

Documents de cours - Conversion électromécanique de puissance - Machines tournantes

Introduction

Nous abordons ici un nouveau thème du programme de PSI, dédié à la conversion de puissance. Après avoir évoqué les applications technologiques qui font intervenir la conversion de puissance, nous nous intéresserons en particulier à trois types de conversion de puissance.

La conversion de puissance est nécessaire tout au long de la *production*, la *transmission* et l'*utilisation* de l'énergie électrique. Nous allons donc développer successivement :

- la conversion électromécanique
- la conversion électromagnétique
- la conversion électronique

1 Energie électrique

1.1 Production d'énergie électrique

L'électricité permet une *production* massive d'énergie de façon localisée et une *utilisation* non localisée sous des formes extrêmement variées grâce à un *réseau électrique* très dense.

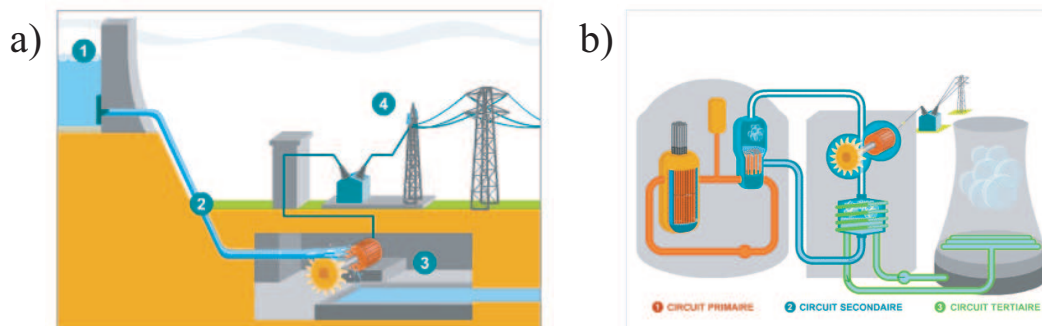
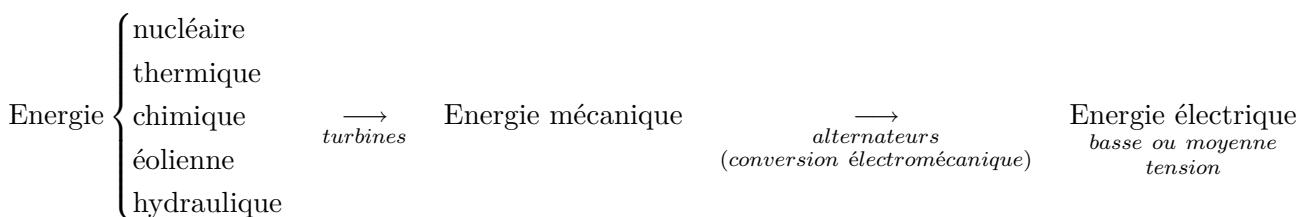


FIGURE 1: a) *Fonctionnement d'une centrale hydroélectrique.* b) *Fonctionnement d'une centrale nucléaire.* Animations sur le site : www.edf.com/html/panorama/index.html

La production d'énergie électrique peut en général¹ être décomposée en deux étapes :

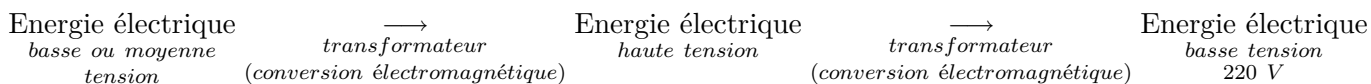


1. Ces étapes ne permettent par exemple pas de modéliser la production d'électricité d'un panneau solaire.

La seconde étape fait intervenir une **conversion électromécanique de puissance** par l'intermédiaire d' **alternateurs** (ou de **génératrices**).

1.2 Transport d'énergie électrique

Comme nous l'avons vu en première année, le transport de l'électricité se fait à haute tension pour limiter les pertes par effet Joule :

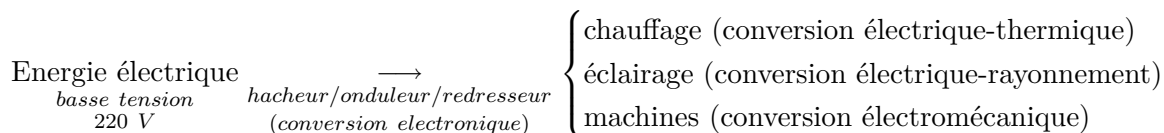


Les deux étapes font intervenir une **conversion électromagnétique de puissance** par l'intermédiaire de **transformateurs**.

1.3 Conversion de puissance et l'utilisation de l'énergie électrique

a) Exemples

L'utilisation de l'énergie électrique est multiple :



Cette étape nécessite d'adapter l'électricité du réseau à l'appareil utilisé grâce à une **conversion électronique de puissance** dont les principaux types sont regroupés dans le tableau ci-dessous.

| Sortie \ Entrée | Mécanique | Electrique continu | Electrique alternatif |
|-----------------------|-------------------------------------|--|---|
| Electrique continu | (moteur de ventilateur) | (alimentation des machines à courant continu) | (alimentation d'appareils alternatifs par une batterie) |
| Electrique alternatif | (Moteur de TGV) | (alimentation d'appareils adaptés au continu par une source alternative) | (chargeur de portable transformateur haute tension) |
| Mécanique | (engrenage - arbre de transmission) | (TGV en phase de freinage) | ("dynamo" de vélo - éolienne - turbine de barrage) |

b) Caractérisation d'une conversion de puissance

Une conversion de puissance est la transformation d'une puissance d'entrée P_e en une puissance de sortie P_s et une puissance de fuite P_f , généralement perdue, c'est pourquoi on qualifie celle-ci de *pertes*.

La qualité du convertisseur est jugée à partir de son rendement, dont la définition ne se limite pas à ce type de dispositif :

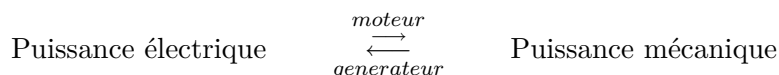
$$(1)$$

Un convertisseur est évidemment d'autant meilleur que son rendement est proche de 1, ce qui a deux intérêts : diminuer la puissance consommée et éviter un échauffement du dispositif.

2 Conversion électromécanique de puissance par induction

Nous allons nous intéresser uniquement à la conversion électromécanique dans la fin de ce chapitre, et nous verrons ensuite les deux autres types de conversion de puissance.

On peut distinguer les deux types de conversion électromécaniques suivantes :



Nous avons déjà rencontré deux exemples de conversion - ou de couplage - électromécanique dans le chapitre d'induction électromagnétique : le *rail de Laplace* et le *haut-parleur électrodynamique*.

Après quelques rappels, nous allons détailler l'exemple de la *machine à courant continu*, qui peut jouer le rôle de moteur ou de génératrice (on dit qu'elle est *réversible*²), puis nous donnerons rapidement le principe de fonctionnement d'autres machines alternatives (machine synchrone et machine asynchrone).

2.1 Conversion d'énergie électrique en énergie mécanique : force de Laplace

On rappelle qu'un élément de conducteur filiforme de longueur $d\vec{\ell}$ parcouru par un courant i en présence d'un champ magnétique \vec{B} est alors soumis à une **force de Laplace** définie par³ :

(2)

On peut donc en déduire qu'un circuit filiforme parcouru par un courant⁴ i , plongé dans un champ magnétique \vec{B}_0 constant est soumis à la résultante des forces de Laplace et à son moment en un point O donnés par :

(3)

(4)

Bilan : Il y a bien dans ce cas conversion d'énergie électrique (courant circulant dans le circuit) en énergie mécanique (mise en mouvement du circuit sous l'effet des forces de Laplace).

2. On rappelle que le dispositif du haut-parleur électrodynamique est également réversible puisqu'il joue le rôle de moteur dans son fonctionnement en haut-parleur, et le rôle de générateur dans son fonctionnement en microphone. On notera que l'expérience du rail de Laplace est également réversible.

3. On rappelle que dans le cas de l'existence d'un courant volumique, on remplace l'élément de courant $i d\vec{\ell}$ par $\vec{j} d\tau$.

4. Ce courant est identique en tout point de \mathcal{C} d'après la loi des branches en ARQS.

2.2 Conversion d'énergie mécanique en énergie électrique : f.e.m. induite

On rappelle qu'un conducteur \mathcal{C} se déplaçant à la vitesse $\vec{v}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}}$ dans un champ magnétique \vec{B}_0 est le siège d'une **force électromotrice** - ou **fem** - de Lorentz, définie par⁵ :

$$(5)$$

Bilan : Il y a bien dans ce cas conversion d'énergie mécanique (mouvement du circuit) en énergie électrique (apparition d'un courant dans le circuit sous l'effet de la f.e.m. induite).

