
Chapitre 25
Induction électromagnétique
2^{ème} partie

I. Principe de la conversion

électromécanique : les rails de Laplace

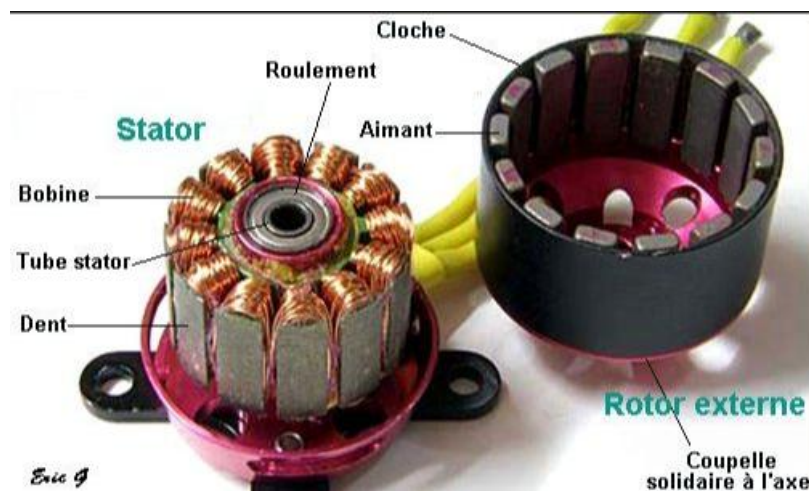
1. Conversion de puissance mécanique en puissance électrique : générateur
2. Conversion de puissance électrique en puissance mécanique : moteur
3. Généralisation

II. La machine à courant continu

1. Principe de fonctionnement
2. Modèle simplifié de la MCC
3. Modes de fonctionnement

III. Machines à courant alternatif

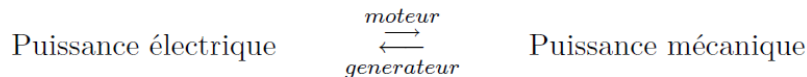
1. Principe et création d'un champ tournant
2. La machine synchrone
3. Principe de la machine asynchrone



Le cours

Mettre en mouvement un circuit électrique dans un champ magnétique suffit pour y voir apparaître un courant électrique, et réciproquement imposer un courant dans un circuit soumis à un champ permet de mettre en mouvement les parties mobiles du circuit.

Les phénomènes d'induction mettant en jeu le **déplacement d'un conducteur dans un champ magnétique** donnent ainsi lieu à des couplages électromécaniques, où l'on peut avoir des transferts d'énergie, une énergie mécanique étant transformée en énergie électrique ou inversement.



Les applications sont multiples : tous les moteurs électriques (de la brosse à dents au TGV!) reposent sur ces principes, de même que la production d'électricité dans toutes les centrales thermodynamiques. De tels systèmes sont appelés **transducteurs électromécaniques**.

Il existe une très grande variété de transducteurs électromécaniques, d'une importance pratique considérable : moteurs, dynamos, alternateurs, haut-parleurs, microphones, etc...

I. Induction dans les circuits en mouvement

1. Loi de Faraday et exceptions

On a dit dans le chapitre précédent que la loi de Faraday reste valable dans le cas des circuits mobiles de constitution constante. Le mouvement du circuit fait varier le flux magnétique au travers de celui-ci et on observe l'apparition d'une force électromotrice donnée par la loi de Faraday.

Dans le cas de circuit de constitution variable, ce n'est pas aussi simple... Pour la déterminer, on utilise alors la conservation de la puissance, $P_{Laplace} + ei = 0$, que nous évoquerons dans la suite. Malgré tout, la loi de Faraday reste encore valable dans de nombreuses situations comme les rails de Laplace.

