



# CONVERSION DE L'ENERGIE

## COURS

### CH.35 : CONVERSION ELECTROMECHANIQUE

**Plan** (Cliquez sur le titre pour accéder au paragraphe)

\*\*\*\*\*

CH.35 : CONVERSION ELECTROMECHANIQUE .....	1
I. BILAN DE PUISSANCE DE LA FORCE DE LORENTZ .....	1
I.1. PUISSANCE MECANIQUE DE LA FORCE DE LAPLACE .....	1
I.2. PUISSANCE ELECTRIQUE DE LA F.E.M D' INDUCTION .....	2
I.3. PUISSANCE NULLE DE LA FORCE DE LORENTZ : CONSEQUENCE .....	2
I.4. CONVERSION ELECTROMECHANIQUE ; REVERSIBILITE .....	2
II. APPLICATION A LA « MACHINE A COURANT CONTINU » .....	2
II.1. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT .....	2
II.2. F.E.M INDUITE ET COUPLE MOTEUR .....	3
II.3. M.C.C EN FONCTIONNEMENT MOTEUR .....	4
II.3.1. Mise en équations .....	4
II.3.2. Régime permanent .....	4
II.3.3. Régime transitoire .....	5
III. REALISATION DE CHAMPS MAGNETIQUES TOURNANTS .....	5
III.1. DISPOSITIF DE PRINCIPE .....	5
III.2. INTERACTION D'UN MOMENT MAGNETIQUE PERMANENT ET D'UN C.M.T ...	6
III.3. FONCTIONNEMENT EN ALTERNATEUR .....	7
III.4. FONCTIONNEMENT EN MOTEUR .....	7
III.4.1. Notion de synchronisme .....	7
III.4.2. Caractéristiques du moteur synchrone .....	8
IV. CONCLUSION .....	9

\*\*\*\*\*

## I. BILAN DE PUISSANCE DE LA FORCE DE LORENTZ

### I.1. PUISSANCE MECANIQUE DE LA FORCE DE LAPLACE

- On considère un milieu conducteur **neutre** où  $n$  est la densité volumique des porteurs **mobiles** de charge  $q$  (la densité volumique des charges **fixes**  $-q$  est également  $n$ ).
- Ce conducteur, placé dans un champ magnétique  $\vec{B}$ , est en mouvement par rapport au référentiel du laboratoire ( $R$ ) ; nous noterons :
  - ♦  $\vec{v}$  = vitesse d'un porteur mobile par rapport à ( $R$ )
  - ♦  $\vec{v}_1$  = vitesse d'un porteur mobile par rapport à ( $R_1$ ), lié au conducteur
  - ♦  $\vec{v}_e$  = vitesse d'entraînement **locale** de ( $R_1$ ) par rapport à ( $R$ )

• En admettant la loi de composition galiléenne des vitesses, on a :

$$\vec{j}_{(R)} = nq(\vec{v}_1 + \vec{v}_e) + n(-q)\vec{v}_e \Rightarrow \boxed{\vec{j}_{(R)} = nq\vec{v}_1 = \vec{j}_{(R_1)} = \vec{j}} \quad (\text{indépendant du référentiel})$$

• La force de Laplace s'exerçant sur le conducteur de volume ( $V$ ) est :  $\vec{F}_{Lap} = \iiint_V (\vec{j} \wedge \vec{B}) d\tau \Rightarrow$   
 la **puissance mécanique** fournie par la force de Laplace s'exerçant sur le conducteur s'écrit :

$$\boxed{P_m = \iiint_V (\vec{j} \wedge \vec{B}) \cdot \vec{v}_e d\tau}$$

### 1.2. PUISSANCE ELECTRIQUE DE LA F.E.M D' INDUCTION

- Nous savons que le conducteur mobile est le siège d'un champ induit :  $\vec{E}_i = \vec{v}_e \wedge \vec{B} \Rightarrow$

sur une portion de conducteur AB, la f.e.m d'induction est de la forme : 
$$e = \int_A^B (\vec{v}_e \wedge \vec{B}) \cdot d\vec{l}$$

- Pour un conducteur filiforme, la **puissance électrique** fournie par cette f.e.m s'écrit :

$P_e = e \times i = \int_A^B (\vec{v}_e \wedge \vec{B}) \cdot i d\vec{l}$ , avec  $e$  et  $i$  orientés dans le **même sens**.

