

# LP00 – Titre

29 juin 2020

Laura Guislain & Pascal Wang

**Niveau :**

**Commentaires du jury**

**Bibliographie**

✦ *Le nom du livre, l'auteur*<sup>1</sup>

→ Expliciter si besoin l'intérêt du livre dans la leçon et pour quelles parties il est utile.

**Prérequis**

➤ Induction : loi de Lenz, force de Laplace

**Expériences**

✦ Biréfringence du quartz

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Principe de la conversion de puissance électromécanique</b>	<b>3</b>
1.1	Expérience des rails de Laplace : moteur . . . . .	3
1.2	Expérience des rails de Laplace : générateur . . . . .	5
1.3	Bilan de puissance . . . . .	5
<b>2</b>	<b>La machine à courant continu</b>	<b>6</b>
2.1	Structure et principe . . . . .	6
2.2	Modélisation simple de la MCC . . . . .	8
2.3	Equations de la MCC, caractéristique en régime permanent . . . . .	9
2.4	Bilan de puissance . . . . .	9
2.5	Considérations techniques . . . . .	10
2.6	Bonus : modes d'excitation . . . . .	10
2.7	Bonus : caractéristique de fonctionnement . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Machines alternatives</b>	<b>11</b>
3.1	Champ magnétique tournant . . . . .	11
3.2	Machine synchrone . . . . .	11
3.3	Machine asynchrone . . . . .	11
3.4	Redressement, pont de Graetz . . . . .	12
3.5	Lissage . . . . .	12
3.6	Pont diviseur de tension . . . . .	12
3.7	Hacheur . . . . .	12
3.8	Les interrupteurs . . . . .	13
3.9	Onduleur . . . . .	13
<b>4</b>	<b>Commentaires</b>	<b>15</b>
<b>5</b>	<b>Questions</b>	<b>16</b>

## Jury

\* Il faut prendre le temps d'expliquer avec des schémas les plus clairs possibles les dispositifs présentés. Il faut orienter tous les circuits électriques, et prêter attention aux conventions et aux signes lors des bilans de puissance.

2017 : Une approche à l'aide des seules forces de Laplace est insuffisante. Les candidats doivent aussi s'interroger sur l'intérêt d'utiliser des matériaux ferromagnétiques dans les machines électriques. 2016 : Afin de pouvoir aborder des machines électriques de forte puissance, le rôle essentiel du fer doit être considéré car les forces électromagnétiques ne se réduisent pas aux seules actions de Laplace s'exerçant sur les conducteurs traversés par des courants. 2015 : Il est souhaitable de préciser le rôle de l'énergie magnétique lors de l'étude des convertisseurs électromécaniques constitués de matériaux ferromagnétiques linéaires non saturés. 2014 : Dans le cas des machines électriques, les candidats sont invités à réfléchir au rôle du fer dans les actions électromagnétiques qui peuvent également être déterminées par dérivation d'une grandeur énergétique par rapport à un paramètre de position.

## Préparation

Biblio : ma fiche d'induction, le poly de Jérémy Neveu (JN), le Dunod PSI (top!!!), le Précis Bréal, MP Moteurs, HPrepa, bup 846 actualisation

Questions : démo loi de Faraday pour induction de Lorentz/Neumann/les deux (cf. ma fiche avec les démos), Pourquoi utilise-t-on des matériaux ferromagnétiques ? C'est le champ dans les matériaux ou dans l'entrefer qui est fort ? Surtout dans les matériaux, mais aussi dans l'entrefer comparé à l'air à côté. Comment sont les lignes de champs dans la MCC ? (cf. Sanz PSI, approche énergétique), MCC en régime non stationnaire (cf. Bréal, en schéma bloc avec  $L$ , passe bas) Fonctionnement d'une machine asynchrone, synchrone ?

## A faire

Attention aux conventions

Lire le HPrepa, Dunod PSI, biblio correction 2018.

quelques ordres de grandeurs typiques (champ magnétique, vitesse de rotation, couples, puissance utile) pour des moteurs courants (essuies glace, mixeur, moteur de machine à laver) biblio 2018

odg pertes fer/ cuivres etc

schémas à l'avance

bétonner moteur synchrone, asynchrone (BUP, jérémy neveu, livres).

Bonus : lire 2013

Biblio : Niard (Machines électrique, J. Niard) - pour les ODG

Électronique et conversion de puissance : 2e année PSI Delacressonnière chez Tec et Doc

Machines électrique et électronique de puissance de la Collection HEBERT

haut parleur

## Ressources Laura

- Rail de Laplace : dur de trouver un truc propre <https://www.youtube.com/watch?v=a9FBe7aHlgQ>, animation <https://www.youtube.com/watch?v=G5r6hhIEusw>.
- <https://www.youtube.com/watch?v=q4yZDYWMzJo>

## Introduction

**Conversion électrique-mécanique au quotidien** L'énergie disponible à la maison est sous forme électrique dans les prises secteur. Pour l'utiliser au quotidien pour les machines à laver, les lave-vaisselles, les frigo, il faut effectuer une conversion électro-mécanique, par exemple à l'aide d'un moteur l'électricité pour alimenter un moteur produisant un travail mécanique. De plus, au quotidien, on utilise des centaines de moteurs utilisant l'électricité, rien que dans une voiture, entre les pompes (liquide de refroidissement) et les actionneurs (balais essuie-glaces) on peut en compter plus de 40.

**Production d'électricité** De l'autre côté de la chaîne, dans une centrale nucléaire par exemple, l'énergie dégagée par les réactions nucléaires chauffe de l'eau qui circule dans des turbines qui produisent l'électricité. Ce sont les deux aspects de la conversion de puissance électro-magnétique. On va s'intéresser plus particulièrement dans cette leçon au cas de l'induction électromagnétique.

**Principe de la conversion : induction** La conversion réciproque d'énergie mécanique et d'énergie électrique repose sur les principes de l'induction : force de Laplace et loi de Faraday, qui font le lien entre mécanique et électromagnétisme.

**Bonus : alternateur** Un alternateur sert à transformer une puissance mécanique en une puissance électrique. Ce dispositif est par exemple utilisé sur les vélos, dont une roue entraîne en rotation l'alternateur qui alimente des ampoules ou une batterie. On peut aussi citer les centrales électriques, où l'alternateur est entraîné par de la vapeur (centrales thermiques), de l'eau sous pression (centrales nucléaires françaises), de l'eau en écoulement (centrales hydrauliques).

**Bonus : intérêt du triphasé vs. monophasé** Transporter l'électricité en triphasé, à section égale, permet de réduire les pertes Joules d'un facteur 2 et à pertes égales, de réduire le volume de cuivre utilisé d'un facteur 4/3.

**Bonus : haute tension vs. basse tension** On notera également que les pertes Joule sont inversement proportionnelles au carré de la tension et proportionnelles à la longueur de ligne, d'où l'intérêt d'utiliser des tensions élevées pour le transport de l'énergie électrique à longue distance. C'est ce qui explique l'échelonnement des tensions dans le réseau électrique.