2.3 Bilan de puissance dans le cas d'un couplage électromécanique

Dans le cas d'un circuit filiforme indéformable \mathcal{C} parcouru par un courant i , se déplaçant à la vitesse $\vec{v}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}}$ dans un champ magnétique \vec{B}_0 constant, le champ magnétique cède au circuit :

- une *puissance mécanique* \mathcal{P}_m reçue par le circuit, par l'intermédiaire des forces de Laplace :

$$(6)$$

- une *puissance électrique* \mathcal{P}_e reçue par le circuit, par l'intermédiaire de la fem induite :

$$(7)$$

L'utilisation de la formule d'analyse vectorielle sur le produit mixte permet d'écrire⁶ :

$$(8)$$

$$(9)$$

Le couplage électromécanique est donc parfait, c'est à dire qu'il se fait **sans pertes**. C'est évidemment un atout important pour l'exploitation de ce phénomène.

Remarques : L'égalité entre ces deux puissances vient du fait que le champ magnétique ne cède aucune puissance à un conducteur électrique **filiforme** en mouvement. Le champ magnétique n'est qu'un intermédiaire qui permet de faire la conversion d'énergie mécanique en énergie électrique, ou l'inverse, de façon parfaite⁷.

5. \mathcal{R} est le référentiel dans lequel les sources du champ magnétique \vec{B}_0 sont fixes, et \mathcal{R}' est le référentiel dans lequel le circuit est fixe.

6. Nous l'avons déjà montré dans le cas du rail de Laplace et du haut-parleur électrodynamique.

7. Cependant, si l'on tient compte de la section du conducteur, il faut tenir compte de l'apparition de boucles de courants dans la masse du conducteur sous l'effet du champ magnétique. Nous avons déjà rencontré ces courants appelés **courants de Foucault**.

Ces courants jouent en général un rôle limitatif puisqu'ils sont à l'origine de **pertes par effet Joule**. On peut néanmoins en tirer profit dans le cas du freinage ou du chauffage par induction, comme nous l'avons montré dans le cours d'induction.

3 Application à la machine à courant continu

3.1 Présentation

La machine à courant continu (MCC) est réversible. Elle n'est pratiquement plus utilisée comme génératrice pour la production d'électricité. En revanche, elle est très utilisée en tant que moteur car sa vitesse peut se régler en agissant sur la force électromotrice E grâce à l'utilisation de hacheur, que nous verrons dans le chapitre sur la conversion électrique.

Son utilisation est multiple ; on la retrouve dans des jouets, des ventilateurs, des machine-outils, dans certaines lignes de métro, RER et TGV.

Cependant, le moteur à courant continu est coûteux, et on lui préfère, quand cela est possible, le moteur asynchrone, dont nous étudierons rapidement le fonctionnement en fin de chapitre.

3.2 Principe de fonctionnement

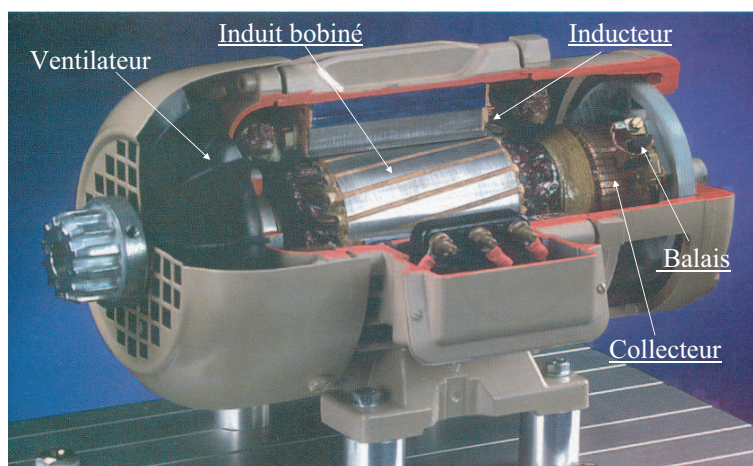


FIGURE 2: Photo d'une machine à courant continu.

Comme toutes les *machines tournantes*, la machine à courant continu est constituée de deux parties principales : le **stator**, qui est la partie fixe du système, et le **rotor**, qui est la partie tournante de la machine.

Le principe général de la machine à courant continu repose sur l'**action d'un champ magnétique radial sur des spires parcourues par un courant**.

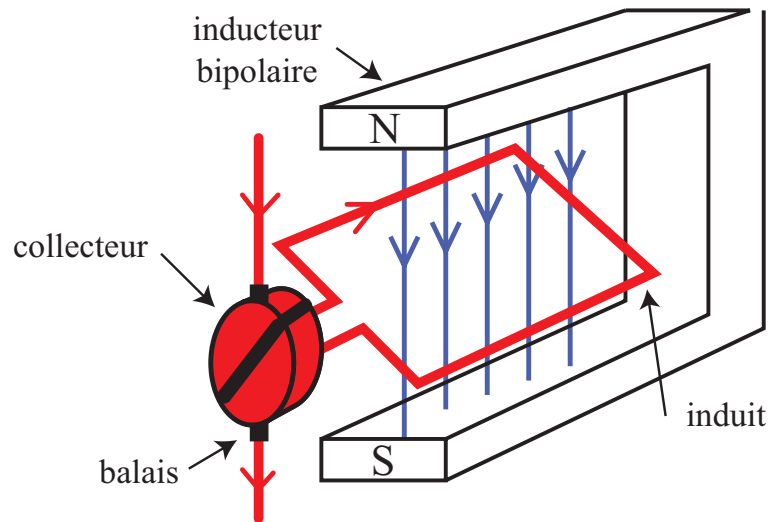
a) Machine simplifiée

FIGURE 3: Schéma simplifié d'une machine à courant continu bipolaire.

Afin de comprendre le principe de fonctionnement, nous allons tout d'abord nous intéresser à une machine à courant continu *bipolaire* qui comporte :

- une spire conductrice logée dans le rotor qui constitue l'**induit**.
- un circuit **inducteur** disposé sur le stator qui engendre un champ magnétique (ce circuit peut parfois être remplacé par des aimants permanents).
- un **collecteur** qui, associé à deux **balais**, permet de relier la spire à un circuit électrique extérieur.

