

LP20 – CONVERSION DE PUISSANCE ÉLECTROMÉCANIQUE .

6 mai 2019

Lagoin Marc & Ramborghi Thomas

Niveau : L2

Commentaires du jury

- Une approche à l'aide des seules forces de Laplace est insuffisante .
- Le candidat doit savoir pourquoi les machines électriques utilisent des matériaux ferromagnétique.
- Un grand soin doit être porté dans la définition du système (orientation et conventions de signe).
- Les applications des machines présentées doivent être connues.

Bibliographie

⚡ *Électrotechnique Parcours IUT*, **Christophe Palermo**

⚡ *Physique tout-en-un (j'intègre)*, **S.Cardini**

⚡ *Électrotechnique, conversion de puissance PSI (les nouveaux précis Bréal)* , **P. Brenders**

Prérequis

- Phénomène d'induction
- Force de Laplace
- PFD et loi des mailles

Table des matières

1	Positionnement des bases à travers l'étude des rails de Laplace	2
1.1	Fonctionnement en générateur : conversion d'une puissance mécanique en puissance électrique	2
1.2	Fonctionnement en moteur : conversion d'une puissance électrique en puissance mécanique	4
2	Un exemple incontournable : la machine à courant continu	4
2.1	Description générale du fonctionnement d'une machine à courant continu	5
2.2	Étude des caractéristiques de la MCC à excitation indépendante	6

Introduction

L'homme cherche depuis toujours à maîtriser la production et la transformation d'énergie. Nous nous en servons en permanence, que ce soit pour nous chauffer, pour nous éclairer, pour nous déplacer ou pour nous faire à manger. Parmi toutes les énergies à notre disposition, l'une nous vient forcément à l'esprit : il s'agit de l'énergie électrique. Il nous suffit de se brancher au réseau pour alimenter grand nombre de produit. En France, un réseau d'environ 100000km de câbles transporte la même quantité d'énergie que des milliers de citerne de fioul. Dans cette leçon nous allons nous intéresser plus particulièrement à la conversion d'une puissance électrique en puissance mécanique comme nous le retrouvons dans les transports commun (métro, tram ou train) ou encore dans les moteurs omniprésents autour de nous ainsi que la conversion opposée que nous retrouvons notamment dans certains moyens de production d'énergie durable (éolien, hydrolique).

Nous commencerons par décrire ces conversions à l'aide d'un dispositif simple le rail de Laplace. Puis nous étudierons un exemple concret d'une machine réalisant cette conversion qui est la machine à courant continu.

1 Positionnement des bases à travers l'étude des rails de Laplace

Commençons par décrire le système que nous allons étudier. Il s'agit d'un système électromécanique ; c'est à dire un système mécanique et un système électrique couplés par le phénomène d'induction. Il est constitué de 2 rails séparés d'une distance a qui sont reliés d'une part à une tige en métal mobile de masse m et d'autre part à un ampèremètre. L'ensemble du dispositif est placé dans un champ magnétique \vec{B} uniforme et constant. Un schéma du montage est donné en figure 2.

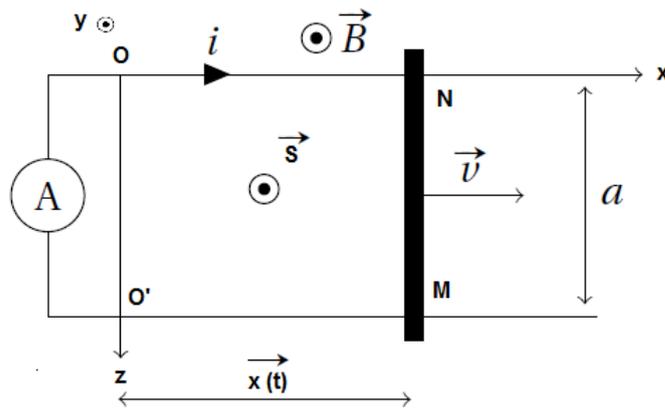


FIGURE 1 – Expérience des rails de Laplace en fonctionnement générateur. Cette figure a été réalisée à partir de celle présente dans le poly de Gérémy Ferrand.