**Objectif** Cette leçon fait suite à une leçon sur les lois de l'induction. On va les mettre en oeuvre pour comprendre les principes physiques et les aspects énergétique de la conversion électromécanique. On commence sur un exemple simple qui couvre les principes physiques du problème, puis un exemple très répandu : la machine à courant continu.

## 1 Principe de la conversion de puissance électromécanique

Les rails de Laplace vont constituer l'exemple introductif à la conversion électromécanique de puissance et vont nous permettre d'introduire les notions et conventions.

🔴 Le respect des convention et la cohérence physique des signes est primordiale dans cette partie.

### 1.1 Expérience des rails de Laplace : moteur

#### Mise en évidence du fonctionnement moteur des rails de Laplace

**Présentation** On montre cette vidéo : <https://youtu.be/Jcho7bThzv4?t=44>. Les rails de Laplace sont constituées de deux barres de conducteur fixes, parallèles et espacées d'une distance  $L$  avec un barre de conducteur mobile dessus se déplaçant à la vitesse  $\vec{V}$  dans le référentiel R. Le circuit est fermé avec un ampèremètre et est immergé dans un champ magnétique  $\vec{B}$  perpendiculaire aux barres. On utilise un aimant en U pour générer le champ "permanent". *Le pôle nord est rouge et le pôle sud est vert. Les lignes de champ vont du Nord vers le Sud. Donc  $\vec{B}$  est vers le bas au début de la vidéo, puis vers le haut.*

**Observations** Lorsque le générateur débite, le barreau se déplace. Lorsque le courant change de sens, la barre change de direction. En changeant la direction du champ magnétique, la barre change aussi de direction. *Si cela ne marche pas, cela peut être dû probablement à cause d'un contact électrique imparfait et de frottements. On peut humidifier le barreau et décaper les rails pour assurer un meilleur contact électrique et prendre un barreau lisse et*

pas cranté.

**Modélisation** On suppose que le champ magnétique  $\vec{B}$  est constant et uniforme. On fait un schéma avec un choix de convention d'orientation du circuit et du champ magnétique, première chose à faire dans un problème d'induction. On peut choisir l'orientation comme on veut, c'est l'expérience qui donne le véritable signe algébrique des grandeurs. Si on met  $\vec{B}$  vers le haut,  $B > 0$  pour la deuxième partie de la vidéo.

**Analyse qualitative** Le courant circulant de B à A crée une force de Laplace

$$d\vec{F}_l = i d\vec{l} \wedge \vec{B}$$

avec  $\bullet d\vec{l}$  dans le sens d'orientation de  $i$ , c'est important ! Ainsi, la force de Laplace met en mouvement la tige. On vérifie que c'est compatible avec le mouvement de la vidéo.

**Bonus : interprétation alternative de la force de Laplace** Une autre interprétation de la force de Laplace est possible. Elle peut être vue comme la force due au champ de Hall sur les ions du réseau :

$$\vec{E}_H = -\vec{u} \wedge \vec{B} \quad (1)$$

**Ordre de grandeur** Avec  $i = 1\text{A}$ ,  $L = 10\text{ cm}$ ,  $B = 0.1\text{T}$ , on obtient  $F = 10^{-2}\text{N}$ . En général, il faut des champs intenses et des courants forts pour avoir de grandes forces exercées.

**Champ électromoteur** Si on faisait l'expérience, on pourrait aussi mesurer l'apparition d'une fém induite associée à la variation du flux. On rappelle la définition du champ électromoteur. Une portion de conducteur, mobile à la vitesse  $\vec{v}$  dans le référentiel d'étude  $R$  soumis à un champ magnétique permanent  $\vec{B}$  est le siège d'un champ électromoteur

$$\vec{E}_m = \vec{v} \times \vec{B} \quad (2)$$

**Force électromotrice induite** La circulation de  $\vec{E}_m$  sur la boucle que constitue le conducteur est la force électromotrice induite.

$$e_{AB} = \int_{AB} \vec{E}_m d\vec{l} \quad (3)$$

**Modèle électrocinétique équivalent** Comme tout conducteur ohmique, le conducteur mobile possède une résistance  $R$ . La résistance est en fait principalement due au contact mobile du barreau. On propose alors le modèle électrocinétique équivalent, qu'on présente en schéma. Ici, on a négligé l'auto-induction  $\bullet$  Dans la définition de  $e_{AB}$ , on a choisi  $d\vec{l}$  dans le même sens que  $i$  donc on s'est implicitement placé en convention générateur. Ainsi,  $e$  et  $i$  sont fléchés dans le même sens. Les calculs donneront leurs véritables signes, qui dépendent de la situation.

**Loi de modération de Lenz** Dans notre situation moteur,  $\vec{E}_m$  et  $d\vec{l}$  sont de sens opposé, donc  $e < 0$ . On retrouve la loi de modération de Lenz : le système s'oppose à la source de son évolution. La loi de Lenz n'est plus vérifiée lorsque le signal est déphasé par un condensateur/une bobine ou lorsque la géométrie est modifiée. Ex : instabilité dynamo.

**Bonus : résolution**  $\blacktriangleleft$  ma fiche, Dunod PCSI. Sans frottement et sans autoinduction, on peut résoudre  $v(t)$  et  $i(t)$ , qui vérifie une EDO d'ordre 1, avec une valeur à l'infini et un temps caractéristique commun  $\tau = Rm/(Bl)^2$ . En vrai, on pourrait sauter cette partie ou la faire si on a vraiment le temps Avec les solutions explicites, en considérant le transfert d'énergie entre  $t = 0$  et  $t = \infty$ , on peut montrer que la moitié de l'énergie du générateur a été dissipée par effet Joule et l'autre moitié a été convertie en énergie cinétique. Le rendement est de 0.5.

**Bonus : retour sur les conventions de signe** On remarque que les phénomènes inductifs peuvent être modélisés électriquement avec  $e$  et  $i$  de mêmes signes et orientés dans le même sens (sens du vecteur  $d\vec{l}$  le long du circuit). "De même sens" signifie que le dipôle équivalent  $M$  soumis à cette tension  $e$  et parcouru par ce courant  $i$  peut être représenté en convention générateur.

Or, on rappelle que les conventions électriques définissent la puissance reçue par le dipôle avec tension et intensité positives mais orientés en sens inverse. Celle-ci est positive pour un dipôle récepteur et négative pour un dipôle générateur. On remarque donc que cette convention électrocinétique va à l'encontre de la convention utilisée en induction puisque la puissance reçue est  $\mathcal{P}_e > 0$  avec  $e$  et  $i$  positifs et de même sens.

Pour rétablir l'harmonie des conventions dans les schémas électriques, on peut définir la tension contre-électromotrice  $E = -e$  qui, positive et orientée en sens inverse de  $i$ , redonnent les signes usuels pour la puissance dans la convention électrocinétique. C'est-à-dire que la puissance reçue par le dipôle  $M$  équivalent  $\mathcal{P}_M = Ei = -ei$  est bien positive pour un dipôle récepteur et négative pour un dipôle générateur. Pour une référence bibliographique, se référer à *Précis Électrotechnique PSI* p.126.

