

CHAP 3 : MACHINE A COURANT CONTINU

INTRODUCTION : La conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique (ou inversement) est réalisé avec des machines tournantes.



Définition des MCC : Ce sont des machines tournantes qui transforment l'énergie mécanique en énergie électrique et inversement, et dans lesquelles l'énergie électrique apparaît sous forme de tension et courant continu.

Remarque 1 : comme toutes les machines électriques, les MCC sont réversibles, ce qui signifie que la même machine peut fonctionner indifféremment en moteur et en générateur (Dynamo).

Remarque 2 : La marche en Moteur de la MCC est la plus importante. En effet ;

- Pour la consommation d'énergie en courant continu, en général, on utilise des redresseurs électroniques statiques (à diodes et thyristors) au lieu des générateurs à courant continu.
- Par contre, les moteurs à courant continu sont très utilisés pour les entraînements à vitesse variable puisque la tension U est proportionnelle à la vitesse Ω . La variation de la vitesse est obtenue par la variation de la tension d'alimentation.

II/ CONSTITUTION D'UNE MCC :

Une MCC est constitué des 4 parties principales :

1/ **Circuit Inducteur (Stator)** : c'est la partie fixe de la machine, qui sert à créer une succession de pôles Nord et Sud à partir de bobinages inducteurs parcourus par un courant continu.

2/ **Circuit d'Induit (Rotor)** : c'est la partie mobile en rotation de la machine, il est constitué de tôles de minces épaisseurs isolées l'une de l'autre pour éviter les courants de Foucault. L'enroulement d'induit (rotorique) est disposé dans les encoches pratiques sur la longueur du cylindre rotorique.

3/ **Entrefer** : C'est la partie de vide qui sépare le stator (fixe) du rotor qui est mobile.

4/ **Système Balais-Lames de collecteur** :

-Le collecteur est un cylindre creux assemblé de lames en cuivre isolées les unes des autres et de l'arbre de la machine, ces lames sont connectées d'une façon bien déterminée aux spires de l'enroulement d'induit.

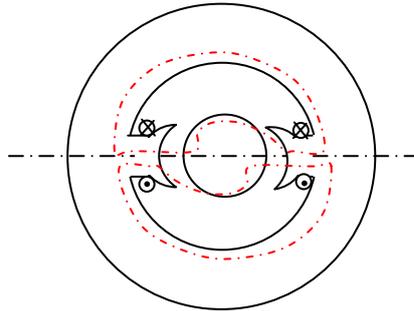
-Sur le collecteur, dans de porte-balais, sont maintenus des balais immobiles (fixes) par lesquels l'enroulement d'induit est relié au circuit extérieur. Les balais sont appuyés sur le collecteur par des ressorts.

Etude du circuit inducteur :

Le rôle de l'inducteur est de créer le flux Φ dans lequel tourne l'induit.

Pas polaire : représente l'écart angulaire entre les axes de deux pôles voisins (un Nord et un Sud)

On note par P : le nombre de paires de pôles inducteurs. $\tau_p = \frac{2\pi}{2P} = \frac{\pi}{P}$



Machine bipolaire ($P=1$)

- Le champ magnétique (lignes d'induction) produit par l'inducteur parcourt la culasse statorique, les épanouissements polaires, l'entrefer, la denture rotorique et le rotor.
- Le rotor tourne dans le flux inducteur, tous les points sont soumis à une induction alternative de fréquence $(P.n)$, tel que, n : vitesse de rotations en tr/mn.
- Le flux dans le stator est supérieur au flux Φ traversant l'entrefer et qui arrive à l'induit car il y'a un flux de fuites.
- On appelle coefficient d'hopkinson : $v = \frac{\Phi_t}{\Phi_u}$
- Le flux total produit par l'inducteur parcourt la culasse statorique, les épanouissements polaires, l'entrefer, la denture rotorique et le rotor.
- flux traversant l'entrefer et qui arrive à l'induit

Force magnétomotrice :

Soit : e : l'épaisseur de l'entrefer.

J : courant dans le bobinage inducteur.

N_s : Nombre de spires du circuit inducteur.

En appliquant le théorème d'Ampère : $N_s \cdot J = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} + \oint \vec{H} \cdot d\vec{l}$

- Si le circuit magnétique (culasse statoriques, les noyaux, les épanouissements polaires, les dents et l'anneau de l'induit) est supposé constitué de matériaux ayant une perméabilité magnétique μ très grande devant celle du vide μ_0 .
- Pratiquement, on aura donc, la force magnétomotrice suivante : $N_s \cdot J = H_e = 2e \cdot \frac{H_e(\theta)}{\mu_0}$

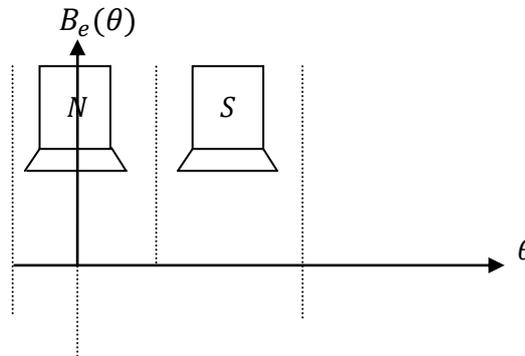
L'induction magnétique B est produite par un courant continu ou par un aimant permanent, donc elle est indépendante du temps ; c 'est une fonction de la position angulaire θ [$B_e(\theta)$].

Remarque :

- La culasse statoriques, les noyaux et les épanouissements polaires sont parcourus par le flux total $\rightarrow \Phi_t$.
- L'entrefer, les dents et l'anneau de l'induit $\rightarrow \Phi_u$.

