

# Induction et conversion de puissance : quelques compléments

Ce qui suit est à titre informatif seulement. Le lire si vous avez le temps.

## 1 –Détails sur la MCC à entrefer plan (celle du cours)

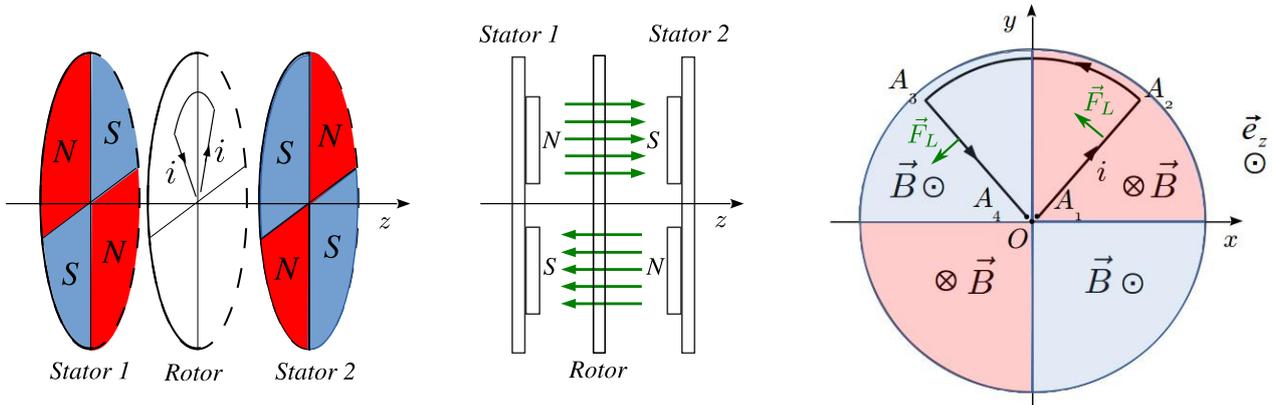
### ★ Câblage du rotor :

Le courant  $i$  arrive par l'axe du rotor, et doit aussi repartir par cet axe : le courant ne peut donc pas toujours aller de l'axe vers la périphérie, il faut qu'un fil le ramène au centre. Le choix effectué est celui de la figure ci-dessous : chaque rayon fait un arc de cercle et revient vers le centre. L'angle entre le rayon aller et le rayon retour est de  $90^\circ$  exactement.

La portion "arc de cercle" ne contribue pas au moment des forces de Laplace, car  $\vec{F}_L$  sur cette portion est dirigée vers l'axe.

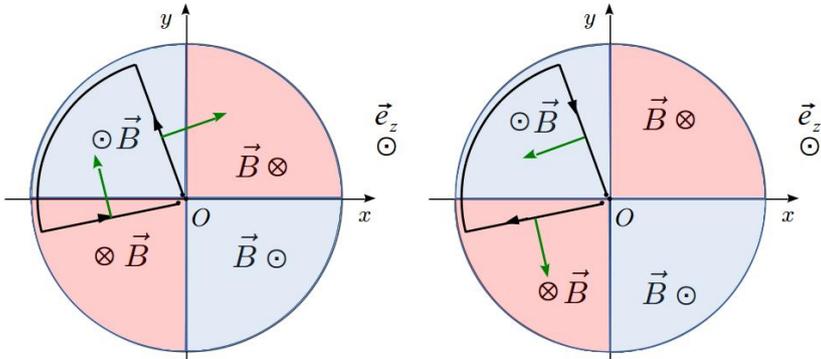
Donc seuls les deux rayons contribuent. Mais si le champ magnétique  $\vec{B}_0$  était toujours dans le même sens, par exemple  $\vec{B}_0 = -B_0\vec{e}_z$  comme supposé précédemment, alors la force de Laplace sur le rayon aller serait opposée à celle sur le rayon retour, et le moment résultant de la somme des deux serait nul !

