

# LP20 - Conversion de puissance electromécanique

Cléments (COLLÉAUX et DE LA SALLE)

9 juin 2020

## Niveau : PSI

## Bibliographie

⚡ <i>Électronique PSI Précis Bréal, Brenders</i>	→ Ouuuuuuffissime <3
⚡ <i>Électronique II Hprépa</i>	→ p.58 le cours, noté dans la leçon ⚡ <i>Hprépa</i>
⚡ <i>Électrotechnique Précis Bréal, Bréhat</i>	→ le cours complet aussi
⚡ <i>Électromagnétisme MP PC PSI PT Hprépa, Brébec</i>	→ Deux trois applications sur haut-parleur, MCC et moteur asynchrone p.211
⚡ <i>Électrotechnique IUT, Palermo</i>	→ Des trucs
⚡ <b>BUP 846</b>	→ Des OdG
⚡ <i>J'intègre PSI</i>	→ Chap. 25 - 26 - 27
⚡ Vidéo pour le triphasé	→ les joies des Internet
⚡ Autre vidéo (rail de LAPLACE)	→ les joies des Internets

## Prérequis

- Induction
- Champ électromoteur
- Loi de Laplace

## Expériences



## Table des matières

<b>Table des matières</b>	<b>1</b>
<b>1 Principe : le rail de LAPLACE</b>	<b>4</b>
1.1 Observations . . . . .	4
1.2 Modèle . . . . .	4
1.3 Bilan de puissance . . . . .	4
1.4 Réversibilité de la conversion . . . . .	6
<b>2 Machine à courant continu</b>	<b>7</b>
2.1 Description . . . . .	7
2.2 Mise en équations . . . . .	9
2.3 Modes de fonctionnement . . . . .	11
2.4 Circuits électriques équivalents . . . . .	11
2.5 Point de fonctionnement . . . . .	12
2.6 Rendement . . . . .	14
<b>3 Machine synchrone</b>	<b>16</b>

<b>3.3. Machine à courant continu</b>	
Structure d'un moteur à courant continu à pôles lisses.	Décrire la structure d'un moteur à courant continu bipolaire à excitation séparée : rotor, stator, induit, inducteur.
Collecteur.	Par analogie avec le moteur synchrone, expliquer que le collecteur établit le synchronisme entre le champ statorique stationnaire et le champ rotorique quelle que soit la position angulaire du rotor.
Couple et $f_{cem}$ .	<p>Citer l'expression du moment du couple <math>\Gamma = \Phi i</math>, établir l'expression de la <math>f_{cem}</math> induite <math>e = \Phi \Omega</math> par un argument de conservation énergétique.</p> <p>Décrire qualitativement les pertes existant dans une machine réelle : pertes cuivre, pertes fer, pertes mécaniques.</p> <p>Établir les équations électrique et mécanique. Tracer la caractéristique <math>(\Omega, \Gamma)</math> à tension d'induit constante. Analyser le démarrage d'un moteur entraînant une charge mécanique exerçant un moment <math>-f \cdot \Omega</math>.</p> <p><b>Mettre en œuvre un moteur à courant continu.</b></p>
Fonctionnement réversible.	Décrire les conditions d'utilisation de la machine à courant continu en génératrice. Choisir des conventions d'orientation adaptées.
Applications.	Citer des exemples d'application de la machine à courant continu.

## Programme PSI

<b>3.2. Machine synchrone</b>	
Structure d'un moteur synchrone à pôles lisses et à excitation séparée.	Décrire la structure d'un moteur synchrone diphasé et bipolaire : rotor, stator, induit, inducteur.
Champ magnétique dans l'entrefer.	Pour une machine de perméabilité infinie à entrefer constant, exprimer le champ magnétique dans l'entrefer généré par une spire passant dans deux encoches opposées. Expliquer qualitativement comment obtenir un champ dont la dépendance angulaire est sinusoïdale dans l'entrefer en associant plusieurs spires décalées.
Champ glissant statorique.	Justifier l'existence d'un champ glissant statorique lorsque les deux phases sont alimentées en quadrature.
Champ glissant rotorique.	Justifier l'existence d'un champ glissant rotorique associé à la rotation de l'inducteur.
Énergie et couple.	Exprimer l'énergie magnétique totale stockée dans l'entrefer en fonction de la position angulaire du rotor.  Calculer le moment électromagnétique s'exerçant sur le rotor en exploitant l'expression fournie $\Gamma = \partial E / \partial \theta$ .

Condition de synchronisme.	Justifier la condition de synchronisme entre le champ statorique et le champ rotorique afin d'obtenir un moment moyen non nul.  Discuter qualitativement la stabilité du système en fonction du déphasage entre les deux champs glissants.  Identifier la difficulté du démarrage d'un moteur synchrone, décrire qualitativement le principe de l'autopilotage.
----------------------------	---

Modèle électrique de l'induit.	En admettant les expressions des coefficients d'inductance, établir les équations électriques vérifiées par les phases de l'induit et donner les représentations de Fresnel associées.  À l'aide d'un bilan énergétique où seules les pertes cuivre sont envisagées, justifier l'égalité entre la puissance électrique absorbée par les $f_{cem}$ et la puissance mécanique fournie.
Fonctionnement réversible.	Décrire les conditions d'utilisation de la machine synchrone en alternateur.
Applications.	Citer des exemples d'application de la machine synchrone.

# Introduction

insister sur l'intérêt de cette conversion

## 1 Principe : le rail de LAPLACE

### 1.1 Observations

#### Manip' : Rail de Laplace

Rails de Laplace + aimant en U + galvanomètre (courant  $\mu\text{A}$  à aiguille avec zéro au milieu). On fait bouger le rail dans un sens, puis dans l'autre et on voit l'aiguille aller dans un sens puis dans l'autre. On parle de **mode génératrice** (on verra pourquoi)

Ce phénomène s'explique qualitativement grâce à la loi de Lenz. En effet en déplaçant le conducteur mobile on modifie la surface du circuit et donc le flux de  $\mathbf{B}$  à travers le circuit, ce qui engendre l'apparition d'une force électromotrice (noté fem) et donc d'un courant dans le circuit. Ce courant crée à son tour un champ magnétique  $\mathbf{B}'$  qui s'oppose au champ magnétique qui lui a donné naissance.

Wahou mais c'est ouf, on arrive à obtenir de l'énergie électromagnétique avec de l'énergie mécanique, qu'est-ce donc que cette sorcellerie ?