## 1.2 Expérience des rails de Laplace : générateur

### Mise en évidence du fonctionnement générateur des rails de Laplace

**Présentation** C'est la même expérience que précédemment sauf qu'on a retiré l'alimentation et on ferme le circuit avec un ampèremètre. En déplaçant la barre mobile sur les rails on voit l'apparition d'un courant dans le circuit grâce à l'ampèremètre. En déplaçant dans l'autre sens, le courant change de signe.

**Modélisation** Le reste du circuit étant un simple ampèremètre et des conducteurs fixes, le modèle du circuit équivalent est alors : **on fait un schéma, avec une force exercée par un opérateur.**

**Interprétation qualitative** On calcule  $e = -vBl < 0$ . La tige est la seule partie en mouvement donc la fem induite dans tout le circuit est égale à  $e$ . Dans le schéma électrique, on voit un courant  $i = e/R = -vBl/R < 0$  qui apparaît : la force électromotrice génère un courant. On a fourni de la puissance mécanique et on a obtenu de la puissance électrique : c'est la conversion électromécanique.

**Interprétation avec la loi de Lenz** Ce phénomène s'explique qualitativement grâce à une loi de modération de Lenz : le courant créé induit une force de Laplace  $\vec{f}_L$  opposée à  $\vec{f}_{op}$ . *Cette force de Laplace est proportionnelle à  $v$ , c'est un frottement type fluide visqueux. C'est aussi le principe du freinage par courant de Foucault.* **Le champ magnétique induit  $\vec{B}_{induit}$  est dans le même sens que le champ  $\vec{B}$ , ce n'est pas avec  $\vec{B}$  qu'il faut raisonner pour la loi de Lenz, mais avec  $\vec{f}_L$ .**

**Ordre de grandeur ODG:**  $v = 20$  cm/s,  $B = 0.1$  à  $1$  T,  $L = 5$  cm :  $e = Blv = 1$  à  $10$  mV

↓ *Un courant électrique implique une puissance électrique et un mouvement implique puissance mécanique. Quelle est la relation entre les deux ?*

## 1.3 Bilan de puissance

**Définition du système** On considère le système "circuit électrique = barre+rails+fil+ampèremètre" (porteurs de charge et réseau cristallin).

**Convention des puissances** On prend la convention thermodynamique : les puissances sont les puissances reçues par le système. En particulier  $P_e = eI$  avec  $P_e > 0$  si de l'énergie est fournie aux porteurs de charges.

**Bonus : cas des rails de Laplace** On calcule les puissances explicitement. **le calcul est sur la fiche, mais on peut s'en passer, même si ça rend la suite et les conventions plus claires.** On trouve que  $P_e > 0$  : le système électrique reçoit de l'énergie et  $P_m = -P_e < 0$ , le système mécanique fournit de l'énergie. La somme est nulle. On va généraliser.

**Relation fondamentale de la conversion de puissance électromécanique** Considérons une modélisation filaire des courants. La puissance mécanique liée au mouvement du système "fil  $d\vec{l}$ " est alors :

$$d\mathcal{P}_L = d\vec{f}_L \cdot \vec{v} = I \left( d\vec{l} \wedge \vec{B} \right) \cdot \vec{v} = -I \left( \vec{v} \wedge \vec{B} \right) \cdot d\vec{l} \quad (4)$$

où la seconde égalité est obtenue en exploitant les propriétés du produit mixte<sup>2</sup>. En introduisant le champ électromoteur :

$$\vec{E}_m = \vec{v} \wedge \vec{B} \quad (5)$$

et la force électromotrice d'induction :

$$de = \vec{E}_m \cdot d\vec{l} \quad (6)$$

On obtient alors la relation fondamentale de la conversion de puissance électromécanique :

$$d\mathcal{P}_L = -Ide \Rightarrow \mathcal{P}_L + \mathcal{P}_e = 0 \quad (7)$$

avec  $d\vec{l}$  dans le sens de  $I$  et  $\mathcal{P}_e = Ie$ , toujours en convention thermodynamique : toutes les puissances sont reçues par le système.

**Discussion des cas moteur et générateur** On rappelle que les puissances sont définies avec la convention thermodynamique : ce sont les puissances algébriques reçues par le système "portion de fil".

2. En l'occurrence :  $(\vec{a} \wedge \vec{b}) \cdot \vec{c} = (\vec{b} \wedge \vec{c}) \cdot \vec{a} = (\vec{c} \wedge \vec{a}) \cdot \vec{b}$ .

- Cas générateur : si les phénomènes d'induction fournissent de la puissance électrique aux porteurs de charge  $P_e > 0$  alors exactement la même puissance est prélevée sur le système mécanique  $\mathcal{P}_L < 0$ . En régime stationnaire, pour assurer la nullité de la puissance totale reçue, un opérateur extérieur doit fournir de la puissance au système : c'est le fonctionnement générateur.
- Cas moteur : si de la puissance mécanique est fournie au système mécanique via les forces de Laplace ( $\mathcal{P}_L > 0$ ), alors exactement la même puissance est prélevée aux porteurs de charge via les phénomènes inductifs :  $\mathcal{P}_e < 0$ . En régime stationnaire, pour assurer la nullité de la puissance mécanique totale reçue, un générateur extérieur doit fournir de la puissance au système : c'est le fonctionnement moteur.

**Signification** Cette équation ne veut pas dire qu'aucune énergie électrique ou mécanique est perdue, mais qu'il y a identité des énergies transférées entre le système électrique et le système mécanique. *En fait, la puissance de la force de Lorentz est égale à  $\mathcal{P}_L + P_e$  (HPrepa p63) donc la relation fondamentale traduit le fait que la force de Lorentz ne travaille pas.*

**Application concrète : fonctionnement générateur** Si un opérateur applique une force  $\vec{f}_{\text{méca ext}}$  au barreau, en régime permanent,  $\vec{f}_{\text{méca ext}} + \vec{f}_{\text{frot}} + \vec{f}_L = \vec{0}$ . Donc  $\mathcal{P}_{\text{méca ext}} + \mathcal{P}_{\text{frot}} + \mathcal{P}_L = 0$ . Côté électrique, si on néglige l'autoinductance du circuit, alors avec  $P_e + P_J + P_{\text{élec ext}} = 0$  avec  $P_e = eI$  et donc avec la relation fondamentale :

$$\boxed{\mathcal{P}_{\text{méca ext}} + \mathcal{P}_{\text{frot}} = -\mathcal{P}_L = \mathcal{P}_e = -\mathcal{P}_J - \mathcal{P}_{\text{élec ext}}} \quad (8)$$

Avec en fonctionnement moteur :  $\mathcal{P}_{\text{méca ext}} > 0$  le système reçoit de l'énergie de l'opérateur. Une partie est dissipée par frottement  $\mathcal{P}_{\text{frot}} < 0$ . La puissance des forces de Laplace est convertie en puissance électrique. Puis le système en restitue une partie au dipôle à alimenter (machine à laver) :  $\mathcal{P}_{\text{élec ext}} < 0$ , qui est diminué par  $\mathcal{P}_J = RI^2 > 0$ .

