

OS – Chapitre R

Conversion de puissance électromécanique

I - Conversion de puissance mécano-électrique

I.3 - Freinage par induction

Généralisation du principe

Lorsqu'un conducteur, quel qu'il soit, est en mouvement dans un champ magnétique et que ce mouvement est la cause d'une variation du flux magnétique dans le conducteur, alors l'apparition d'une fem d'induction puis d'un courant induit mène à l'apparition d'une force de Laplace.

Par application de la loi de Lenz, cette force est toujours une force de freinage pour le conducteur puisque sa cause première est un mouvement du conducteur.

Courants de Foucault

L'étude complète des courants de Foucault n'est pas au programme de PTSI. On se contente de retenir que leur origine est un phénomène d'induction et qu'ils sont les courants électriques induits dans le volume d'un conducteur massif (c'est-à-dire un conducteur non-filiforme).

Les courants de Foucault sont à l'origine de nombreuses applications (chauffage et four à induction, freins magnétiques) mais peuvent également être des nuisances à éliminer (dans les machines électriques, les transformateurs).

Exemple d'application : frein magnétique Le principe du freinage magnétique est de mettre la pièce mobile conductrice à freiner dans l'entrefer d'un aimant.

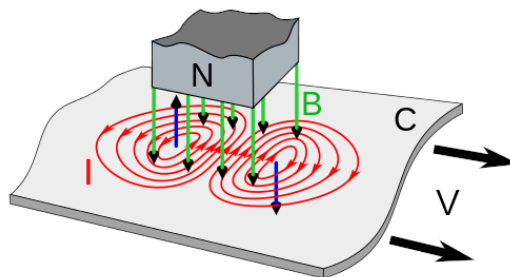


FIGURE 1.1 – La pièce mobile conductrice se déplace de gauche à droite dans l'entrefer d'un aimant dont le pôle nord est indiqué sur la figure (le pôle sud est en dessous de la pièce mobile). En vert : le champ inducteur dû à l'aimant, considéré nul en dehors de l'entrefer. En rouge : le courant induit par la variation de flux magnétique. En bleu : le champ propre induit par les courants induits.

L'analyse mathématique du phénomène est complexe en raison de la géométrie du système étudié, on retient néanmoins les points clés suivants :

- les parties de la pièce qui rentrent dans l'entrefer de l'aimant voient un flux magnétique qui augmente en valeur absolue car elles passent d'une zone où le champ est nul à une zone où le champ est non-nul (entrefer) ; le champ propre induit par les courants induits est opposé au champ inducteur (principe de modération de la variation du flux) ;
- les parties de la pièce qui sortent dans l'entrefer de l'aimant voient un flux magnétique qui diminue en valeur absolue car elles passent d'une zone où le champ est non-nul à une zone où le champ est nul ; le champ propre induit par les courants induits est dans le même sens que le champ inducteur (principe de modération de la variation du flux).

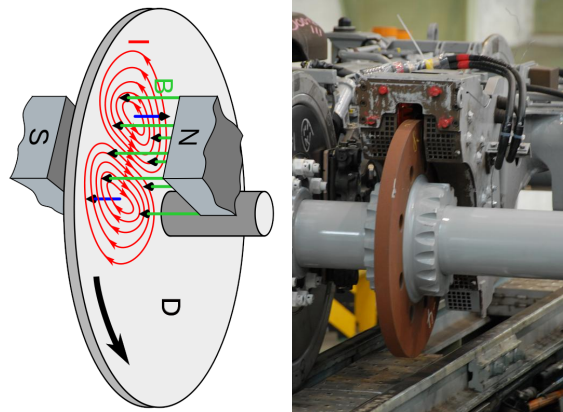


FIGURE 1.2 – À gauche : schéma physique de principe en rotation. À droite : la réalisation pratique d'un frein magnétique à courants de Foucault pour le Shinkansen, train à grande vitesse japonais ; le disque de freinage monté sur l'essieu passe dans l'entrefer d'un aimant qui constitue la « mâchoire » magnétique du frein.

L'analyse complète des différentes forces d'origine magnétique agissant sur la pièce mobile est complexe, mais leur résultante est toujours une force de freinage car la cause première qui les a produites est le mouvement de la pièce.