Faire le schéma équivalent dès maintenant ?

| *Regardons ça de manière plus quantitative !*

### 1.2 Modèle

↪ *Brenders, p.122*

On rappelle la définition du champ électromoteur ↪ *LP21* :

#### Définition : Champ électromoteur

Une portion de conducteur, mobile à la vitesse  $\mathbf{V}$  dans le référentiel d'étude  $\mathcal{R}$  soumis à un champ magnétique permanent  $\vec{B}$  est le siège d'un champ électromoteur  $\mathbf{E}_m$  dont la circulation sur le conducteur est la fem induite :

$$\mathbf{E}_m = \mathbf{V} \wedge \mathbf{B}$$

On oriente le circuit (c'est important) dans le sens du courant créé (règle de la main droite) et on calcule la fem induite avec le champ électromoteur  $\mathbf{E}_m$ . On trouve une fem  $E$  dans le même sens que le courant  $i$ , c'est la **convention générateur**. En rajoutant la résistance  $R$  du rail, on obtient le modèle électrique équivalent du rail de Laplace en fonctionnement génératrice.

### 1.3 Bilan de puissance

↪ *Brenders, p.123*

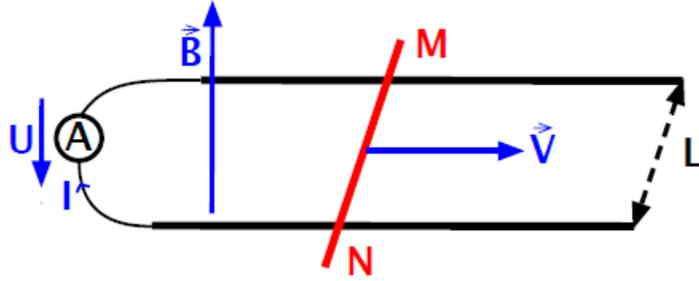


FIGURE 1.1 – Rail de Laplace en mode génératrice

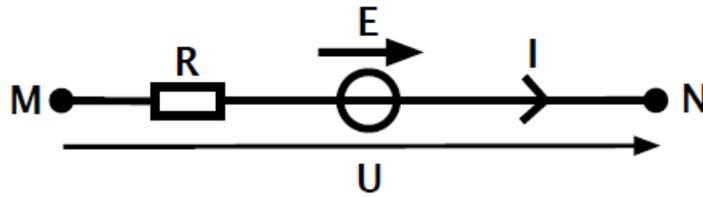


FIGURE 1.2 – Modèle électrique équivalent du rail de Laplace en fonctionnement génératrice - Convention générateur

- la vitesse des porteurs de charge (si y a une tension de créée c'est que les électrons bougent) est noté  $\mathbf{v}$
- la vitesse du rail est notée  $\mathbf{V}$
- le champ magnétique est noté  $\mathbf{B} = B\mathbf{u}_z$
- champ électrique NUL
- on se place dans le référentiel  $\mathcal{R}$  du laboratoire, supposé galiléen
- on néglige les pertes par frottements du rail

Les électrons bougent à la vitesse  $\mathbf{v} + \mathbf{V}$ . Avec le champ  $\mathbf{B}$ , ils sont donc soumis à la force de Lorentz :

$$\mathbf{F}_L = (-e(\mathbf{v} + \mathbf{V}) \times \mathbf{B})$$

ce qui correspond donc à la puissance  $\mathcal{P}$  :

$$\begin{aligned} \mathcal{P} &= [(-e(\mathbf{v} + \mathbf{V}) \times \mathbf{B}) \cdot (\mathbf{v} + \mathbf{V})] \underset{\substack{= \\ \uparrow \\ \text{géométriquement}}}{=} 0 \\ \mathcal{P} &= (-e\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{V} + (-e\mathbf{V} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{v} = 0 \\ \mathcal{P} &= (-e\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{V} + (-e\mathbf{V} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{v} = 0 \\ \mathcal{P} &= \underbrace{(-e\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{V}}_{\mathcal{P}_m} + \underbrace{(-e\mathbf{V} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{v}}_{\mathcal{P}_e} = 0 \\ \mathcal{P} &= \mathcal{P}_m + \mathcal{P}_e = 0 \end{aligned}$$

On va donc s'intéresser à ces deux puissances (mais après un léger goûter) :

- :  $\mathcal{P}_m$  :

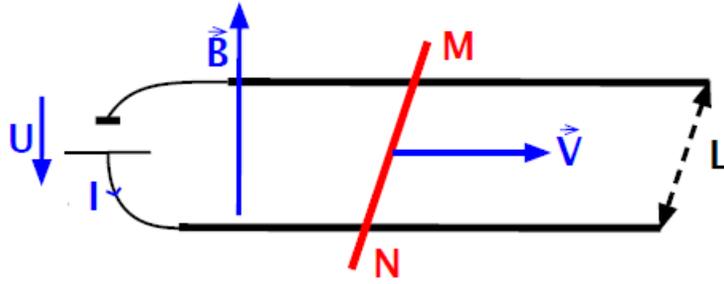


FIGURE 1.3 – Rail de Laplace en mode moteur

$\mathcal{P}_m = (-e\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{V}$  est la puissance associée à la force  $\mathcal{F}_L = -e\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  qui est colinéaire à  $\mathcal{V}$  (faire le raisonnement avec les projections selon les axes). Il semble donc qu'il s'agit de cette force qui fait bouger le rail. Attention cependant, la force dont on parle est la force de Laplace qui s'applique sur les seuls électrons, pour comprendre qu'il s'agit de cette force qui fait bouger le rail, il faut un petit raisonnement.

Les électrons sont liés au réseau cristallin (même dans la théorie du GP d'électrons, le rail est pas un conducteur parfait, il y a donc des chocs électrons/réseau) et donc ne peuvent s'en extraire. En contrepartie, selon la troisième loi de Newton, le réseau exerce sur les électrons la force  $-\mathbf{F}_L$ . Par conséquent, la quantité de mouvement associée à  $\mathbf{F}_L$  est transférée au réseau. Le bilan complet se traduit alors par un mouvement macroscopique du rail (bien dire que ce mouvement est causé par l'impulsion donnée au réseau par les électrons).

On peut aussi dire qu'il y a eu transfert d'énergie électrique (associée au mouvement des électrons) en énergie mécanique (associée au mouvement du rail) : c'est la **conversion électromécanique de la puissance** (électromécanique = électro + mécanique).