La solution est d'imposer un champ  $\vec{B}$  non uniforme, réparti par quadrant comme sur la figure ci-dessous. Ainsi quand le rayon aller est dans une zone où  $\vec{B} = -B_0\vec{e}_z$ , alors le rayon retour est nécessairement dans une zone où  $\vec{B} = +B_0\vec{e}_z$ , et les forces de Laplace sont ainsi toujours dans le même sens !



### ★ Rôle du collecteur et des balais :

Une dernière subtilité subsiste : si on s'en tient à ce qui est fait jusqu'ici, lorsque la paire de rayons change de quadrant, alors les deux forces de Laplace changent de sens (puisque les champs  $\vec{B}_0$  changent de sens) (cf ci-dessous à gauche, à comparer à la figure ci-dessous à droite : les forces de Laplace ont changé de sens).



On ne fait rien de spécial. Lors d'un chagement de quadrant, la force de Laplace s'inverse par rapport à précédemment.

Le collecteur inverse le sens du courant lors d'un chagement de quadrant. La force de Laplace reste alors toujours dans le même sens.

Le courant est transmis aux rayons à l'aide de balais qui frottent contre l'axe. La solution est d'utiliser des points de contact, au niveau de l'axe de rotation, qui envoient le courant dans les rayons différemment en fonction de où sont situés ces rayons. Ce système est appelé le collecteur. Ainsi, lorsqu'un rayon change de quadrant, le collecteur envoie le courant dans un sens contraire à précédemment.

★ **Enfin**, nous avons raisonné sur une seule paire de rayons. Dans le moteur réel il y a un grand nombre de telles paires. Il peut également y avoir plus que quatre secteurs.

## 2 – Utilisations des moteurs et générateurs

### Moteurs

Du côté des moteurs peu puissants (servo-mécanisme, mécanisme de voiture comme les essuie-glaces, jouets, ...), on trouve une grande part de machines à courant continu (MCC).

Mais dès que les puissances deviennent importantes, les MCC sont de moins en moins utilisées, car le système de balais qui assure le passage du courant vers le rotor implique des frottements, de la chaleur, des étincelles, et un entretien régulier et coûteux.

Le seul avantage des MCC est une vitesse angulaire facilement réglable (en changeant la tension d'alimentation), chose compliquée pour les machines synchrones et asynchrones car il faut pour cela changer la fréquence de la tension d'alimentation. Mais ceci n'est plus un problème depuis les années 1980 avec la maîtrise de la commutation de puissance (onduleurs, hacheurs), et des mathématiques qui vont avec <sup>1</sup>, et qui permettent de produire à volonté une tension de fréquence voulue, que ce soit à partir d'une tension alternative à 50 Hz ou d'une tension continue.

Ainsi les moteurs asynchrones correspondent à 80% des moteurs utilisés dans l'industrie (machine outil, ventilateur, ...), car peu chers, nécessitant peu d'entretien (absence de balais), et possédant un bon couple au démarrage.

Dans les trains on trouve de tout (MCC, asynchrone, synchrone), mais les MCC tendent à disparaître. La puissance typique par moteur est de 1MW à 2MW (une rame en contient plusieurs).

Dans les premières voitures électriques on trouvait des MCC (Peugeot 106). Il s'agit aujourd'hui de machines asynchrones commandées de façon pointue (Roadster de Tesla Motor par exemple), où la tension continue de la batterie est convertie en triphasée de fréquence réglable par un onduleur. Les constructeurs penchent également vers des machines synchrones, soit à aimants permanents, soit à bobine inductrice. Des innovations sont constamment à l'étude, comme par exemple le moteur à flux axial <sup>2</sup>, qui est à entrefer plan mais avec les aimants sur le rotor. La puissance typique est de l'ordre de 100 kW (tout comme pour les moteurs thermiques).

Les vélos électriques utilisent également des moteurs synchrones <sup>3</sup>, dont le rotor est fait d'aimants permanents, alimentés à partir de la batterie dont la tension continue est distribuée alternativement aux bobines du stator par un calculateur.

Dans l'électroménager (aspirateur, machine à laver), on trouve des moteurs appelés "universels", qui ressemblent à des moteurs à courant continu, avec stator (bobiné) et rotor alimentés en série par le courant alternatif, si bien que le sens du champ  $\vec{B}$  et du courant dans l'induit changent en même temps, le couple résultant est alors toujours dans le même sens, même s'ils sont alimentés en alternatif.

