

LP n° 22

CONVERSION DE PUISSANCE ÉLECTROMÉCANIQUE. EXEMPLES ET APPLICATIONS.

Niveau :	2 ^{ème} année de classes préparatoires (PSI-PSI*)	Prérequis :	• Induction électromagnétique • Magnétisme	Références :	• 1- HPrépa, <i>Electronique II</i>, PSI-PSI* • 2- Physique tout-en-un, Dunod, PSI-PSI* • 3- BUP 846 p.1241 (moteurs électriques)
-----------------	--	--------------------	---	---------------------	---

– PLAN DE LA LEÇON –

I – Principe de la conversion de puissance électromécanique

I.1. Rails de Laplace en fonctionnement générateur [2,1]

I.2. Réversibilité de la conversion : fonctionnement moteur [1]

II – Machine à courant continu

II.1. Structure et principe [1]

II.2. Équations de fonctionnement [à savoir]

II.3. Étude du moteur à excitation indépendante [1,2]

III – Machines à champs tournants

III.1. Production d'un champ magnétique tournant [2]

III.2. Machine synchrone [2]

III.3. Machine asynchrone [2]

Rapports du Jury des années antérieures :

[2011] "Dans cette leçon, le plus grand soin dans la définition des orientations et des conventions de signe s'impose. Les applications doivent occuper une place significative dans la présentation. Il n'est pas nécessaire de traiter en détail les deux types d'induction." (idem en 2012)

[2008] "Cette leçon nécessite une bonne connaissance des machines présentées et de leurs applications."

[2005] "Il ne faut pas confondre force de Lorentz sur un porteur de charge et force de Laplace sur un conducteur. Toutes les grandeurs introduites doivent être algébriques ou vectorielles, ce qui nécessite de préciser les orientations et les bases de projection. Il ne faut pas limiter les applications au seul haut-parleur."

[2006] "Les principes élémentaires de l'induction ne sont pas correctement utilisés dans cette leçon qui nécessite un minimum de connaissance de la technologie des machines."

[2004] "La conversion de puissance a donné lieu à des exposés purement descriptifs. Nous attendons une attitude de physicien, c'est-à-dire une justification des modèles simples proposés pour les machines à courant continu, par exemple avec les conditions d'algebrisation des grandeurs électriques et mécaniques introduites."

[2001] "L'algebrisation des grandeurs doit être très soignée, il faut réserver du temps à l'étude des moteurs."

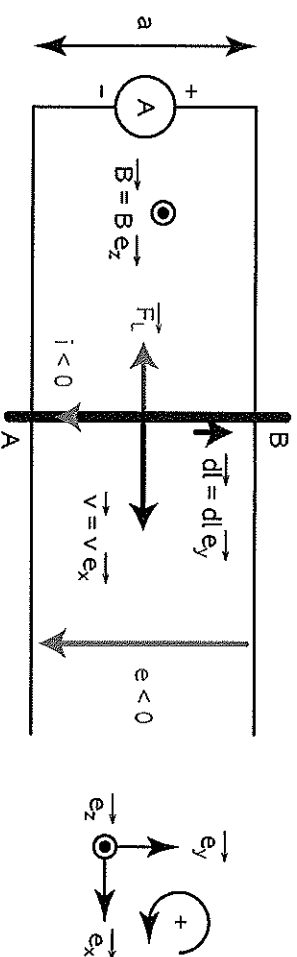
[1998] "Il est essentiel de montrer l'importance des termes de couplage entre équation mécanique et équation électrique. Dans le bilan d'énergie global, il faut faire ressortir le rôle du champ magnétique et expliquer l'origine du bilan auxiliaire $P_{L,aplace} + P_{fem} = 0$."

La conversion de puissance électro-mécanique est quelque chose que l'on rencontre partout dans notre quotidien. Les appareils électromécaniques, comme les aspirateurs ou autres machines à laver convertissent l'énergie électrique en énergie mécanique. En revanche, la dynamo de notre bicyclette par exemple a un rôle inverse : elle doit convertir l'énergie mécanique en énergie électrique. Il en est de même pour les centrales hydrauliques ou encore pour les éoliennes. Nous allons tout d'abord étudier le principe de base de la conversion de puissance à partir de notre connaissance des lois de l'induction électromagnétique. Ensuite nous nous intéresserons de plus près au moteur à la machine à courant continu, puis nous étudierons enfin le fonctionnement des machines à champs tournants que sont les moteurs synchrone et asynchrone.

1 – Principe de la conversion de puissance électromécanique

1.A. Rails de Laplace en fonctionnement générateur [2,11]

Les rails de Laplace sont deux conducteurs rectilignes parallèles, reliés à une extrémité par un fil fixe (via un galvanomètre ici pour mesurer le courant circulant éventuellement dans le circuit) et mis en contact d'autre part par l'intermédiaire d'une tige conductrice mobile. Le circuit ainsi formé est donc un fermé mais déformable. On place ce circuit (du moins la partie entourant la tige) dans le champ magnétique produit par un aimant permanent en U. Ainsi, le champ peut être considéré uniforme et de direction orthogonale au plan des rails (ici selon $\vec{e}_z$).



Dans cette partie, on s'intéresse aux rails en mode générateur. On fournit de l'énergie mécanique à la barre en lui imprimant un mouvement de translation rectiligne à la vitesse v . Dans un premier temps, on fait l'hypothèse que le contact entre les rails et la barre mobile

est assuré en permanence et que le glissement de celle-ci se fait sans frottements. On note R la résistance totale du circuit que l'on considère constante (elle est en premier lieu due aux contacts en A et en B).

Manip. : Déplacer la barre vers la droite et remarquer l'apparition d'un courant induit et noter son sens (il faut avoir bien branché l'appareil) ! Idem dans l'autre sens. Si possible, noter qualitativement l'influence de la vitesse de déplacement de la barre.

La barre conductrice est mobile dans un champ permanent uniforme : on est dans le cas de l'induction de Lorentz. Pour tout point M de [AB], le champ électromoteur vaut à l'instant t :

$$\vec{E}_m(t) = \vec{v} \wedge \vec{B} = -v B \vec{e}_y. \text{ Par intégration sur toute la barre, on détermine la fem induite}$$

$$\text{entre A et B : } e = \int_A^B \vec{E}_m \cdot d\vec{l} = \int_A^B (-v B \vec{e}_y) \cdot (d\vec{l} \cdot \vec{e}_y) = -v a B. \text{ Puisque le circuit est fermé, la}$$

fem induite se traduit par l'apparition d'un courant induit, observé expérimentalement : $i = \frac{e}{R} = -\frac{v a B}{R}$. On remarque que $v > 0$ si $i < 0$, ce que l'on a observé, et vice-versa.

On remarque que i et e ont le même signe, ce qui correspond bien à la convention générateur du point de vue électrique. Enfin, l'intensité du courant est proportionnel à la vitesse de déplacement de la barre.

Nous avons fourni de l'énergie mécanique et obtenu de l'énergie électrique : il y a donc bien eu conversion de puissance. Effectuons le bilan de puissance de cette conversion :

La force de Laplace qui s'exerce sur la tige est :

$$\vec{F}_L = \int_A^B i \cdot d\vec{l} \wedge \vec{B} = \int_A^B \left(-\frac{v a B}{R} \right) \cdot d\vec{l} \cdot \vec{e}_y \wedge B \cdot \vec{e}_z = -\frac{v a^2 B^2}{R} \vec{e}_x. \text{ on retrouve la Loi de Lenz.}$$

$$\text{– La puissance de cette force est : } P_L = \vec{F}_L \cdot \vec{v} = -\frac{v^2 a^2 B^2}{R}.$$

$$\text{– La puissance électrique liée à la fem induite vaut quant à elle : } P_e = e \cdot i = -\frac{v^2 a^2 B^2}{R}.$$

$$\text{Au final : } \boxed{P_L + P_e = 0}.$$

On retrouve le résultat important concernant les phénomènes d'induction de type Lorentz : quand un circuit se déplace dans un champ magnétique permanent, le couplage électromécanique est parfait, c'est-à-dire que la puissance électrique de la fem induite est opposée à la puissance mécanique des forces de Laplace. Ce résultat traduit le bilan des forces de Lorentz à l'échelle microscopique sur les porteurs de charge. Le bilan $P_e + P_L = 0$ constitue un bilan de puissance « auxiliaire », dont le rendement est de 100%, auquel il faut rajouter les pertes pour obtenir le bilan global de puissance de la conversion, qui sont à la fois de nature électrique (effet Joule) et mécanique (frottements).

Ce résultat obtenu pour un champ permanent demeure exact dans le cas des champs tournants que nous étudierons plus loin. Il faut noter que dans le cas de champs variables dans le temps, il existe une fem de Neumann, et le bilan de puissance est modifié. [???]