• :  $\mathcal{P}_e$  :

$\mathcal{P}_e = (-e\mathbf{V} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{v}$  est la puissance associée à la force  $-e\mathbf{V} \times \mathbf{B}$  qui est dirigée selon l'axe du conducteur : c'est elle qui met en mouvement les électrons *dans le bon sens* et donne ainsi lieu à une puissance de nature électrique. Et cette puissance électrique est créée à la base par la force  $-e\mathbf{V} \times \mathbf{B}$  qui est une force due au mouvement du rail, donc à son énergie mécanique. On a cette fois-ci le transfert inverse : transfert d'énergie mécanique en énergie électrique : c'est encore la **conversion électromécanique de la puissance**

Ainsi, l'équation  $\mathcal{P}_m + \mathcal{P}_e = 0$  résume la conversion de la puissance électromécanique ayant lieu à chaque instant puisque  $\mathcal{P}_m = -\mathcal{P}_e$ .

| *Mais ça a l'air de marcher dans les deux sens!*

## 1.4 Réversibilité de la conversion

### Manip' : Mode moteur

On fait l'expérience inverse, le rail de Laplace en mode moteur.

Wahou trop bien (j'en ai si marre de cette leçon c'est terrible)

En fonctionnement moteur l'ampèremètre est remplacé par une source de tension continue  $U$ . Or pour que la force de Laplace entraîne le conducteur mobile dans la direction de  $\mathbf{V}$  il faut que le courant  $I$  soit

dans le sens opposé du fonctionnement générateur ainsi la fem  $E$  sera dans le sens opposé au courant  $I$  dans ce mode de fonctionnement, c'est la **convention récepteur**. Dans cette convention la puissance  $\mathcal{P}_e$  devient  $\mathcal{P}_e = -EI$  car  $-E$  et  $I$  sont orienté dans le même sens ↗ *Blenders, p.126* . Le schéma électrique équivalent des rails de Laplace en fonctionnement moteur est :

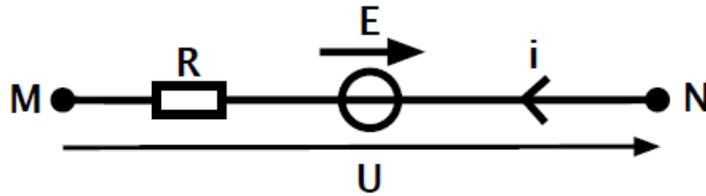


FIGURE 1.4 – Modèle électrique du rail de Laplace en fonctionnement moteur - Convention récepteur

## 2 Machine à courant continu

### Historique

Première génératrice par PIXXI en 1832 puis AMPÈRE (1775 - 1836) suggère un dispositif de redressement pour créer un courant continu. La première MCC telle que nous les connaissons viennent de 1871 par Gramme. Les machines à courant continu ont tout d'abord été largement utilisées, même les premiers TGV (1981) utilisaient des MCC (WIKIPÉDIA) pour des tensions 1500 V. Ensuite on a utilisé des machines synchrones, mais aujourd'hui c'est full asynchrone.

### Applications

On les a utilisé pour le TGV mais aujourd'hui on peut encore s'en servir pour les démarreurs, tramway ou drones...

### 2.1 Description

↗ *Blenders p.127*

↗ *Hprépa p.75*

L'idée est de se servir de la conversion précédemment établie pour transformer une énergie électrique en énergie mécanique afin de faire tourner un moteur. La machine à courant continu peut se schématiser comme suit :

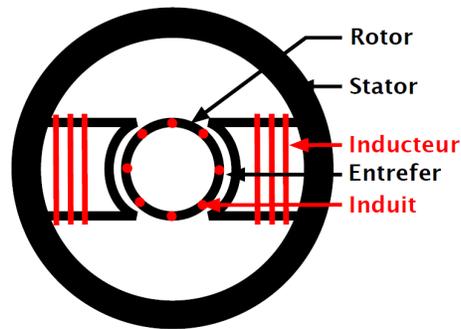


FIGURE 2.1 – Représentation schématique des différents composants de la MCC

Les composants sont les suivants :

**Stator** Partie fixe, suffisamment massive pour ne pas être entraînée

**Rotor** Partie mobile solidaire de l'arbre mécanique, il est relié au stator par des paliers

**Inducteur** Circuit électrique placé sur le stator : il constitue la source de champ magnétique (électroaimant)

**Induit** Circuit électrique soumis au champ magnétique et placé sur le rotor

**Entrefer** Espacement entre l'inducteur et l'induit, il doit être suffisamment faible pour optimiser le couplage (quelques millimètres typiquement)

**Balais et lames** Permettent l'alimentation de l'induit par un circuit externe

### Rôle du fer

Le flux magnétique est canalisé par le fer afin que le champ soit toujours radial et amplifié, par rapport à un milieu tel que l'air.

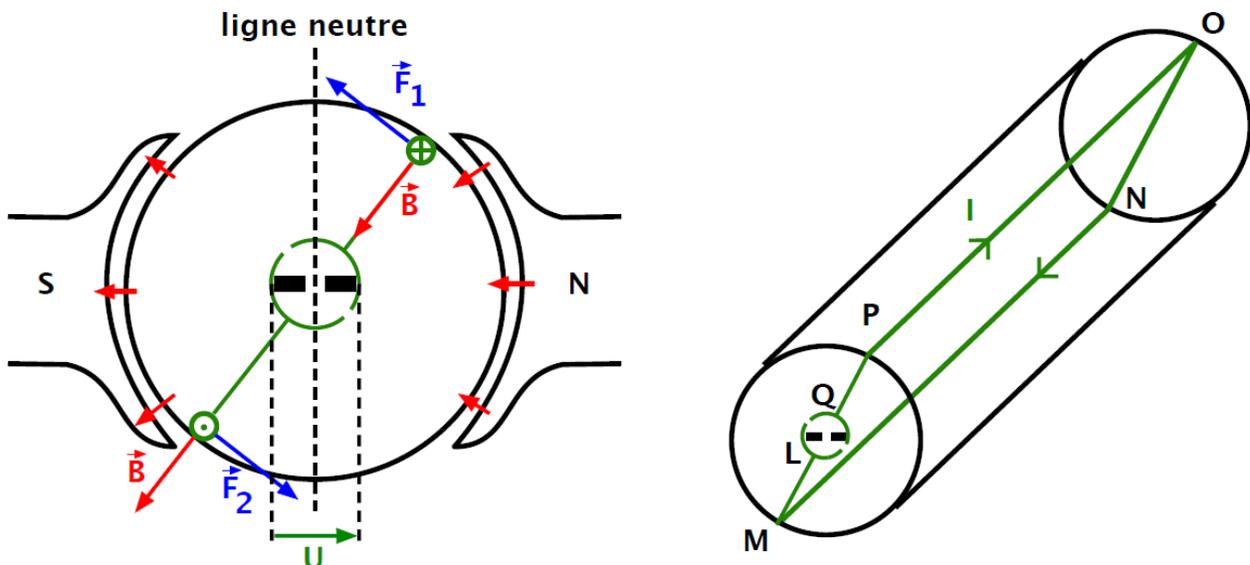


FIGURE 2.2 – Étude qualitative de l'action du champ magnétique sur une spire. Attention, les spires devraient plutôt être représentées dans l'entrefer... En effet le champ  $\vec{B}$  n'est radial que dans l'entrefer, pas en tout point du rotor ! Ceci est dû à la grande différence de perméabilité entre l'air et le ferro qui laisse les lignes localement orthogonales à la surface.