REPARTITION DE L'INDUCTION MAGNETIQUE :

L'induction magnétique est pratiquement constante sous les pôles inducteurs, elle diminue sous les épanouissements polaires 'cornes pour s'annuler à $\theta = \frac{\pi}{2}$ ($\theta = \frac{\pi}{2P}$; machine à plusieurs paires de pôles).



Ligne neutre : c'est un axe suivant lequel, l'induction magnétique dans l'entrefer est nulle et change de signe.

Remarques :

- La fluctuations dans la forme de $B_e(\theta)$ sous les pôles est due à la présence de l'encoche (denture de l'induit).
- La machine à courant continu est une machine dit à pôles saillants car l'épaisseur de l'entrefer n'est pas constante.
- En négligeant les fluctuations de $B_e(\theta)$, et dans le cas d'une machine hétéropolaire $P > 1$.

$$B_e(\theta) = B(\theta) = B_{max} \cdot \cos(P\theta)$$

Flux par pôle inducteur :

La valeur moyenne de flux utile (Φ) par pôle inducteur, dans le cas d'une machine ayant $2P$ poles inducteurs, s'obtient en utilisant :

$$\Phi = \iint \overrightarrow{B(\theta)} \cdot \overrightarrow{dS}$$

Soit R : rayon d'alésage (diamètre intérieur d'un cylindre) statorique.

l_u : longueur utile de la machine suivant son axe de rotation.

$$\Phi = \iint \overrightarrow{B(\theta)} \cdot \overrightarrow{dS} = R \cdot l_u \int_{-\frac{\pi}{2P}}^{\frac{\pi}{2P}} B_{max} \cdot \cos(P\theta) d\theta$$

$$\Phi = R \cdot l_u \cdot \frac{B_{max}}{P} \cdot \sin(P\theta)$$

$$\Phi = R \cdot l_u \cdot \frac{B_{max}}{P} \cdot [\sin P \cdot \frac{\pi}{2P} - \sin(-P \cdot \frac{\pi}{2P})]$$

$$\Phi = 2 \cdot \frac{R \cdot l_u}{P} \cdot B_{max}$$

Etude du circuit d'induit :

On appelle généralement induit, le bobinage situé sur le rotor, ce bobinage est constitué de conducteurs parallèles à l'axe de rotation de la machine et qui sont régulièrement logés dans des encoches rotoriques. Les connexions frontales de ces conducteurs d'induit permettent de former un enroulement fermé sur lui-même et relié à intervalles réguliers aux lames de collecteur.

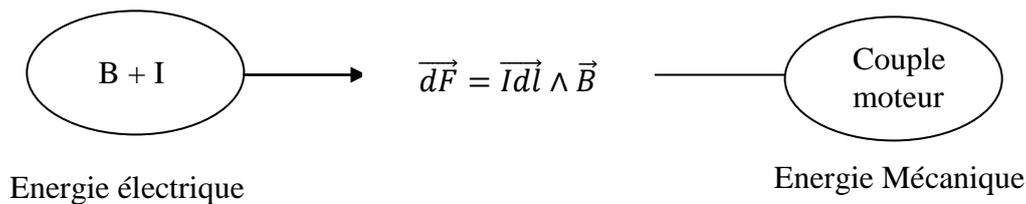
Principe de fonctionnement en Moteur – loi de Laplace :

Le fonctionnement en moteur de la MCC est basé sur le principe de la force de Laplace. En effet, un conducteur de longueur l parcouru par un courant I est plongé dans un champ magnétique d'induction \vec{B} , sera soumis à une force de Laplace tel que : $\vec{dF} = I \vec{dl} \wedge \vec{B}$.

$$\vec{F} = \int_{(l)} I \vec{dl} \wedge \vec{B} = I \int_{(l)} \vec{dl} \wedge \vec{B}$$

$$\vec{F} = I \vec{L} \wedge \vec{B} \Rightarrow F = BLI \sin\alpha$$

Pour $\vec{L} \perp \vec{B}$ la force est maximale $F=BLI$.



Rmq : Dans le cas où B ou I est nul ; cette force est évidemment nulle.

Principe de fonctionnement en générateur :

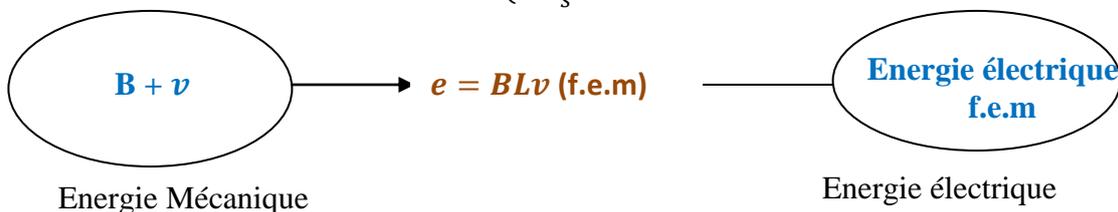
C'est la loi de Lenz-faraday qui est utilisé. En effet, un conducteur rectiligne de longueur (dl) placé dans un champ magnétique d'induction \vec{B} est se déplaçant à une vitesse \vec{v} à l'intérieur de celui-ci, induit un champ électrique \vec{E} tel que : $\vec{E} = \vec{v} \wedge \vec{B}$

La force électromotrice induite e est :