2. Méthode d'étude d'un système avec couplage électromécanique

Le système couplant deux domaines différents, l'approche est nécessairement double et implique aussi bien la mécanique que l'électricité. Le comportement du système est ainsi régi par deux équations différentielles couplées :

- **Une équation mécanique, obtenue en appliquant le théorème de la résultante cinétique (translation) ou du moment cinétique scalaire (rotation) aux parties en mouvement du système**
- **Une équation électrique, obtenue en appliquant la loi des mailles au circuit électrique équivalent.**

Du côté mécanique, le couplage apparaît au travers de l'action des forces Laplace qui dépend du courant, et du côté électrique il transparaît dans la f.é.m induite, puisque les variations de flux magnétique dépendent de la vitesse (éventuellement vitesse angulaire) des parties mobiles.

Attention ! L'expression de la force électromotrice induite et de la force de Laplace dépendent de l'orientation du contour choisie. La première étape de tout exercice d'induction est d'orienter le courant !

II. Principe de la conversion électromécanique : les rails de Laplace

1. Conversion de puissance mécanique en puissance électrique : générateur

Un dispositif mécanique extérieur met en mouvement tout ou une partie d'un circuit électrique plongeant dans un champ magnétique, créant ainsi une force électromotrice au sein du circuit.

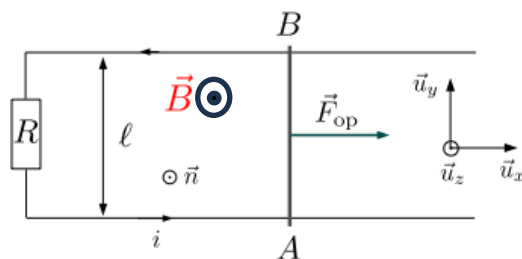
Nous allons illustrer cette conversion avec les rails de Laplace en fonctionnement générateur.

Une tige rectiligne métallique rigide, de longueur l , de masse m , peut glisser sans frottements le long deux rails rectilignes métalliques parallèles horizontaux très longs, perpendiculaires à la tige. On note R la résistance totale du circuit que l'on suppose constante.

La résistance électrique de la tige entre les deux points de contacts A , B et celle des rails sont négligeables. On néglige l'inductance propre du circuit.

L'ensemble est placé dans une zone où l'on a créé un champ magnétique uniforme, permanent, perpendiculaire au plan des rails et dirigé suivant la verticale ascendante.

À un instant $t = 0$, la tige, initialement immobile ($v(0) = 0$), est déplacée horizontalement sur les rails par un opérateur, on suppose la force constante $\vec{F}_{op} = F_{op} \vec{u}_x$.



1. Exprimer la force électromotrice $e(t)$ induite dans le circuit.
2. A l'aide d'une modélisation électrique, écrire l'équation électrique.

3. En appliquant le PFD à la barre, écrire l'équation différentielle vérifiée par la vitesse $v(t)$.

4. Dédire des équations précédentes les expressions de $v(t)$ et $i(t)$. Tracer leur allure.

5. Faire un bilan de puissance électrique puis mécanique.

- TPC :

- Puissance électrique fournie par $e(t)$:

On remarque que la puissance électrique fournie par la f.é.m. d'induction P_{elec} est opposée à la puissance mécanique des forces de Laplace $P_{Laplace}$.

$$P_{Laplace} + P_{elec} = 0$$

Ce résultat est à la base du principe de conversion électromécanique.

L'énergie fournie par l'opérateur est convertie en énergie cinétique et en énergie électrique (ici dissipée par effet Joule) : $F_{op} v = \frac{dE_c}{dt} + Ri^2$

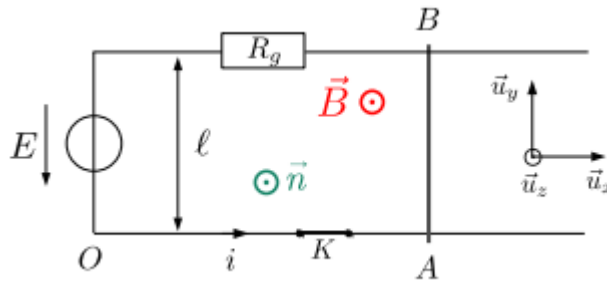
En régime permanent : $v = cte$ et toute l'énergie fournie par l'opérateur est convertie en énergie électrique : $F_{op} v = Ri^2$ donc $P_{op} = -P_{Laplace}$ et $F_{op} = -F_{Laplace}$.