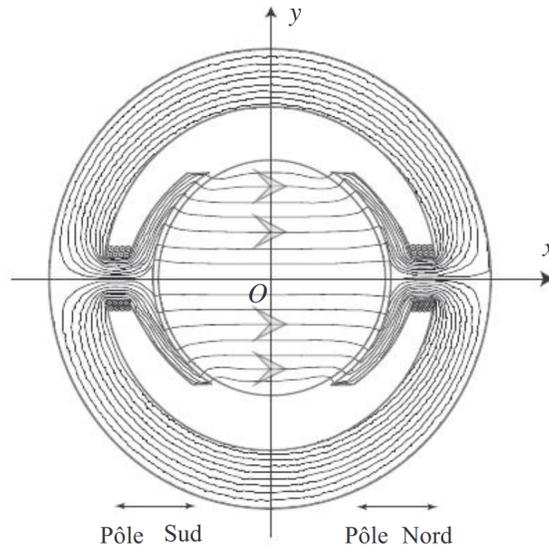


FIGURE 2.3 – Il est important de remarquer que le champ magnétique n'est pas radial en tout point du rotor ! Ceci n'est vrai que dans l'entrefer, et c'est donc là qu'on doit placer les spires. Extrait du *⚡ J'intègre PSI*

L'induit est constitué de plusieurs spires telles que le courant qui les parcourt est orthogonal au champ magnétique créé. Ainsi chaque côté de la spire va subir une force, toujours orthogonale à la spire. Ces deux forces sont (par symétrie) opposées

$$\mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 = \mathbf{0}$$

Il n'en résulte donc aucun déplacement global du moteur (encore heureux). Par contre on comprend que ces forces contribuent à la création d'un couple non nul sur la spire, d'où le mouvement de rotation.

### BIEN ABUSER DE SCHÉMAS ET DE RÈGLE DE LA MAIN DROITE.

Notons au passage que les balais et lames au centre permettent la création d'une différence de potentiel entre chaque branche de la spire et donc le passage d'un courant. Ainsi lorsque celle-ci vient à franchir la ligne neutre, le sens du courant est inversé et donc la force continue à pousser dans le bon sens ! S'ils n'avaient pas été là, la force aurait été inversée au passage de la ligne neutre et donc la contribution des spires d'un côté de la ligne compenserait totalement la contribution des spires de l'autre côté. Il en résulterait un couple nul.

## 2.2 Mise en équations

⚡ *Brenders p.128*

⚡ *Brébec p.215*

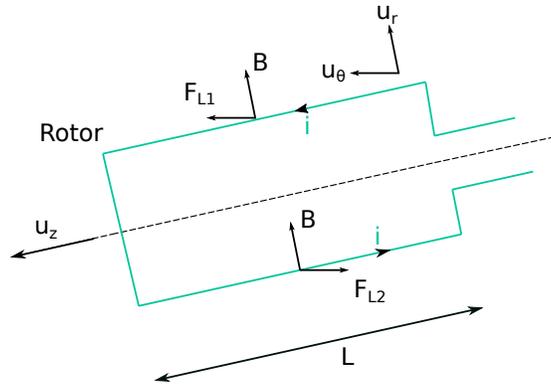


FIGURE 2.4 – Étude du couple exercé sur une spire

La force subie par un côté de la spire est

$$\mathbf{F}_{1,2} = BIl \mathbf{e}_\theta$$

On a vu que la somme des deux forces s'annulait mais le couple exercé par chacune d'elle est identique, de sorte que le couple total s'écrive :

$$\mathbf{\Gamma} = 2R\mathbf{e}_r \times \mathbf{F} = 2BRIl \mathbf{e}_z$$

On trouve alors que le couple exercé est **proportionnel** au courant  $I$  de l'induit. C'est tout l'intérêt de la MCC : on peut contrôler le couple en ajustant ce courant.

$$\mathbf{\Gamma} = \phi_0 I \mathbf{e}_z$$

On remarque que la constante de proportionnalité est homogène à un flux magnétique. CE N'EST PAS le flux du champ magnétique à travers la spire, puisque ce dernier est nul.

Puisque l'on traduit une conversion de puissance, étudions les deux termes mis en jeu. Tout d'abord, la puissance mécanique s'exprime en faisant intervenir la vitesse de rotation angulaire de l'induit  $\Omega$

$$\mathcal{P}_m = \mathbf{\Gamma} \Omega$$

#### Définition : Force électromotrice d'induction

De plus la puissance électrique doit faire intervenir une tension, que l'on notera en  $E$  et appelée **force électromotrice d'induction** telle que

$$\mathcal{P}_e = \mathcal{P}_m \implies EI = \mathbf{\Gamma} \Omega$$

On a alors

$$E = \phi_0 \Omega$$

Si le courant contrôle le couple, c'est la tension qui sélectionne la vitesse de rotation !

Le compromis mécanique Couple / Vitesse de rotation est exactement traduit en terme de compromis Courant / Tension. Pour tourner des arbres lourds, on ne pourra pas aller très vite... Il faudra donc utiliser de forts courants pour peu de tension.