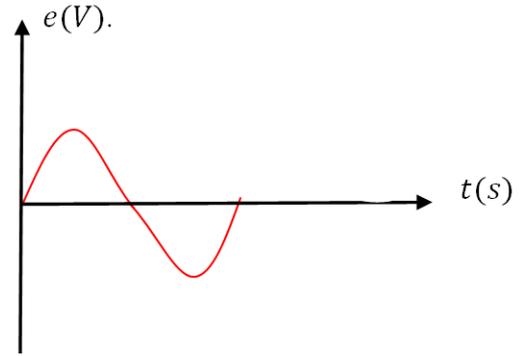
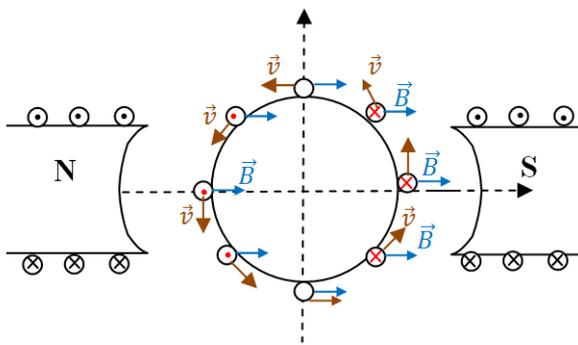
$$e = \int_{l_1}^{l_2} \vec{E} \cdot \vec{dl} = \int_{l_1}^{l_2} (\vec{v} \wedge \vec{B}) \cdot \vec{dl}$$

$$e = BLv \sin\alpha$$

Si ($\vec{L} \perp \vec{v}$) ; $\alpha = \frac{\pi}{2}$ donc on aura $e = BLv \begin{cases} e(V) \\ B(T) \\ v(\frac{m}{s}) \end{cases}$



Cas d'un conducteur rectiligne animé d'un mouvement circulaire uniforme :

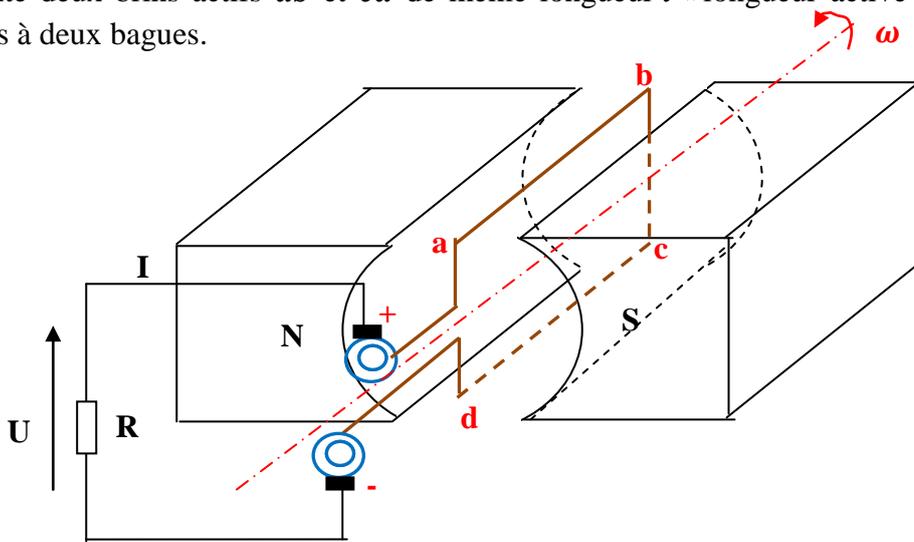


Rmq :

- La f.e.m $e(t)$ produite a une forme alternative sinusoïdale à cause du mouvement circulaire.
- Après un demi-tour ($\alpha = \pi$), le sens du courant est inversé.
- La force électromotrice s'oppose à la cause qui lui donne naissance.

a) F.E.M alternative (à l'intérieur de la machine) :

Considérons une spire mobile en rotation à l'intérieur d'un champ d'induction uniforme B , cette spire présente deux brins actifs ab et cd de même longueur l « longueur active », ses extrémités sont soudées à deux bagues.



- Sous les pôles Nord (N) et sud (S), on a respectivement :

$$\begin{cases} e_{ab} = B_n \cdot l \cdot v \\ e_{cd} = -B_n \cdot l \cdot v \end{cases}$$

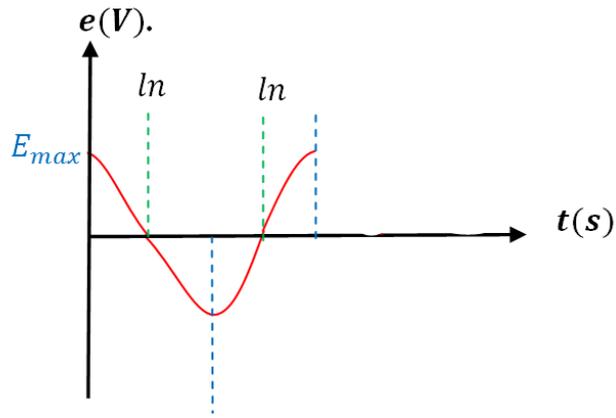
Pour $\theta = P\omega t$ ($P = 1$ pour notre exemple), on a :

$$\begin{cases} e_{ab} = B_{max} \cdot l \cdot v \cdot \cos\theta \\ e_{cd} = -B_{max} \cdot l \cdot v \cdot \cos\theta \end{cases}$$

On pose :