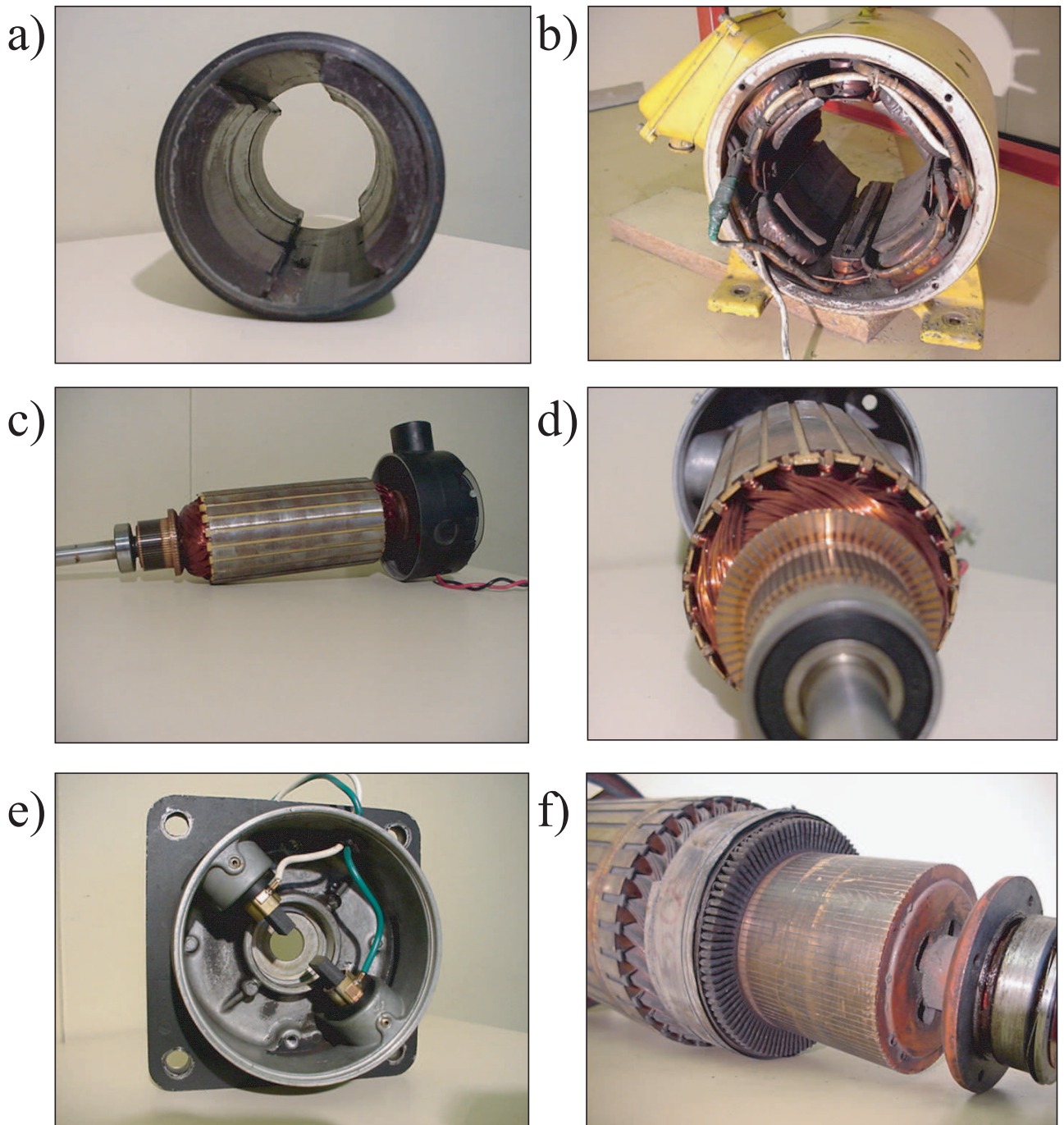


FIGURE 4: Photos de pièces d'une machine à courant continu : inducteurs à aimants permanents (a), ou à bobinage (b), circuits induits (c) et (d), balais (e) et collecteur (f).

b) Champ magnétique créé par l'inducteur

L'**inducteur**, fait de bobines ou d'aimants permanents, produit un *champ magnétique radial* dans l'entrefer (on vérifie bien que le champ "sort par la face nord" de l'aimant.). Comme le montre la figure ci-dessous, ce champ est maximal sur l'axe (Ox), pour $\theta = 0$ [π], et nul selon l'axe (Oy) qui est appelé *ligne neutre*, pour $\theta = \pi/2$ [π].

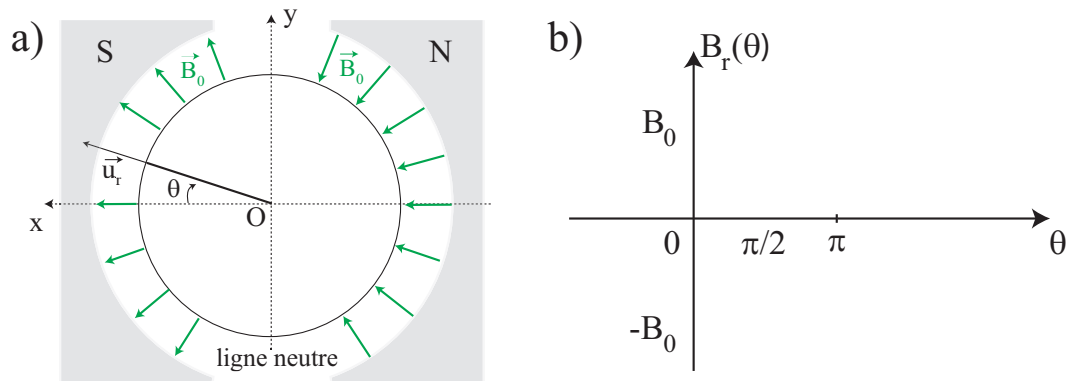


FIGURE 5: a) Topographie du champ magnétique dans l'entrefer. b) Composante radiale du champ magnétique en fonction de l'angle θ défini dans la figure a).

Pour simplifier, on considérera dans la suite que l'amplitude du champ magnétique radial $B_r(\theta)$ est un signal créneau périodique variant entre les valeurs B_0 et $-B_0$.

c) F.e.m. induite dans l'induit

Considérons une spire $ABCDEF$, de largeur $2a$ et de longueur b , représentée ci-dessous, tournant à la vitesse angulaire $\vec{\Omega} = \dot{\theta} \vec{u}_z$ dans l'entrefer de la machine lorsque celle-ci fonctionne en moteur, et parcourue par un courant algébrique i_{AF} .

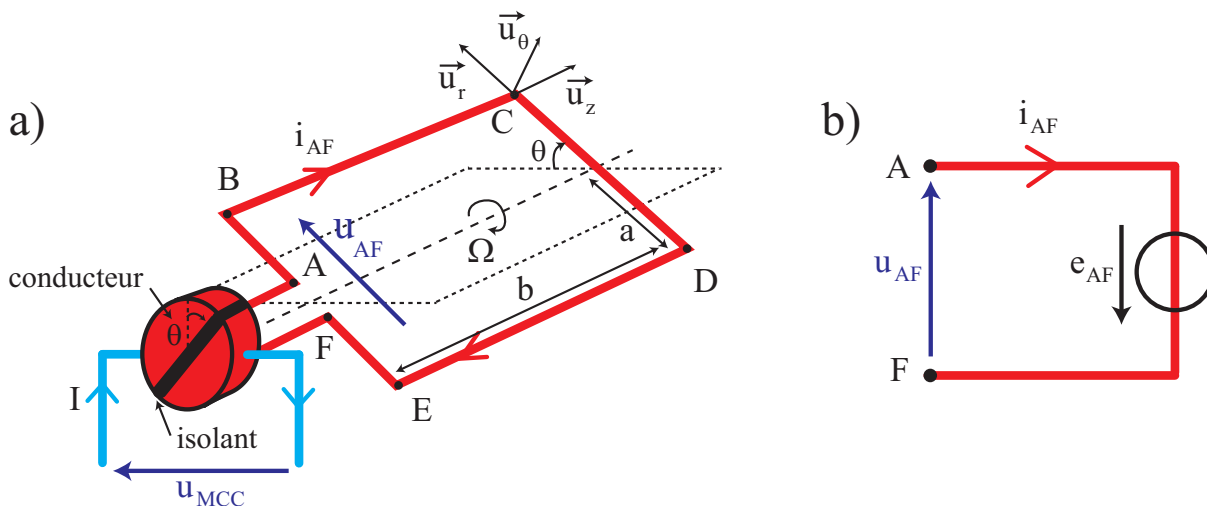


FIGURE 6: a) Notations pour une spire (circuit induit) tournant dans l'entrefer de l'aimant (inducteur), lorsque la machine fonctionne en mode récepteur (moteur). b) Schéma électrique équivalent.

Il s'agit d'un circuit \mathcal{C} mobile dans un champ magnétique, et il apparaît donc une force électromotrice e_{AF} à ses bornes, orientée dans le sens du courant par convention, donnée par :

$$(10)$$

Le champ étant radial et la vitesse de chacun des points du circuit étant portée par \vec{u}_θ , le champ électromoteur $\vec{E}_m(M)$ est porté par le vecteur \vec{u}_z quel que soit le point M du circuit.

Seules les parties de circuit colinéaires à ce même vecteur \vec{u}_z vont donc donner une contribution non nulle dans le calcul de la f.e.m. induite, donc :

$$(11)$$

$$(12)$$

$$(13)$$

Or le champ magnétique est périodique de période 2π et tel que $B_r(\theta + \pi) = -B_r(\theta)$, donc le champ magnétique vu par la portion BC est opposé au champ magnétique vu par la portion DE . On en déduit :

$$(14)$$

Finalement, en introduisant la surface $S = 2ab$ de la spire, on obtient :

$$(15)$$

D'après le schéma électrique équivalent présenté dans la figure précédente, la tension aux bornes de la spire s'écrit⁸ :

$$(16)$$

Le champ magnétique radial étant périodique, on s'attend à ce stade à obtenir une tension oscillant entre $-S\Omega B_0$ et $S\Omega B_0$. Cependant, nous allons voir qu'on peut obtenir une tension u_{MCC} de signe constant aux bornes de l'induit grâce au collecteur et aux balais qui réalisent un redressement mécanique de la tension u_{AF} .

8. Ce cas correspond à une machine parfaite. En présence d'une machine dont la spire a une résistance r et un coefficient d'auto-induction L , on aurait :

$$u_{AF} = Ri_{AF} + L \frac{di_{AF}}{dt} - e_{AF}(\theta)$$

d) Rôle du collecteur et des balais

Le *collecteur* (*mobile* car solidaire du rotor) se présente ici comme deux parties conductrices séparées par un isolant. Comme l'illustre la figure ci-dessous, les *balais* (*fixes* car solitaires du stator), vont successivement être en contact avec l'une ou l'autre des parties conductrices lors de la rotation du collecteur.