## 2.3 Modes de fonctionnement

🔗 *Brenders p.131*

Il existe deux modes de fonctionnement :

**Moteur** On transforme la puissance électrique en puissance mécanique  $EI > 0$

**Génératrice** L'inverse  $EI < 0$

Ainsi il existe quatre possibilités en fonction des signes de  $\Omega$  (ou  $E$ ) et  $C$  (ou  $I$ )

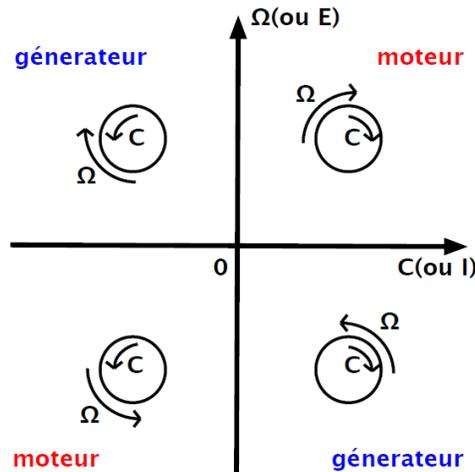


FIGURE 2.5 – Deux modes de fonctionnement représentés dans les quadrants de l'espace  $(C, \Omega)$  (ou  $(I, E)$ )

### Démarrage

On remarque qu'au démarrage,  $\Omega = 0 \implies E = 0$  donc  $U = RI$  et comme généralement  $R$  est faible, on peut atteindre des courants très élevés qui peuvent endommager les circuits. Il faut donc augmenter  $U$  progressivement !

## 2.4 Circuits électriques équivalents

🔗 *Brenders p.132*

### Bilan de puissance

Ça peut être bien de foutre un bilan de puissance explicitement avant de l'utiliser oklm.

Cette définition est posée dans le cas parfait où l'on néglige les pertes ohmiques... Dans un cas plus général,

$$\mathcal{P}_e = UI \quad \text{avec} \quad U = E + Ri = \phi\Omega$$

Donc on peut modéliser le circuit de l'induit ainsi :

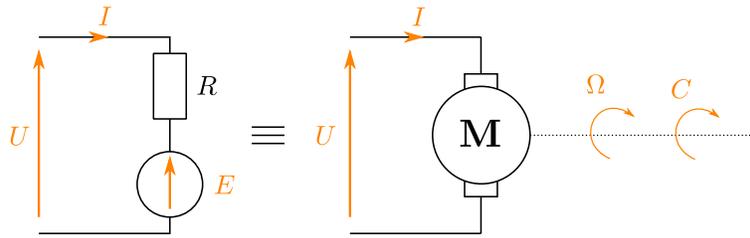


FIGURE 2.6 – Circuit équivalent de l'induit en mode moteur.

Mais ici on a considéré un moteur, pour une génératrice, c'est l'inverse : la présence d'un couple et d'une vitesse de rotation créer un courant ainsi qu'une tension :

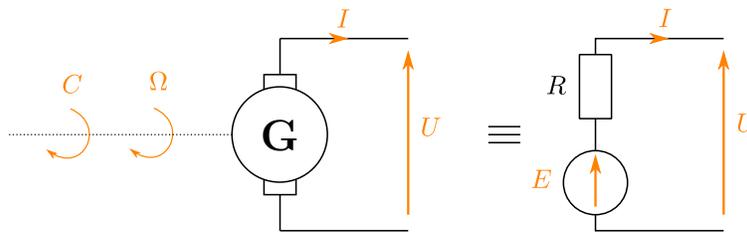


FIGURE 2.7 – Circuit équivalent de l'induit en mode génératrice. On peut typiquement une résistance comme charge.

On peut par exemple imaginer lier un moteur à une seconde machine, débittant dans un charge  $R_C$  :

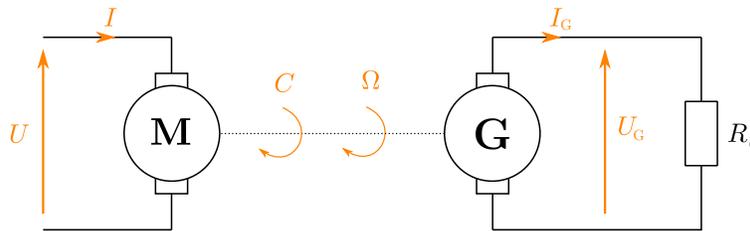


FIGURE 2.8 – Moteur lié à une génératrice débittant dans une charge.

## 2.5 Point de fonctionnement

### Version Brenders (simple izi win)

➤ *Brenders p.134*

On a les équations

$$\begin{cases} C = \phi_0 I \\ U = \phi_0 \Omega + RI \end{cases} \implies C = \frac{\phi_0 U}{R} - \frac{\Omega}{R}$$

Et de plus dans un problème, il est souvent donné le couple résistant en fonction de la vitesse de rotation  $C_r(\Omega)$ , donc il ne reste qu'à trouver dans le plan  $(\Omega, C)$  l'intersection entre  $C(\Omega)$  et  $-C_r(\Omega)$  (couples opposé en régime permanent)

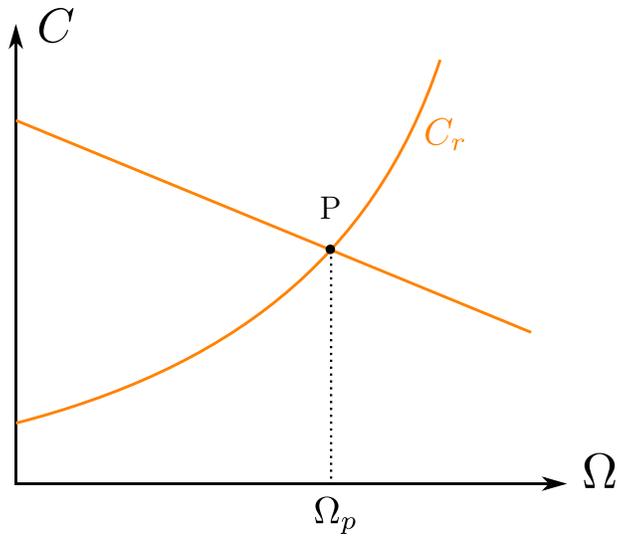


FIGURE 2.9 – Recherche graphique du point de fonctionnement de la MCC.

Remarquons que l'on a représenté seulement le quadrant  $C > 0, \Omega > 0$  (donc moteur). Mais techniquement, le point de fonctionnement peut nous dire si la machine fonctionne en moteur ou bien en génératrice, en fonction du quadrant dans lequel se trouve le point de fonctionnement.