↓  
*Nous avons réalisé un transducteur électrique qui peut convertir l'énergie électrique en énergie mécanique et réciproquement. Les hauts-parleur et micros fonctionnent sur le même principe (avoir un schéma). Cependant la plupart de nos moteurs tournent et il est certes possible de convertir translation/rotation mais cela se fait au prix de frottements. On va donc étudier une machine qui fut celle mise en place au début de l'ère électromécanique : La machine à courant continu. Utilisation : TGV 1981 "Paris-Sud Est", métro de Lyon (1978), jouets.*

## 2 La machine à courant continu

### 2.1 Structure et principe

**Principe des moteurs** On rappelle les actions exercées sur un dipôle magnétique  $\vec{M}$  plongé dans un champ magnétique  $\vec{B}$  :

$$\vec{F} = (\vec{M} \cdot \vec{\nabla})\vec{B}, \quad \text{et} \quad \vec{\Gamma} = \vec{M} \wedge \vec{B}$$

On retrouve ainsi la force  $\vec{F}$  subie par le dipôle dans un champ non homogène, et le couple  $\Gamma$  qui tend à orienter le moment dipolaire  $\vec{M}$  dans le sens du champ.

C'est d'une certaine façon ce couple qui est à la base des moteurs électriques, et qui permet d'en appréhender la subtilité. En effet, ce couple tend à faire tourner le moment, mais une fois celui-ci convenablement orienté, le couple s'annule et le mouvement cesse ! Il existe alors deux solutions :

- faire tourner le champ magnétique en même temps que le dipôle, ce qui est le principe des moteurs à courant alternatif,
- utiliser la rotation pour modifier la distribution de courants de sorte que l'orientation relative entre le dipôle et le champ ne soit pas modifiée, ce qui est le principe des moteurs à courant continu.

**Stratégie** La stratégie de la MCC est d'utiliser la rotation elle-même pour commuter les courants dans le circuit tournant et avoir un couple moyen non nul.

#### Fonctionnement de la MCC

On montre la vidéo <https://youtu.be/LAtPHANefQo?t=20>.

**Structure de la MCC** On peut montrer sur cette vidéo un vrai moteur : <https://youtu.be/-qS85aIvleQ?t=270> où le stator sont deux aimants permanents, puis aller à 5 :05 pour voir le vrai stator qui est un électroaimant et 6 :02 pour voir les balais.

- La partie fixe, le stator, porte les éléments inducteurs (bobines ou aimants permanents), destinés à créer un champ magnétique constant. Dans les petits moteurs (robotique **ODG**: qq W), le stator est à aimants permanents. Dans les moteurs plus puissants (**ODG**: 10 MW), il est formé de bobinages parcourus par du courant continu.
- L'utilité du fer est de canalisation des lignes de champ. *Ainsi, le champ magnétique est quasi radial entre le rotor et le stator.*
- Le rotor comprend un circuit soumis au champ magnétique : l'induit. Les conducteurs sont parallèles ou légèrement inclinés par rapport à l'axe et sont reliés à un ensemble de lames de cuivre, le collecteur. Dans le champ magnétique fixe du stator, les courants rotoriques subissent des forces de Laplace qui provoquent la rotation, comme expliqué.
- L'entrefer est l'espace entre l'inducteur et induit. **ODG**: 1mm-1cm faible pour optimiser le couplage électromagnétique entre inducteur et induit.
- L'induit est alimenté en courant continu, mais le système balais-collecteur agit comme redresseur mécanique. Il fait circuler dans les conducteurs rotoriques des courants alternatifs synchronisés avec la rotation : le courant change de sens dans un conducteur du rotor chaque fois qu'il passe d'un pôle du stator au pôle suivant, afin que le couple des forces de Laplace fasse tourner le moteur dans le même sens. *Il y a des encoches pour insérer les bobinages de l'induit. La réalisation du bobinage rotorique et du collecteur a aussi pour rôle d'organiser la connexion des spires afin de rendre la force électromotrice induite dans le circuit rotorique indépendante du temps*
- Le collecteur est la pièce maîtresse du moteur à courant continu, mais aussi la plus fragile à cause des contacts glissants qui s'usent (frottements mécaniques, arcs électriques...) et qu'il faut donc remplacer régulièrement.
- *Facultatif* Une ligne neutre est un plan d'anti-symétrie du champ B dans le rotor. Le champ magnétique donc le couple est nul.

**Intérêt et applications de la MCC** Comme ce moteur fonctionne avec des tensions et des courants continus, il est donc adapté à des sources d'énergie électrochimique (jouets à pile...). Pour les fortes puissances, on le trouve dans les lignes de métro où elle fonctionne en moteur (traction) ou en génératrice (freinage). Leur intérêt est de facilement commander la vitesse de rotation en tension. Son intérêt est de pouvoir commander sa vitesse de rotation par la tension d'alimentation et donc d'avoir un moteur à vitesse variable facilement commandable. **ODG**: 1 à  $4.10^3$  tour/min, avec des accélérations angulaires jusqu'à  $150.10^3 \text{rad.s}^{-2}$ . *On peut montrer la plaque signalétique du pic du midi : 400 kW, couple nominal 2880 N.m, vitesse de rotation 1373 tr/min. C'est De plus, la très faible inductance du rotor, ainsi que son faible moment d'inertie, produisent des constantes de temps mécanique  $\tau_m$  et électrique  $\tau_e$  extrêmement faibles, jusqu'à  $\tau_m = 4\text{ms}$  et  $\tau_e < 5.10^{-2}\text{ms}$ , ainsi qu'un très faible encombrement. Toutefois, la puissance disponible reste limitée à environ 1 kW. Dans quels domaines utilise-t-on alors une MCC à entrefer plan ? Partout où il faut créer un mouvement de rotation soit de précision, soit dans un volume limité. La géométrie très plate sera appréciée en motorisation des bicyclettes, des chaises roulantes ; la précision de la rotation en robotique industrielle, médicale (pompes à sang, à dialyse, respirateurs), informatique (rotation de disques de stockage), militaire (chargeurs automatiques de munitions, tourelles).*