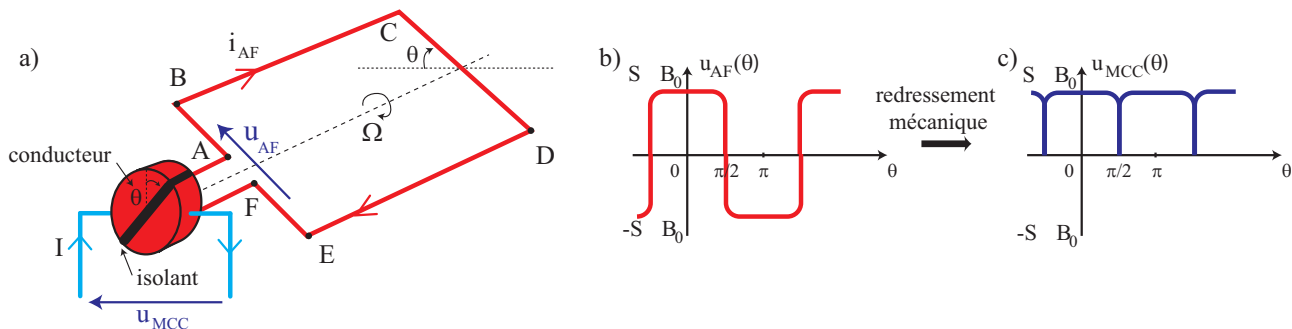


FIGURE 7: Illustration du rôle de "redresseur mécanique" du dispositif {collecteur + balais}.

Cherchons à déterminer la tension aux bornes de l'induit, notée u_{MCC} et orientée en **convention récepteur** par rapport au courant I .

Le dispositif collecteur et balais permet un **changement de sens du courant et un changement du signe de la f.e.m.** dans la spire à chaque fois que celle-ci effectue une rotation de π , c'est à dire un demi tour. En effet :

- Pour $\theta \in \left[-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right]$: $\begin{cases} i_{AF} = \\ u_{MCC} = \end{cases}$ donc $u_{MCC} =$.
- Pour $\theta \in \left[\frac{\pi}{2}; \frac{3\pi}{2}\right]$: $\begin{cases} i_{AF} = \\ u_{MCC} = \end{cases}$ donc $u_{MCC} =$.

La tension u_{AF} est donc *redressée mécaniquement* au niveau des balais de sorte que la tension u_{MCC} aux bornes de l'induit est pratiquement constante et égale à :

$$(17)$$

En introduisant le flux maximal au travers de la spire $\phi_0 = SB_0$, on obtient finalement, en **convention récepteur** pour u_{MCC} et en **convention générateur** pour e :

$$(18)$$

L'équation précédente permet de comprendre la propriété de convertisseur électromécanique de la MCC : la vitesse angulaire Ω (énergie mécanique) est couplée à la tension u_{MCC} (énergie électrique).

Remarque : La formule précédente reste valable quel que soit le mode de fonctionnement de la machine à courant continu, lorsqu'elle joue le rôle de génératrice par exemple. Nous détaillerons les différents modes de fonctionnement par la suite.

e) Couple de Laplace appliqué au rotor

La spire (circuit induit) est parcourue par le courant en présence d'un champ magnétique, et est donc soumise à des **forces de Laplace**.

Le champ magnétique étant radial, les parties radiales du circuit ne vont pas les subir, et seules les portions BC et DE vont subir les forces suivantes :

$$(19)$$

$$(20)$$

Ces deux forces exercent donc un **couple** sur le rotor donné par⁹ :

$$(21)$$

$$(22)$$

$$(23)$$

Ce couple dépend a priori de l'angle θ du rotor puisque le courant i_{AF} et le champ magnétique $B_r(\theta)$ en dépendent :

$$\bullet \text{ pour } \theta \in \left[-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2} \right] : \begin{cases} i_{AF} = \\ B_r(\theta) = \end{cases} \quad \text{donc } \vec{\Gamma}_{Laplace} =$$

$$\bullet \text{ pour } \theta \in \left[\frac{\pi}{2}; \frac{3\pi}{2} \right] : \begin{cases} i_{AF} = \\ B_r(\theta) = \end{cases} \quad \text{donc } \vec{\Gamma}_{Laplace} =$$

Finalement, les forces de Laplace exercent un **couple électromagnétique** sur le rotor qui vaut, quel que soit son angle dans l'entrefer :

$$(24)$$

où $\phi_0 = SB_0$ est le flux maximal traversant la spire, et I est le courant circulant au niveau des balais et alimentant l'induit (la spire).

On peut remarquer que :

$$\begin{cases} I > 0 & \text{accélère la rotation si } \Omega = \dot{\theta} & \text{ou ralentit la rotation si} \\ I < 0 & \text{ralentit la rotation si } \Omega = \dot{\theta} & \text{ou accélère la rotation si} \end{cases}$$

L'équation précédente permet à nouveau de comprendre la propriété de convertisseur électromécanique de la MCC : le courant I (énergie électrique) est couplé au couple $\vec{\Gamma}_{Laplace}$ (énergie mécanique).

9. Les composantes qui ne sont pas dans le plan de la figure s'annulent.

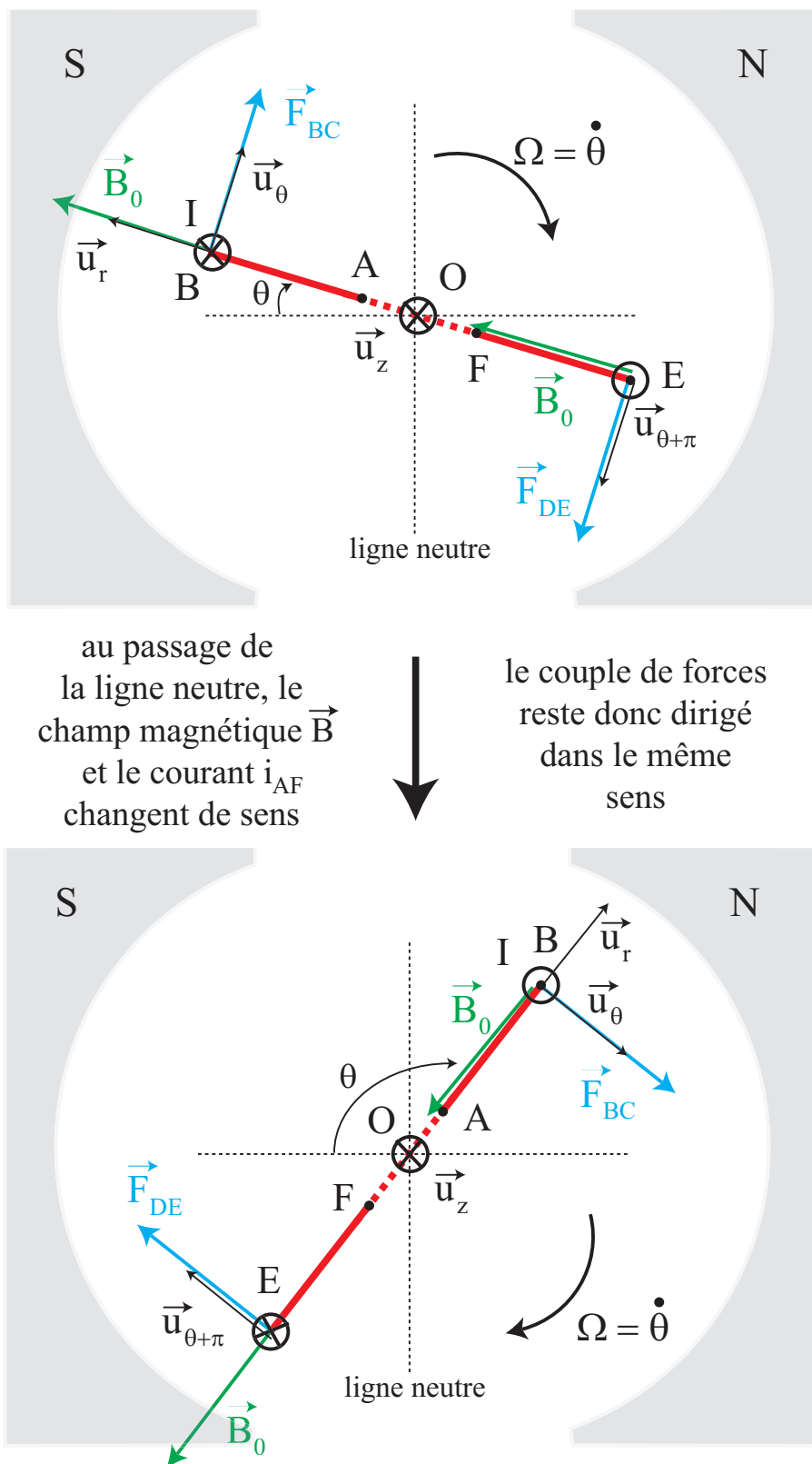


FIGURE 8: Représentation du couple de force de Laplace s'exerçant sur la spire.