### Exo

Si on veut ne pas traiter la suite, trouver un exo dans le Précis ou n'importe où d'ailleurs pour illustrer tout ce qu'on vient de dire. D'ailleurs on peut même directement présenter le point de fonctionnement dans un exemple précis. Par exemple avec un ventilateur

$$C_r = k\Omega^2$$

## Version Hervé (tmtc il est cho)

Un convertisseur électro-mécanique est un quadripôle caractérisé par 4 variables :

- 2 électriques  $E$  et  $I$
- 2 mécaniques  $\Gamma$  et  $\Omega$

Définir un point de fonctionnement signifie déterminer ces 4 grandeurs. Il nous faut donc 4 équations. On a déjà 2 équations intrinsèques

$$\begin{cases} E = \phi_0 \Omega \\ \Gamma = \phi_0 I \end{cases}$$

Pour le reste, on n'a qu'à supposer qu'on fixe la tension de l'induit ainsi que le couple de sortie (égal au couple résistant en régime permanent) :

$$\begin{cases} U = \phi_0 \Omega + RI = \text{cste} \\ \Gamma = -C_r = \text{cste} \end{cases}$$

Ces équations nous permettent de tracer le réseau de caractéristiques :

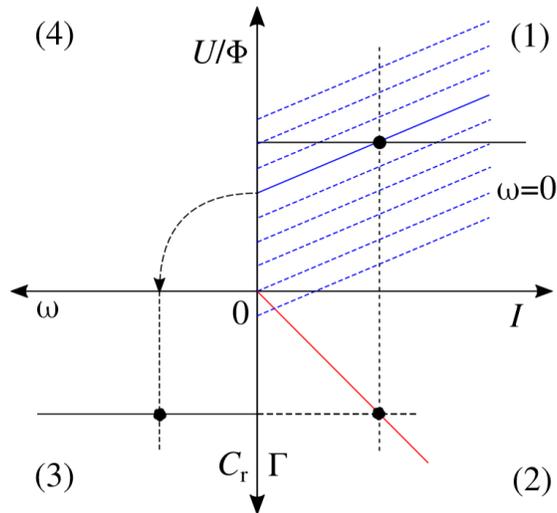


FIGURE 2.10 – On ne représente que les parties positives pour chaque grandeur en supposant qu'on se situe dans le cadran en haut à droite (moteur)

## 2.6 Rendement

### Mode Brenders (un peu imbitable)

La machine absorbe la puissance électrique  $UI$  absorbée à l'induit (en convention récepteur), ajouté à celle éventuellement absorbée par l'inducteur  $U_e I_e$ , lorsqu'il est bobiné. Cette puissance étant entièrement dissipé par effet Joule.

La puissance absorbée à l'induit s'écrit  $UI = (E + RI)I = EI + RI^2$ . On voit qu'une puissance  $RI^2$  est aussi dissipé par effet Joule par l'induit.

La puissance alors disponible est  $P_e = EI = C\Omega$ . Cependant nous avons pour l'instant pas pris en compte les éventuels pertes mécaniques (frottement) et magnétiques (hystérésis et courant de Foucault). Ces pertes sont mesurable expérimentalement et on les regroupe dans les pertes collectives que l'on note  $P_C$ . Ainsi la puissance effectivement disponible sur l'axe de la machine est nommée puissance utile  $P_U = C_u\Omega$  tel que :  $P_e = P_U + P_C$

#### Définition : Rendement

On définit le rendement de la machine (en fonctionnement moteur) comme la puissance mécanique utile sur la puissance électrique absorbée

$$\eta = \frac{P_U}{P_U + P_C + RI^2 + R_e I_e^2}$$

### Mode Sanz (bien mieux)

↪ J'intègre p.788

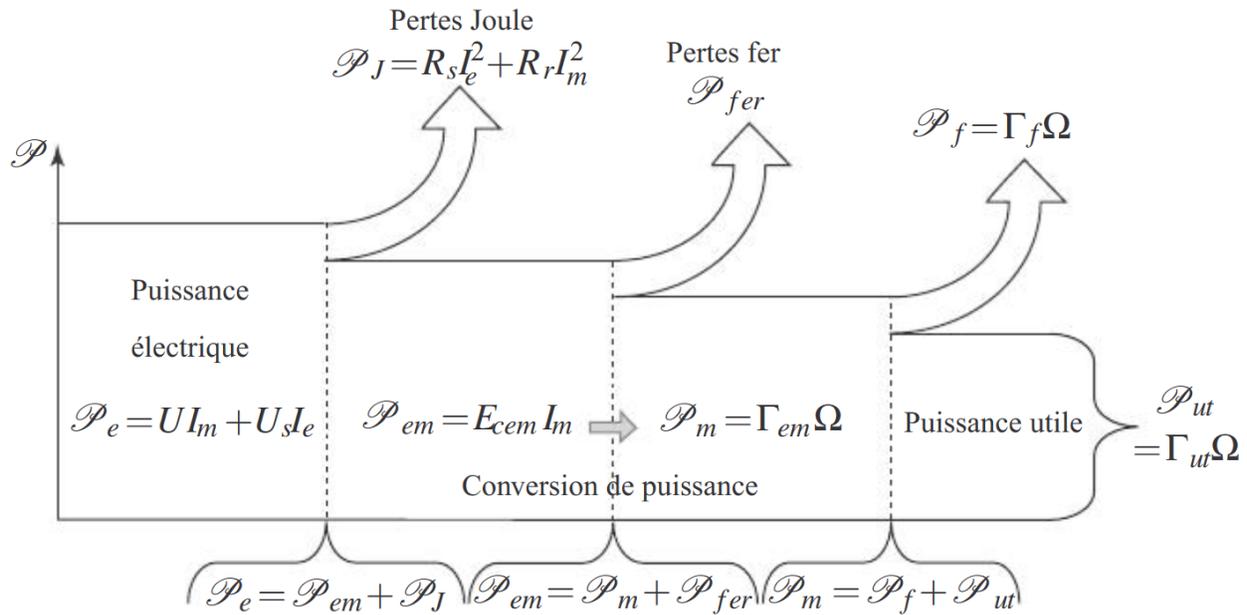


FIGURE 2.11 – Bilan de puissance (extrait du *J'intègre PSI*). Le terme de perte  $\Gamma_f \Omega$  est lié au couple des frottement  $\Gamma_f$ . Désolé c'est pas les mêmes notations mais ça vaaaa...