Pour faire le bilan de puissance global de la conversion, prenons donc désormais en compte les pertes. On note E_c l'énergie cinétique de la barre [AB]. Le théorème de l'énergie cinétique appliqué au conducteur s'écrit :

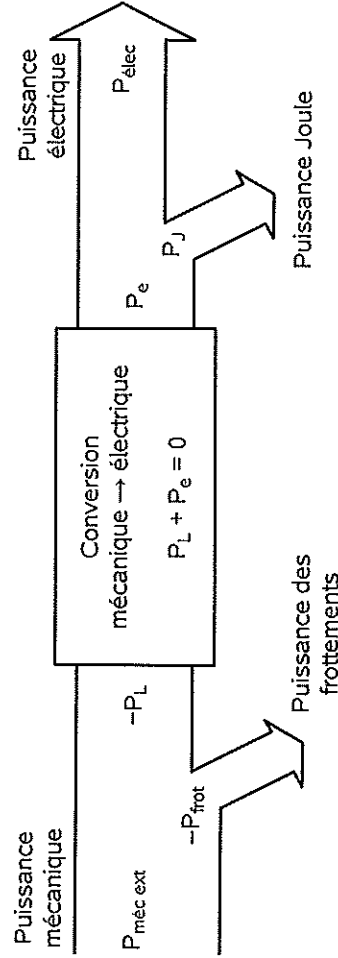
$$\frac{dE_c}{dt} = (\vec{F}_{ext} + \vec{F}_L + \vec{F}_{rot}) \cdot \vec{v} \quad \text{En régime permanent on a donc : } (\vec{F}_{ext} + \vec{F}_L + \vec{F}_{rot}) \cdot \vec{v} = 0$$

$$\Rightarrow P_{méc ext} = \vec{F}_{ext} \cdot \vec{v} = -\vec{F}_L \cdot \vec{v} - \vec{F}_{rot} \cdot \vec{v} \Rightarrow \left[P_L = -P_{méc ext} - P_{rot} \right]$$

Si on place une charge Z à alimenter en série avec la barre, et si u est la tension à ses bornes, alors la puissance électrique récupérable est :

$$P_{élec} = ui = (e - Ri)i = ei - Ri^2 = P_e - P_f \Rightarrow \left[P_e = P_{élec} + P_f \right]$$

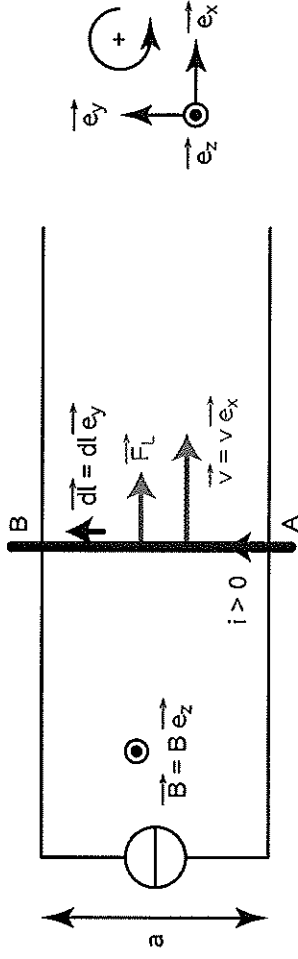
$$\text{Au final : } P_{méc ext} + P_{rot} = P_{élec} + P_f \quad \begin{matrix} >0 & <0 & >0 & >0 \end{matrix}$$



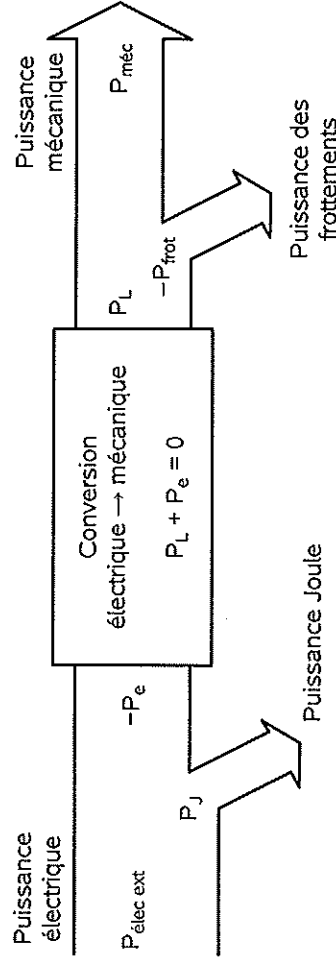
I.B. Réversibilité de la conversion : fonctionnement moteur [1]

On peut s'intéresser désormais à la conversion de puissance électrique en puissance mécanique, c'est-à-dire au fonctionnement moteur des rails de Laplace. Au lieu de mettre la barre en mouvement pour créer un courant induit, on alimente le circuit avec un courant fixe $i > 0$ et on observe le mouvement de la barre.

Manip : Remplacer le galvanomètre par un générateur de courant. Placer la barre dans l'entrefer de l'aimant. Montrer le déplacement de celle-ci, et montrer que si on change le sens du courant, on change le sens du mouvement de la barre.



La tension aux bornes de la barre est orientée en convention récepteur et la puissance électrique P_e effectivement apportée à la barre pour la conversion de puissance est donc négative. La force de Laplace est dans ce cas motrice ($\vec{F}_L = i a e_y \wedge \vec{B} = i a B e_x$) et la puissance qui lui est associée est bien positive. On a toujours $P_L + P_e = 0$. Le bilan de puissance est symétrique de celui effectué précédemment :



Le bilan de puissance auxiliaire concernant uniquement la conversion électromécanique a un rendement de 100%, aussi bien en moteur qu'en générateur, auquel viennent se rajouter les pertes mécaniques dues aux frottements, et les pertes électriques par effet Joule. Les rails de Laplace constituent ce qu'on appelle un transducteur électromécanique, c'est-à-dire un système réversible (au sens électrotechnique et pas au sens thermodynamique) permettant de convertir de la puissance électrique en puissance mécanique, et vice-versa. Il en existe de nombreux exemples : haut-parleur, dynamo, cristaux piézo-électriques, etc...

On vient de voir le fonctionnement des rails de Laplace comme transducteur électromécanique, mais en réalité ce système n'est jamais utilisé en tant que tel, en particulier à cause de sa géométrie plane très malcommode. Ceci explique l'utilisation massive des machines tournantes, dans lesquelles $x \rightarrow \theta$ (fonctionnement périodique). On va s'intéresser maintenant à un type de machine tournante bien particulier : la machine à courant continu (MCC).

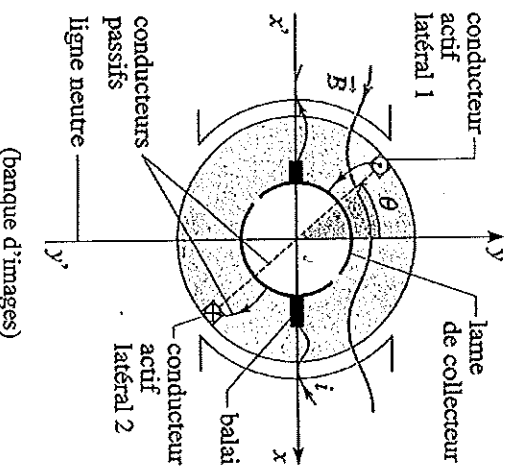
II – Machine à courant continu

II.A. Structure et principe [1]

La MCC est constituée de deux parties distinctes mobiles l'une par rapport à l'autre. La carcasse fixe constitue ce que l'on appelle le stator et porte le circuit inducteur. Son rôle est de créer le champ magnétique qui va permettre la conversion de puissance. Dans certains petits moteurs, des aimants permanents peuvent être utilisés, mais en général, on utilise plutôt des électroaimants.

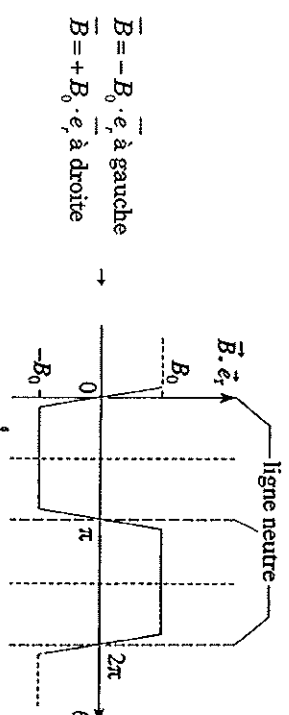
Au milieu de la machine, on trouve une partie mobile que l'on appelle le rotor et qui porte le circuit d'induit. La géométrie de celui-ci est telle que l'entrefer soit le plus étroit possible (espace vide entre le rotor et le stator) de manière à ce que les lignes de champ magnétique soit le mieux canalisées possible et ainsi limiter ce qu'on appelle les pertes de flux. Aussi, le stator et le rotor sont constitués de matériaux ferromagnétiques. De plus, le champ magnétique produit est radial au niveau de l'entrefer, et de norme constante, ce qui va avoir une grande importance dans la suite.