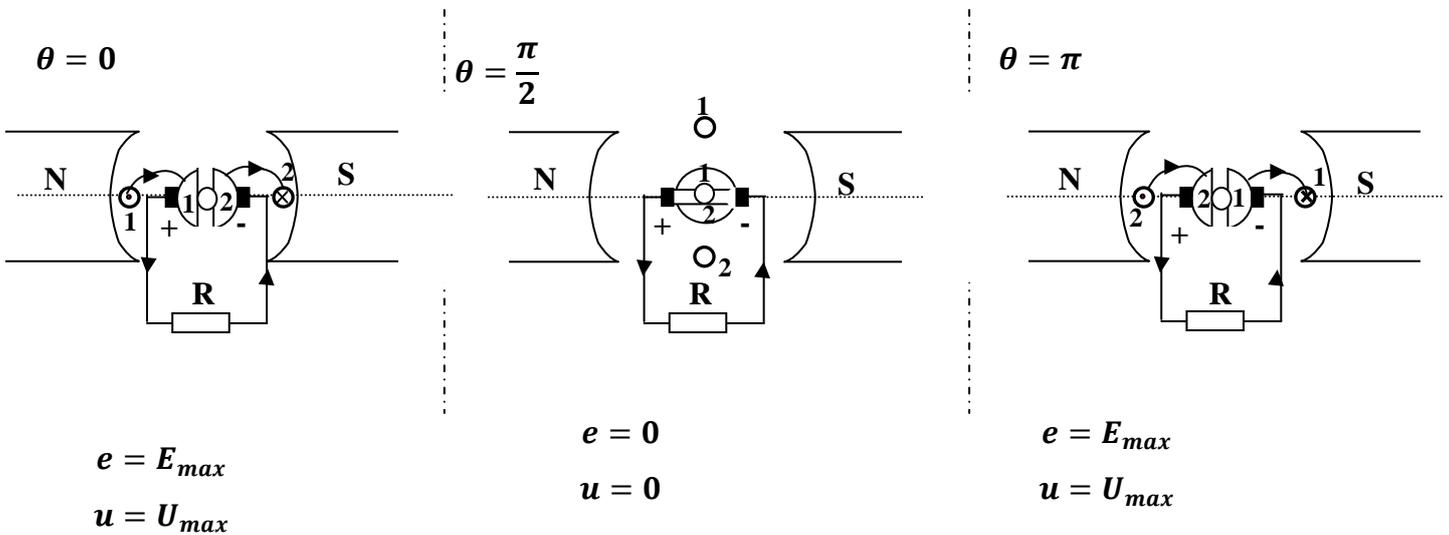
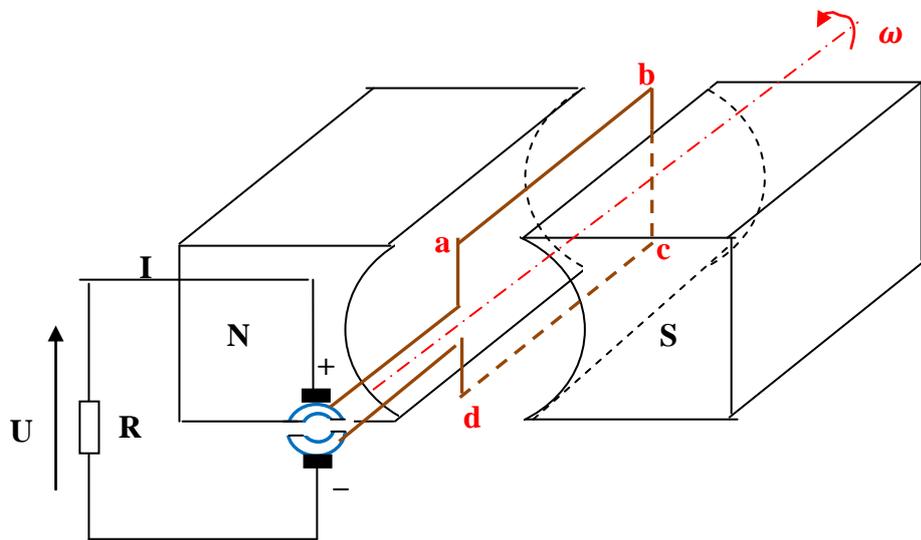
$$E_{max} = B_{max} \cdot l \cdot v$$

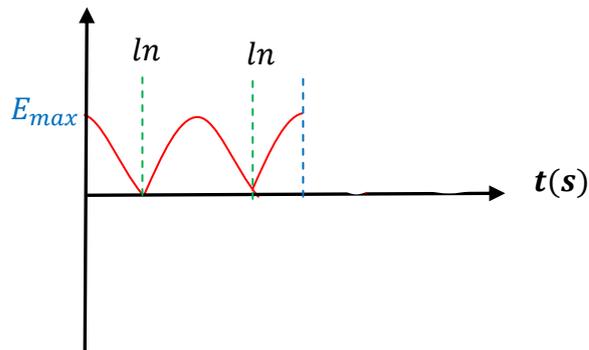
$$e = E_{max} \cos(\omega t)$$



b) Obtention d'une f.e.m unidirectionnelle :

Pour obtenir une f.e.m unidirectionnelle, on remplace les deux bagues, par demi-bagues en cuivre isolées entre elles et sur lesquelles frottent deux balais en charbon.





Rmq 1 :

Les deux demi-bagues ou lames (I et II) sur lesquelles sont soudées les extrémités des deux brins actifs *ab* noté 1 et *cd* noté 2, changent de balais (fixes) aux passages par la ligne neutre (axe interpolaire), on obtient un signal redressé dont l'ondulation varie entre 0 et E_{max} (O et U_{max} , 0 et I_{max} dans la résistance R).