f) Bilan de puissance

Vérifions à nouveau que la machine à courant continu bipolaire réalise bien une conversion électromécanique parfaite :

- La puissance des forces de Laplace fournie à la spire et cédée par le champ est donnée par : (25)

• La puissance fournie par la force électromotrice induite et reçue par le circuit est donnée par, en convention générateur ¹⁰ :

(26)

On vérifie donc bien que **le couplage électromécanique réalisé est parfait** puisque :

(27)

3.3 Améliorations de la machine à courant continu

a) Principales améliorations

La machine à courant continu réelle présente quelques améliorations par rapport au dispositif très simple que nous venons d'étudier de manière à la rendre plus performante. Les principales améliorations sont :

- Le nombre N_{spires} de spires enroulées dans le rotor, qui constituent l'induit. On comprend aisément que le flux ϕ_0 intervenant dans les expressions de la f.e.m. et du couple est multiplié par N_{spires} .
- Le nombre N_{poles} de pôles dans le stator, qui constituent l'inducteur. Le collecteur doit alors présenter N_{poles} zones afin de redresser la f.e.m. Nous ne rentrerons pas dans ces considérations technologiques, et on admettra que ceci permet également d'augmenter le flux ϕ_0 , et donc la f.e.m. et le couple.

b) Equations fondamentales de la machine à courant continu

• Pour une machine réelle, la force électromotrice dans l'induit est proportionnelle à la vitesse angulaire du rotor, et peut s'exprimer selon la relation ¹¹ :

(28)

• Pour une machine réelle, le couple électromagnétique est proportionnel au courant I qui circule dans l'induit, et peut s'exprimer selon la relation ¹² :

(29)

10. On peut également retrouver ce résultat au niveau de l'ensemble de l'induit qui reçoit une puissance *en convention récepteur* donnée par :

$$\mathcal{P}_{f.e.m. induite} = -u_{MCC}I = -\phi_0 I \Omega$$

11. Cette expression est bien cohérente avec une tension aux bornes du collecteur égale dans le cas d'une machine parfaite à $u_{MCC} = -e = \phi \Omega$.

Attention : on pourra trouver dans les ouvrages cette relation avec ou sans signe "-" car celle-ci dépend de l'orientation choisie.

12. Là encore, le signe dépend de l'orientation choisie. En revanche, la conservation de la puissance doit toujours être vérifiée.

La constante de proportionnalité ϕ est homogène à un flux de champ magnétique. Celle-ci est identique dans les deux expressions. On retrouve ainsi la conservation de la puissance¹³ :

(30)

c) Equation électrique et schéma électrique équivalent de l'induit

L'induit d'une machine à courant continu réelle étant constitué d'un bobinage de fils, il comporte nécessairement une *partie résistive* et une *partie inductive*, de sorte qu'on peut le modéliser par le schéma de la figure ci-dessous.

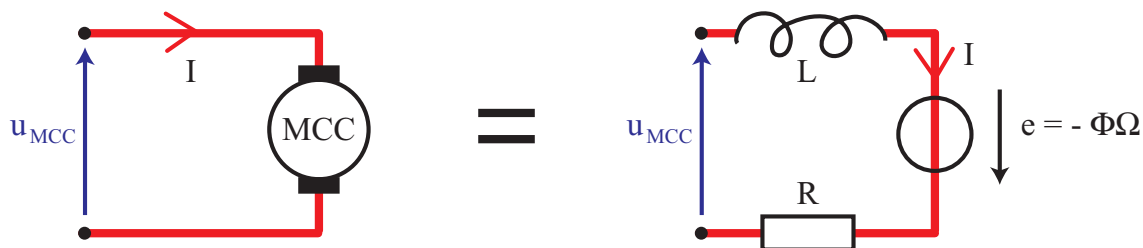


FIGURE 9: *Symbole de la machine à courant continu et schéma électrique équivalent de l'induit.*

On déduit de la loi des mailles l'équation électrique de l'induit :

(31)

(32)

d) Equation mécanique

L'application du théorème du moment cinétique au rotor, par rapport au point fixe O , dans le référentiel du laboratoire, en projection sur l'axe \vec{u}_z , permet d'obtenir l'équation mécanique :

(33)

où J est le moment d'inertie du rotor, et Γ_r est la projection suivant l'axe z d'un éventuel couple résistant.

13. Pour la puissance électrique fournie à l'induit, on peut utiliser la convention récepteur ou la convention générateur suivant qu'on utilise u_{MCC} ou e :

$$\mathcal{P}_{f.e.m. induite} = -u_{MCC}I = eI$$

3.4 Réversibilité et modes de fonctionnement de la machine à courant continu

La machine à courant continu est en **convention électrique générateur**, donc :

- $eI > 0 \Rightarrow$ la MCC une puissance électrique : fonctionnement en
- $eI < 0 \Rightarrow$ la MCC une puissance électrique : fonctionnement en

La machine à courant continu est en **convention mécanique générateur**, donc :

- $\vec{\Gamma} \cdot \vec{\Omega} > 0 \Rightarrow$ la MCC une puissance mécanique : fonctionnement en
- $\vec{\Gamma} \cdot \vec{\Omega} < 0 \Rightarrow$ la MCC une puissance mécanique : fonctionnement en

La machine à courant continu est **réversible** et peut donc fonctionner de quatre manières différentes, qui sont regroupées dans la figure ci-dessous.

On vérifie bien que le fonctionnement en moteur correspond au mode récepteur électrique, et que le fonctionnement en frein correspond au mode générateur électrique.

C'est ce principe qui est utilisé dans les voitures à moteur électrique : lorsqu'on veut accélérer, on utilise la MCC comme moteur en prélevant de l'énergie électrique à la batterie, et lorsqu'on veut freiner, on utilise la MCC comme générateur en rechargeant la batterie¹⁴.

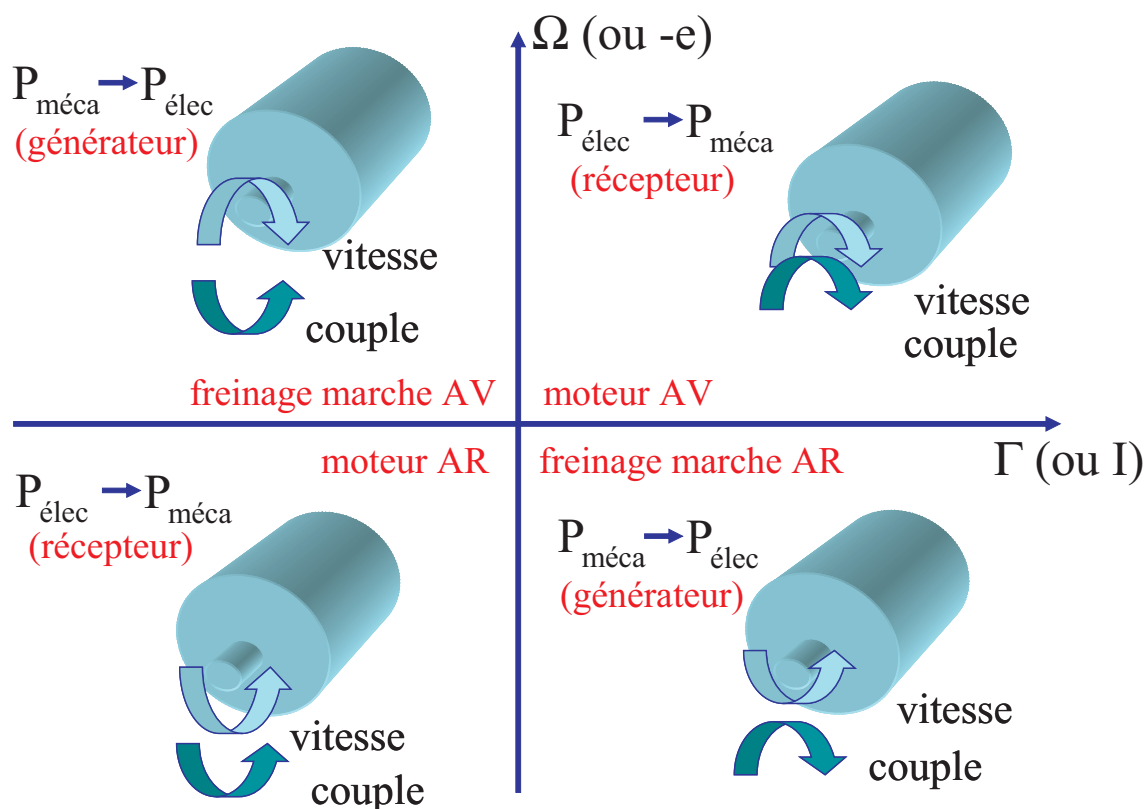


FIGURE 10: Les différents modes de fonctionnement de la machine à courant continu.