La relation précédente se généralise en : 
$$P_e = \iiint_V (\vec{v}_e \wedge \vec{B}) \cdot \vec{j} d\tau$$

### 1.3. PUISSANCE NULLE DE LA FORCE DE LORENTZ : CONSEQUENCE

- Nous savons que la force de Lorentz ne travaille jamais ; dans le référentiel du laboratoire ( $R$ ), on peut donc écrire : 
$$P_{Lorentz} = 0 = \iiint_V nq[(\vec{v}_1 + \vec{v}_e) \wedge \vec{B}] \cdot (\vec{v}_1 + \vec{v}_e) d\tau$$

- En développant la relation précédente, on remarque la nullité des produits mixtes du type  $(\vec{v}_1 \wedge \vec{B}) \cdot \vec{v}_1$  ; il vient : 
$$0 = \iiint_V (nq\vec{v}_1 \wedge \vec{B}) \cdot \vec{v}_e d\tau + \iiint_V nq(\vec{v}_e \wedge \vec{B}) \cdot \vec{v}_1 d\tau \Rightarrow$$

$$0 = \iiint_V (\vec{j} \wedge \vec{B}) \cdot \vec{v}_e d\tau + \iiint_V (\vec{v}_e \wedge \vec{B}) \cdot \vec{j} d\tau \Rightarrow \boxed{P_m + P_e = 0} \quad (\text{puissances fournies})$$

### 1.4. CONVERSION ELECTROMECHANIQUE ; REVERSIBILITE

- La puissance nulle de la force de Lorentz a donc pour conséquence **l'égalité** (en valeur absolue) de la puissance mécanique de la force de Laplace et de la puissance électrique de la f.e.m d'induction : on parle de « **CONVERSION ELECTROMECHANIQUE** » parfaite.

- On peut distinguer 2 types de fonctionnement :

- ♦ **MOTEUR** ( $P_m > 0$  et  $P_e < 0$ ) : une source impose un courant  $i$  dans le circuit électrique ; une force de Laplace motrice apparaît :  $P_m > 0 \Rightarrow P_e = e \times i < 0 \Rightarrow e$  et  $i$  sont de **signe contraire**, on parle pour  $e$  de « force contre-électromotrice ».

- ♦ **GENERATEUR** ( $P_m < 0$  et  $P_e > 0$ ) : un système mécanique extérieur met en mouvement une partie du circuit électrique (barreaux, rotor...) ; une f.e.m d'induction est générée et, si le circuit électrique est fermé, fait circuler un courant  $i$  dans le **même sens**  $\Rightarrow P_e = e \times i > 0$ . L'apparition de  $i$  provoque une force de Laplace de puissance  $P_m < 0$  : on parle de « force résistante » ou de « couple résistant ».

- Pour résumer ces 2 possibilités, on dit qu'il y a « **REVERSIBILITE** » de la conversion électromécanique.

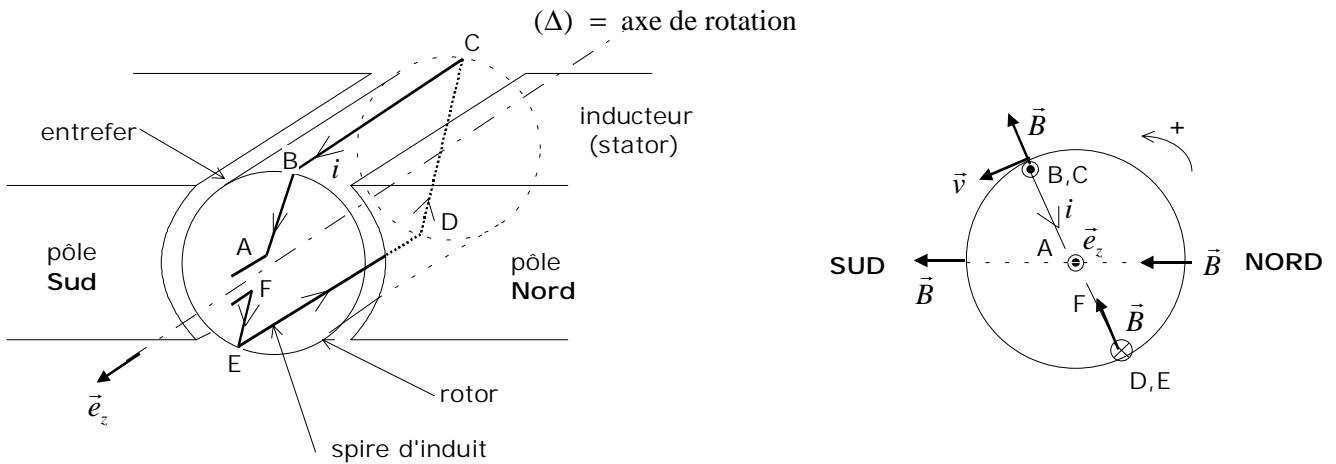
## II. APPLICATION A LA « MACHINE A COURANT CONTINU »