2. Conversion de puissance électrique en puissance mécanique : moteur

Une source externe impose un courant i dans un circuit électrique plongeant dans un champ magnétique. La force de Laplace ou un couple de Laplace peut mettre tout ou une partie de ce circuit en mouvement et ainsi entraîner une charge mécanique.

Nous allons illustrer cette conversion avec les rails de Laplace en fonctionnement moteur.

On suppose la tige initialement immobile sur ses rails. On alimente le circuit par une source de tension continue de force électromotrice E . On note R la résistance totale du circuit. L'interrupteur K est initialement ouvert. A $t = 0$, on ferme K .



1. A l'aide d'une modélisation électrique, écrire l'équation électrique.

2. En appliquant le PFD à la barre, écrire l'équation différentielle vérifiée par la vitesse $v(t)$.

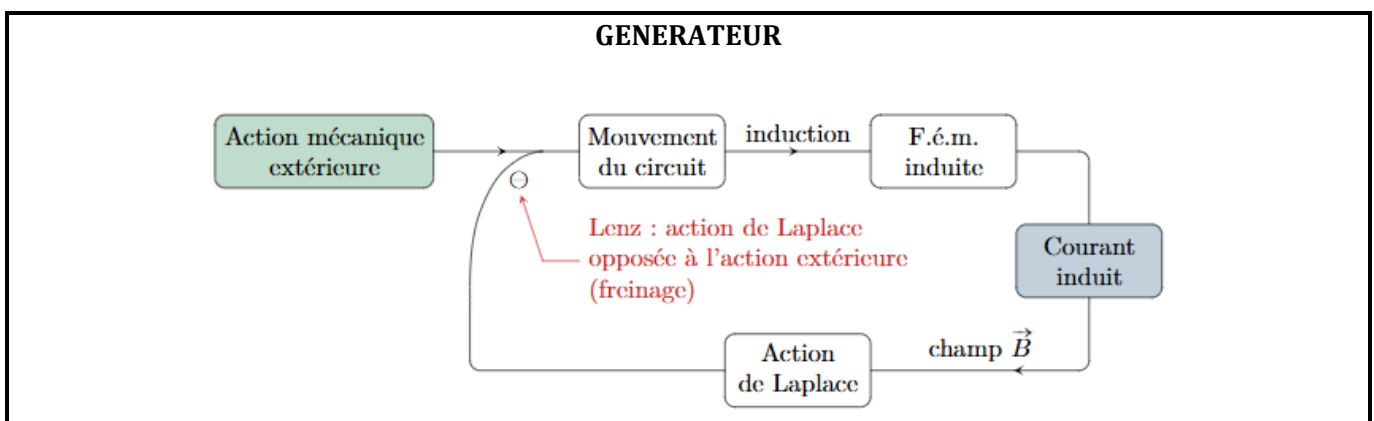
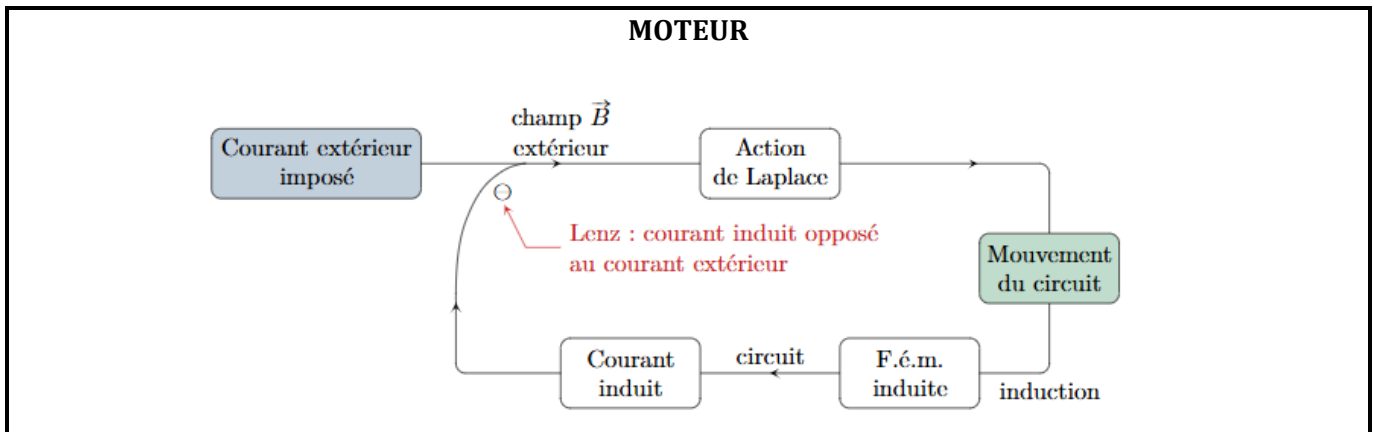
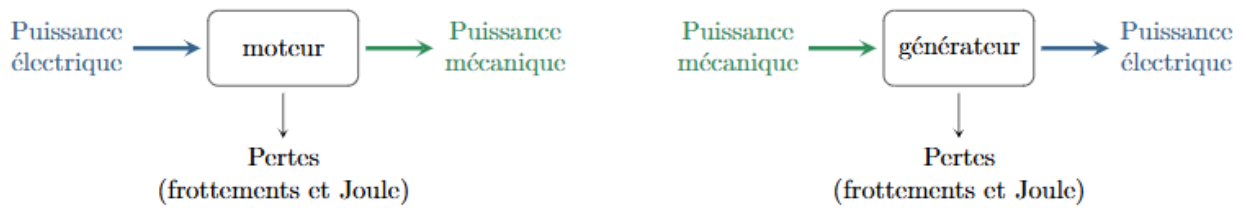
3. Dédurre des équations précédentes les expressions de $v(t)$ et $i(t)$. Tracer leur allure.

