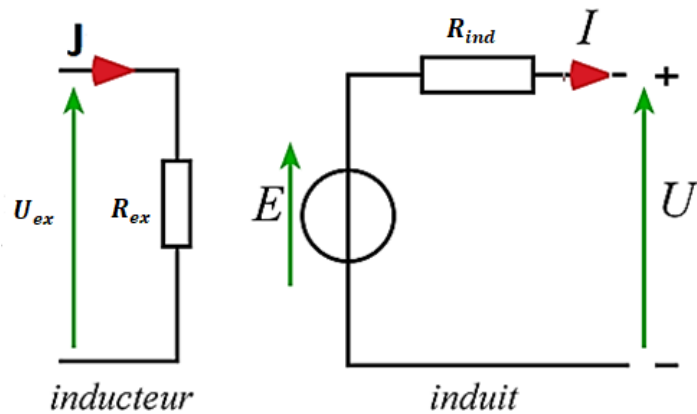
### Cas de la génératrice

$$-U - R_{ind} I + E = 0$$

alors

$$U = E - R_{ind} I$$

$$U_{ex} = R_{ex} J$$



En pratique  $R_{ex} \gg R_{ind}$  et  $J \ll I$

## VI.5 Force électromotrice et couple dans la machine C.C.

### VI.5.1 Expression de la fem induite

La force électromotrice induite dans une machine est donnée par l'expression (loi de Faraday) :

$$E = k_e \Phi \Omega$$

$E$  : fem induite (tension continue en Volts)

$\Phi$  : flux magnétique crée sous un pôle par l'inducteur.

$\Omega$  : vitesse de rotation (en rad/s)  $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$  où  $n$  la vitesse en tours/minutes

$k_e$  : constante qui dépend de la machine considérée

### VI.5.2 Expression du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique dans une machine est donné par l'expression (Loi de Laplace) :

$$C_{em} = K_c \Phi I$$

$C_{em}$  : Couple électromagnétique (en Nm)

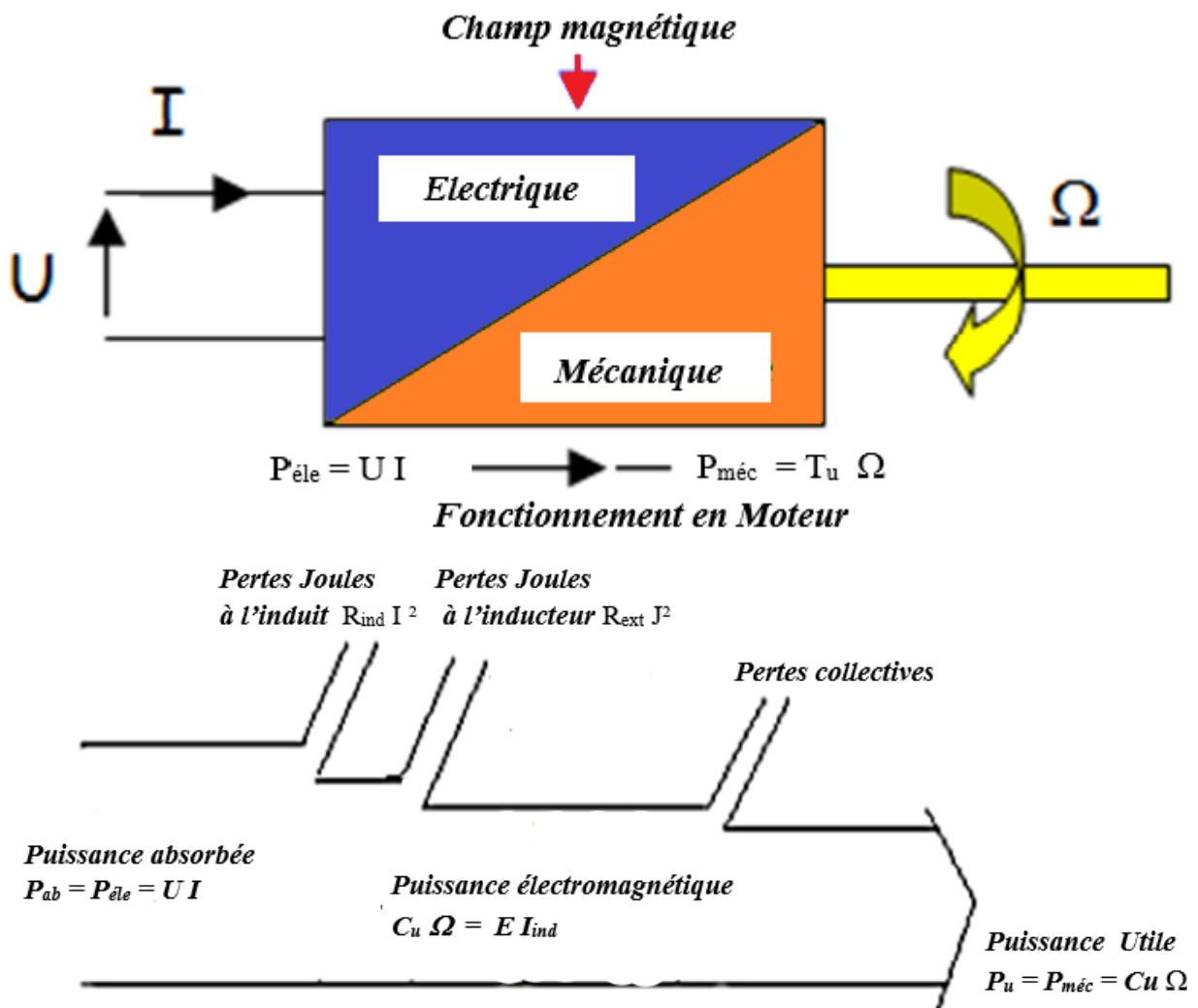
$I$  : courant d'induit (en A)