Sur la MCC de démonstration on note la présence de deux pôles magnétiques sur l'inducteur (certaines en comportent quatre). L'induit est quant-à-lui constitué d'un certain nombre de lames conductrices parallèles, isolées entre elles, dont le câblage semble assez complexe. Pour avoir un fonctionnement moteur, les lames sont alimentées en courant, et le contact électrique est assuré malgré le mouvement relatif de l'alimentation fixe par rapport au rotor mobile par un système de balais et de collecteur dont nous décrirons l'intérêt plus loin.



(banque d'images)

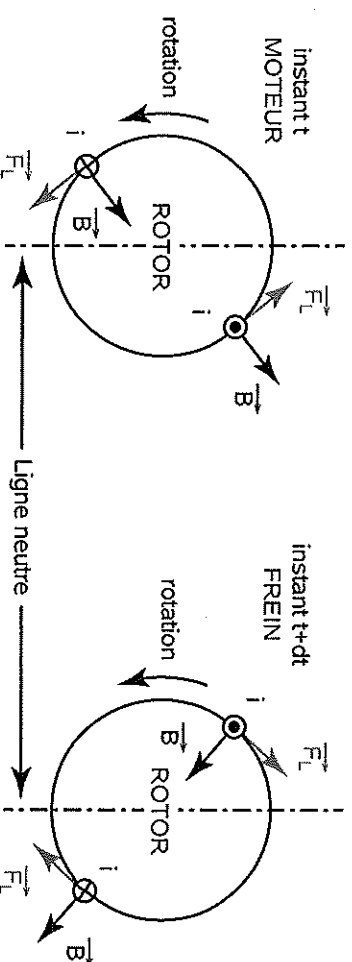
On va construire par la pensée une MCC idéale, puis on discutera dans un deuxième temps des limitations technologiques en comparant notre modèle à la machine réelle de démonstration. On considère une machine bipolaire et un rotor ne comportant qu'une seule spire parcourue par un courant \$i\$. Le champ magnétique est radial au niveau de l'entrefer, donc au niveau de la spire conductrice. On le suppose de la forme suivante :



Enfin, les parties de la spire qui sont dans le champ magnétique sont qualifiées de « conducteurs actifs » par opposition à celles qui ne subissent pas l'influence du champ et que l'on qualifie de « conducteurs passifs ». Dernier terme de vocabulaire : la ligne neutre, (ici l'axe \$Oy\$) est un axe d'antisymétrie du circuit magnétique et des lignes de champ magnétique.

• Nécessité du système balais/collecteur :

Observons le mouvement d'un conducteur actif simple parcourue par un courant \$i\$, toujours dans le même sens :



On voit que si le courant reste toujours dans le même sens, en franchissant la ligne neutre, la force de Laplace entraîne la barre dans un sens puis dans l'autre : le mouvement est impossible ! Il est nécessaire que le sens du courant soit inversé au passage de la ligne neutre. Ceci peut être effectué en alimentant le circuit d'induit avec un courant alternatif

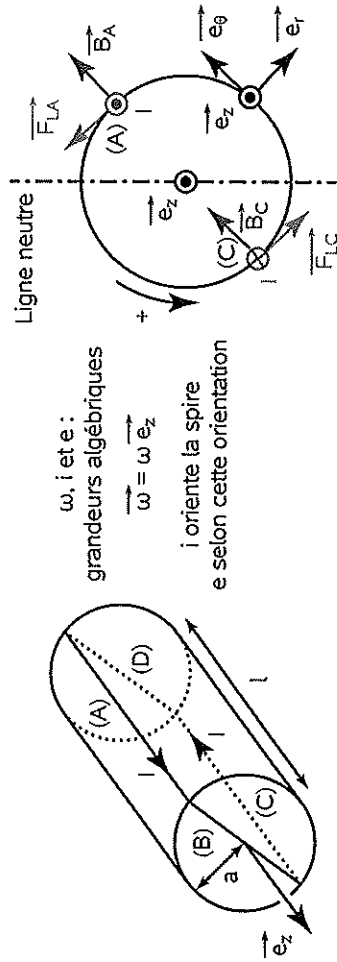
synchronisé sur la fréquence de rotation, mais en réalité, ceci est très compliqué à réaliser et devient carrément impossible lorsqu'on considère plusieurs spires ! On utilise donc le système balais/collecteur schématisé précédemment. À chaque fois que la spire franchit la ligne neutre, le contact entre les lames du collecteur et les balais s'inverse, ce qui provoque bien une inversion du sens du courant ! Ce système ingénieux constitue un « redresseur mécanique ». En régime générateur, il en va de même : ce système permet de récupérer un courant continu. Dans les deux cas, ça justifie l'appellation de machine à courant continu.

Récapitulatif : La MCC est donc composée de :

- un circuit magnétique : B circule dans le stator (carcasse) et dans le rotor, séparés par l'entrefer.
- deux circuits électriques : inducteur qui produit B et l'induit dans lequel circule le courant i. Ces deux circuits peuvent être reliés, et de différentes façons (série, parallèle) ou pas. Dans ce dernier cas, auquel on va s'intéresser par la suite, on parle de machine à excitation indépendante.

II.B. Équations de fonctionnement [à savoir]

• **Couple électromécanique :**



On alimente la spire avec un courant I, qui fixe l'orientation de celle-ci pour l'alébrisation des grandeurs électriques, et notamment de la fem induite e.

On fait le bilan des forces de Laplace, sur les conducteurs actifs (A) et (C), seules parties qui sont soumises au champ magnétique produit par le stator.

$$\begin{cases} d\vec{F}_{LA} = I d\vec{l}_A \wedge \vec{B}_A = I dl e_z \wedge B e_{\theta A} = I B dl e_{\theta A} \\ d\vec{F}_{LC} = I d\vec{l}_C \wedge \vec{B}_C = I dl (-e_z) \wedge (-B e_{\theta C}) = I B dl e_{\theta C} \end{cases} \quad \text{or} \quad e_{\theta A} = -e_{\theta C}$$

La résultante des forces de Laplace est nulle : $\vec{F}_{LA} + \vec{F}_{LC} = 0$. Heureusement, sinon le rotor se translaterait à l'intérieur du stator ce qui provoquerait des chocs et autres frottements très mauvais pour la machine ! En revanche, le couple des forces de Laplace n'est à priori pas nul. On algébrique les couples en suivant la même convention pour le sens de rotation, et projette selon e_z .

$$\begin{cases} d\vec{T}_{LA} = (a e_{\theta A} \wedge d\vec{F}_{LA}) \cdot \vec{e}_z = a I B dl \\ d\vec{T}_{LC} = (a e_{\theta C} \wedge d\vec{F}_{LC}) \cdot \vec{e}_z = a I B dl \end{cases} \Rightarrow \Gamma = 2 a l I B$$

On remarque que 2.a.l.B est homogène à un flux magnétique, et on note cette constante Φ . Attention cependant, il ne s'agit pas du flux effectif du champ magnétique à travers la spire !

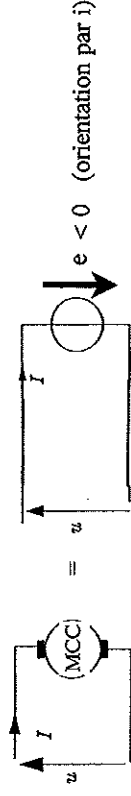
Alors : $\Gamma = \Phi I$.

Pour une machine réelle, le nombre de conducteurs actifs est généralement bien supérieur à 2 et le bobinage est assez complexe. Au final, en introduisant une constante k caractéristique de la géométrie de la machine, on peut écrire : $\Gamma = k \Phi I$.

• **Fem d'induction :**

Le bilan de puissance auxiliaire effectué dans le cas des rails de Laplace est encore valable ici (ça se démontre facilement) : $P_l + P_e = 0$. Puisque $\begin{cases} P_l = \Gamma \cdot \omega \\ P_e = e \cdot I \end{cases}$, alors on en déduit que

$$e = -k \Phi \omega$$



On remarque que la fem d'induction e tend à faire circuler un courant opposé à I dans le circuit. Ceci justifie le terme de force contre-électromotrice qu'on lui donne souvent ! C'est très cohérent avec la loi de Lenz qui affirme que le circuit s'oppose à la variation de flux qui lui a donné naissance. Ici le courant induit « cherche » à annuler le courant I qui a donné naissance au phénomène d'induction !