**Bonus : approche énergétique, rôle du ferromagnétique, allure du champ** Dans une machine réelle les conducteurs de l'induit sont logés dans des encoches du rotor ferromagnétique. **Le matériau ferromagnétique canalise les lignes de champ magnétique venant du stator. Le champ magnétique est concentré dans l'entrefer et normal à l'entrefer, donc radial (cf. schéma). Il devient quasiment nul au niveau des conducteurs ce qui compromet le calcul des forces de Laplace subies par le conducteur.** De plus, il n'a pas été pris en compte l'interaction mutuelle du rotor comme dipôle magnétique avec le stator. Dans les nouveaux programmes, le couple électromécanique est déduit de considération sur l'énergie magnétique stockée dans la machine et convertie en force mécanique. **L'énergie stockée dans la machine se met sous la forme  $w_{em} = \int B^2/2\mu_0\mu_r$  où les contributions essentielles de l'intégrales sont dans l'entrefer et les matériaux ferromagnétiques. En considérant le ferromagnétique idéal  $\mu_r = \infty$ , l'intégrale volumique ne porte que sur l'entrefer. En se donnant une forme de champ statorique et rotorique :  $\vec{B} = \vec{B}_r + \vec{B}_s = (K_r \cos(\theta - \theta_r) + K_s \cos(\omega t - \theta)) \vec{u}_r$ , on calcule l'intégrale avec  $w_{em} = \frac{1}{2\mu_0} (B_r^2 + B_s^2 + 2B_r B_s)$  et on obtient le couple avec  $\Gamma_{em} = \left( \frac{\partial \mathcal{E}_{em}}{\partial \theta_r} \right)$ .** Cette nouvelle approche permet de prendre en compte l'effet des matériaux ferromagnétiques présents dans le rotor et leur influence réciproque sur le stator. On constate que l'utilisation de l'énergie volumique pour calculer l'énergie magnétique permet de s'affranchir du calcul délicat des mutuelles inductances entre les trois circuits. *La force électromagnétique est toujours attractive ; elle tend à diminuer le volume des entrefers. On peut l'appliquer pour faire des contacteurs.*

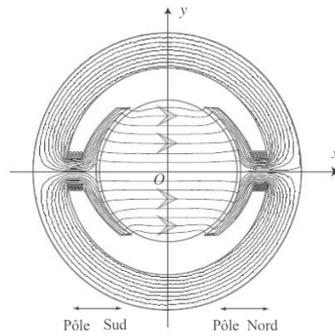


Figure 27.2 – Carte du champ magnétique inducteur.

↓ Quelles équations régissent la MCC ?

## 2.2 Modélisation simple de la MCC

A partir de là, le principe et sur ma fiche.

**Cadre simplifié** Pour simplifier on commence par s'intéresser qu'à un induit constitué d'une seule spire. On suppose que le champ magnétique est homogène et permanent  $\vec{B} = B\vec{u}_x$ . Le champ radial correspondant est sinusoidal. En réalité, le champ radial est plutôt un "créneau", à cause de la géométrie des ferromagnétiques : l'entrefer est circulaire et les lignes de champs sont normales à l'entrefer donc radiales, cf. Sanz PSI.

**Couple électromagnétique** On se suppose que la rotation est effectuée à  $\Omega = \text{cte}$ . Suivre le calcul de la fiche

L'ensemble collecteur/balais permet de redresser mécaniquement le couple pour qu'il ait une moyenne non-nulle.

**Force électromotrice** On le fait directement avec collecteur On commente le signe de  $e$  et  $E = -e$  en moteur.

**Relation fondamentale de la conversion de puissance électromécanique.** on discute ensuite du mode de fonctionnement selon les signes

**Réversibilité** Une machine à courant continu est donc réversible, c'est-à-dire qu'elle peut fonctionner soit en moteur soit en génératrice. Dans le premier cas la machine est alimentée par une source de tension continue et fonctionne comme un récepteur électrique. Dans le second cas, la machine fonctionne comme un générateur de tension continue alimentant une impédance de charge  $Z_c$ .

**Fonctionnement moteur :** Les forces de Laplace travaillent dans le sens de rotation et donc  $\langle \Gamma \Omega \rangle > 0$  et donc  $\langle eI_R \rangle < 0$ .

**Fonctionnement générateur :** Pour fournir de l'énergie électrique, de l'énergie mécanique doit être transformée en énergie électrique donc  $\langle eI_R \rangle > 0$ . Par conséquent, le couple de Laplace devient résistif.

**Diagramme de fonctionnement** On le projette (JN).

- $eI_R > 0$  : la machine fournit de l'énergie électrique et fonctionne en générateur
- $eI_R < 0$  : la machine consomme de l'énergie électrique et fonctionne en récepteur
- $\vec{\Gamma}_z \cdot \vec{\Omega} > 0$  : la machine fournit une puissance mécanique et fonctionne en moteur
- $\vec{\Gamma}_z \cdot \vec{\Omega} < 0$  : la machine perd de l'énergie mécanique et fonctionne en freinage

Ce principe de réversibilité du fonctionnement de la machine à courant continu est utilisé dans les voitures à moteur électrique ou dans le métro. Par exemple en voiture hybride, lorsqu'on veut accélérer, on utilise la machine comme moteur en prélevant de l'énergie électrique à la batterie, et lorsqu'on veut freiner, on utilise la machine comme générateur en rechargeant la batterie. En métro l'énergie électrique récupérée en mode générateur est réinjectée dans le rail pour alimenter les autres rames.

**ODG:** machine à courant continu du téléphérique du Pic du Midi. Les valeurs nominales sont :  $U_n = 420$  V,  $I_n = 1009$  A,  $U_{en} = 260$  V,  $I_{en} = 11,2$  A,  $P_n = 400$  kW,  $N = 1373$  tr/min,  $C_n = 2880$  N.m. source : <http://projet.eu.org/pedago/sin/1ere/9-mcc.pdf>

### 2.3 Equations de la MCC, caractéristique en régime permanent

**Equation électrique, équation mécanique** Avec l'équation mécanique qui vient du TMC et l'équation électrique qui vient de la loi des mailles, on donne le système de deux équations.

**Paramètres, inconnues** En fonctionnement moteur, les données sont  $\phi_S, R$  et  $U$  imposés par l'opérateur. Les inconnues sont  $I_R, \Omega, \Gamma, E$ . On a obtenu deux équations. En régime permanent, les deux restantes sont la caractéristique de la charge  $\Gamma_r(\Omega)$  et l'équilibre du couple moteur et du couple résistif+couple de frottement  $\Gamma_{EM} = \Gamma_r + \Gamma_f$ .

**Point de fonctionnement/caractéristique**  $\neq$  ma fiche et Bréal. *La forme de la caractéristique du couple résistif est souvent donnée par le type de frottement : si fluide  $\Gamma_r(\Omega) \propto \Omega^2$  avec une valeur non nulle à  $\Gamma_r(\Omega) \neq 0$  à cause du frottement solide.*

On en déduit que la vitesse du moteur à courant continu  $\Omega$  est donc essentiellement imposée par sa tension d'alimentation  $U$ , et peu par le couple à fournir.

#### Commentaires

- Si on néglige la chute ohmique,  $\omega \propto U$  c'est un moyen simple de contrôler la vitesse de rotation, c'est ce qui explique pourquoi cette machine a été la première à être utilisée.
- Au démarrage, on peut avoir un couple non-nul à vitesse nulle, le moteur peut démarrer tout seul.
- En réaction au mouvement une force électromotrice induite s'établit (négligée dans l'étude, on pourrait ajouter une bobine). Cette cfem est proportionnelle à la vitesse de rotation  $\Omega$ . Si  $\Omega$  augmente,  $e$  la fcem augmente, donc  $I_R$  diminue donc le couple des forces de Laplace diminue. Cela fait que le moteur à courant continu est naturellement un système en contre-réaction.