4. Faire un bilan de puissance électrique puis mécanique.
 - Puissance des forces de Laplace :

- Puissance électrique fournie par $e(t)$:

3. Généralisation

Un transducteur électromécanique est un dispositif pouvant réaliser soit la conversion d'une énergie mécanique en énergie électrique soit la conversion inverse grâce au phénomène d'induction, cela aux pertes par effet Joule et par frottement près.



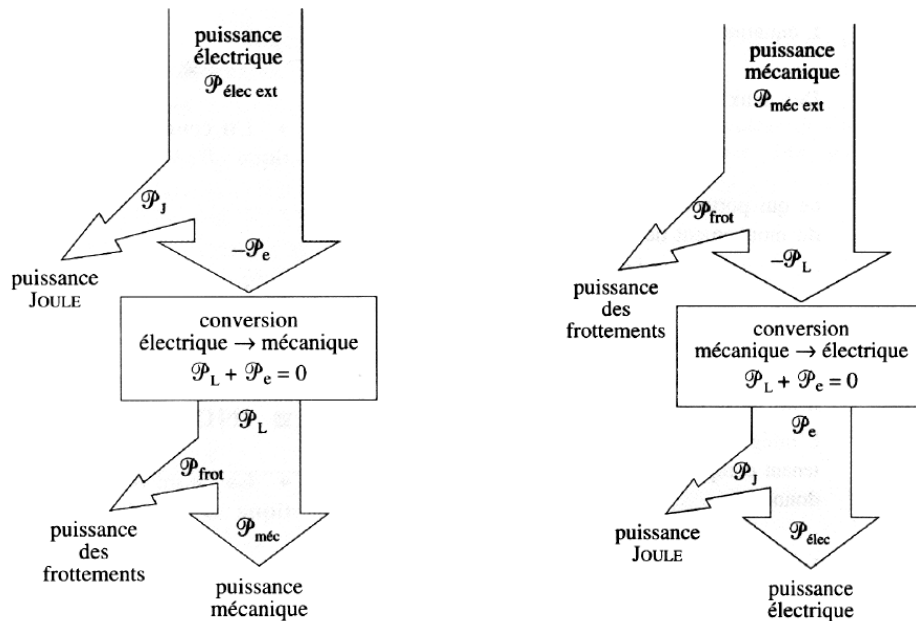
La puissance mécanique fournie par les forces de Laplace $P_{Laplace}$ et la puissance électrique fournie par le générateur induit sont toujours exactement opposées :