1.1 Fonctionnement en générateur : conversion d'une puissance mécanique en puissance électrique



Création d'un courant par application d'un travail mécanique



⊖ 30 s

Nous choisissons comme ampèremètre un microampèremètre Fluke 187 pour son côté visuel. Pour créer un champ magnétique considéré uniforme, nous plaçons un aimant en U entre les rails créant un champ magnétique vertical ascendant.

Nous déplaçons la tige rapidement le long des rails vers la droite, en appuyant légèrement pour maintenir le contact électrique. Si tout va bien, nous constatons l'apparition d'une intensité positive assez faible (de l'ordre du

μA). Nous pouvons aussi observer l'apparition de la force électromotrice en mesurant la tension entre les deux rails. Un mouvement en sens inverse provoque la naissance d'un courant de signe opposé.

D'où provient ce courant ?

Puisque nous nous intéressons à la conversion d'une puissance mécanique en puissance électrique, nous allons appliquer une force sur notre tige mobile (énergie mécanique fournis) orientée dans la direction Ox . Le flux passant par la boucle $OO'MN$, étant égale ici au produit de l'aire associée et de la norme du champs \vec{B} (car uniforme), va donc varier au cours du temps. Comme nous l'avons vu, cette variation induit l'apparition d'une force électromotrice par induction qui se traduit par la présence d'un courant $i(t)$ dans la boucle. Finalement, nous savons qu'un élément dl dans un champ \vec{B} parcouru par un courant i subit une force de Laplace de la forme :

$$d\vec{F}_L = i d\vec{l} \wedge \vec{B} \quad (1)$$

Nous allons maintenant mettre en équation notre problème. Les inconnues sont ici le courant électrique $i(t)$, la position de la tige $x(t)$ et sa vitesse $v(t) = \frac{dx}{dt}$.

Considérons le cas où nous tirons le barreau vers les x positif. Le flux dans la boucle augmente et nous avons donc une fem négative. Nous choisirons d'orienter le vecteur de cette force et donc le courant (car nous sommes en convention générateur) suivant \vec{MN} . La valeur du courant est négatif et la règle des trois doigts nous donne une force de Laplace suivant les x négatif donc opposée à la force de traction.

Nota Bene : L'autre orientation pour le courant (et la fem) est possible mais dans ce cas là sa valeur sera positive et ne changera pas le sens de \vec{F}_L . Il faut, d'après la loi de Lenz, que la force résultante s'oppose à la force qui lui a donnée naissance.

Nous commençons par effectuer un bilan des forces agissant sur notre tige : le poids $\vec{P} = -mg\vec{e}_y$ et la réaction des rails $\vec{R} = R\vec{e}_y$ qui se compensent, la force de Laplace $\vec{F}_L = -i\vec{MN} \wedge \vec{B} = -iaB\vec{e}_x$ (avec i positif ici) et la force de traction que nous exerçons pour déplacer manuellement la barre $\vec{T} = T\vec{e}_x$.

Par application du principe fondamental de la dynamique projeté suivant Ox , nous obtenons :

$$m \frac{dv(t)}{dt} = -i(t) a B + T \quad (2)$$

Pour obtenir une seconde équation, nous pouvons définir le modèle électrique de notre système. Ici il s'agit d'un conducteur mobile de résistance R traversé par un courant i auquel est appliqué une fem e . Le schéma équivalent est donc :

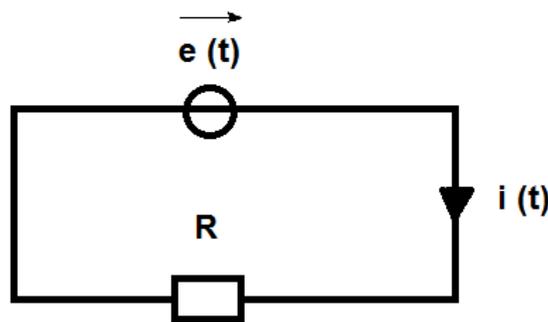


FIGURE 2 – Modèle électrique équivalent à la tige conductrice mobile NM.