### 2.4 Bilan de puissance

Encore une fois, les machines réelles présentent des écarts par rapport à la machine idéale jusqu'ici décrite. Par exemple, il est plus réaliste de prendre en compte les résistances et les inductances de l'induit et de l'inducteur dans les équations électriques, et en particulier lors d'un bilan d'énergie.

Dans une machine à courant continu, les pertes d'énergie sont de plusieurs natures :

- les pertes électriques (ou pertes "cuivre")  $\mathcal{P}_J$  : elles se produisent par effet Joule dans les circuits électriques de l'inducteur et de l'induit ainsi qu'au niveau des contacts collecteur-balais :

$$\mathcal{P}_J = RI_R^2 + r_e i_e^2 \quad (9)$$

avec  $r_e$  la résistance du circuit inducteur et  $i_e$  le courant inducteur (contribution nulle si l'inducteur est constitué par un aimant permanent). L'échauffement qui en résulte est réduit par une ventilation forcée ;

- les pertes fer  $\mathcal{P}_{fer}$  : ce sont les pertes par hystérésis et les pertes par courants de Foucault produites dans la carcasse ferromagnétique du rotor ;
- les pertes par commutation  $\mathcal{P}_{com}$  : lors des commutations du collecteur les fortes variations de courants dans le circuit induit produisent des étincelles qui détruisent les contacts électriques et dissipent de l'énergie ;
- les pertes mécaniques  $\mathcal{P}_{frot}$  : elles sont dues au contact des balais sur le collecteur (sensiblement proportionnelles à la vitesse de rotation) et à la liaison rotor-bâti.

En *régime permanent*, pour une machine fonctionnant en moteur à l'aide d'une puissance électrique fournie  $\mathcal{P}_{elec\ ext} = UI_R > 0$ , le bilan de puissance est :

$$\mathcal{P}_{elec\ ext} - \mathcal{P}_J - \mathcal{P}_{com} = -\mathcal{P}_e = \mathcal{P}_L = \mathcal{P}_{frot} + \mathcal{P}_{fer} - \mathcal{P}_{méca\ ext} \quad (10)$$

avec  $\mathcal{P}_{méca\ ext} = \vec{\Gamma}_{utile} \cdot \vec{\Omega} < 0$  la puissance mécanique récupérable sur l'arbre du moteur.

**Rendement moteur** Le rendement du moteur est égal au rapport de la puissance mécanique utile délivrée à la charge mécanique sur la puissance électrique fournie par les générateurs. En tenant compte de tous les effets dissipatifs, il s'écrit :

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

qui s'exprime aussi en fonction des couples :

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

**ODG:**  $\eta = 80\%$ . La limite est 1, pas comme les machines thermiques.

**Bilan générateur** Pour une machine fonctionnant en génératrice à l'aide d'une puissance mécanique fournie  $\mathcal{P}_{\text{méca ext}} = \vec{\Gamma}_z \cdot \vec{\Omega} > 0$ , le bilan de puissance est :

$$\boxed{\mathcal{P}_{\text{méca ext}} - \mathcal{P}_{\text{frot}} - \mathcal{P}_{\text{fer}} = -\mathcal{P}_L = \mathcal{P}_e = \mathcal{P}_J + \mathcal{P}_{\text{com}} - \mathcal{P}_{\text{élec ext}}} \quad (11)$$

avec  $\mathcal{P}_{\text{élec ext}} = U I_R < 0$  la puissance électrique récupérable sur le circuit induit.

**Rendement générateur** La puissance totale fournie à la génératrice étant  $\mathcal{P}_{\text{mec}} + U_s I_e$ , le rendement de la génératrice a pour expression :

$$\eta = \frac{\mathcal{P}_{\text{ut}}}{\mathcal{P}_{\text{mec}} + U_s I_e} = 1 - \frac{\mathcal{P}_{\text{fer}} + \Gamma_f \Omega + R_r I_G^2 + R_s \hat{I}_e^2}{\mathcal{P}_{\text{mec}} + U_s I_e}$$

En notant  $\mathcal{P}_f = \Gamma_f \Omega$ , la puissance dissipée par frottement mécanique et  $\mathcal{P}_J = R_r I_G^2 + R_s I_e^2$  la puissance totale dissipée par effet Joule, on obtient :

$$\eta = 1 - \frac{\mathcal{P}_f + \mathcal{P}_J + \mathcal{P}_{\text{fer}}}{\mathcal{P}_{\text{mec}} + U_s I_e}$$

En définissant, comme dans le cas moteur, le couple de perte par  $\Gamma_p = \frac{\mathcal{P}_{\text{fer}} + \mathcal{P}_f}{\Omega}$ , le rendement s'exprime en fonction des couples selon l'expression :

$$\eta = 1 - \frac{\Gamma_p \Omega + \mathcal{P}_J}{\Gamma_{\text{mec}} \Omega + U_s I_e}$$

## 2.5 Considérations techniques

**Considérations techniques** Démarrage, extinction des feux, bobinage. L'intérêt d'avoir plusieurs bobinages est d'avoir un couple qui ondule moins : <https://youtu.be/LAtPHANefQo?t=101>.

**Avantages** La vitesse de rotation réglable facilement avec la tension.

### Applications

- automobile en génératrice pour charger des batteries
- tachymètres : mesure précise de la vitesse de rotation
- Vélos et trottinettes électriques : Les vélos à assistance électrique et les trottinettes électriques sont équipés de moteurs à courant continu car les batteries délivrent nativement un courant continu. Ils peuvent être soit avec balais, soit sans balais mais dans ce cas ils doivent être accompagnés d'un contrôleur électronique.

**ODG:** avec le BUP

### Inconvénients

- Le collecteur est la pièce maîtresse du moteur à courant continu, mais aussi la plus fragile à cause des contacts glissants qui s'usent : frottements mécaniques, chauffage, arcs électriques et qu'il faut donc remplacer régulièrement. **ODG:** démontage complet tous les ans pour le TGV.

OdG pour son utilisation (b BUP)

**Ouverture : moteurs sans balais** Pour des utilisations à longue durée de vie, (servo- mécanismes, les machines-outils, la robotique, les disques durs, graveurs DVD, ventilateurs d'ordinateur, voitures hybrides, vélos à assistance électrique) on peut utiliser des moteurs à courant continus sans balais. Un système électronique (capteur à effet Hall + commutateur) qui réalise lui-même la commutation des courant dans le circuit rotorique. Par son alimentation, il rentre dans les catégorie des machine à courant continu, mais par son fonctionnement il ressemble plutôt à une machine synchrone auto-pilotée. <https://www.youtube.com/watch?v=bCEi0nuODac>

## 2.6 Bonus : modes d'excitation

## 2.7 Bonus : caractéristique de fonctionnement

## Conclusion

**Ouverture :** De nos jours, les machines à courant alternatif sont industriellement beaucoup plus utilisées que les MCC. Cela pour des raisons liées à leur fiabilité, à leur entretien et à leur puissance volumique plus élevée. Utiliser les champs tournants permet de se passer des balais, qui ont une durée de vie limitée.