Transition : La machine à courant continu est facilement pilotable car sa vitesse de rotation

14. Cette méthode permet ainsi de récupérer une partie de l'énergie qui est habituellement dissipée par frottement au niveau des freins.

est directement modifiable par l'intermédiaire de grandeurs continues : la tension u_{MCC} et le courant I .

Ceci présente notamment un avantage pour de petits moteurs fonctionnant avec des piles, qui fournissent nécessairement un courant continu.

Cependant, pour les moteurs de grande puissance, l'énergie utilisable doit en général être prélevée sur le réseau électrique alternatif. L'utilisation de machine à courant continu nécessite donc un redressement de tension.

De plus, le contact mécanique des balais sur le collecteur entraîne souvent une usure et un coût d'entretien élevé. On préfère donc aujourd'hui souvent d'autres types de machines fonctionnant avec une alimentation alternative que nous allons développer maintenant.

4 Application aux machines à champs magnétiques tournants

4.1 Utilisation de ces machines

Il existe deux types de machines à champ tournant :

- Les machines **synchrones**, qui sont par exemple utilisées dans les centrales électriques en tant qu'alternateurs.
- Les machines **asynchrones**, qui sont par exemple utilisées dans les machines à laver et certains moteurs de train.

Comme la machine à courant continu, ces machines sont *réversibles*. Cependant, elles utilisent ou produisent un **courant alternatif**.

Le principe général des machines à champs tournants repose sur l'**action d'un champ magnétique tournant sur un dipôle magnétique**.

4.2 Réalisation de champs magnétiques tournants

a) Rappel : champ créé par une bobine sur son axe

On rappelle que le champ magnétique créé par une spire de rayon a , parcourue par un courant $i(t)$ (dans le régime de l'ARQS), sur son axe, à une distance z , est donné par¹⁵ :

$$(34)$$

On retiendra en particulier de cette formule que le champ magnétique créé par une spire sur son axe est proportionnel au courant $i(t)$ circulant dans la spire, et orienté suivant l'axe de cette dernière.

Dans le cas d'une bobine plate possédant N spires, on peut donc écrire le champ créé de la façon suivante :

$$(35)$$

où k est une constante de proportionnalité qui dépend de la géométrie de la bobine et de la position du point où l'on calcule le champ.

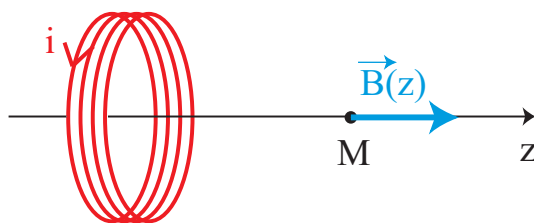


FIGURE 11: Champ magnétique créé par une bobine sur son axe.

b) Définition d'un champ tournant

Un champ magnétique \vec{B} est dit *tournant* lorsque sa norme est constante et que sa direction tourne dans l'espace avec une vitesse angulaire constante.

¹⁵. La démonstration sera revue en exercice. On rappelle que la direction du champ magnétique dépend de l'orientation du courant, et peut se retrouver facilement à partir de la règle de la main droite.

c) Production d'un champ tournant

• La méthode la plus immédiate consiste à prendre un aimant monté sur un pivot et à le faire tourner. L'existence du champ tournant ainsi engendré peut être matérialisé par une aiguille aimantée, montée elle aussi sur pivot, qui accompagne l'aimant dans sa rotation.

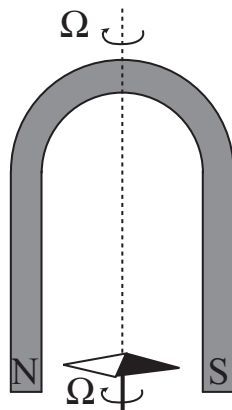


FIGURE 12: Production d'un champ magnétique tournant par simple rotation d'un aimant en U.

• Une autre méthode pour générer un champ tournant en un point O est d'utiliser deux bobines identiques \mathcal{B}_1 et \mathcal{B}_2 dont les axes sont perpendiculaires, c'est à dire en *quadrature spatiale*, à égale distance du point O . Ces deux bobines doivent être alimentées par des courants sinusoïdaux de pulsation ω , et déphasés de $\frac{\pi}{2}$, c'est à dire en *quadrature temporelle* :

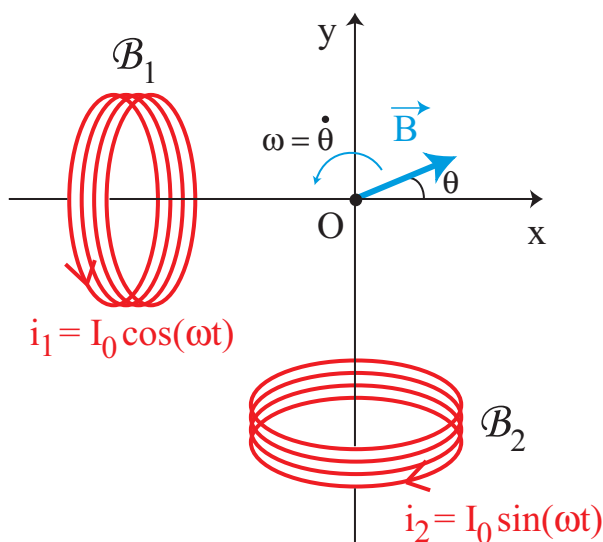
$$\begin{cases} i_1(t) = \\ i_2(t) = \end{cases}$$


FIGURE 13: Production d'un champ magnétique tournant à partir de deux bobines en quadrature spatiale et temporelle.

D'après le résultat énoncé précédemment, les champs magnétiques créés sont respectivement :

$$\begin{cases} B_1(t) = \\ B_2(t) = \end{cases}$$

Le champ résultant au point O est donc :

$$\boxed{\vec{B} = } \quad (36)$$

On obtient donc bien un **champ magnétique tournant**, de norme B_0 constante, qui tourne autour de l'axe Oz à la même pulsation ω que celle correspondant à celle des courants alimentant les bobines.

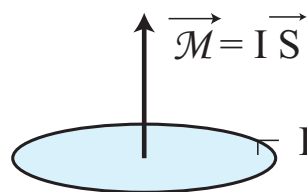
Remarque : Afin d'augmenter l'amplitude du champ tournant, on peut utiliser davantage de bobines¹⁶.

4.3 Moment magnétique

Le moment magnétique $\vec{\mathcal{M}}$ est une grandeur vectorielle qui permet de mesurer l'intensité d'une source magnétique. La source peut être :

- une distribution de courant. Dans le cas d'une spire parcourue par un courant I par exemple, on parle de **dipôle magnétique** de le moment magnétique :

$$\boxed{\vec{\mathcal{M}} = } \quad (37)$$



où \vec{S} est un vecteur de norme égale à la surface de la spire et orienté suivant la normale au plan de la spire.

- un matériau présentant un moment magnétique spontané. On parle alors d'**aimant permanent**, de moment magnétique $\vec{\mathcal{M}}$. Nous verrons dans le chapitre suivant que ce moment magnétique trouve notamment son origine microscopique dans le mouvement orbital des électrons autour du noyau atomique dans des matériaux particuliers.

En présence d'un champ magnétique \vec{B} , le moment magnétique $\vec{\mathcal{M}}$, quelle que soit son origine, est soumis au couple électromagnétique suivant :

$$\boxed{\vec{\Gamma} = } \quad (38)$$

Ce couple tend donc à **aligner le moment magnétique avec le champ magnétique**¹⁷.

16. On se reportera aux exercices du TD correspondant.

17. On notera que ce résultat est similaire au cas de l'électrostatique, où nous avons vu en première année qu'un moment dipolaire \vec{p} avait tendance à s'aligner avec le champ électrique \vec{E} .