• **Fonctionnements :**

Moteur : on injecte $I > 0 \Rightarrow \Gamma = \Phi_0 I > 0 \Rightarrow \omega > 0 \Rightarrow P_M = \Gamma \omega > 0$ moteur
mais création de $e = -k \Phi_0 \omega < 0 \Rightarrow P_e = e I < 0$

Générateur : on fait tourner à $\omega > 0 \Rightarrow e < 0$ qui crée $i < 0$

Du coup, $\Gamma < 0$: cela produit un couple résistant !

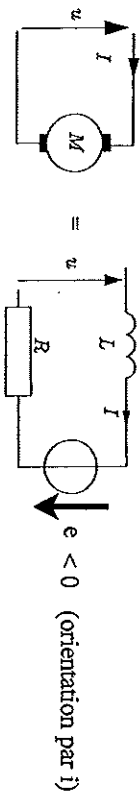
Dans le cas moteur, l'énergie électrique est consommée pour produire le couple moteur et faire tourner la spire, tandis que dans le cas du générateur, c'est le couple résistant qui consomme de l'énergie mécanique pour la restituer sous forme électrique !

II.C. Étude du moteur à excitation indépendante [1,2]

On considère un moteur à courant continu à excitation indépendante, c'est-à-dire un moteur pour lequel les circuits inducteur et induit sont électriquement isolés. Le circuit inducteur reçoit une puissance $U_d e$ qu'il consomme intégralement par effet Joule lors de la production du champ magnétique dans l'entrefer.

• Equations de fonctionnement

L'induit de la machine à courant continu est symbolisé par le schéma suivant, où l'on prend en compte son inductance propre L ainsi que sa résistance R . On note en minuscule les grandeurs en régime variable et en majuscules celles en régime permanent (les schémas des livres sont pas très cohérents et mélangent un peu les deux).



D'après la loi des mailles, lorsque l'induit est alimenté sous la tension $u(t)$, le courant d'induit $i(t)$ est donné par l'équation électrique : $u(t) = L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + k\Phi\omega(t)$. D'autre

part, si on note J le moment d'inertie du rotor et de la charge mécanique et $\Gamma_r(\omega)$ le moment résistant opposé par les frottements et la charge mécanique. Alors la vitesse du rotor est donnée par l'équation mécanique : $J \frac{d\omega(t)}{dt} = k\Phi i(t) - \Gamma_r(\omega)$.

En combinant les deux équations précédentes et en négligeant les phénomènes d'induction propres au circuit d'induit (ce qui revient à considérer $L=0$), l'équation du moteur devient :

$$RJ \frac{d\omega(t)}{dt} + (k\Phi)^2 \omega + R\Gamma_r(\omega) = k\Phi u(t).$$

• Démarrage du moteur :

Au démarrage, $\omega(t=0) = 0$ et $\frac{d\omega(t=0)}{dt} > 0$. Ceci implique $k\Phi u(t=0) - R\Gamma_r(\omega=0) > 0$.

En d'autres termes, pour que la machine démarre, la tension d'induit doit être supérieure à la tension de démarrage $U_d : u(t=0) > \frac{R\Gamma_r(\omega=0)}{k\Phi} = U_d$.

Néanmoins, si le circuit d'induit est alimenté directement à sa tension nominale $U_n \gg U_d$, ceci provoque l'apparition d'un courant induit $i(t)$ très grand, très supérieur à la valeur nominale i_n , responsable d'un choc mécanique sur le rotor et d'un échauffement excessif, souvent destructeur. En pratique on branche souvent un rhéostat en série avec le circuit d'induit, dont on diminue progressivement la résistance pour la mise en vitesse du moteur. Cette méthode n'est pas très économique car on perd beaucoup d'énergie par effet Joule et on préfère donc souvent dans l'industrie utiliser des générateurs de rampes de tension.

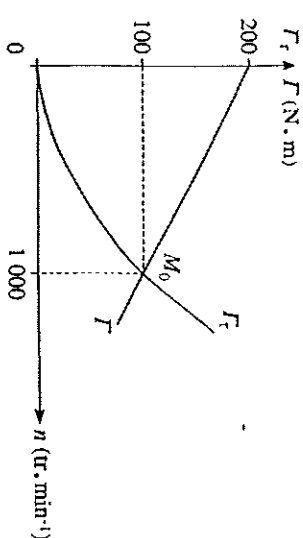
• Point de fonctionnement du moteur :

$$\begin{cases} i(t) \rightarrow I \\ u(t) \rightarrow U \\ E(t) = k\Phi i(t) \rightarrow E = k\Phi I \end{cases}$$

En régime permanent :

L'équation électrique devient : $U = E + RI$ avec $E = k\Phi\omega$ et $\Gamma = k\Phi I$. En combinant, on obtient : $U = k\Phi\omega + \frac{R}{k\Phi} \Gamma$. D'où l'expression du couple moteur (moment des forces magnétiques) : $\Gamma(\omega) = \frac{k\Phi}{R} (U - k\Phi\omega)$.

En régime permanent, le couple moteur $\Gamma(\omega)$ est égal à celui du couple résistant $-\Gamma_r(\omega)$. Pour l'exemple, on prend une charge de type « ventilateur », pour laquelle le couple résistif augmente avec la vitesse de rotation en ω^2 . Le point de fonctionnement mécanique est déterminé par l'intersection de la caractéristique de son couple électromagnétique et de celle du couple lié à la charge mécanique. Puisque $\Gamma_r(\omega)$ est une fonction croissante de ω , on pourra ici toujours trouver un point de fonctionnement.



Différents types de charges :

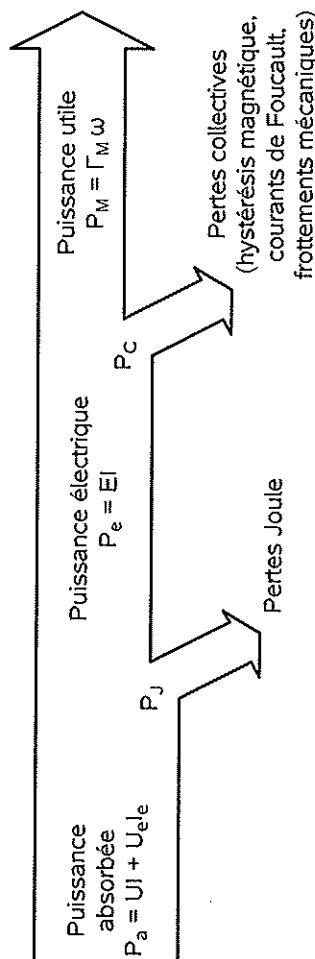
Guide des solutions d'automatisme. Schneider Electric. 2002 p. 56-57, en accès sur google books.

• Rendement du moteur :

En s'appuyant sur le raisonnement effectué pour les rails de Laplace, on peut effectuer un bilan de puissance sur le moteur à courant continu et déterminer son rendement. Il faut prendre en compte l'énergie consommée pour produire le champ B (pertes par effet Joule au niveau de l'inducteur).

Le moteur reçoit une puissance électrique P_a des alimentations de l'inducteur et de l'induit : $P_a = U_e I_e + UI$ et fournit la puissance mécanique $P_M = \Gamma_M \omega$ où Γ_M est le couple « utile » (couple moteur disponible sur l'arbre moteur). On définit le rendement du moteur

$$\text{comme : } \eta = \frac{P_M}{P_a}.$$



Les pertes s'analysent en :

- pertes par effet Joule P_j (ou pertes cuivre). Dans l'inducteur, toute la puissance électrique reçue est perdue par effet Joule lors de la création du champ magnétique, dans l'induit en revanche la puissance perdue par effet Joule vaut RI^2 . On a donc : $P_j = UI_e + RI^2$. La puissance des pertes par effet Joule est déterminée à partir de la connaissance de la résistance des circuits et de l'intensité qui les traverse.
- pertes collectives P_c , d'origine magnétique (hystérésis et courants de Foucault, dites encore pertes fer) et mécaniques (frottements). La puissance des pertes collectives est déterminée par un essai à vide (sans charge mécanique) avec les mêmes valeurs du flux Φ et de vitesse ω que lors du fonctionnement en charge, afin d'avoir les mêmes pertes magnétiques et mécaniques. On peut montrer facilement que $P_c = UI_v$ où U_v et I_v sont respectivement la tension et le courant à vide de l'induit.

$$\text{Au final : } P_M = P_a - P_j - P_c = UI - RI^2 - P_c, \text{ et donc : } \eta = \frac{P_M}{P_a} = \frac{UI - RI^2 - P_c}{UI_e + UI}.$$

ODG : Si on considère un moteur à excitation séparée dont l'inducteur est alimenté par $U_e = 200 \text{ V}$ et $I_e = 0,5 \text{ A}$, et l'induit de résistance $R = 0,5 \Omega$ par $U = 220 \text{ V}$ et $I = 20 \text{ A}$. Un essai à vide permet quand à lui de déterminer $U_v = 200 \text{ V}$ et $I_v = 1 \text{ A}$.

$$\text{Alors : } \eta = \frac{220 * 20 - 0,5 * 20^2 - 200 * 1}{200 * 0,5 + 220 * 20} = 89\%. \text{ Rendement très correct !}$$

• Avantages, inconvénients et applications de la MCC :

On a vu le fonctionnement de la machine à courant continu dans le cas particulier du moteur à excitation indépendante. Le moteur à courant continu est le champion de la vitesse réglable : en effet, il suffit de faire varier la tension d'alimentation du rotor pour faire varier la fréquence de rotation ! On peut aussi faire varier le champ magnétique en jouant sur l'inducteur. En revanche, ce type de moteur est bien plus coûteux que les moteurs asynchrones par exemple dont il va être question dans la dernière partie. Enfin, le système balais/collecteur est très fragile et demande un entretien régulier. Par exemple, les moteurs des TGV Paris-Sud-Est doivent subir un démontage complet et un reprofilage du collecteur tous les 300 000 km, c'est-à-dire grosso modo tous les ans. Les moteurs à courant continu sont donc actuellement réservés aux usages qu'ils sont seuls à pouvoir satisfaire.