Rmq2 :

On dit que les balais sont calés sur la ligne neutre, mais en réalité, ils sont disposés sur l'axe des pôles, et ce sont les conducteurs qui aboutissent aux lames de collecteur en contact avec les balais qui sont disposés sur la ligne neutre.

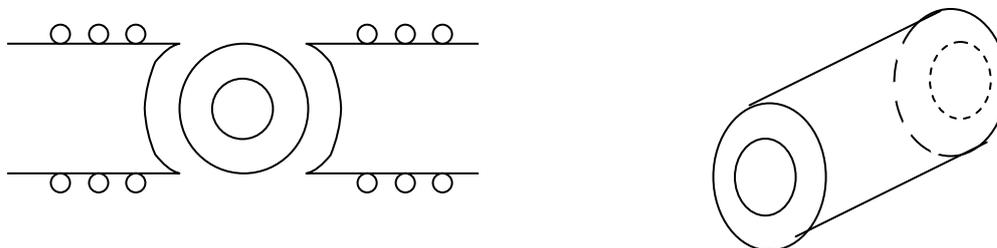
Production d'une f.e.m pratiquement continue :

Pour obtenir un signal proche d'un signal continu, il faut augmenter le nombre de conducteurs actifs et par conséquent le nombre d'encoches pour les logés et nombre de lames au collecteur.

Types d'induit :

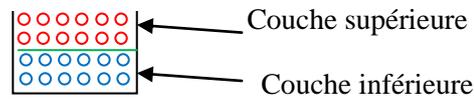
Dynamo en Gramme

Au début de la construction es MCC, le bobinage d'induit est formé d'une suite de spires qui sont bobinés autour d'un cylindre réalisé par un empilage de tôles. Cette forme est dite en anneaux.

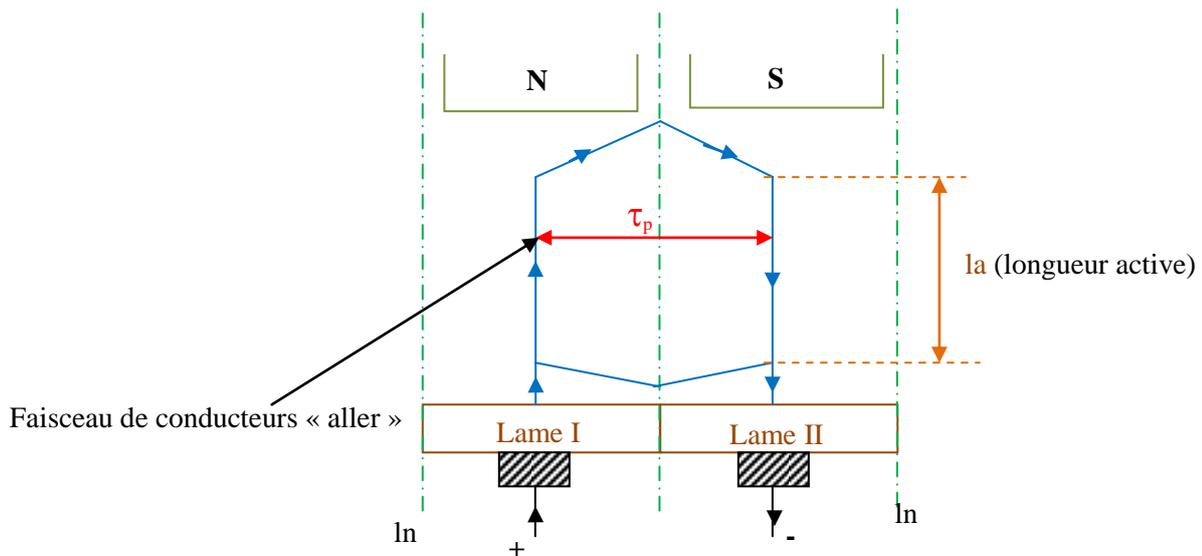


Dans ce type de bobinage, environ 40% seulement de bobinage joue un rôle dans la conversion d'énergie.

MCC à induit en Tambour : Actuellement, on utilise des enroulements dits en « Tambour » mis au point par l'ingénieur allemand « Siemens ». Dans ce cas on met en série les conducteurs placés sur la périphérie du Tambour (Rotor ou induit) dont tous les conducteurs sont utilisés, d'où l'avantage. Cet enroulement à deux couches ; Chaque encoche de l'induit comporte deux couches de conducteurs actifs.



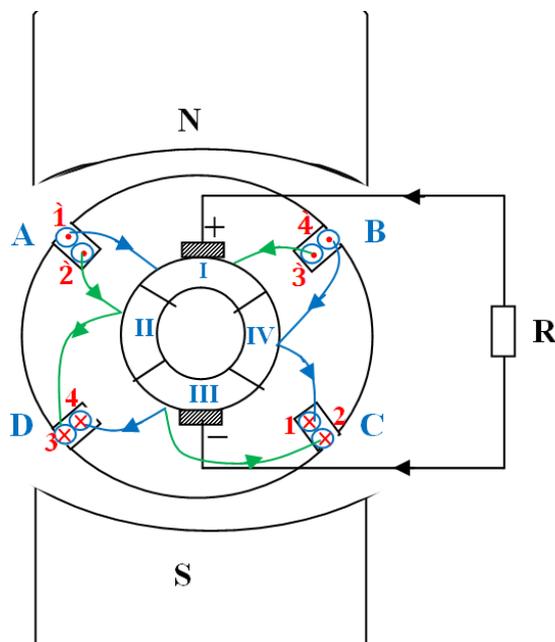
Représentation sous forme panoramique (développée) de l'enroulement d'induit :



- Un faisceau comporte n brins actifs
- La f.e.m totale est la somme des f.e.m de chaque brin.
- Pour avoir une f.e.m plus importante, il faut augmenter le nombre de brins actifs.