## 3 Machines alternatives

### 3.1 Champ magnétique tournant

**Méthode de base** Pour générer un champ tournant à  $\omega$ , on peut utiliser 2 bobines d'axe orthogonal et déphasées de  $\pi/2$  : la superposition de deux polarisations rectilignes en quadrature donne le champ tournant. Un autre possibilité est d'utiliser trois bobines distantes géométriquement d'une rotation de  $120^\circ$  et déphasés temporellement de  $2\pi/3$  : c'est les bobines triphasées.

**Théorème de Ferraris** Trois bobinages décalés de  $2\pi/3$  alimentés par des courants sinusoïdaux triphasés équilibrés de pulsation  $\omega$  sont équivalents à un rotor fictif bipolaire tournant à la vitesse  $\omega$ . Ce rotor fictif passe par l'axe d'une bobine quand le courant y est maximum.

**Cas d'une alimentation monophasée** Dans le cas d'un réseau électrique domestique, l'alimentation est monophasée. Comment générer un champ magnétique tournant pour faire tourner le moteur d'une machine à laver par exemple ? On crée un champ oscillant dans une direction (rectiligne), qu'on peut décomposer en deux polarisations tournantes et on fait en sorte de mettre en mouvement le moment magnétique qui tourne pour qu'il n'accroche qu'un des deux champs tournant.

### 3.2 Machine synchrone

[JN] **Constitution** Pour une machine synchrone, le rotor est un moment magnétique permanent (aimant ou bobine, avec ou sans noyau de fer). Le stator produit un champ magnétique avec un bobinage triphasé. Le champ est radial à répartition sinusoïdale :  $\vec{B}(\theta, t) = B_s \cos(\omega_s t - \theta) \vec{e}_r$ .

**Rotation et couple** Le rotor tourne à la vitesse de rotation du champ statorique, seule vitesse possible assurant un couple moyen non nul. Le couple de Laplace dépend en  $\sin \alpha$  du retard  $\alpha$  avec le champ tournant et sa valeur s'ajuste pour assurer l'équilibre des couples de Laplace et de la charge. A charge fixée, deux valeurs de  $\alpha$  sont possibles mais une seule est stable.

**Fonctionnement générateur/alternateur** Le moteur synchrone est réversible, il peut fonctionner en générateur, et on le nomme alors alternateur. Le rotor est mis en mouvement par des forces mécaniques (turbines à vapeur dans les centrales thermiques et nucléaires ou moteur à explosion). Le moment magnétique du rotor est la source du champ magnétique, dont le flux dans les enroulements du stator (constitué de trois bobinages qui ne sont plus alignés) est alternatif à cause de la rotation. On obtient donc un ensemble triphasé de forces électromotrices à la fréquence de rotation du rotor. Le rotor est alors appelé inducteur et le stator induit.

**Problème au démarrage** L'avantage du moteur synchrone est qu'il est facilement commandable en vitesse par la vitesse de rotation du champ statorique car les deux vitesses sont égales. Mais l'inconvénient de ce moteur est que son couple au démarrage est de valeur moyenne nulle car le rotor n'a pas encore accroché le champ statorique et sans couple il ne peut commencer à vaincre le couple de charge.

Le problème du démarrage est résolu (i) par un système d'électronique de puissance, consistant en des onduleurs de fréquence variable, et permettant d'établir un asservissement de l'angle interne pour obtenir de façon constante un couple moteur. On parle alors de moteur synchrone autopiloté. (ii) en plaçant sur le rotor de la machine synchrone des barres métalliques reliées par des couronnes, celles-ci jouent le rôle de cage d'écureuil, donc de machine asynchrone qui assure le démarrage du moteur. Une fois le synchronisme atteint le couple qui s'exerce sur cette cage devient nul.

#### Applications

- production d'électricité (générateur/alternateur) avec les turbines à vapeur dans les centrales thermiques et nucléaires.
- traction ferroviaire (moteur) dans le TGV Atlantique

### 3.3 Machine asynchrone

**Constitution** Pour la machine asynchrone, le rotor est constitué d'une bobine en court-circuit. Le courant qui le parcourt est d'origine purement inductive, due à la rotation et au champ tournant statorique. Le rotor a une fréquence légèrement inférieure à celle du champ tournant, on parle de vitesse de glissement. En effet, si la vitesse est identique, le flux coupé par la boucle ne change pas dans le temps.

**Structure** Le stator est semblable à celui de la machine synchrone. Il possède un bobinage triphasé dans des encoches creusées dans un circuit magnétique doux destiné à canaliser le flux magnétique. Le bobinage du rotor est le siège des courants induits. Il s'agit d'un circuit fermé supportant de très forts courants. On distingue principalement deux types de rotors. Il peut être réalisé à partir de bobinages (on a alors des bornes qui donnent accès à ce circuit afin de pouvoir changer sa résistance au démarrage). Il peut être également formé par une cage, réalisée à partir de barres en aluminium fixées entre deux anneaux. C'est la structure la plus robuste.

**Modélisation** Le circuit électrique est constitué de  $(e, R, L)$ . La courbe  $\Gamma(\omega_g)$  est nulle en 0 (couple nul au synchronisme) et présente un maximum. A couple résistif fixé, le point stable est celui après le maximum.

**Démarrage** Le couple est non-nul au démarrage car la vitesse de glissement est non nulle.

**Applications** Les moteurs asynchrones sont les plus répandus dans le domaine des moyennes puissances, du fait de leur faible rapport prix/puissance.

- dispositifs domestiques : machines à laver, sèche linge, tondeuse électrique
- dispositifs industriels : machine-outil.
- traction ferroviaire dans les derniers modèles de TGV (TGV Nord)
- structures éoliennes.

Machine	MCC	Synchrone	Asynchrone
Constitution	$\vec{B}$ fixe, $\vec{M}$ permanent	$\vec{B}$ tournant, $\vec{M}$ permanent	$\vec{B}$ tournant, $\vec{M}$ induit
Rotation	Commandée en tension	Synchrone avec retard	Vitesse de glissement
Commentaires	Redressement mécanique, entretien	Couple nul au démarrage	$\Gamma(\omega_g)$ a un maximum.
Applications	Vélo électrique, métro D (Lyon)	TGV atlantique, centrales	Puissance moyenne, domestique

## De l'alternatif au continu

### 3.4 Redressement, pont de Graetz

**Redressement mono-alternance** Avec une diode, on redresse le signal *i.e.* un courant algébrique devient positive ou nul mais on perd la puissance liées aux demi-périodes de courant négatif :  $s(t) = \max(e(t), 0)$

**Redressement double-alternance** Pour y remédier, on fait un redressement double alternance :  $s(t) = |(e(t), 0)|$  à l'aide d'un pont de Graetz, qui met en jeu 4 diodes (2 circuits croisés).

### 3.5 Lissage

**Lissage** Pour transformer le signal redressé en signal quasi-continu, on le lisse en plaçant un  $RC$  de fréquence de coupure adaptée.

## Du continu vers le continu

Cela ne peut pas être fait à l'aide de transformateurs électriques car ceux-ci reposent sur l'induction et nécessitent donc des tensions variables dans le temps.