Par application de la loi des mailles, nous obtenons l'équation :

$$e(t) - Ri(t) = 0 \quad (3)$$

La loi de Faraday nous permet d'exprimer la fem en fonction du flux donc en fonction de la surface de la boucle donc de $x(t)$:

$$e(t) = -\frac{d\varphi}{dt} = -Bav(t) \quad (4)$$

Finalement, nous trouvons :

$$B a v(t) + R i(t) = 0 \quad (5)$$

Si nous voulons à présent obtenir un bilan de puissance, nous multiplions 3 par $i(t)$ ($P = u i$) et 2 par $v(t)$ ($P = \vec{F} \cdot \vec{v}$). Nous obtenons le système :

$$\begin{cases} B a v(t) i(t) + R i^2(t) & = 0 \\ m \frac{dv(t)}{dt} v(t) & = T v(t) + B a i(t) v(t) \end{cases} \quad (6)$$

D'où :

$$T v(t) = m \frac{dv(t)}{dt} v(t) + R i^2(t) \quad (7)$$

Soit :

$$P_T = \frac{dE_c}{dt} + P_{Joule} \quad (8)$$

Nous obtenons ainsi que la puissance cédée à notre système se décompose en une partie de variation de l'énergie cinétique et une autre de dissipation par effet Joule ; ce nous observons bien expérimentalement (vitesse modifier plus chauffage).

Nous remarquons également que le terme à gauche de l'égalité est une puissance mécanique que nous noterons P_m et celui de droite au être vu comme la puissance fournie aux porteurs de charges donc une puissance électrique que nous noterons P_e .

Ainsi, le bilan de puissance pour un système électromécanique, qui n'est autre qu'une **loi de conservation**, s'écrit :

$$P_m + P_e = 0 \quad (9)$$

1.2 Fonctionnement en moteur : conversion d'une puissance électrique en puissance mécanique



Déplacement de la tige par application d'un courant



⊗ 30 s

Plutôt que d'imposer une force, nous imposons cette fois-ci un courant. Pour cela, nous remplaçons l'ampèremètre par un générateur de tension continu qui délivre une tension de quelques volt. Il est possible d'humidifier le barreau si l'expérience ne fonctionne pas pour faciliter le contact électrique. Il faut cependant penser dans ce cas là à atteindre le générateur avant.

Ici, par application d'une tension, nous faisons passer un courant dans la tige mobile. Étant placée dans un champ magnétique, elle va subir alors une force de Laplace dont l'expression est identique à celle donnée en première partie.

Nous avons donc montré qu'il était possible de convertir de l'énergie électrique en énergie mécanique et inversement à l'aide d'un unique montage. Le rendement théorique maximal est ici de 1 contrairement aux machines thermiques limitées quoi qu'il arrive par le rendement de Carnot.

2 Un exemple incontournable : la machine à courant continu

Maintenant que nous avons étudié le principe de base des machines électromécaniques, nous allons nous intéresser à un cas concret : la machine à courant continu.

2.1 Description générale du fonctionnement d'une machine à courant continu

La machine à courant continu est une **machine réversible**. En mode moteur, elle convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. En mode générateur, elle convertit à l'inverse le l'énergie méca en énergie élec (principe de fonctionnement d'une dynamo).

Elle est composée de 2 parties distinctes : le stator qui joue le rôle de l'inducteur et le rotor qui joue en rôle de l'induit. Le premier crée un champ magnétique \vec{B} constant à l'aide d'un bobinage traversé par un courant continu ou à l'aide un aimant permanent. La seconde composante est constitué d'un ensemble de spire pouvant être mises en rotation et relié à un arbre de transmission.