Bien entendu il y a réversibilité et la machine à courant continu peut être utilisée en fonctionnement générateur. C'est le cas des génératrices tachymétriques par exemple, qui sont des machines à faible puissance à aimants permanents, et qui permettent de mesurer de façon immédiate et très précise des vitesses de rotation, sans perturber le système étudié (si la charge électrique à laquelle est reliée la génératrice est suffisamment élevée, le couple opposé à la rotation est quasiment nul).

→ Il peut être judicieux de se renseigner sur le moteur « universel », le moteur « pas-à-pas », ou sur le moteur « brushless » (moteur synchrone mais alimenté en continu).

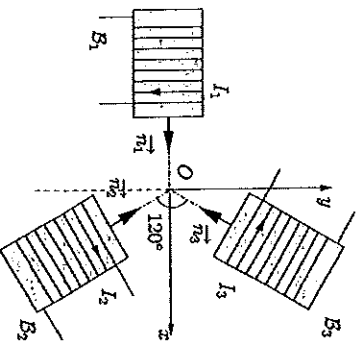
III – Machines à champs tournants

III.A. Production d'un champ magnétique tournant [2]

Définition : Un champ magnétique tournant est un champ magnétique B , de norme constante, dont la direction tourne dans l'espace avec une vitesse angulaire constante.

La manière la plus intuitive de produire un champ tournant est d'utiliser un aimant en U et de le faire tourner. Ceci dit cette méthode n'est jamais utilisée car le champ n'est pas assez intense et cela nécessite un système pour mettre l'aimant en rotation !

On peut également réaliser un champ B tournant avec un système de courants triphasés. On considère trois bobines identiques dont les axes sont décalés de 120° et parcourues par un système triphasé de courants. Les industries sont équipées de prises reliées à un réseau triphasé, ce qui justifie l'étude de cette configuration précise.



Les courants sont de la forme : $I_1(t) = I_0 \cos(\Omega t)$, $I_2(t) = I_0 \cos(\Omega t - \frac{2\pi}{3})$ et $I_3(t) = I_0 \cos(\Omega t - \frac{4\pi}{3})$. Une bobine crée sur son axe un champ magnétique proportionnel

$B_1(t) = B_0 \cos(\Omega t) \vec{n}_1$, $B_2(t) = B_0 \cos(\Omega t - \frac{2\pi}{3}) \vec{n}_2$ et $B_3(t) = B_0 \cos(\Omega t - \frac{4\pi}{3}) \vec{n}_3$. En

décomposant les vecteurs $\vec{n}_1, \vec{n}_2$ et $\vec{n}_3$ dans la base (x, y, z) , on obtient en faisant intervenir des relations trigonométriques :

$$\vec{B}(t) = \vec{B}_1(t) + \vec{B}_2(t) + \vec{B}_3(t) = \frac{3}{2} B_0 \left[\cos(\Omega t) \vec{u}_x + \sin(\Omega t) \vec{u}_y \right].$$

On a vérifié ici le théorème de Ferraris (fin du XIXe siècle), à la base du fonctionnement des machines tournantes alternatives, et qui affirme que : « Si on alimente par des tensions triphasées équilibrées un ensemble de p bobines par phase décalées angulairement de $2\pi/p$ radians les unes par rapport aux autres, alors ces bobines produisent un champ magnétique d'amplitude constante et qui tourne à la vitesse : $N_s = f/p$, avec f fréquence des tensions alimentant les bobines. »

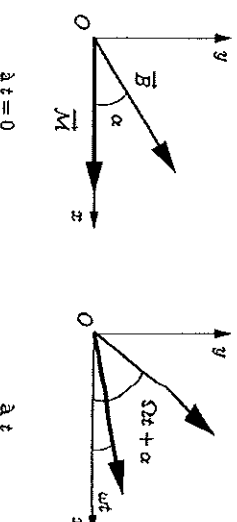
Manip : Faire la manip avec les trois bobines et l'aiguille aimantée (si le temps le permet).

On dit que l'aiguille tourne exactement à la fréquence du réseau électrique, et qu'on a donc créé une machine synchrone. Ça permet de faire la transition...

III.B. Machine synchrone [2]

• Principe de fonctionnement :

Soit un champ tournant $\vec{B}(t)$ de pulsation Ω , produit comme précédemment, et $\vec{M}(t)$ un moment magnétique permanent de module constant tournant avec une pulsation ω (avec $\omega \neq \Omega$ à priori). Le champ $\vec{B}$ et le moment magnétique $\vec{M}$ partagent le même axe de rotation et sont initialement décalés d'un angle α .



Le champ B étant uniforme, il agit sur le moment magnétique $\vec{M}$ par l'intermédiaire d'un couple électromécanique dont le moment par rapport à l'axe de rotation est :

$$\vec{\Gamma}(t) = \vec{M}(t) \wedge \vec{B}(t) = M B \sin(\Omega t - \omega t + \alpha) \vec{u}_z.$$

En moyenne au cours du temps :

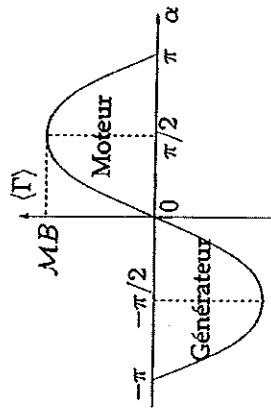
– si $\Omega \neq \omega$, alors $\langle \vec{\Gamma}(t) \rangle = \vec{0}$. Ce cas n'est pas intéressant car il n'y a pas de couplage, donc pas de conversion de puissance !

– si $\Omega = \omega$ (vitesse de synchronisme), $\langle \vec{\Gamma}(t) \rangle = M B \sin \alpha \vec{u}_z$ avec $\alpha = cte$.

Dans ce cas : - si $\alpha \in]0; \pi[$ alors le moment magnétique est entraîné par un couple moteur (il cherche à rattraper le champ tournant).

- si $\alpha \in]\pi; 2\pi[$, alors $\vec{M}$ subit un couple résistant.

Comme toutes les machines électriques tournantes, une machine synchrone est un convertisseur électromécanique réversible. Ici, suivant la valeur de l'angle α , la machine synchrone va jouer le rôle de moteur ou de générateur (on parle d'alternateur).



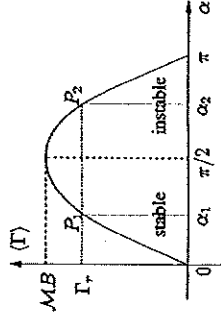
La partie fixe sur laquelle sont disposées les bobines créant le champ B constitue le stator. La partie mobile, qui peut être soit un aimant permanent soit un bobinage parcouru par un courant fixe constitue le rotor. On va s'intéresser spécifiquement au moteur synchrone, et tenter de comparer son fonctionnement à celui du moteur à courant continu.

• Démarrage du moteur

Contrairement au moteur à courant continu, le moteur synchrone ne peut pas démarrer seul. En effet, au départ, le rotor est immobile ($\omega = 0$) et est placé dans le champ tournant à la vitesse $\Omega \neq 0$. Par conséquent, le couple moyen exercé sur le rotor est nul ($\langle \vec{\Gamma}(t) \rangle = \vec{0}$) et ne permet pas la mise en rotation du rotor... Pour démarrer, le moteur a besoin d'un dispositif auxiliaire. On peut le lancer avec une machine à courant continu par exemple, ou augmenter la vitesse de rotation du champ magnétique progressivement de manière à ce que le rotor puisse suivre (possible grâce à l'électronique de puissance).