Les avantages du freinage magnétique sont :

- il est d'autant plus efficace que la pièce mobile va vite puisque la cause première du phénomène d'induction est le mouvement ;
- il n'y a pas de contact mécanique entre les pièces donc pas d'usure mécanique.

Les inconvénients du freinage magnétique sont :

- il n'est pas efficace à faible vitesse et asymptotiquement nul quand la pièce mobile est proche de l'arrêt : il faut donc prévoir un système de freinage auxiliaire si l'objectif est de stopper la pièce mobile ;
- les courants de Foucault qui se développent dans la pièce mobile dissipent beaucoup d'énergie sous forme thermique : il faut prévoir un système de refroidissement pour éviter l'usure thermique, voire la fonte de la pièce.

Autre expérience intéressante à analyser : <https://www.youtube.com/watch?v=xOXwk6XtabE>

Limitations des courants de Foucault Dans certaines situations, les courants de Foucault sont nuisibles, et on cherche alors à limiter leurs effets. Dans des disques mobiles en rotation, on peut par exemple réaliser des encoches (entailles) dans la masse métallique, pour limiter la circulation des courants. Dans le cas des noyaux ferromagnétiques des transformateurs, à l'origine des pertes « fer », on réalise un feuilletage qui lui aussi limite les effets des courants de Foucault (voir figure 1.3).

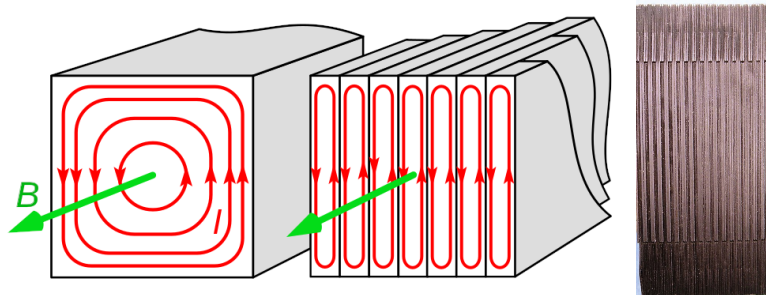


FIGURE 1.3 – À gauche : principe du feuilletage utilisé dans les noyaux ferromagnétiques de transformateurs et destiné à limiter les effets des courants de Foucault qui s'y développent. À droite : exemple de réalisation pratique.

Crédits images (dans l'ordre d'utilisation) :

- Chetvorno / CC0 (<https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/deed.fr>)
- Chetvorno / CC0 (<https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/deed.fr>)
- Take-y at the Japanese language Wikipedia / CC BY-SA (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>)
- Chetvorno / CC0 (<https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/deed.fr>)
- Roy McCammon / CC0 (<https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/deed.fr>)

II - Conversion de puissance électro-mécanique

II.1 - Moteur à courant continu

MCC à entrefer plan

Structure

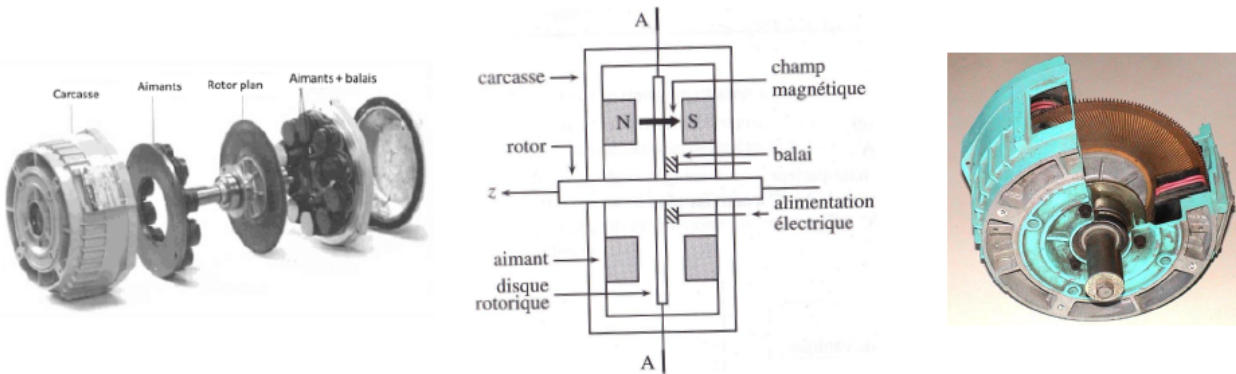
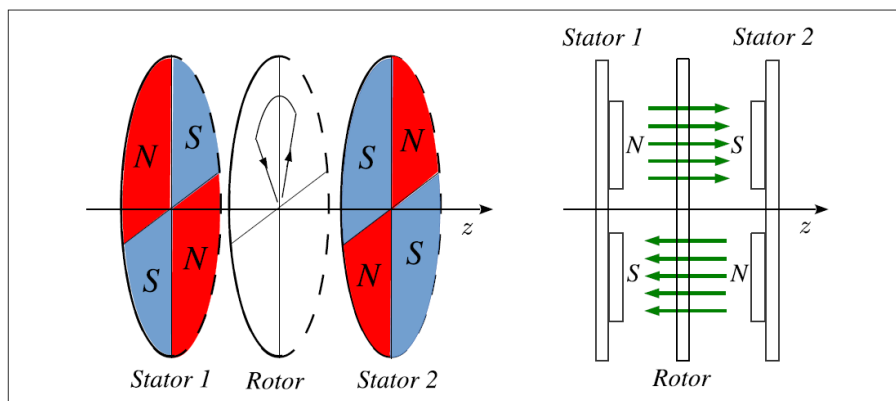