Nota Bene : Nous pouvons sortir la machine à courant continue de démonstration pour illustrer nos propos pendant la présentation des différentes pièces.

En fonctionnement moteur, un courant circule dans les spires induisant une force de Laplace en présence du champ \vec{B} et donc la création d'un couple responsable de la mise en rotation.

En fonctionnement génératrice, les spires tournent modifiant la surface par laquelle traverse le champs donc le flux. Cette variation au cours du temps est source d'une force électromotrice générant une tension.

Nous nous pencherons sur le premier mode de fonctionnement pour la suite de de cette partie. Pour que la rotation perdure, **il faut que le courant soit inversé à chaque demi-tour de la spire**. En effet lorsque la spire en considération passe par la position dans laquelle le vecteur normal sa surface est perpendiculaire au champs, le couple appliqué change de signe et la force de Laplace tend à ramener la spire en sens inverse jusqu'à repasse par cette orientation critique. un schéma explicatif est présent en figure 3. De plus il faut pouvoir fournir un courant à un conducteur en rotation ! Pour cela **nous utilisons ici un collecteur et des balais**.

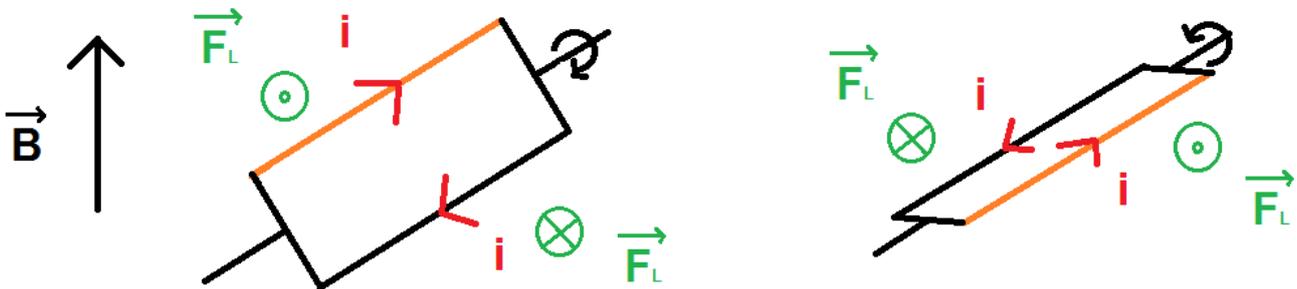


FIGURE 3 – Courant circulant dans une spire en présence d'un champs magnétique et force de Laplace résultante.

Le collecteur est un ensemble de cylindre conducteur isolées les un des autres et relié 2 par 2 à un solénoïde du bobinage du rotor. Les balais sont 2 petits éléments en contact avec les lames du collecteur qui glissent sur ses derniers lors de la rotation du rotor. L'un d'entre eux possède un courant entrant et l'autre un courant sortant.

Flexam : Nous pouvons montrer la figure 2.8 p 80 du livre Électrotechnique Parcours IUT pour illustrer ces 2 éléments.

Ici lorsque le solénoïde passe par la position critique précédemment évoqué, le balais avec lequel il était en contact passe à l'autre cylindre et l'autre balais rentre en contact avec ce solénoïde. Ceci se traduit concrètement par un changement de courant : on appelle ce procédé la commutation.

La machine à courant continu étant constituée de 2 circuits électriques (inducteur et induit) nous avons plusieurs choix pour les alimenter. Nous allons nous intéresser au montage à courant d'excitation séparé dans lequel l'inducteur et l'induit sont alimentés séparément.

Nota Bene : Ce mode est caractérisé par les caractéristiques suivantes : une résistance d'inducteur élevée, une vitesse stable avec la charge, un emballement possible si nous coupons l'excitation, une vitesse constante, un couple proportionnel à l'intensité, un démarrage à courant élevé, la possibilité de freinage. Il est principalement utilisé pour les machines-outils contrairement au montage en série utilisé pour la traction, le levage et l'électroménager. Les autres montages possible sont le montage à excitation séparée et montage en série.