Exemple : F.E.M continue

Soit un induit avec un enroulement en tambour qui comporte 4 encoches ($K = 4$) [A, B, C, D]. $P = 1, K = 4$

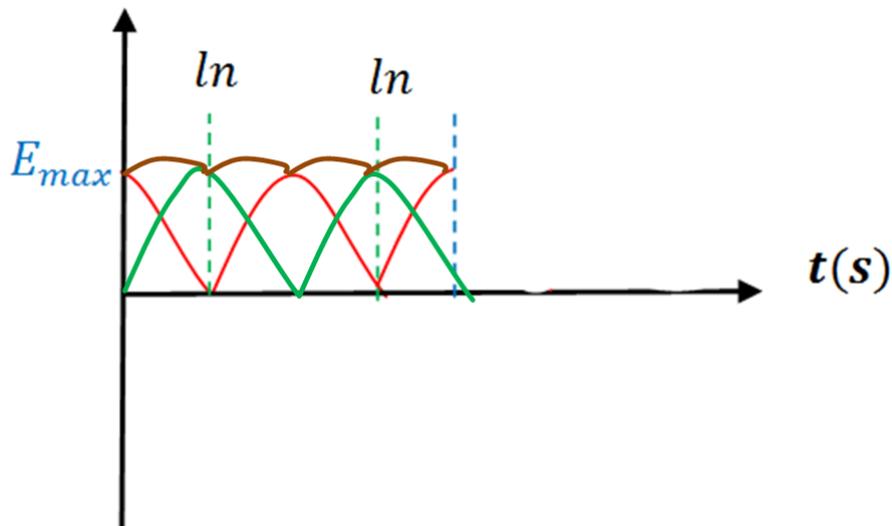


N.B : K nombres des encoches = nombres des lames au collecteur.

A l'instant initial : les encoches A et C sur la ligne neutre

⇒ la f.e.m des brins $1, \hat{1}, 2, \hat{2}$ sont nulles

la f.e.m des brins $1, \hat{1}, 2, \hat{2}$ sont maximales.



Rmq :

Une comparaison du signal obtenu par rapport au signal précédent (2 encoches, 2 brins) montre que lorsque on augmente le nombre d'encoches c-à-d le nombre de lames au collecteur, on augmente le nombre d'ondulations de la tension (du courant) mais en réduisant les amplitudes de ces tensions.

F.E.M d'induit d'une MCC :

F.E.M d'une voie d'enroulement :

On prend toujours l'exemple précédent : $P = 1, K = 4$.

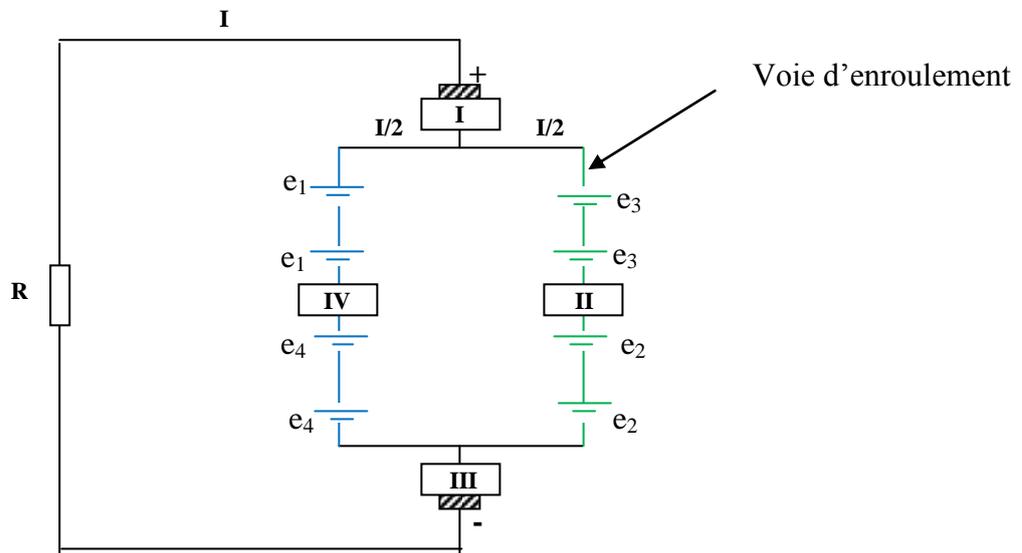
A un instant donné, on constate que les lames I et III sont en contact avec les balais respectifs (+) et (-) dans le sens générateur, tandis que les lames (IV) et (II) servent à la mise en série des f.e.m des conducteurs concernés.

- Chaque conducteur → ec

- La ligne des balais coupe l'enroulement d'induit en 2 voies d'enroulements identiques comprenant chacun 4 f.e.m (ec) correspondantes aux 4 conducteurs en série.

- Nous avons deux groupements en parallèle de deux séries de $(Nc/2)$ f.e.m

Nc : Nombre total de brins actifs de longueur l .



F.E. M d'induit :

On prend le cas général d'une machine ayant $2P$ pôles, $2a$ voies d'enroulements en parallèle.

a : Nombre de paires de voies.

Nc : Nombre de conducteurs d'induit.

l : Longueur active.

Chaque voie d'enroulement comporte $(Nc/2a)$ conducteurs en série.