### Générateur

Là aussi, les générateur de type MCC ne sont plus utilisés à cause des inconvénients des balais. La seule exception est l'utilisation comme tachymètre (capteur mesurant la vitesse de rotation), car la tension délivrée est proportionnelle à  $\omega$ .

L'alternateur de voiture ou la dynamo de vélo a été décrit dans le II.1 : il s'agit de génératrices synchrones (dont la tension produite est redressée dans le cas de la voiture).

Les centrales de production d'électricité utilisent des génératrices synchrones, dont la fréquence de rotation est de 50 Hz. La source de chaleur (énergie fossile ou nucléaire) sert à faire tourner une machine thermique (avec un rendement limité par  $1 - T_f/T_c$ ), puis la puissance mécanique en sortie de cette machine entraîne la génératrice afin de produire une puissance électrique (avec un rendement proche de 100%). Il en est de même dans les barrages hydroélectriques, où la turbine est entraînée directement par l'eau.

La plupart des éoliennes utilisent des génératrices asynchrones, probablement pour des raisons d'entretien.

---

1. Algèbre : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Commande\\_vectorielle](https://fr.wikipedia.org/wiki/Commande_vectorielle)

2. <http://www.voiture-electrique-populaire.fr/enjeux/technologie/moteur>

3. <https://www.furosystems.com/fr/nouvelles/comment-les-moteurs-dans-vos-velos-electriques-fonctionnent-ils/>

### 3 – Quelques remarques sur les matériaux magnétiques

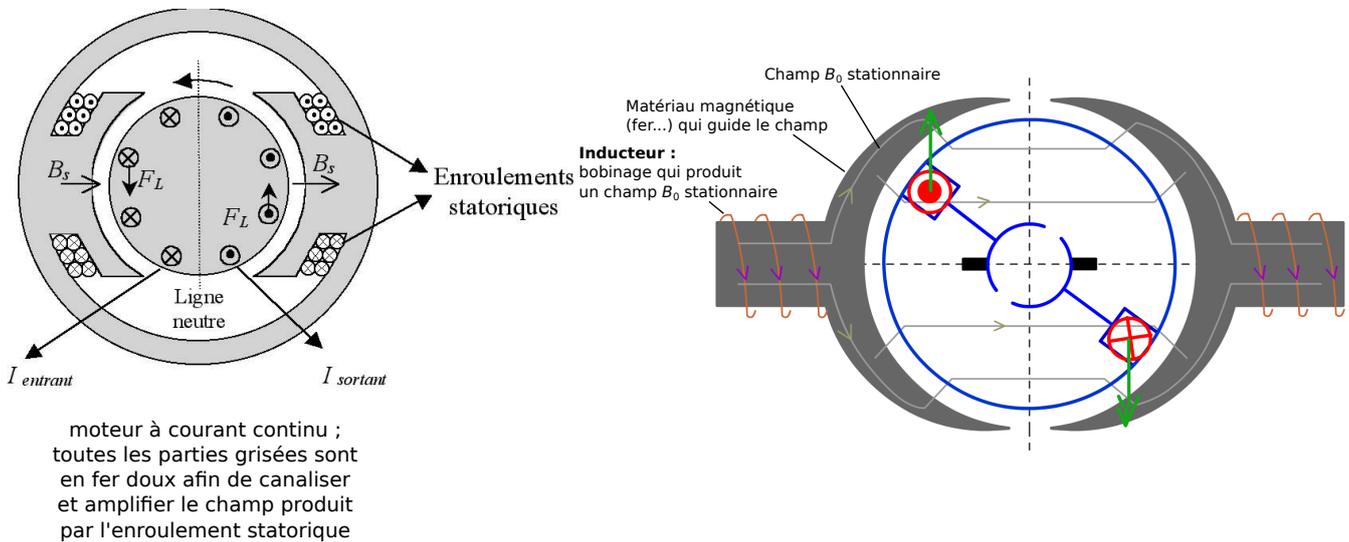
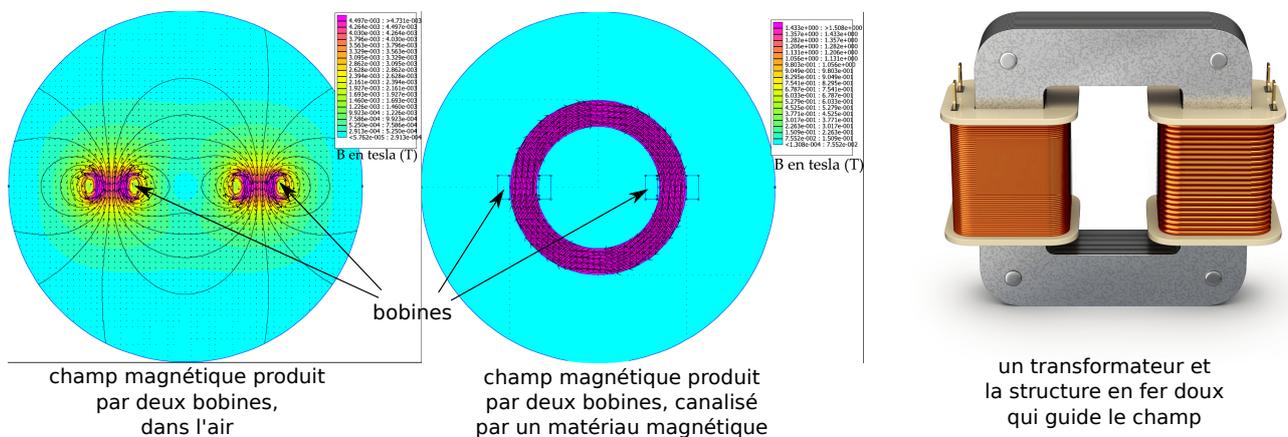
On entend par “matériaux magnétiques” des ferromagnétiques. Il s’agit en général de métaux, que l’on classe en deux catégories :