FIGURE 1.4 – **MCC à entrefer plan.** Vue éclatée (gauche), schéma en coupe (centre) et photo d’une machine ouverte (droite), permettant de bien voir les rayons assurant le transport du courant. L’axe de rotation de la MCC est l’axe (Oz).

Comme toute machine tournante, une MCC est constituée d’un stator fixe et d’un rotor mobile (voir figure 1.4). Le rotor est constitué d’un arbre et d’un disque, solidaire de l’arbre, sur lequel sont imprimés de nombreux circuits électriques radiaux (voir figure de droite), séparés par un isolant. Des contacts métalliques frottants appelés balais assurent le passage du courant entre les circuits électriques mobiles du rotor et l’alimentation, liée au stator.

Le stator, solidaire du bâti, est constitué d’une carcasse et de deux supports fixes circulaires sur lesquels sont montés des aimants permanents de polarités alternées de manière à obtenir des lignes de champs perpendiculaires au plan du rotor et de sens alterné pour chaque quadrant (voir figure ??). Un câblage astucieux du rotor couplé à une répartition bien choisie des aimants du stator permet une alimentation uniquement à partir des balais. On appelle entrefer l’espace situé entre les aimants : il s’agit ici du plan du rotor, noté AA sur le schéma central, d’où la dénomination de MCC à entrefer plan.

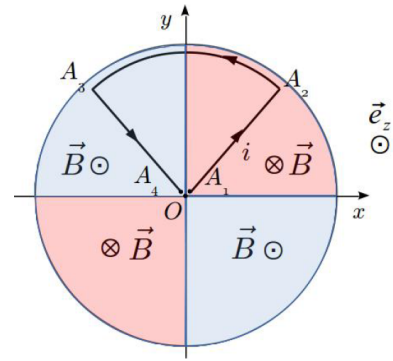


Modélisation et analyse physique

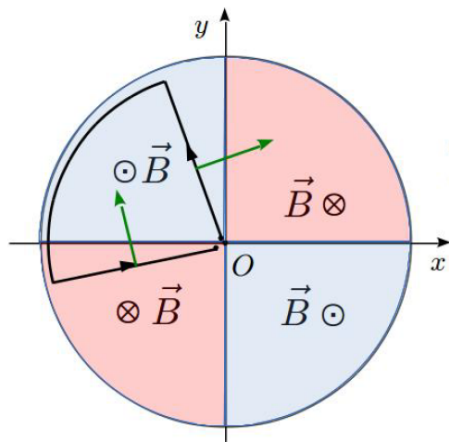
On considère une spire de courant $A_1A_2A_3A_4$ placée sur le rotor. Les points A_1 et A_4 par lesquels entre et sort un courant d’intensité i sont situés près de O . Les points A_2 et A_3 délimitent une portion d’arc de cercle de rayon a . $OA_1 \ll a$, $OA_4 \ll a$ de telle sorte qu’on considérera dans nos calculs que $OA_1 \simeq OA_4 \simeq 0$.

On considère le champ magnétique uniforme dans chacun des quadrants avec $\vec{B} = \pm B \vec{e}_z$.