La F.E.M totale d'induit :

$$E = e_1 + e_2 + e_3 + \dots + e_i + \dots = \sum_{i=1}^{Nc/2a} e_i$$

Soit :

$$E = \sum_{i=1}^{Nc/2a} B_i l v$$

$$\sum_{i=1}^{Nc/2a} B_i = B_{moy} \cdot \frac{Nc}{2a} \Rightarrow E = B_{moy} \cdot \frac{Nc}{2a} \cdot l v$$

Sachant que :

$$v = R \cdot \omega = R \cdot 2\pi n$$

v : Vitesse périphérique des conducteurs.

R : Rayon du rotor.

n : Vitesse de rotation (tr/s).

$$\tau'_p = \frac{\pi D}{2P} = \frac{2\pi R}{2P} = \frac{\pi R}{P}$$

$$v = 2P\tau'_p n$$

On obtient : $E = B_{moy} \cdot \tau'_p \frac{Nc}{2a} \cdot 2Pn = B_{moy} \cdot \tau'_p \frac{Nc}{2a} \cdot Pnl$

Où : $\phi_v = B_{moy} \cdot l \cdot \tau'_p$ (flux utile par pôle inducteur).

$$E = K \cdot n \cdot \phi_v \quad (\text{Valeur moyenne de la F.E.M redressée})$$

$$K = \frac{P}{a} \cdot Nc \quad (\text{Constante pour une machine donnée}).$$

Rmq :

Cette expression est celle de la f.e.m à vide (présence uniquement du flux inducteur ϕ , qui est dit « flux à vide ») quand le courant d'induit est nul.

Cette f.e.m est proportionnelle à la vitesse de rotation de l'induit (n), mais elle n'est pas proportionnelle au flux inducteur (courant inducteur, courant d'excitation) à cause du phénomène du à la situation des matériaux magnétiques.

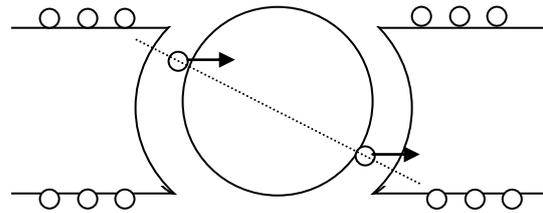
Couple magnétique :

a) *En utilisant la force de laplace :*

$$\vec{F} = \frac{I_a}{2a} \cdot \vec{l} \wedge \vec{B}$$

$$T_{ec} = F_t \cdot R = F \cdot OH = F \cdot R \cdot \cos\theta$$

$$T_{ec} = \frac{I_a}{2a} \cdot l \cdot B \cdot R \cdot \cos\theta \quad (\text{Couple de chaque conducteur})$$



Couple électromagnétique total :

$$T_e = Nc \cdot T_{ec} = Nc \cdot \frac{I_a}{2a} \cdot l \cdot B \cdot R \cdot \cos\theta$$

$$T_e = Nc \cdot \frac{I_a}{2a} \cdot l \cdot R \cdot B_n$$

$$\phi = B \cdot l \cdot \tau'_p = l \cdot \frac{2\pi R}{2P} \cdot B$$

$$\phi = \frac{l\pi RB}{P}$$

$$T_e = \frac{P}{a} \cdot \frac{Nc}{2\pi} \cdot \phi_{ch} \cdot I_a \quad (\text{J/rad})$$

b) *En utilisant la conservation d'énergie :*

$$Pe = E \cdot I_a$$

$$P_m = T_e \cdot \omega$$

$$Pe = P_m \Rightarrow E \cdot I_a = T_e \cdot \omega$$

$$T_e = \frac{E \cdot I_a}{\omega} = \frac{E \cdot I_a}{2\pi n}$$

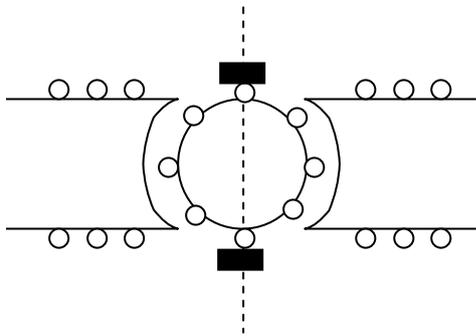
$$T_e = \frac{P}{a} \cdot \frac{Nc}{2\pi} \cdot \phi_{ch} \cdot I_a$$

Réaction magnétique d'induit :

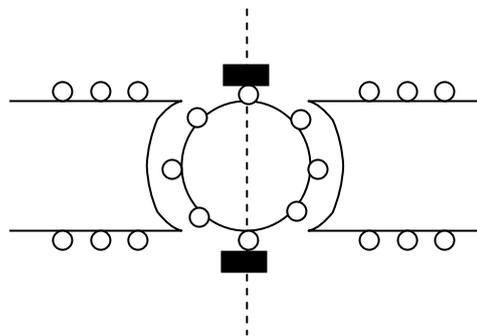
Nous avons considéré jusqu'à maintenant que le flux traversant la machine était du uniquement au circuit inducteur (« Flux par pôle » créé par le circuit du champ). Ceci n'est exact que lorsqu'il ne circule aucun courant I_a dans l'induit.

En effet, dès qu'il circule un courant dans l'induit c-à-d (pour une dynamo lorsqu'elle débite sur une charge et un moteur lorsqu'il entraine une charge mécanique), ce courant induit crée lui aussi un flux ; le flux résultant qui traverse la machine est alors constitué par la somme des deux flux.