• Fonctionnement du moteur en régime permanent

Sur la caractéristique en couple précédente, on ne garde que la partie $[0; \pi]$. La charge exerce un couple résistant $-\Gamma_r$ sur la machine. Le rotor est par ailleurs soumis au couple moteur moyen $\langle \vec{\Gamma}(t) \rangle = M B \sin \alpha$. En régime permanent, le point de fonctionnement du moteur est donné par $\langle \vec{\Gamma}(t) \rangle = \Gamma_r$.



- Si $\Gamma_r > M B$, le régime de fonctionnement permanent ne peut pas être atteint. La machine synchrone ne peut pas entraîner n'importe quelle charge, contrairement à la MCC. Le couple MB est appelé couple de décrochage.

- Si $\Gamma_r < M B$, le régime permanent s'établit pour $\langle \vec{\Gamma}(t) \rangle = \Gamma_r = M B \sin \alpha$. On voit que deux positions sont possibles pour différentes valeurs de α : P1 et P2. Étudions la stabilité de ces deux positions. Supposons que la vitesse de rotation de la machine diminue à cause des frottements par exemple. L'angle α augmente de $d\alpha > 0$.

- Position P1. On voit que $M B \sin(\alpha_1 + d\alpha) > \Gamma_r$: le théorème du moment cinétique par rapport à l'axe de rotation indique que la vitesse de rotation du rotor augmente pour retrouver sa valeur d'équilibre. La position P1 est stable !
- Position P2. On voit que $M B \sin(\alpha_2 + d\alpha) < \Gamma_r$: le rotor ralentit et la situation s'aggrave donc. Cette position est donc instable.

• Utilisation des moteurs synchrones

- qualités : excellent rendement (85% à 95%), vitesse fixée précisément par le réseau électrique utilisé. Le moteur supporte des variations de charge sans changer de vitesse de rotation (variation de la puissance active absorbée par le stator) : très intéressant pour avoir une vitesse de rotation précise et constante.
- défauts : démarrage difficile et non-autonome, risque de décrochage en cas de surcharge mécanique. On utilise donc ce moteur pour des systèmes fonctionnant de manière permanente avec le moins de démarrages possible, comme c'est le cas pour l'entraînement de pompes en pétrochimie, de compresseurs ou de gros ventilateurs. Des trois types de moteurs présentés ici, c'est de loin le moins utilisé.

Enfin, on trouve des machines synchrones en fonctionnement générateur, autrement dit des alternateurs, par exemple dans les centrales hydro-électriques, et pendant les heures creuses, on renverse le fonctionnement en moteur synchrone pour remonter l'eau dans le lac supérieur ! (De loin le plus utilisé. « Dynamo » de vélo : alternateur en réalité...)

III.C. Machine asynchrone [2]

On place dans un champ magnétique B tournant, non plus un moment magnétique permanent, mais une bobine plate, fermée sur elle-même, sans source d'alimentation, comportant N spires de surface S . On note R sa résistance, L son inductance propre et J son moment d'inertie par rapport à l'axe de rotation Oz .

La bobine tourne autour de l'axe Oz avec une vitesse angulaire ω , tandis que le champ, supposé uniforme sur toute la surface de la bobine, tourne à la vitesse ω_0 . On note α l'angle entre S et B à l'instant initial.

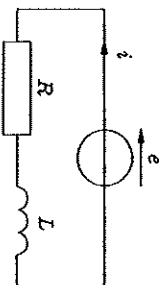
• Courant induit dans la bobine

La bobine est donc soumise flux variable Φ puisque le champ B tourne par rapport à celle-ci à la vitesse $\Omega = \omega_0 - \omega$: $\Phi(t) = N \vec{B} \vec{S} = N B S \cos((\omega_0 - \omega)t + \alpha)$.

Par conséquent, la fem induite est donnée par la loi de Faraday :

$$e(t) = -\frac{d\Phi(t)}{dt} = N B S (\omega_0 - \omega) \sin((\omega_0 - \omega)t + \alpha) .$$

Cette fem se traduit par l'apparition d'un courant induit $i(t)$ dans la bobine. On peut représenter le rotor par le schéma électrique suivant, et on obtient facilement l'équation régissant l'évolution du courant induit :



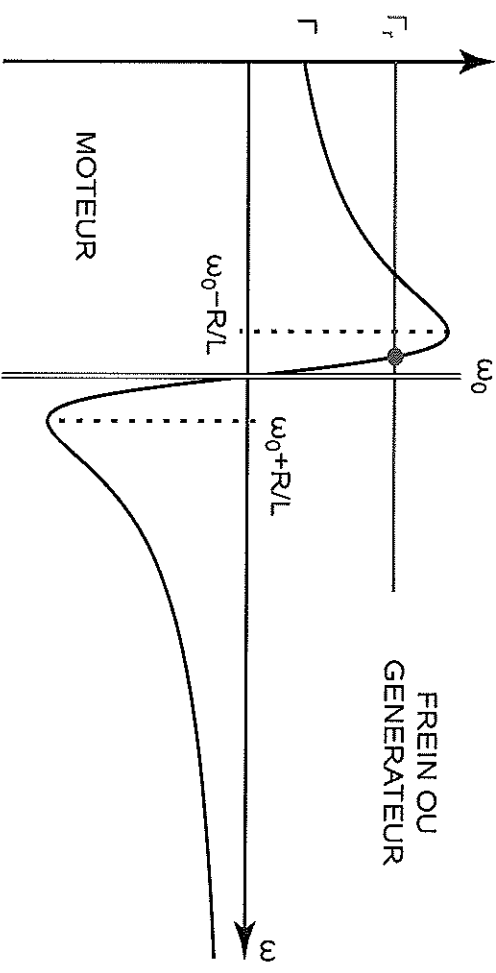
$$e(t) = L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) = N B S (\omega_0 - \omega) \sin((\omega_0 - \omega)t + \alpha)$$

Après le régime transitoire, le régime permanent s'établit à la pulsation $\Omega = \omega_0 - \omega$. Le circuit étant régi par une équation linéaire, on peut utiliser la notation complexe pour résoudre les équations du régime sinusoïdal forcé. Les calculs donnent pour le courant induit : $i(t) = \frac{N B S \Omega}{R^2 + L^2 \Omega^2} [R \sin(\Omega t + \alpha) - L \Omega \cos(\Omega t + \alpha)]$.

• Couple électromoteur moyen exercé sur la bobine

En régime permanent, la bobine de moment magnétique $\vec{M}(t) = N i(t) \vec{S}(t)$, subit un couple de la part du champ tournant : $\vec{\Gamma}(t) = \vec{M}(t) \wedge \vec{B}(t) = N i(t) \vec{S}(t) \vec{B}(t) \sin(\Omega t + \alpha) \vec{u}_z$.

En remplaçant i , S et B par leurs expressions, on montre que le couple a pour valeur moyenne temporelle : $\langle \vec{\Gamma}(t) \rangle = \frac{N^2 B^2 S^2 R}{2(R^2 + L^2 \Omega^2)} \cdot \Omega \cdot \vec{u}_z$. Une étude de cette fonction permet de tracer la caractéristique en couple suivante :



Le couple est du même signe que $\Omega = \omega_0 - \omega$! On va donc avoir un comportement moteur si $\omega < \omega_0$ et un comportement frein, ou générateur, si $\omega > \omega_0$. Pour un couple résistant donné dont la valeur est prise indépendante de ω ici (cas pour certaines charges, comme par exemple de type convoyeur ou engins de levage), et pas trop important, on trouve le point de fonctionnement. En fait il y a deux possibilités, mais on montre que la seule qui soit stable est celle pour $\frac{d\Gamma}{d\Omega} < 0$. Enfin, un point très important à remarquer est que le couple moteur est nul lorsque le rotor est à l'arrêt.

• Avantages, inconvénients et applications de la machine asynchrone

Le moteur peut démarrer seul pourvu que le charge ne soit pas trop importante (pas le cas sur le schéma). De plus, il s'adapte à une augmentation de la charge par une faible diminution de sa vitesse de rotation.

Très bon rendement, de l'ordre de 90%.

Si la charge mécanique est trop élevée, il y a décrochage et le rotor s'arrête de tourner, ce qui constitue une limitation, comme pour la machine synchrone.

Le moteur asynchrone triphasé est le moteur à tout faire dans l'industrie, et il est de loin le plus utilisé des trois moteurs présentés dans cet exposé. Pour obtenir toutes les gammes de vitesses désirées, on utilise souvent des réducteurs mécaniques de vitesse, mais ça réduit énormément le rendement, qui peut chuter à 50% dans certains cas. De plus, l'électronique de puissance, développée depuis les années 80 permet de produire des courants triphasés de fréquence réglable, ce qui a révolutionné l'utilisation des machines tournantes.