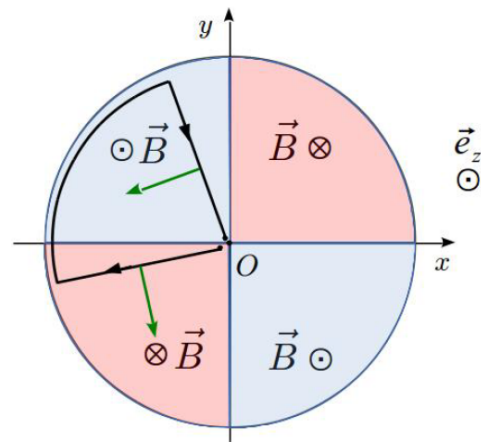
- Indiquer le sens des forces de Laplace subies par les segments A_1A_2 et A_3A_4 .
- Indiquer le sens des forces de Laplace subies par deux éléments de longueur du circuit situés sur l'arc $\widehat{A_2A_3}$ de part et d'autre de Oy . Ces forces contribueront-elles au moment résultant des forces de Laplace ?
- Dans quel sens le rotor est-il entraîné ?



Nécessité d'une commutation



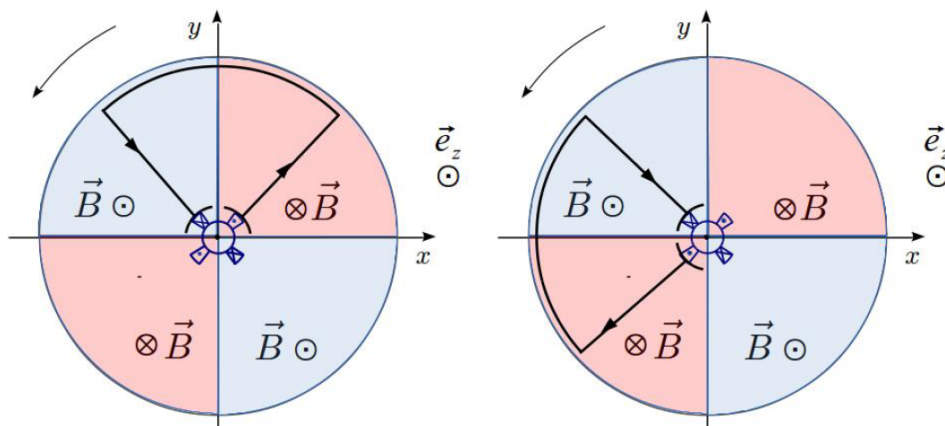
Si le sens du courant reste inchangé lorsqu'un rayon passe d'un cadran à un autre, l'entraînement de la spire n'est plus possible.



Si on parvient à inverser le sens du courant lorsqu'un rayon passe d'un cadran à un autre, l'entraînement se poursuit dans le même sens.

La commutation est réalisée par un système « collecteurs-balais »¹ :

- les balais sont solidaires du stator et donc fixes dans le référentiel d'étude,
- les collecteurs sont solidaires du rotor. Ils collectent le courant lorsqu'ils sont en contact avec le balai.



On constate sur la figure ci-dessus que les polarités des quatre balais sont alternées. Nous avons raisonné sur une unique spire. Sur un moteur réel, de nombreux enroulement sont superposés. On peut également disposer plusieurs enroulements autour de l'axe (par exemple ici en ajoutant un enroulement dans la position diamétralement opposée). On peut également augmenter le nombre de secteurs (ici quatre, certains moteurs en possèdent huit).

1. On place les balais près du centre, là où la vitesse est la plus faible, afin de minimiser les frottements

III - Synthèse

III.1 - Généralités

Nomenclature énergétique

Entrée(s)	Dispositif	Sortie(s)
énergie électrique	moteur électrique	énergie mécanique
énergie mécanique	générateur ou alternateur	énergie électrique
énergie électrique	transformateur	énergie électrique

D'une façon générale, l'efficacité énergétique s'écrit

$$\eta = \frac{\mathcal{P}_s}{\mathcal{P}_e}$$

avec $\mathcal{P}_e = \mathcal{P}_s + \mathcal{P}_d$ où \mathcal{P}_d est la puissance dissipée (pertes). On a donc aussi : $\eta = \frac{\mathcal{P}_s}{\mathcal{P}_s + \mathcal{P}_d}$.