### II.1. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

- Un dispositif **INDUCTEUR** (aimants permanents, bobinages...) de forme adéquate permet d'engendrer un champ magnétique  $\vec{B}$  **radial** dans l'**entrefer** (= espace entre l'inducteur fixe, ou **STATOR**, et une partie mobile, le **ROTOR**).

- Dans des « encoches » ménagées à la périphérie du rotor, sont logées des **spires** conductrices raccordées les unes aux autres en série et/ou en parallèle : cet ensemble constitue un **enroulement d'induit**, ou « **INDUIT** » tout court.

- Dans un premier temps, nous allons raisonner sur une seule spire, avec les schémas de principe ci-dessous :



**Rq** : on notera  $L$  la longueur  $BC = DE$  d'une spire, et  $d = BE = CD$  son diamètre ; la vitesse d'un point à la périphérie du rotor sera donc :  $\vec{v} = \frac{d}{2} \omega \vec{e}_\theta$ , où  $\omega$  est la vitesse angulaire du rotor.

### II.2. F.E.M INDUITE ET COUPLE MOTEUR

- Sur les côtés BE et CD, le champ magnétique est colinéaire au courant  $\Rightarrow$  la force de Laplace y est nulle.

• Sur BC :  $\vec{F}_{Lap}(CB) = \int_C^B i d\vec{l} \wedge \vec{B} = iBL\vec{e}_{\theta,B}$

sur ED :  $\vec{F}_{Lap}(ED) = \int_E^D i d\vec{l} \wedge \vec{B} = iBL\vec{e}_{\theta,E}$  avec :  $\vec{e}_{\theta,E} = -\vec{e}_{\theta,B} \Rightarrow \boxed{\sum \vec{F}_{Lap} = \vec{0}}$

$\Rightarrow$  les actions extérieures agissant sur la spire se résume à un **couple** :  $\vec{C} = d\vec{e}_r \wedge iBL\vec{e}_\theta = iBLd\vec{e}_z$

- On remarque que  $B \times Ld$  est homogène à un **flux** (en gros, le flux à travers la spire considérée : dans la réalité, c'est un peu plus compliqué car le champ n'est pas partout radial et la spire ne se referme pas par des segments BE et DC parfaitement radiaux) ; on écrira alors :

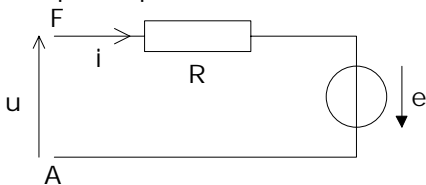
$\boxed{\vec{C} = \Phi \times i \vec{e}_z = \text{"couple moteur"}}$

et :

$\boxed{P_m = C \times \omega = \text{puissance mécanique fournie}}$

**Rq** :  $\Phi$  (en Weber) est la « **constante électromécanique** » de la machine à courant continu.

- Donnons un schéma électrocinétique équivalent de la spire, en négligeant, dans un premier temps, le phénomène d'auto-induction :



Le champ électrique induit  $\vec{E}_i$  s'écrit:

$$\vec{E}_i = \vec{v} \wedge \vec{B} = \pm \frac{d}{2} \omega B \vec{e}_z$$

$\Rightarrow$  la circulation de  $\vec{E}_i$  sur les côtés BE et DC est nulle ; on a donc :

$$e = \int_C^B -\frac{d}{2} \omega B \vec{e}_z \cdot d\vec{l} \vec{e}_z + \int_E^D \frac{d}{2} \omega B \vec{e}_z \cdot (-d\vec{l} \vec{e}_z) = -BLd\omega \Rightarrow \boxed{e = -\Phi \times \omega} \quad (\text{f.e.m induite dans la spire})$$

et la puissance électrique **fournie** par cette f.e.m :

$\boxed{P_e = e \times i = -\Phi \times \omega \times i}$