Conclusion

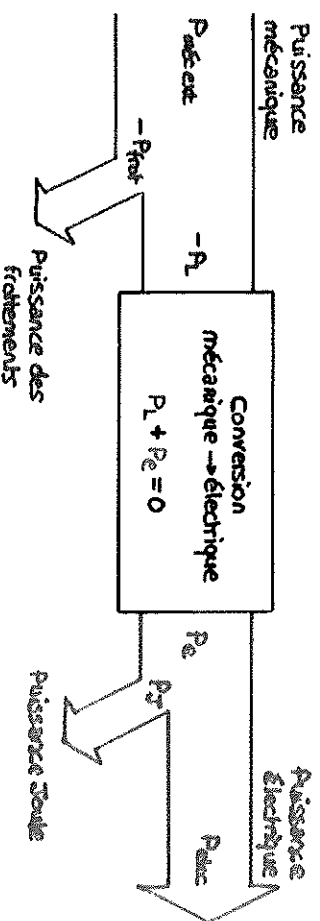
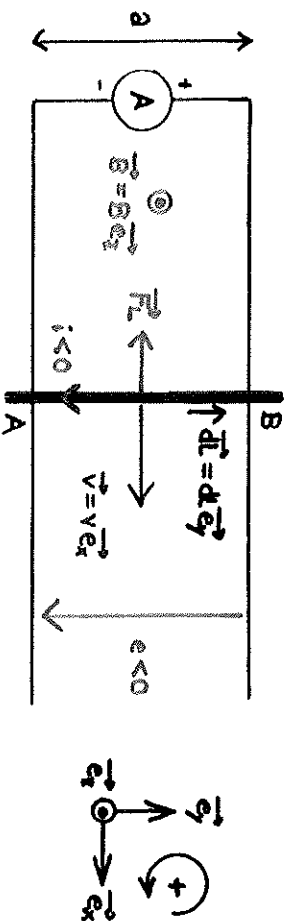
Au cours de cette leçon, on a donc montré comment l'induction électromagnétique permet la conversion de puissance électromécanique, puis comparé les trois types de machines utilisées aussi bien dans l'industrie que chez les particuliers. Il est à noter qu'à l'heure actuelle, le démarrage, le réglage de la vitesse, ses variations spontanées en fonction de la charge, le risque de décrochage, ne sont plus des critères déterminants : quel que soit le type de moteur, ces problèmes sont résolus par l'électronique de puissance. Ceci explique que pour des utilisations parfois similaires, on trouve des moteurs de types différents (par exemple, l'eurostar utilise des moteurs asynchrones alors que le TGV Paris-Sud-Est utilise des moteurs à courant continu).

	ASYNCHRONE	SYNCHRONE	CONTINU
Principe de base	Champ tournant créé au stator par un bobinage triphasé, agissant sur des bobinages rotor en court-circuit	Champ tournant créé au stator par un bobinage triphasé, agissant sur un bobinage rotor alimenté en courant continu	Stator alimenté en continu. Rotor alimenté en continu par l'intermédiaire d'un collecteur (convertisseur continu/alternatif)
Vitesse	$< \omega_0$	$= \omega_0$	quelconque
Couple de démarrage	Existe	N'existe pas à fréquence industrielle	Existe
Alimentation du rotor	Non nécessaire	En courant continu (contacts glissants)	Courant continu avec collecteur
Réglages	Uniquement par l'alimentation stator	Double possibilité : Stator et/ou rotor	Double possibilité : Stator et/ou rotor
Complexité de construction	Faible	Moyenne	Elevée
Coût	Faible	Moyen	Elevé
Possibilité d'utiliser des aimants permanents	Non	Oui, au rotor Mais perte d'une possibilité de réglage	Oui, au stator Mais perte d'une possibilité de réglage

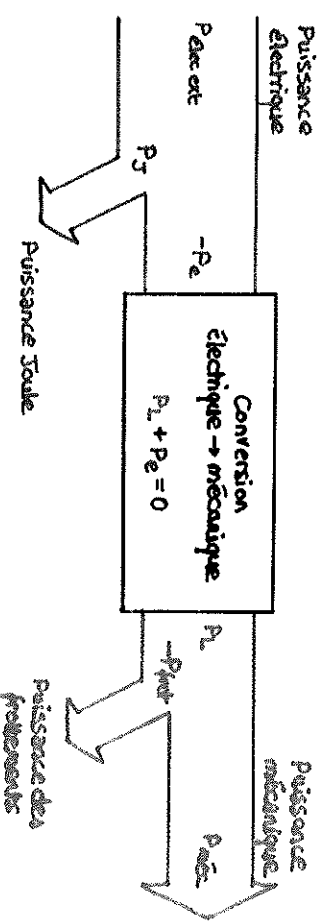
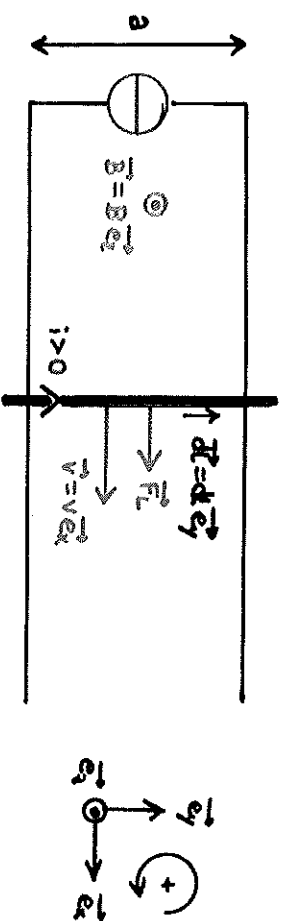
(banque d'images)

Enfin, il existe de nombreux autres exemples de transducteurs électromécaniques. Ainsi, on peut citer le haut-parleur électro-dynamique qui transforme l'énergie électrique reçue en énergie mécanique pour former les ondes mécaniques sonores, ou encore les cristaux piézo-électriques...

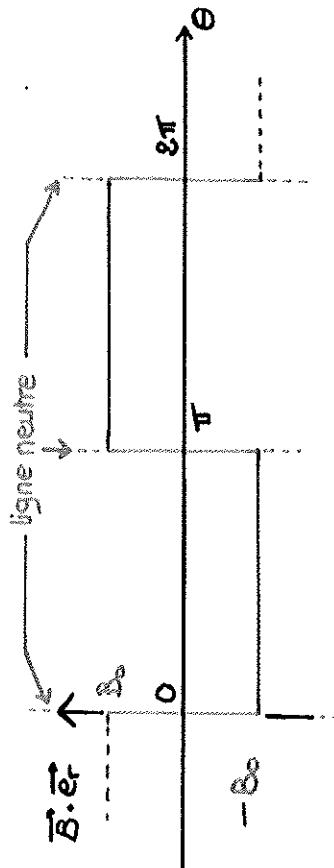
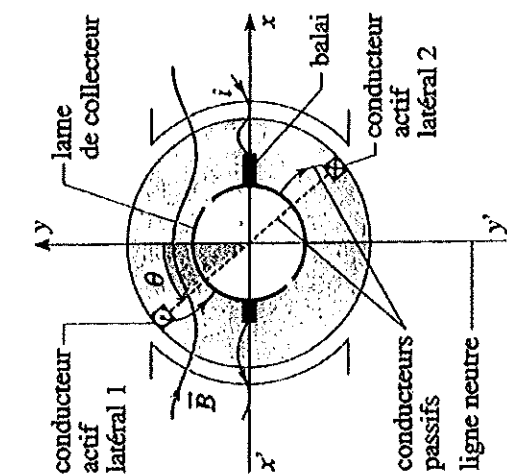
RAILS DE LAPLACE FONCTIONNEMENT GÉNÉRATEUR