4.4 Principe de fonctionnement de la machine synchrone

a) Action d'un champ \vec{B} sur une spire ou sur un dipôle magnétique

Considérons une spire rectangulaire $ABCD$ de largeur $2a$ et de hauteur b pouvant tourner autour de son axe (Oz) comme le montre la figure ci-dessous. Cette spire est parcourue par un

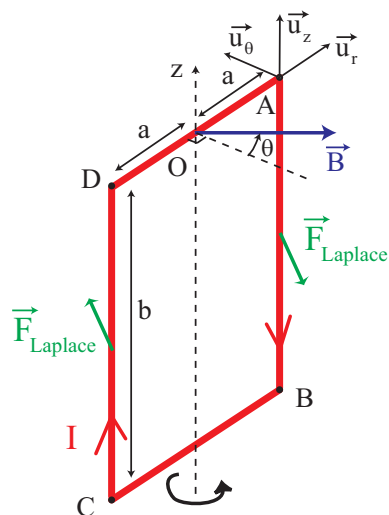


FIGURE 14: Forces de Laplace exercées par un champ magnétique \vec{B} sur une spire rectangulaire parcourue par un courant I .

courant I , et placée dans un champ magnétique \vec{B} généré par une source extérieure.

Seules les parties non radiales du circuit sont soumises à des forces de Laplace de sorte que, comme dans le cas de la machine à courant continu, le circuit est soumis à un couple $\Gamma_{Laplace}$ donné par :

$$\vec{\Gamma}_{Laplace} = \quad (39)$$

$$= \quad (40)$$

$$= \quad (41)$$

En utilisant la définition précédente du **moment magnétique**, on montre que celui de la spire est donné par :

$$\vec{\mathcal{M}} = \quad \text{d'où} \quad \vec{\mathcal{M}} \wedge \vec{B} = \quad (42)$$

On retrouve ainsi l'expression du couple exercé sur un moment magnétique :

$$\boxed{\vec{\Gamma}_{Laplace} =} \quad (43)$$

On voit donc que dans le cas d'un circuit parcouru par un courant en présence d'un champ magnétique, l'origine de ce couple correspond à l'existence de forces de Laplace.

Conclusion : **une spire parcourue par un courant en présence d'un champ magnétique \vec{B} s'aligne avec ce dernier.**

b) Interaction d'un moment magnétique et d'un champ tournant

Soient $\vec{B}(t)$ un champ tournant autour d'un point O avec une pulsation Ω , et \vec{M} un moment magnétique permanent de module constant tournant autour du même axe avec une pulsation ω *a priori* $\omega \neq \Omega$.

On notera α l'angle entre \vec{B} et \vec{M} à $t = 0$.

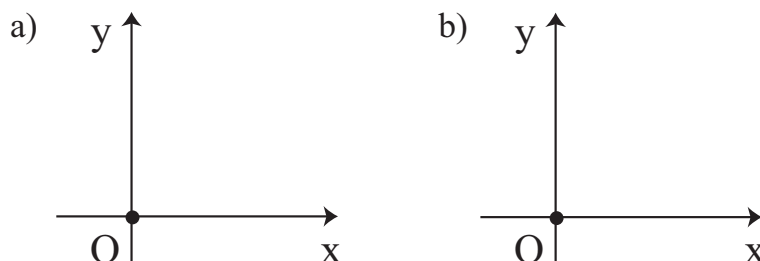


FIGURE 15: Action d'un champ magnétique \vec{B} tournant à une pulsation Ω sur un moment magnétique \vec{M} tournant à la vitesse angulaire ω . a) Configuration à $t = 0$, et b) configuration à l'instant t .

D'après ce que nous avons vu précédemment, le champ magnétique \vec{B} exerce un couple électromagnétique sur le moment magnétique \vec{M} dont le moment par rapport à l'axe de rotation est :

$$\vec{\Gamma} = \quad (44)$$

En valeur moyenne au cours du temps :

- si $\omega \neq \Omega$, $\langle \vec{\Gamma} \rangle =$
- si $\omega = \Omega$, $\langle \vec{\Gamma} \rangle =$

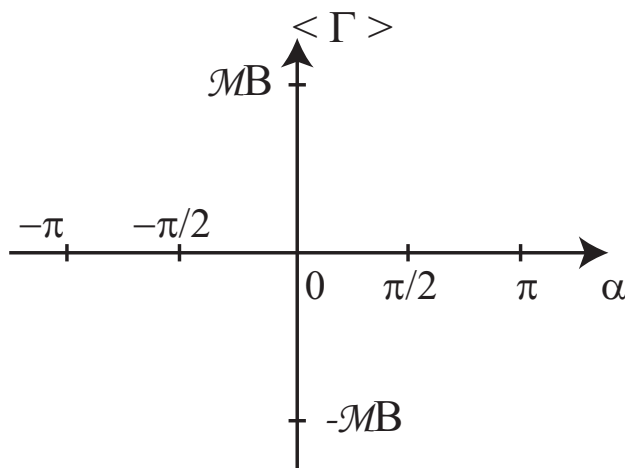


FIGURE 16: Couple électromagnétique en fonction de l'angle α entre \vec{M} et \vec{B} .

Dans la suite, on se place donc dans le second cas, pour lequel il y a **synchronisme** entre les deux mouvements de rotation.

Dans ce cas :

- si $\alpha \in [0, \pi]$, $\langle \vec{\Gamma} \rangle \cdot \vec{u}_z > 0$, et le moment magnétique est entraîné par le champ magnétique dans le même sens de rotation que celui-ci. On dit que le couple électromagnétique est **moteur**.
- si $\alpha \in [-\pi, 0]$, $\langle \vec{\Gamma} \rangle \cdot \vec{u}_z < 0$, et le moment magnétique est entraîné par le champ magnétique dans le sens opposé à la rotation de ce dernier. On dit que le couple électromagnétique est **résistant**.

c) Description simplifiée de la machine synchrone

La machine synchrone est basée sur le principe exposé précédemment : un **stator**, constitué de bobines parcourues par des courants alternatifs produisant un champ magnétique \vec{B} tournant, met en mouvement le **rotor** constitué d'aimants permanents ou de bobines parcourues par un courant constant, jouant le rôle de moment magnétique permanent \vec{M} .

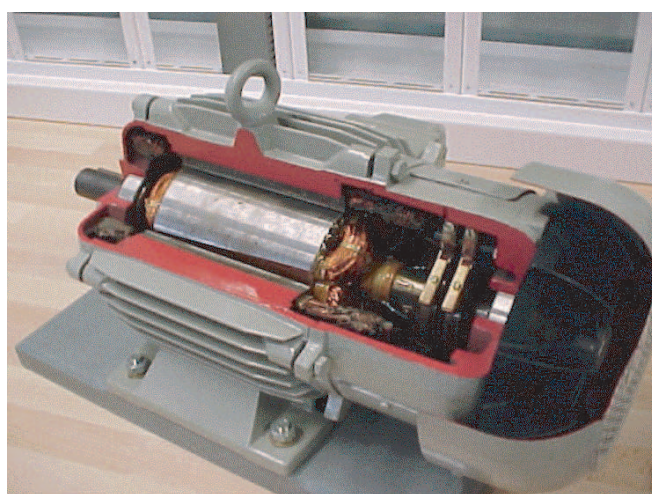
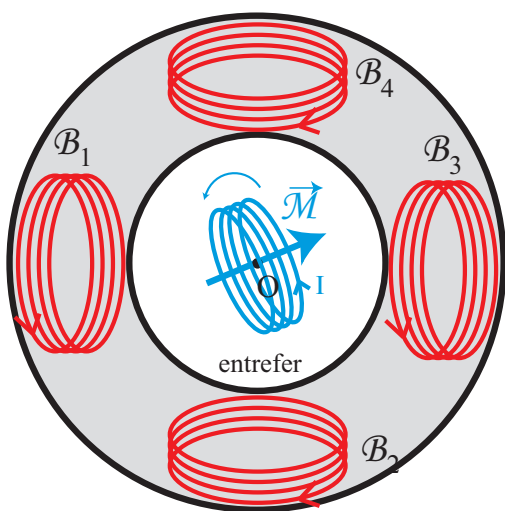


FIGURE 17: a) Schéma simplifié d'une machine synchrone. Le courant I parcourant la spire du stator est constant de façon à générer un moment magnétique constant \vec{M} , alors que les courants qui parcourent les bobines du stator sont variables, afin de générer un champ magnétique tournant. b) Photo d'une machine synchrone.

Comme toutes les machines tournantes, une machine synchrone est un convertisseur électromécanique réversible. Elle peut donc fonctionner soit en *générateur*, soit en *moteur* en fonction de l'angle α entre le champ magnétique tournant \vec{B} et le moment magnétique \vec{M} :

• Fonctionnement en moteur

Si $\alpha \in [0, \pi]$, le couple électromagnétique généré par le champ tournant met en rotation le rotor. La machine convertit donc de l'énergie électrique utilisée pour réaliser le champ magnétique tournant en énergie mécanique.