- Les ferromagnétiques durs : sous l’action d’un champ  $\vec{B}$ , ils deviennent fortement aimantés, et ils conservent cette aimantation propre une fois le champ externe coupé. Ce sont donc des aimants permanents.
- Les ferromagnétiques doux : sous l’action d’un champ  $\vec{B}$ , ils deviennent fortement aimantés, mais cette aimantation forte cesse si le champ  $\vec{B}$  externe est coupé.

Ils agissent donc comme des “amplificateurs de  $\vec{B}$ ” : ils ajoutent au champ  $\vec{B}$  leur propre champ. Ils sont utilisés dans les moteurs pour amplifier la valeur du champ magnétique produit par le stator, et donc la puissance du moteur.

Ils ont également pour effet de canaliser les lignes de champ et de les guider où on le souhaite : ceci est utilisé dans les moteurs, afin de diriger le champ du stator en direction du rotor. Nous avons également vu leur utilisation dans l’exercice sur le transformateur, afin que les lignes de champ du primaire soient guidées vers le secondaire, et vice-versa.

Le matériau ferromagnétique doux le plus utilisé dans les moteurs est le “fer doux”, un alliage de fer et de silicium ou aluminium.



On peut mentionner deux désavantages à l’utilisation de matériaux magnétiques :

- Ils alourdissent le moteur.
- La variation du champ magnétique fait qu’il y a des irréversibilités dans le matériau, et également des courants de Foucault induits dans le matériau (puisque c’est un métal conducteur) dissipé par effet Joule. Il en résulte donc une perte d’énergie. Comme le matériau est presque toujours du fer doux, on parle de **pertes fer** pour les désigner. Il faut ajouter ces pertes aux pertes Joule et pertes par frottements. Elles peuvent être réduites par une division du matériau magnétique en fines couches isolées les unes des autres, ce qui empêche en partie aux courants de Foucault de se développer.

Malgré ces désavantages, le gain de puissance est tel que les matériaux magnétiques sont utilisés dans quasiment tous les moteurs et générateurs.