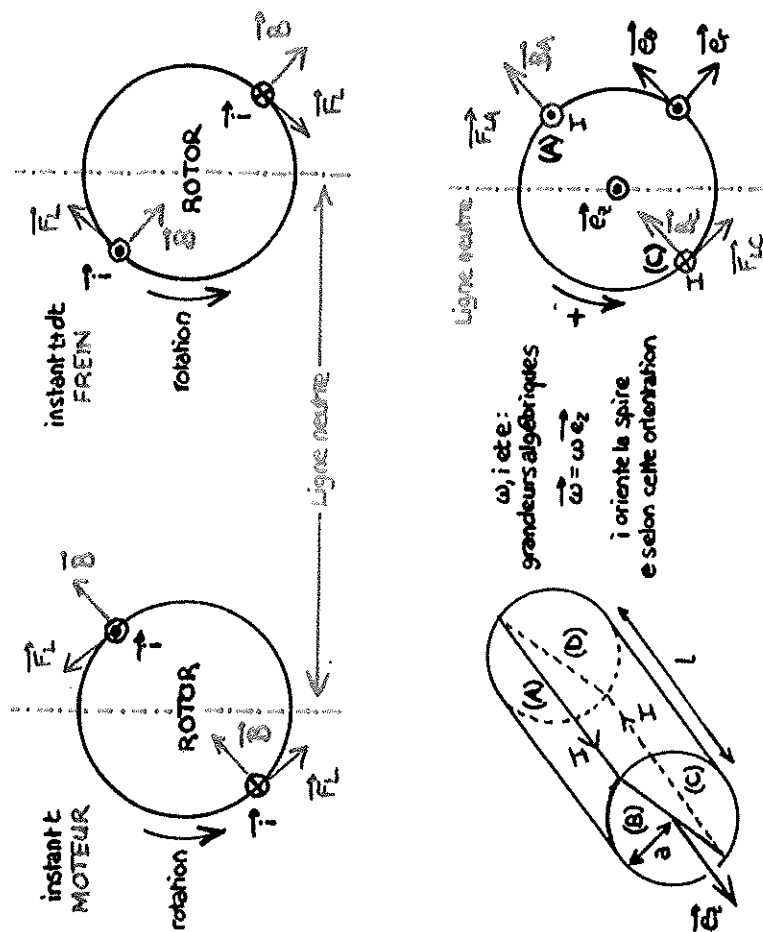
RAILS DE LAPLACE FONCTIONNEMENT MOTEUR



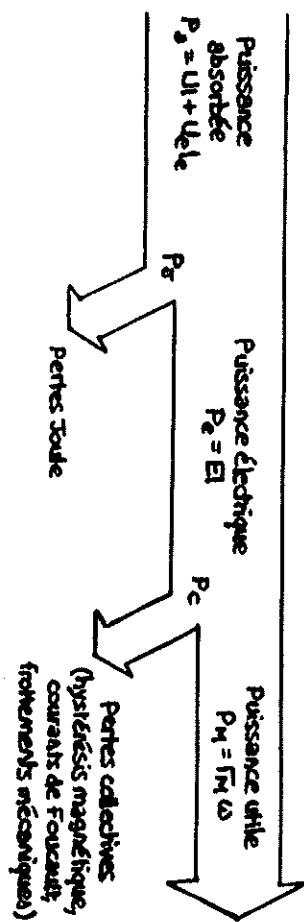
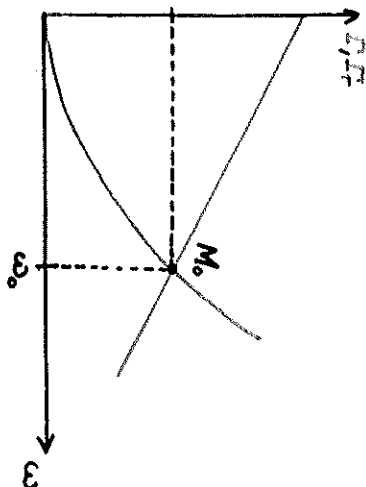
MACHINE À COURANT CONTINU



MACHINE À COURANT CONTINU

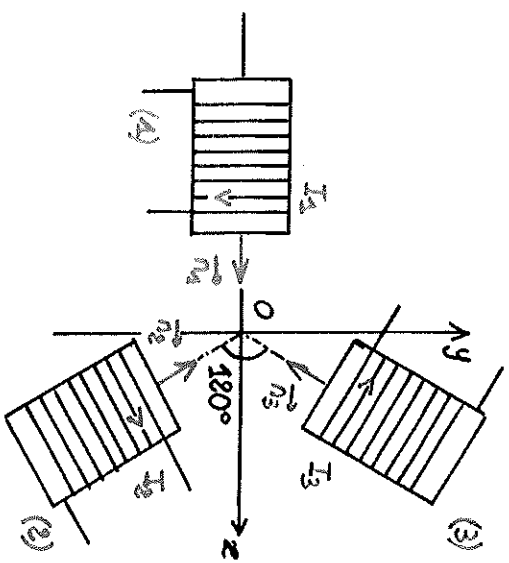


MOTEUR À EXCITATION INDÉPENDANTE



PRODUCTION D'UN CHAMP TOURNANT

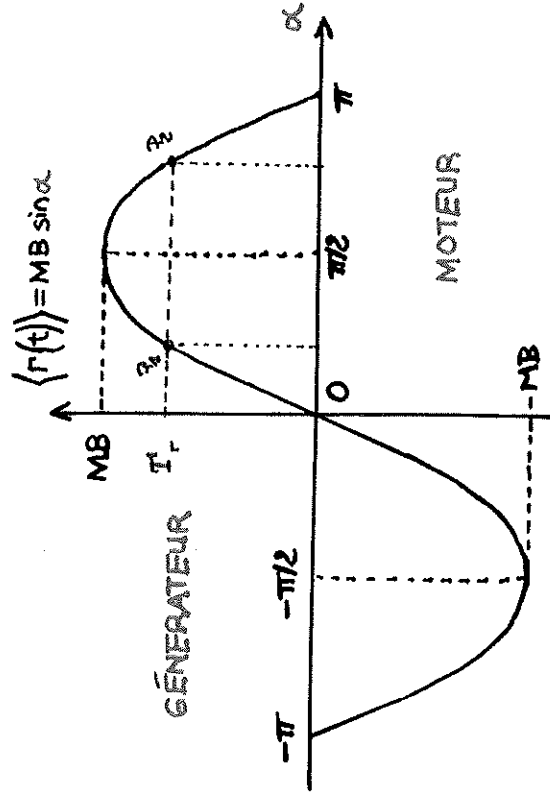
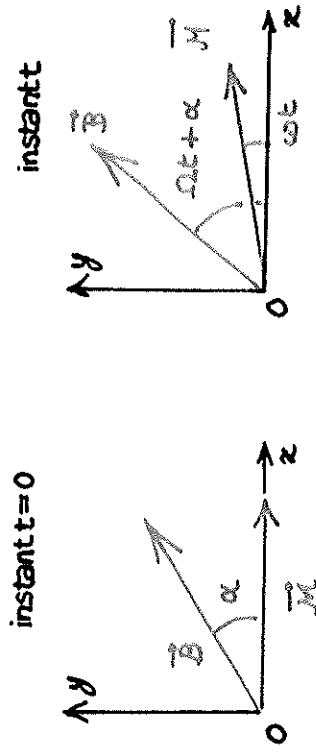
$$\begin{cases} \vec{I}_1(t) = \vec{I}_0 \cos(\omega t) \\ \vec{I}_2(t) = \vec{I}_0 \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \vec{I}_3(t) = \vec{I}_0 \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \xrightarrow{B \propto I \text{ sur l'axe}} \begin{cases} \vec{B}_1(t) = B_0 \cos(\omega t) \vec{n}_1 \\ \vec{B}_2(t) = B_0 \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \vec{n}_2 \\ \vec{B}_3(t) = B_0 \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \vec{n}_3 \end{cases}$$



$$\vec{B}(t) = \vec{B}_1(t) + \vec{B}_2(t) + \vec{B}_3(t) = \frac{3}{2} B_0 \left[\cos(\omega t) \vec{u}_x + \sin(\omega t) \vec{u}_y \right]$$

Théorème de Ferraris : « Si on alimente par des tensions triphasées équilibrées un ensemble de p bobines par phase décalées angulairement de $2\pi/p$ radians les une par rapport aux autres, alors ces bobines produisent un champ magnétique d'amplitude constante et qui tourne à la vitesse : $N_s = f/p$, avec f la fréquence des tensions alimentant les bobines. »

MACHINE SYNCHRONE



MOTEUR ASYNCHRON

Bobine tournant à ω dans un champ $\vec{B}$ tournant à ω_0

→ Variation du flux de $\vec{B}$ à travers le circuit

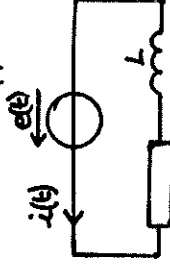
$$\Phi(t) = N \vec{B} \cdot \vec{S} = NBS \cos((\omega_0 - \omega)t + \alpha) \quad \text{avec } \Omega = \omega_0 - \omega$$

→ Force électromotrice induite

$$e(t) = -\frac{d\Phi(t)}{dt} = NBS(\omega_0 - \omega) \sin((\omega_0 - \omega)t + \alpha)$$

→ Courant induit

$$i(t) = \frac{NBS\Omega}{R^2 + L^2\Omega^2} [R \sin(\Omega t + \alpha) - L\Omega \cos(\Omega t + \alpha)]$$



→ Couple mécanique

$$\vec{r}(t) = \vec{M}(t) \wedge \vec{B}(t) = Ni(t) \vec{S}(t) \vec{B}(t) \sin(\Omega t + \alpha) \vec{L}_z$$

$$\langle \vec{r}(t) \rangle = \frac{N^2 B^2 S^2 R}{2(R^2 + L^2 \Omega^2)} \Omega \vec{U}_z$$