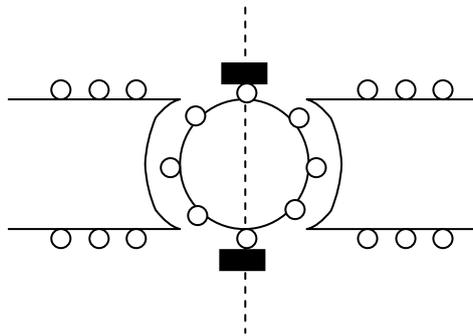
Définition : On appelle réaction magnétique d'induit l'action défavorable que les courants d'induit exercent sur le champ magnétique principal de la machine.



a) Champ magnétique principal ($I = 0, I_E = 0$)



b) Champ d'induit seul ($I = 0, I_E = 0$)



c) Champ résultant ($I = 0, I_E = 0$)

Soit : $n - n'$ ligne neutre théorique

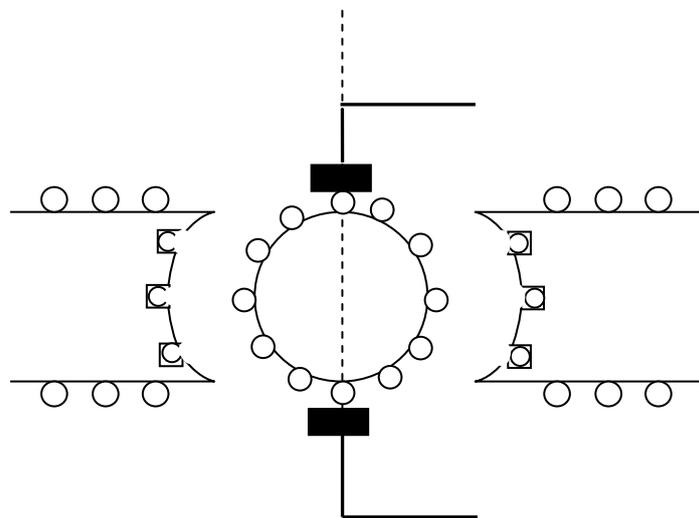
$E - E'$ ligne neutre magnétique.

- Si $I = 0$; $n - n'$ se confond avec $E - E'$.
- Si $I \neq 0$; à cause de la réaction magnétique, $E - E'$ se trouve décalé par rapport à la ligne théorique $n - n'$ et les balais se trouvent à l'extérieur de la ligne neutre.

- Pour collecter la f.e.m maximale en charge $I \neq 0$, il faudrait décaler la ligne des balais d'un angle α (dans la sens de la rotation pour un générateur et dans le sens inverse pour un moteur).
- Si on ne décale pas les balais, la f.e.m en charge E_c sera un peu plus faible que la f.e.m à vide E_v . La différence s'appelle la « chute de tension due à la réaction magnétique d'induit ».

Solution technique adoptée pour réduire les effets de la réaction magnétique d'induit :

Dans les MCC récentes, le décalage n'est pas utilisé. La solution généralement proposée pour réduire les effets de la réaction magnétique d'induit consiste à utiliser un enroulement fixe, dit de compensation ; cet enroulement est disposé à l'intérieur d'encoches pratiquées au niveau des pièces polaires et parcouru par le courant de l'induit I_a de sorte à produire un champ magnétique égal et de sens opposé à celui produit par la réaction magnétique d'induit transversale.



Equations de la tension aux bornes de l'induit :

A vide : $I = 0$, courant d'excitation $J \rightarrow \Phi_v$

Soit U : tension disponible aux bornes de la machine.

$$E_v = U = Kn\Phi_v \text{ [V] avec } K = P/a \cdot Nc$$

En charge : $\Phi_v(J)$, $\Phi_{ch}(I, J)$

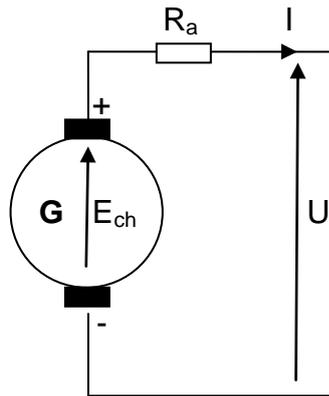
$$\Phi_{ch} < \Phi_v ; E_v = Kn\Phi_v$$

$$E_{ch} = Kn\Phi_{ch}$$

$$E_v - E_c = \epsilon(I) = Kn(\Phi_v - \Phi_{ch})$$

$\epsilon(I)$: Chute de tension due à la réaction magnétique d'induit.

1) **Génératrice :**



$I/2a$: Courant dans une voie

R_a : Résistance totale d'induit (résistance totale + résistance des contacts lames-balais).

$$E_{ch} = U + R_a \cdot I$$

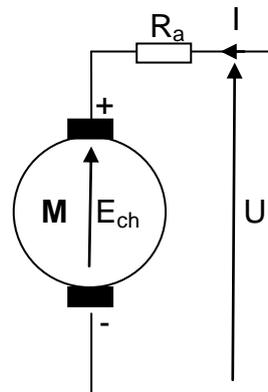
$$\Rightarrow U = E_v - R_a \cdot I - \varepsilon(I)$$

✦ Si on considère que :

R_a : Résistance totale d'induit

$$U = E_v - R_a \cdot I - \Delta U_b - \varepsilon(I)$$

2) **Moteur :**



$$U = E_v + R_a \cdot I - \varepsilon(I)$$

R_a : Résistance totale d'induit (résistance totale + résistance des contacts lames-balais).

✦ Si on considère que :

R_a : Résistance totale d'induit

$$U = E_v - R_a \cdot I - \Delta U_b - \varepsilon(I)$$