On notera que **la fréquence de rotation du rotor est celle du courant alternatif créant le champ \vec{B} tournant**. C'est ce qui explique que l'on appelle ce type de machine un *moteur synchrone*.

• **Fonctionnement en alternateur**

Si le moment magnétique tourne sous l'effet d'un dispositif annexe (une turbine ou un moteur par exemple), il induit dans chaque bobine du stator une force électromotrice périodique qui va donner naissance à un courant sinusoïdal dans celles-ci.

D'après la loi de Lenz, ces courants vont créer un champ magnétique tournant \vec{B} qui va s'opposer au phénomène qui leur a donné naissance, c'est à dire à la rotation du rotor. Le champ magnétique va donc exercer un couple électromagnétique résistant. Ce cas correspond à $\alpha \in [-\pi, 0]$. Dans ce cas, la machine fonctionne en **générateur** ou **alternateur** puisqu'elle convertit de l'énergie mécanique en énergie électrique.

d) **Démarrage du moteur**

Contrairement au moteur à courant continu, **le moteur synchrone ne peut démarrer tout seul**. En effet, au départ, le rotor est immobile ($\omega = 0$) et est placé dans un champ tournant à une vitesse $\Omega \neq \omega$. Par conséquent, le couple moyen exercé sur le rotor est nul et ne permet pas la mise en rotation du rotor.

Pour démarrer, le moteur synchrone nécessite un dispositif auxiliaire de démarrage. On peut par exemple :

- lancer le moteur synchrone à l'aide d'une machine à courant continu par exemple. Lorsque la vitesse du rotor est proche de celle du champ, on peut alors connecter le stator, et le moteur tourne à la vitesse constante Ω du champ tournant ;
- démarrer le moteur avec un champ magnétique qui tourne très lentement et augmenter progressivement sa fréquence de manière à augmenter la vitesse du rotor.

e) **Fonctionnement en régime permanent : existence et stabilité**

On considère maintenant que le moteur synchrone a été mis en rotation, et qu'il tourne à vitesse Ω constante.

Recherchons la possibilité et la stabilité d'un tel fonctionnement en fonction de l'angle α entre le champ magnétique \vec{B} tournant et le moment magnétique \vec{M} .

On considère que le moteur est en charge, et que cette dernière exerce un couple résistant $-\Gamma_r$ sur la machine. Le rotor est par ailleurs soumis au couple moyen moteur $\langle \Gamma \rangle = MB \sin \alpha$.

En régime permanent, le point de fonctionnement est donc obtenu lorsque :

$$\langle \Gamma \rangle = \quad (45)$$

On peut donc distinguer deux cas :

- Si $\Gamma_r > MB$, le régime permanent ne peut être atteint, car le couple moteur ne peut jamais être suffisamment important pour compenser le couple résistant. Lorsque M et B sont fixés, on appelle ainsi le produit MB le *couple de décrochage*.
- Si $\Gamma_r < MB$, le régime permanent s'établit pour un angle α entre le champ magnétique et le moment magnétique défini par :

$$\langle \Gamma \rangle = \quad (46)$$

D'après le graphique précédent donnant le couple électromagnétique moteur en fonction de l'angle α , il existe deux points de fonctionnement : $P_1 \left(\alpha_1 < \frac{\pi}{2} \right)$ et $P_2 \left(\alpha_2 > \frac{\pi}{2} \right)$. Ces deux points sont représentés dans la figure ci-dessous.

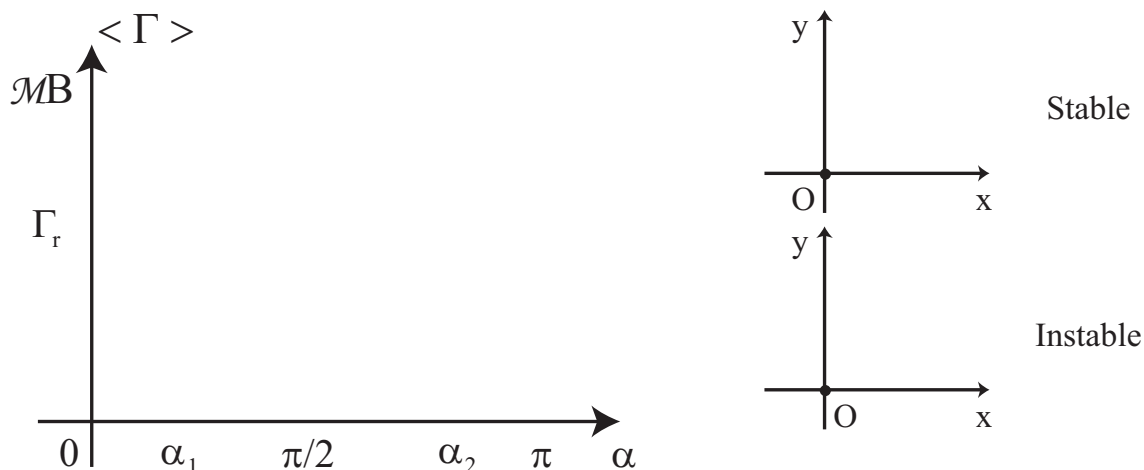


FIGURE 18: Points de fonctionnement et stabilité du moteur synchrone en régime permanent.

Étudions la stabilité de ces deux points de fonctionnement.

Supposons que la vitesse de rotation de la machine ω diminue à cause de l'existence de frottements par exemple. L'angle α augmente alors de $d\alpha > 0$, car le moment magnétique $\vec{\mathcal{M}}$ prend du retard par rapport au champ magnétique \vec{B} .

- Pour $\alpha = \alpha_1$, on lit graphiquement que $\mathcal{M}B \sin(\alpha_1 + d\alpha) - \Gamma_r > 0$. En appliquant le théorème du moment cinétique au rotor par rapport à l'axe de rotation, dans le référentiel du stator, on obtient :

$$(47)$$

où J est le moment d'inertie du rotor. On en déduit donc que la vitesse de rotation du rotor ω augmente pour retrouver sa valeur à l'équilibre Ω .

La position $\alpha = \alpha_1$ est donc un point de fonctionnement **stable**.

- Pour $\alpha = \alpha_2$, on lit graphiquement que $\mathcal{M}B \sin(\alpha_2 + d\alpha) - \Gamma_r < 0$. De la même façon que précédemment, en appliquant le théorème du moment cinétique au rotor, on montre que ω diminue, et la situation s'écarte de plus en plus du régime de fonctionnement permanent. La position $\alpha = \alpha_2$ est donc un point de fonctionnement **instable**.

En conclusion, **un moteur synchrone fonctionne de façon stable lorsque le retard angulaire α entre le rotor et le champ magnétique tournant est compris entre 0 et $\frac{\pi}{2}$.**

4.5 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone

On notera que l'étude détaillée de la machine asynchrone sort du cadre du programme de PSI.

La machine asynchrone fonctionne sur un principe similaire à la machine synchrone : on place dans un champ magnétique tournant, non plus un moment magnétique permanent, mais une bobine plate, fermée sur elle-même, sans sources, qui joue donc le rôle d'un *moment magnétique variable*.

On peut alors montrer que le rotor d'une telle machine tourne de façon stable en régime permanent à une **vitesse de rotation ω inférieure à celle du champ magnétique tournant à Ω** . $\omega \neq \Omega$, c'est pourquoi on lui donne le nom de *machine asynchrone*.

L'**avantage** de la machine asynchrone sur la machine synchrone est qu'elle possède un **couple de démarrage non nul**, et ne nécessite donc pas de dispositif auxiliaire pour fonctionner en moteur.

L'**inconvenient** de la machine asynchrone est qu'elle est difficile à asservir, et qu'elle nécessite un système électronique plus perfectionné.

Les TGV Eurostar et Thalys, qui sont les derniers TGV mis en service fonctionnent par exemple avec des moteurs asynchrones.

Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'introduire les trois principaux types de machines réversibles permettant de convertir de l'énergie mécanique en énergie électrique (fonctionnement en alternateur) ou l'inverse (fonctionnement en moteur).

Ces machines sont utilisées en début de chaîne électrique pour la production d'électricité en tant qu'alternateurs et pour son utilisation en tant que moteurs.

| | M. à courant continu | M. synchrone | M. asynchrone |
|--|----------------------|--------------|---------------|
| Courant d'alimentation | | | |
| Champ magnétique produit par le stator | | | |
| Vitesse de rotation du rotor | | | |
| Couple au démarrage | | | |
| Exemples d'application | | | |

Nous allons maintenant nous intéresser à la conversion électromagnétique de l'énergie électrique pour réaliser le transport de l'électricité, grâce au transformateur.