$$P_{Laplace} + P_{elec} = 0$$

Cette relation traduit le fait que la conversion électro-mécanique est parfaite. Elle est toujours valable, et permet de calculer efficacement la fém induite dans des situations où la loi de Faraday ne s'applique pas.

Le fait que la conversion électromécanique soit parfaite ne signifie pas qu'il n'y a pas de dissipation dans les systèmes réalisant cette conversion, mais que ces pertes sont soit purement mécaniques soit ou purement électriques, mais pas dans la conversion entre les deux.

SCHEMA GENERAL DE CONVERSION



III. La machine à courant continu

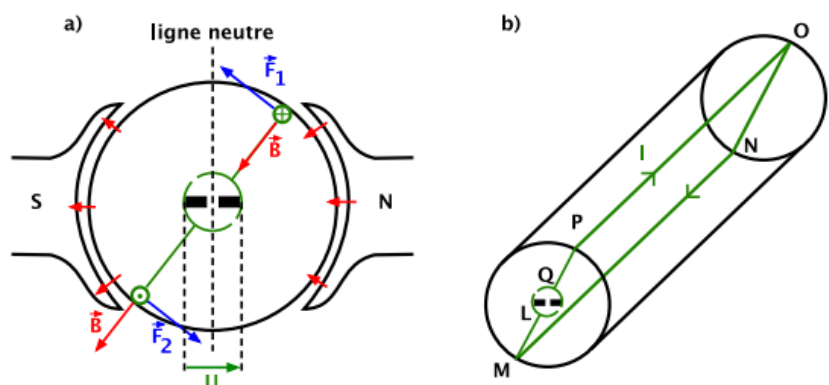
1. Principe de fonctionnement

La machine à courant continu est composée :

- **D'un stator** : c'est la partie fixe de la machine (suffisamment massive pour ne pas être mise en mouvement par les effets de la partie mobile). L'inducteur, source de champ magnétique, est lié au stator et est donc fixe. Il crée un champ magnétique radial. C'est soit un aimant permanent soit un bobinage.
- **D'un rotor** : c'est la partie mobile, solidaire de l'arbre mécanique. Un circuit électrique, l'induit, est placé sur le rotor et est excité par le champ magnétique de l'inducteur.
- De balais et lame permettant l'alimentation de l'induit et la commutation du courant.

2. Modèle simplifié de la MCC

On considère que l'induit est composé d'une spire de surface S . Le circuit est fermé par le dispositif de lames et balais. Ce dispositif est crucial au fonctionnement de la machine. Il permet l'inversion du sens du courant à chaque passage de la ligne neutre et permet ainsi de maintenir le sens de rotation de la machine constant.



Le circuit parcouru par un courant I et plongé dans un champ magnétique subit un couple de Laplace.

3. Modes de fonctionnement

Le couple subi par la spire de moment magnétique \vec{m} est $\vec{\Gamma} = \vec{m} \wedge \vec{B} = I \vec{S} \wedge \vec{B}$

Le couple est proportionnel au courant : on note $\Gamma = KI$ où $K = SB$ (homogène à un flux magnétique).