2.2 Étude des caractéristiques de la MCC à excitation indépendante

Nous étudierons ici la machine en fonctionnement moteur. Le moteur est caractérisé par deux grandeurs : son **couple électromagnétique** et sa **force électromotrice d'induction**.

- Calculons le couple résultant \vec{C}_{EM} exercée sur une spire de courant tel que celle précédemment évoquée en figure 3 dans un champ \vec{B} constant.

Nous nous plaçons dans un repère cylindrique de base $(\vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{e}_z)$. Dans ce dernier, \vec{B} est orienté suivant e_r . Si nous notons l la longueur de la spire parallèle à l'axe de rotation définissant l'axe Oz, I l'intensité le traversant et R le rayon du rotor (suivant Or), nous obtenons alors :

$$\begin{aligned}\vec{C}_{EM} &= R\vec{e}_r \wedge \vec{F}_{L1} - R\vec{e}_r \wedge \vec{F}_{L2} \\ &= R\vec{e}_r \wedge (I\vec{l} \wedge \vec{B}) - R\vec{e}_r \wedge (-I\vec{l} \wedge \vec{B}) \\ &= R\vec{e}_r \wedge (IlB(-\vec{e}_z) \wedge (-\vec{e}_r)) - R\vec{e}_r \wedge (-IlB(\vec{e}_z) \wedge (\vec{e}_r)) \\ &= 2RIlB\vec{e}_z = C_{EM}\vec{e}_z\end{aligned}$$

Le schéma représentant l'étude du couple est représenté en figure 4.

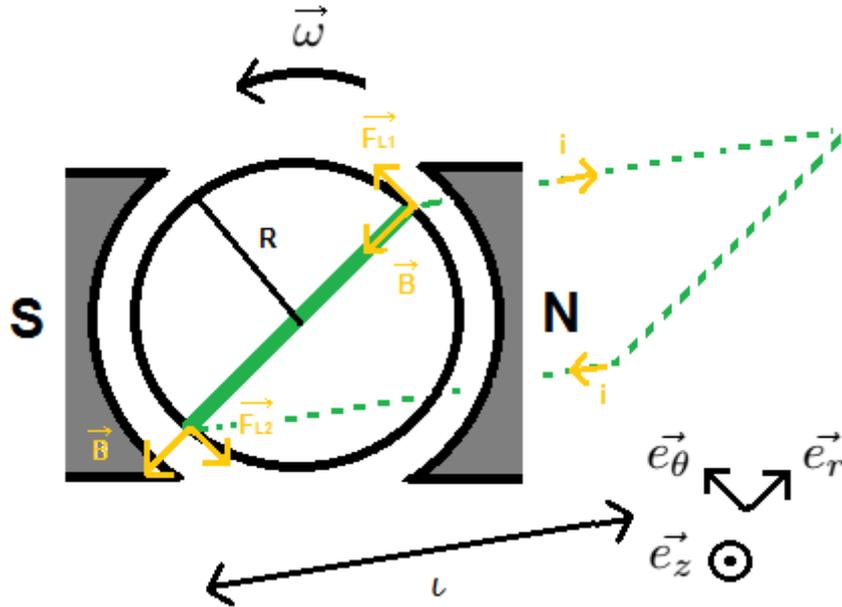


FIGURE 4 – Schéma d'une coupe de la MCC donnant les notation pour le calcul du couple électromagnétique.