#### Définition : Rendement du moteur

On définit simplement (avec les notations de Sanz)

$$\eta = \frac{\mathcal{P}_{ut}}{\mathcal{P}_e} = 1 - \frac{\mathcal{P}_J + \mathcal{P}_{fer} + \mathcal{P}_f}{\mathcal{P}_e}$$

On définit parfois le couple total des pertes

$$\Gamma_p = \frac{\mathcal{P}_{fer} + \mathcal{P}_f}{\Omega}$$

Et alors le rendement peut s'écrire

$$\eta = 1 - \frac{R_s I_e^2 + R_r I_m^2 + \Gamma_p \Omega}{U I_m + U_s I_e}$$

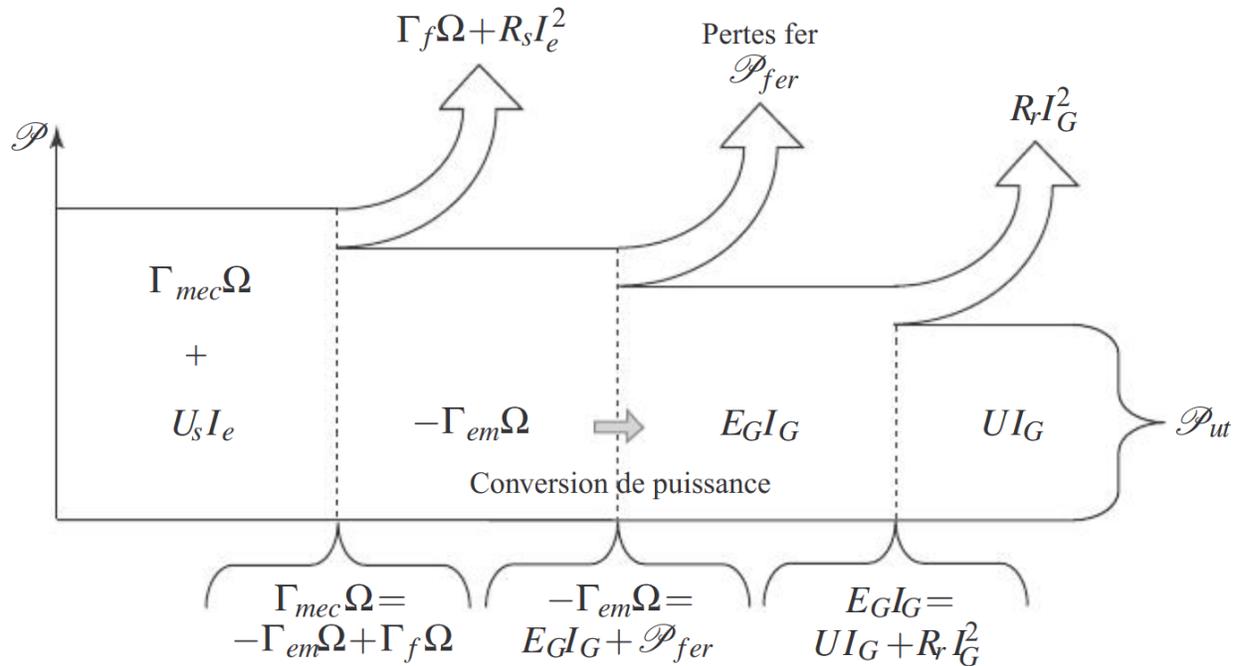


FIGURE 2.12 – Bilan de puissance pour la génératrice

**Définition : Rendement de la génératrice**

$$\eta = \frac{\mathcal{P}_{ut}}{\mathcal{P}_{mec} + U_S I_e} = 1 - \frac{\mathcal{P}_{fer} + \Gamma_f \Omega + R_r I_G^2 + R_s I_e^2}{\mathcal{P}_{mec} + U_S I_e} = 1 - \frac{\mathcal{P}_f + \mathcal{P}_J + \mathcal{P}_{fer}}{\mathcal{P}_{mec} + U_S I_e}$$

### 3 Machine synchrone

➤ *Brenders p.178*

Historique

TESLA fabrique la première machine synchrone en 1883 (à peu près en même temps que la MCC) pourtant, son succès à du attendre quelques temps... En effet, bien que plus robuste et moins chers, il faut une certaine technologie pour les commander.

La description sera assez rapide, c'est pour ça qu'on peut aussi ne pas du tout en parler et laisser ça pour les questions (cf. Book une personne qui a eu 18 en s'arrêtant ici)

➤ *Brenders p.185*

**Manip' : Démo**

Ressortir les trois bobines qui créer un champ tournant et lancer l'aiguille

L'idée est de placer un moment magnétique dans un champ tournant, le couple subit est

$$\mathbf{\Gamma} = \mathbf{M} \times \mathbf{B}$$

Donc si  $\mathbf{B}$  tourne, le couple peut tourner avec le moment et ainsi créer un mouvement de rotation. Notons ici que le moment magnétique provient est un aimant permanent, mais on utilise parfois plutôt des circuits bobinés.

### Moteur asynchrone

C'est le même principe, mais le moment magnétique apparaît par double induction : le champ magnétique tournant créé par le stator induit des courants dans le rotor, qui eux-mêmes induisent un champ magnétique donc l'apparition d'un moment.

On crée un champ

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} B_0 \cos(\omega t + \varphi) \\ B_0 \sin(\omega t + \varphi) \\ 0 \end{pmatrix}$$

Et on considère que le moment est en rotation

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} M_0 \cos(\Omega t) \\ M_0 \sin(\Omega t) \\ 0 \end{pmatrix}$$

Alors le couple est

$$\Gamma = M_0 B_0 \sin((\omega + \Omega)t + \varphi) \mathbf{e}_z$$

La machine ne démarre pas si la fréquence  $\omega$  est trop élevée car on a alors  $\Omega = 0$ , donc en moyenne

$$\langle \Gamma \rangle_\tau = M_0 B_0 \langle \sin(\omega t + \varphi) \rangle_\tau \mathbf{e}_z$$

Avec  $\tau$  le temps de réaction du moteur souvent assez long... Il faut que la période d'excitation  $T = \frac{2\pi}{\omega}$  se rapproche de  $\tau$  pour que le moment ne soit plus nul en moyenne (c'est comme si tu plies et déplies tes jambes trop vite pour la balançoire)... Ensuite la machine se synchronise (d'où sont nom) et tourne à  $\Omega = \omega$  :

$$\langle \Gamma \rangle = M_0 B_0 \sin(\varphi) \mathbf{e}_z$$

De même que pour la MCC, cette machine peut fonctionner en génératrice : la rotation de  $\mathbf{M}$  va créer un champ magnétique variable et donc induire un courant dans les bobines du stator.

### Créer champ tournant

La méthode facile à comprendre et plus pédagogique, c'est avec une source triphasée. Le *🔗 J'intègre PSI chap. 26* fait autrement (au delà de quelques kilowatt, on revient sur du triphasé), c'est un peu plus le bordel donc bon...

## Questions

- ★ Qui c'est le référentiel attaché au circuit, puisqu'il se déforme ?