$K_c$  : Constante qui dépend de la machine

## VI.6 Bilan de puissance et rendement.

### VI.6.1 cas du moteur

Le moteur transforme l'énergie électrique absorbée en une autre énergie mécanique pour entrainer une charge mécanique (pompe, hélice,...). Une partie de l'énergie absorbée est perdue dans le moteur.



**Les puissances :**

1. Puissance absorbée = Puissance électrique :  $P_{\text{éle}} = UI$
2. Puissance utile = Puissance mécanique :  $P_{\text{méc}} = T \Omega$

**Pertes Joules :**

3. Induit :  $P_{\text{Jinduit}} = R_{\text{ind}} I^2$
4. Inducteur :  $P_{\text{Jinducteu}} = R_{\text{ext}} J^2 = U_{\text{ext}} J$

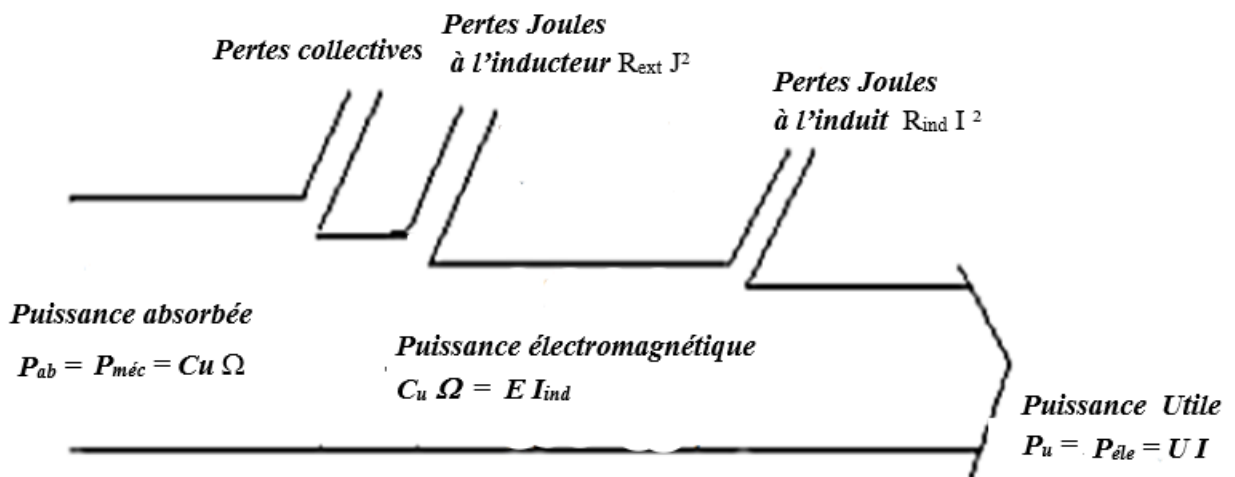
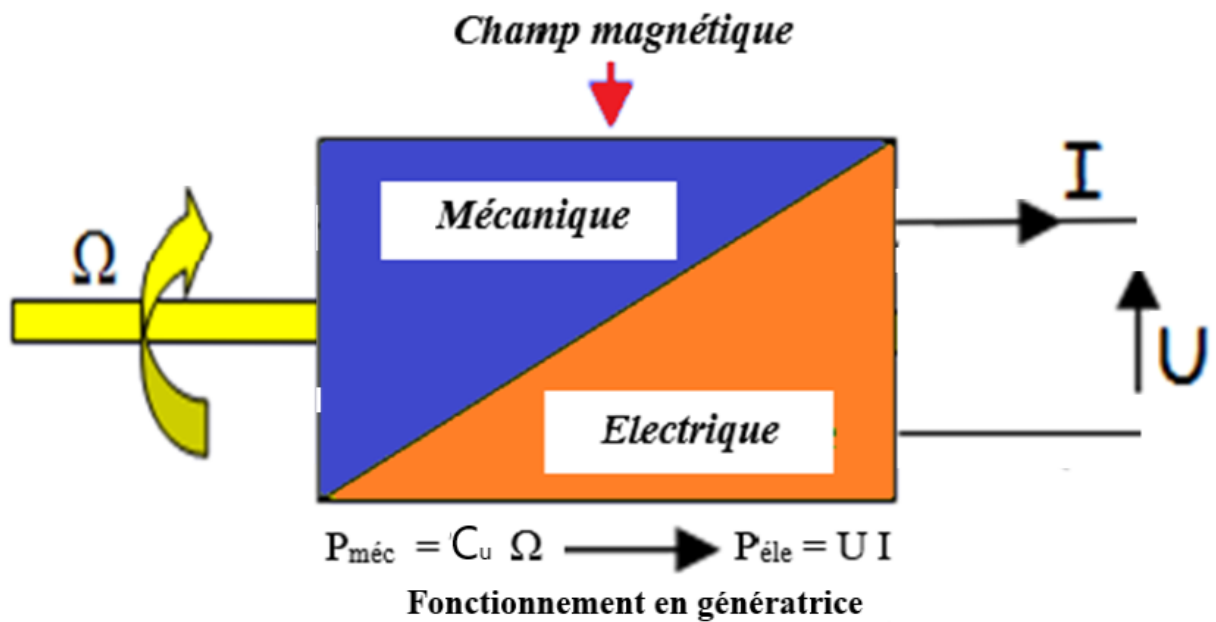
**Pertes collectives (ou constantes) :**