Nous remarquons que le terme $2Rl$ possède la dimension d'une surface donc $2RBl$ à un flux que nous noterons ϕ_0 (exprimé en V.s). Le couple électromagnétique (exprimé en N.m) prend ainsi la forme :

$$C_{EM} = \phi_0 I \quad (10)$$

2 remarques s'imposent :

- * ϕ_0 est une constante donc le couple est directement proportionnel à l'intensité (en A). Nous comprenons ici comment il est possible de contrôler finement la couple et donc le mouvement en configuration moteur. Dans certain ouvrage, nous retrouvons une expression avec une constante k en préfacteur dépendant de la géométrie de la MCC. Ici, elle est incluse dans ϕ_0 .
- * dans un modèle plus réaliste, nous devons tenir compte d'un terme supplémentaire dû aux frottements C_R . Le frottement se fait au point de contact donc au niveau des balais et la force associée est orientée suivant $-\vec{e}_\theta$. Le couple associé est donc bien suivant $-\vec{e}_z$. Dans ce cas, le couple moteur total en sortie C devient :

$$C = C_{EM} - C_R = \phi_0 I - C_R \quad (11)$$

- Intéressons-nous maintenant à la seconde grandeurs caractéristiques du moteur à savoir la force électromotrice d'induction que nous noterons E .

Pour cela, nous repartons de la loi de conservation de la puissance électromécanique : $P_m + P_e = 0$.

Ici, la puissance mécanique est donnée par :

$$P_m = \vec{C} \cdot \vec{\omega} = \phi_0 I \omega + C_{EM} \omega \equiv \phi_0 I \omega - R I^2 \quad \text{par définition de l'effet Joule.} \quad (12)$$

Et la puissance électrique par :

$$P_e = U I \quad \text{avec :} \quad U = E + R I \quad \text{la tension imposée à l'induit.} \quad (13)$$

Par conséquent l'expression de la force électromotrice prend la forme :

$$\boxed{E = \phi_0 \omega} \quad \text{soit en terme de tension imposée :} \quad \boxed{U = \phi_0 \omega + R I} \quad (14)$$

2 remarques s'imposent :

- * **Si nous pouvons, en première approximation, négliger la chute de tension résistive $R I$, alors la vitesse de rotation du moteur est contrôlée par la valeur de la tension appliquée à l'induit de ce moteur.**

- * La vitesse de rotation du moteur est inversement proportionnelle à ϕ_0 . Par conséquent, si nous éteignons l'induit avant l'inducteur dans une alimentation séparée la machine s'emballe.

Le passage de la convention moteur à la convention génératrice se fait très facilement. En effet il suffit de changer de signe le terme correspondant aux frottements dans les équations 14 et 11. Par exemple pour la tension appliquée dans le cas d'un moteur, la force électromotrice et les frottements s'opposent au courant crée par la DDP donc sont de même signe. Dans le cas d'une utilisation en génératrice, la tension en sortie correspond à la fem crée à laquelle nous retranchons les frottements qui sont des pertes par effet Joule. Les 2 termes ont donc des signes différents.

conclusion

Nous avons vu que nous pouvions utiliser l'induction pour convertir de l'énergie électrique en énergie mécanique et vis-et-versa.

Nous avons vu comme application la machine à courant continu. Cette machine est plein d'avantages :

- Cette machine est facile à commander : la variation de vitesse s'effectue via la tension d'induit et la variation du couple par le courant.
- Cette machine est facile est réversible. Le passage d'un fonctionnement à l'autre est facile via la force électromagnétique induite.
- Le freinage est simple et l'énergie peut être récupérée sous forme électrique en passant la machine en mode génératrice.
- le couple du moteur lors du démarrage étant important et réglable, il peut démarrer sans aide extérieur.
- Cette machine est polyvalente puisqu'elle peut aussi bien travailler à vitesse constante pour un travail de précision ou à puissance constante si une brusque variation de couple est nécessaire.

cependant elle possède aussi son lot d'inconvénient (entretien et coût) :

- Le remplacement des balais est régulièrement nécessaire.
- Les lames doivent être positionnées avec précision pour éviter de faire sauter les balais et former des étincelles. Il en est de même pour le ressort dans les balais.

Le moteur à courant continu a été de plus en plus remplacé par le moteur asynchrone qui utilise un rotor induit en court-circuit (cage d'écureuil) ne nécessitant aucune collection de courant (ce qui est le gros point faible de la MCC!).