### 3.6 Pont diviseur de tension

Ok mais le rendement est faible : de la puissance est dissipée par effet Joule.

### 3.7 Hacheur

Dans le pont diviseur de tension, on préfère alors remplacer le rhéostat par un interrupteur dont la fermeture et l'ouverture sont commandées électroniquement. En général, l'interrupteur commandé sera alimenté périodiquement : il sera fermé pendant une durée  $\alpha T$  et ouvert pendant  $(1 - \alpha)T$  où  $\alpha$  est nommé rapport cyclique et détermine la puissance moyenne délivrée à la charge.

Les variations brutales d'intensité et de tension peuvent être gênantes et on doit dans ce cas recourir à un lissage de la tension : soit avec un condensateur, soit avec une bobine. [todo : plus de détails dans le Duffait élec].

### 3.8 Les interrupteurs

[duffait]

- diode semi-conductrice (jonction pn)
- transistor bipolaire (pnp), interrupteur unidirectionnel.
- transistor MOSFET (metal oxide on top of a semiconductor field effect transistor). La grille sert d'électrode de commande et régule le passage de l'état bloqué à l'état passant. Pour commander la grille, il faut un circuit de commande qui peut charger/décharger rapidement la grille. C'est un interrupteur unidirectionnel.
- thyristor (pnpn). C'est une diode commandée par le courant injecté sur une électrode supplémentaire, appelée gachette. Son utilisation est celle d'une diode (redressement mono-alternance, pont de Graetz version thyristor), mais elle offre la possibilité de contrôler la courant moyen et donc la puissance fournie à la charge, par l'instant où on ferme l'interrupteur.

## Du continu vers l'alternatif

### 3.9 Onduleur

Si on dispose de deux sources  $E/2$  ou d'une source à point milieu, l'onduleur demi-pont utilise deux interrupteurs commandés, ouvert/fermés alternativement tous les  $T/2$  (si l'un est ouvert, l'autre est fermé). Le signal obtenu est alors carré de période  $T$ , entre  $\pm E/2$ .

## De l'alternatif vers l'alternatif

Un transformateur ! (cf. fiche)

## Compléments/Questions

- Bobinage à  $N$  spires (cf. JN). Cela permet de réduire les oscillations du couple.
- Hacheur, onduleur, thyristor.
- Moteur universel (BUP)

## Passage

### Plan

### Questions

- Pourquoi utilise-t-on plutôt du triphasé pour les champs tournants ? Historiquement, il était difficile de transporter un fort ampérage sur une seule phase : jusqu'aux années 90, les installations domestiques à fort ampérage, type carrelages chauffants fonctionnaient en triphasé.
- Qu'est-ce qu'un moteur asynchrone ?
- Quels autres exemples de conversion EM connaissez-vous ? Le haut-parleur et les piézo-électriques.
- A quelle condition le bilan  $P_e + P_m = 0$  est-il valable ? Il faut assurer a priori que le conducteur soit filiforme, pour pouvoir retrouver l'élément de force de Laplace.
- Pourquoi le circuit n'est pas complètement parallèle à l'axe de rotation du rotor ? Il est dit hélicoïdal. Le but est d'éviter les ondulations du couple lors du fonctionnement et donne ainsi la possibilité d'un meilleur asservissement en position.
- Comment calculer autrement la force électromotrice d'induction dans le cas de la machine à courant continu ? On peut simplement intégrer la loi de Faraday et vérifier après que le bilan énergétique est vérifié.
- Comment limiter les pertes par courants de Foucault ? Les matériaux ferromagnétiques sont feuilletés. Ils sont feuilletés dans le but de couper les lignes de courant, ce qui détermine le sens du feuilletage. Le feuilletage est réalisé à l'aide d'un vernis isolant.

- Comment différencier expérimentalement les différentes pertes ? Les pertes par frottement mécanique peuvent se déterminer par la mesure du couple résistant à vide. Les pertes Joule dans l'induit et dans l'inducteur peuvent être déterminées par la mesure de leurs résistances. On peut a priori différencier les pertes de flux et les pertes par hystérésis, des pertes par courant de Foucault, car la dépendance fréquentielle n'est pas la même (en  $\omega^2$  pour les courants de Foucault, en  $\omega$  pour hysteresis, mais pas toujours si le cycle se déforme). Expérimentalement, cette distinction n'est pas aisée.
- Quel problème pose le démarrage de la machine à courant continu ? Au démarrage, la tension est d'ordre  $K\phi\omega$  tandis que la vitesse angulaire est nulle. Comme  $u = k\phi\omega + ri$ , l'intensité est élevée, ce qui peut induire un échauffement trop important. En pratique, c'est surtout problématique pour les machines à courant continu de forte puissance, on utilise dans ce cas une rampe de tension ou un rhéostat de démarrage que l'on court-circuite une fois le démarrage effectué.
- Quelles applications pour les machines à courant continu ? Anciennement, la propulsion des locomotives électriques, du fait de la facilité du contrôle en vitesse (premiers TGV, vieilles locomotives, métro lyonnais). On trouve actuellement beaucoup de machines à courant continu dans des applications à faible puissance (essuie-glace, lève-vitre, photocopieuses, petits ventilateurs, etc.). Le stator est dans ces cas composé d'aimants permanents. Les anciennes voitures électriques utilisaient souvent des machines à courant continu. Désormais, ce sont les technologies synchrone et asynchrone que l'on rencontre le plus souvent. La plupart des voitures électriques fonctionnent avec des moteurs synchrones. Le rotor est constitué d'aimants permanents (Peugeot iOn, Toyota Prius) ou d'aimants induits (Renault Zoé). L'entretien des machines à courant continu est en effet assez onéreux du fait de la fragilité du système balais-collecteur. L'avantage du moteur asynchrone est sa grande robustesse. Branché directement au réseau triphasé, sa vitesse varie seulement de quelques % entre le fonctionnement à vide et la pleine charge. Il est très utilisé lorsque le contrôle de la vitesse n'est pas très important. Grâce au développement de l'électronique de puissance, il est maintenant utilisé dans des applications à vitesse variable (trains récents, tramway lyonnais, etc.)

## Commentaires

## Préparation

1)

## Materiel

### Rails de Laplace

- Rails de Laplace

### Rails de Laplace

- Rails de Laplace

### Moteur synchrone

- Trois bobines
- Onduleur
- Aiguille de boussole

### Cage d'écureuil

- Même matériel que pour moteur synchrone
- Cage d'écureuil

## 4 Commentaires

Mettre plus d'application : on peut parler des haut-parleurs, des piézoélectriques. Rien que dans une voiture il y a une vingtaine de ces systèmes

Il faut une application en alternatif aussi, on peut parler des alternateurs qui servent à produire le courant EDF.

Aller (beaucoup) plus vite sur la mise en équation.

On peut monter le "schéma des electrotechniciens" avec les pertes, et les 4 cadrans de la MCC.

## 5 Questions

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 quelque 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. Non, sinon  $\text{div}B \neq 0$ .

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,  $\vec{v}$ ) 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 entraine un ventilateur pour évacuer la chaleur.