1. Pertes mécaniques (frottements, vibrations, ventilation ....)
2. Pertes fer (dans le matériau ferromagnétique)

Le rendement du moteur est :

$$\eta = \frac{P_{méc}}{P_{éle}} = \frac{P_u}{P_u + \sum \text{pertes}}$$

**VI.6.2 cas de la génératrice**



**Les puissances :**

1. Puissance absorbée = Puissance mécanique =  $C \Omega$
2. Puissance utile = Puissance électrique =  $U I$

**Pertes Joules :**

5. Induit :  $P_{J_{\text{induit}}} = R_{\text{ind}} I^2$
3. Inducteur :  $P_{J_{\text{inducteu}}} = R_{\text{ext}} J^2 = U_{\text{ext}} J$

**Pertes collectives (ou constantes) :**

1. Pertes mécaniques (frottements, vibrations, ventilation ....)
2. Pertes fer (dans le matériau ferromagnétique)

Le rendement du le génératrice est :

$$\eta = \frac{P_{\text{éle}}}{P_{\text{méc}}} = \frac{P_u}{P_u + \sum \text{pertes}}$$

**Exercices sur le sixième chapitre****Exercice 01**

Une machine d'extraction est entraînée par un moteur à courant. L'inducteur est alimenté par une tension  $U_{\text{ext}} = 600 \text{ V}$  et parcouru par un courant d'excitation d'intensité constante :  $J = 30 \text{ A}$ . L'induit de résistance  $R_a = 0.012 \text{ Ohm}$  est alimenté par une source fournissant une tension  $U$  réglable de  $0 \text{ V}$  à sa valeur nominale :  $U_n = 600 \text{ V}$ . L'intensité  $I$  du courant dans l'induit a une valeur nominale :  $I_n = 1.50 \text{ kA}$ . La vitesse de rotation nominale est  $n = 30 \text{ trs/min}$ .

1. Ecrire la relation entre  $U$ ,  $E$  et  $I$ .
2. Exprimer la puissance absorbée par l'induit du moteur et calculer sa valeur numérique.
3. Exprimer la puissance totale absorbée par le moteur et calculer sa valeur numérique.
4. Exprimer la puissance totale perdue par effet Joule et calculer sa valeur numérique.
5. Sachant que les autres pertes valent  $27 \text{ kW}$ , exprimer et calculer la puissance utile et le rendement du moteur.
6. Exprimer et calculer le moment du couple utile  $C_u$  et le moment du couple électromagnétique  $C_{\text{em}}$ .

On donne  $\Omega = 2 \pi n$

**Rép.01**

$U = E + R_a I$ ,  $P_{\text{ab}} = 900 \text{ kW}$ ,  $P_t = 918 \text{ kW}$ ,  $P_{\text{totale}} = 45 \text{ kW}$ ,  $P_u = 846 \text{ kW}$ ,  $\eta = 0.92$ ,  $C_u = 69.3 \text{ kN.m}$ ,  $C_{\text{em}} = 277.8 \text{ kN.m}$

**Exercice 02**

Un moteur à excitation indépendante fonctionne sous une tension  $U = 160 \text{ V}$ . le courant absorbé par le moteur est de  $I = 8.2 \text{ A}$ . la vitesse de rotation est de  $1420 \text{ trs/min}$  ; son couple utile sur l'arbre est  $C_u = 7.1 \text{ Nm}$ . Le courant dans l'inducteur est  $J = 0.7 \text{ A}$ . on donne la résistance de l'induit  $R_{\text{ind}} = 0.45 \text{ Ohm}$  et la résistance de l'inducteur  $R_{\text{ex}} = 220 \text{ Ohm}$ . Calculer :

1. La force contre électromotrice  $E$ .
2. Le couple électromagnétique du moteur.
3. Le rendement du moteur.

**Rép. 02**

$E = 156.4 \text{ V}$  ;  $C_{\text{élé}} = 8.42 \text{ Nm}$      $\eta = 0.8$