*C'est le référentiel de la barre.*

★ La résistance du rail c'est quoi ?

★ Pourquoi voit-on la réversibilité dans l'équation de conservation de l'énergie ?

*On la voit pas (avec des pertes ohmiques on a aussi une équation mais c'est pas pour autant que c'est réversible)*

★ Tu peux justifier la forme du champ **B** pour la MCC ?

*Faut écrire les conditions de passage entre le ferro et l'air, on montre que le champ est quasiment toujours perpendiculaire à la surface.*

★ Les pièces de l'induit elles voient vraiment ce champ ?

*Non puisqu'elles réagissent par induction et donc on a superposition d'un nouveau champ (qui est souvent négligeable)*

★ Dans les quadrants, c'est le même moteurs de chaque côté ?

★ Quelle autre hypothèse on a derrière le point de fonctionnement ?

*On impose  $U = cste$  donc l'impédance de sortie du générateur est nulle.*

★ C'est quoi les modes d'excitation ?

*Des bails de série ou parallèle... Le démarreur de voiture est en excitation série pour avoir le même courant (très fort) dans l'induit et l'inducteur.*

★ C'est quoi un démarrage asynchrone ?

*L'induit peut faire office de cage à écureuil, mais du coup on retrouve le problème des balais.*

**Quelle partie de la MCC crée le champ ? Comment se fait-il qu'on parle de forces de Laplace alors que les conducteurs ne sont pas dans le champ ? Le stator**

**Pourquoi utilise-t-on des matériaux ferromagnétiques ? C'est le champ dans les matériaux ou dans l'entrefer qui est fort ? Dessiner des schémas équivalents des dispositifs utilisés, les orienter, etc. Ferro pour canaliser les lignes de champ**

**vous avez dit que pour réduire les pertes par courants de Foucault on utilise "des matériaux de forte résistivité, par exemple des tôles de silice feuilletées" (trouvé dans le H-prépa), qu'est-ce qui est utile, l'aspect tôle, l'aspect feuilleté ou l'aspect silice ? L'aspect feuilleté**

**si les moteurs électriques sont si fantastiques niveau rendement pourquoi on utilise encore des moteurs thermiques ? il faut créer l'électricité avant de la convertir et puis assez coûteux d'entretien (MCC : frottement rotor-stator, composants...)**

**Pour les rails de Laplace, comment résoudre dans un référentiel centré sur la barre ?**

**Fonctionnement d'une machine asynchrone ? Comment sont les lignes de champs dans la MCC ? Rôle du ferromagnétique dans la MCC ? Pourquoi y a-t-il des encoches dans le rotor de la MCC et pourquoi sont-elles inclinées ?**

**Y a-t-il un intérêt à faire une étude de la MCC en régime non-stationnaire ?**

**Lien force de Laplace/force de Lorentz ; que se passe-t-il au niveau micro ?**

Question sur les conventions d'orientation : est-ce que le signe de la fém ou du courant dépendent de l'orientation ? Est-ce que ça change quelques chose à la physique ?

Comment calculer la fém autrement qu'à partir du champ électromoteur ?

Que représente le point de fonctionnement du moteur ?

Pourquoi on utilise des matériaux ferromagnétiques ? Laquelle de leurs caractéristiques leur donne cette propriété ? (Canalisation des lignes de champs), (grande perméabilité magnétique)

Est-ce que l'on peut créer une MCC avec une moitié où existe un champ magnétique radial et une moitié avec un champ nul ? Dessiner les lignes de champs dans la MCC.

La force de Lorentz est-elle valable dans un référentiel non-galiléen ?

Différence moteur synchrone/asynchrone ? Applications ? Le synchronisme comme le nom l'indique, et asynchrone pas du tout stable en vitesse ni en position, il faut lancer la machine synchrone. Synchrone : textile, alternateur, industrie quand besoin d'être précis en vitesse/position, asynchrone : ascenseur, propulsion des navires, pompes...)

Rails de Laplace : Choix de l'ampèremètre, caractéristiques ? Comment évaluer un O<sub>dg</sub> du courant théoriquement ? Petit courant  $\mu\text{A}$ , à aiguille parce que c'est plus visible, et avec les numériques, on voit juste que cela s'affole.

D'où vient la résistance ? Rôle ? Vient principalement du contact (couche d'oxydation, contact sur des pointes, etc...) et des contacts.

Quand on met du courant la tige bouge. Peut tu en dire plus ? (surtout pour le sens)

Loi de Lenz : D'où cela provient ? Toujours valable ? Forme intégrale de l'équation de Maxwell-Faraday. Pas toujours valable, si on rajoute un condensateur, déphasage de  $\frac{\pi}{2}$  entre l'intensité et le courant donc l'effet peut s'ajouter à la cause. Marche bien pour les moteurs car fortement inductifs.

Pourquoi le bilan de puissance est toujours généralisable ? Puissance électrique  $UI$  totalement général et puissance des forces de Laplace ( $j d\tau \times B$  en volume,  $\cdot \vec{v}$ ) et en volumique on peut écrire la P électrique aussi qui est avec le même produit mixte mais à une rotation prêt.

Avantage et Inconvénients de la machine à courant continu ? On peut la démarrer à vitesse nulle (la machine asynchrone), en utilisation industrielle il n'y a besoin que d'une source d'alimentation. Très bon rendement. Il y a besoin de renverser le courant au moment de la ligne neutre, avec les balais : frottement solide en permanence.

Sources de pertes dans la machine à courant continu ? Corrections dans les termes de e et M Couple mécanique résistif

Terme en  $\omega^2$  car en général machine entraîne un ventilateur pour évacuer la chaleur.

## Commentaires

- Pour la conversion de puissance, bien préciser qu'on a négligé les pertes !
- Préciser qu'on a deux variables électriques conjuguées puis deux variables mécaniques conjuguées.
- Faire des bilans équations inconnues (genre sur la MCC) : on a quatre variables, on peut fixer une variable d'entrée, on a deux équations qui les lient puis il faut une dernière condition en sortie pour fermer le système ( $C_r(\Omega)$  cf. point de fonctionnement).
- Ce serait bien de faire figurer au moins une ligne de champ complète pour la MCC.

- Faire en permanence le lien entre ce qu'on décrit et les cours précédents plus théoriques.
- Donner des OdG plus fondamentaux genre les résistances
- Vaut mieux traiter un exemple avec la MCC plutôt que la machine synchrone. Mener un calcul bien complet des caractéristiques.
- OdG des rendements de la MCC de l'ordre de 99%