Classification des machines électriques

La plupart des machines électriques sont en principe inversibles : elles peuvent souvent réaliser la conversion électro-mécanique et la conversion mécano-électrique.

On classe les machines électriques par la nature du courant électrique (continu ou alternatif) et par le caractère moteur (fournit un travail mécanique) ou générateur (fournit un travail électrique) de la machine.

	courant continu	courant alternatif
Moteurs	moteur à courant continu (MCC)	moteur synchrone (MS) ou asynchrone (MA)
Générateurs	génératrice	alternateur

Dispositifs utilisés pour les moteurs

	stator	rotor
MCC	aimant permanent ou électro-aimant	spire parcourue par I continu
MS	bobines alimentées (champ tournant)	dipôle magnétique (moment magnétique propre non nul)
MA	bobines alimentées (champ tournant)	bobine non-alimentée (moment magnétique propre nul)

III.2 - Analyses qualitatives

Les schémas présentés ci-dessous se veulent généraux ...et demandent donc d'être adaptés au cas par cas. Ils ont l'intérêt de mettre en évidence la réversibilité de la conversion électromécanique

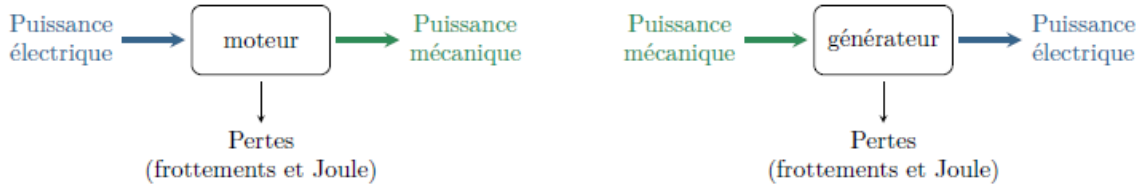


Figure 1 – Deux types de conversion. Un convertisseur électromécanique peut être utilisé comme un moteur ou comme un générateur. Seul change le sens de conversion d'énergie.

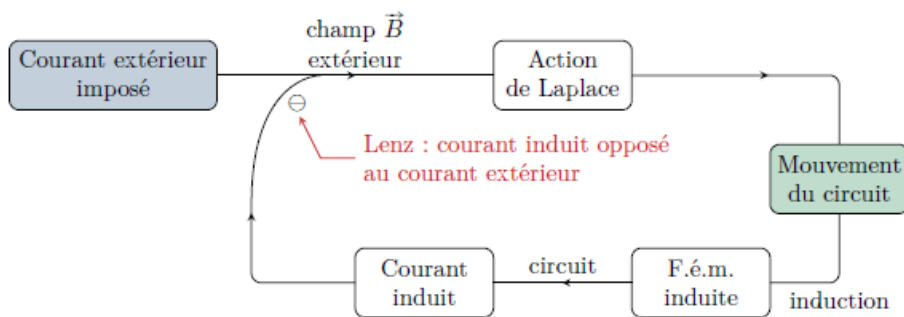


Figure 2 – Schéma de rétroaction d'un moteur. La grandeur fournie au convertisseur est un courant électrique, la grandeur récupérée est l'action mécanique permettant la mise en mouvement du circuit.

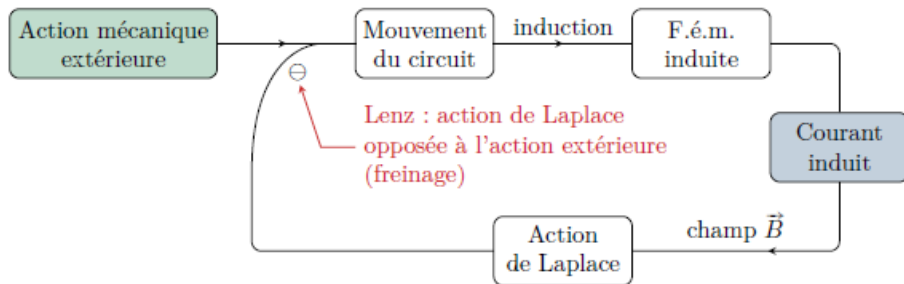


Figure 3 – Schéma de rétroaction d'un générateur. La grandeur fournie au convertisseur est l'action mécanique permettant la mise en mouvement du circuit, la grandeur récupérée est le courant électrique induit dans le circuit.

D'après E. Thibierge