La rotation du rotor s'accompagne de l'apparition d'une force électromotrice induite e telle que :

$$P_{Laplace} + P_{elec} = 0$$

avec $P_{Laplace}$ la puissance du couple de Laplace et $P_{elec} = eI$ la puissance électrique induite.

Or $P_{Laplace} = \Gamma \Omega$ ainsi $eI = -\Gamma \Omega = -k I \Omega$ ainsi : $e = -K\Omega$.

Fonctionnement moteur : Lorsque la machine est alimentée électriquement, elle reçoit de la puissance électrique à laquelle la fém s'oppose ($eI < 0$) et fournit de la puissance mécanique $\Gamma \Omega > 0$.

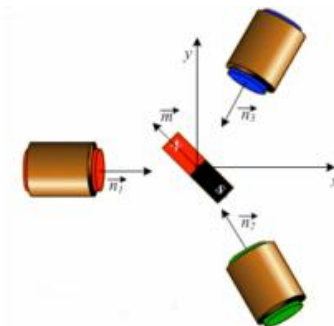
Fonctionnement générateur : À l'inverse, la machine reçoit de la puissance mécanique à laquelle la force de Laplace s'oppose ($\Gamma \Omega < 0$) et fournit de la puissance électrique $eI > 0$.

Un atout majeur de la MCC est le très bon contrôle de la vitesse de rotation, directement proportionnelle à la tension d'alimentation. De plus, une MCC peut être alimentée par une batterie continue autonome comme une pile. En contrepartie, leur vitesse de rotation et leur puissance sont limitées, et les frottements au niveau du collecteur induisent des pertes notables et imposent un entretien régulier des balais. On les rencontre aujourd'hui dans tous les systèmes tournants de petite taille, aussi bien dans un portail automatique qu'en voiture ou dans les jouets.

IV. Machines à courant alternatif

1. Principe et création d'un champ tournant

On alimente trois bobines identiques, fixes (le stator), placées en étoile autour d'une aiguille de boussole. On alimente ces bobines avec un courant de même intensité mais déphasé de $2\pi/3$.



Mettons ce système en équation. Les courants dans les 3 bobines sont :

$$i_1(t) = I \cos(\omega t)$$

$$i_2(t) = I \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$i_1(t) = I \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

Le champ magnétique crée au centre du système par une bobine est proportionnel à l'intensité qui le crée. Les trois champs résultants sont :

$$\vec{B}_1(t) = k I \cos(\omega t) \vec{u}_x$$

$$\vec{B}_2(t) = k I \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \left(\cos\left(\frac{2\pi}{3}\right)\vec{u}_x + \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right)\vec{u}_y\right)$$

$$\vec{B}_3(t) = k I \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \left(\cos\left(\frac{4\pi}{3}\right)\vec{u}_x + \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right)\vec{u}_y\right)$$

Le champ au centre des bobines est la somme des trois champs créés par chacune des bobines.

On trouve que $\vec{B} = \frac{3}{2} kI(\cos(\omega t)\vec{u}_x + \sin(\omega t)\vec{u}_y)$.

On a ainsi créé un champ magnétique tournant à la pulsation ω au centre du système.

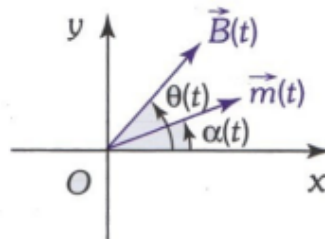
En modélisant l'aiguille par un dipôle magnétique \vec{m} , l'interaction entre ce champ tournant et l'aiguille se traduit par un couple $\vec{\Gamma} = \vec{m} \wedge \vec{B}$ selon Oz : le champ tournant met en rotation l'aiguille autour de cet axe.

2. La machine synchrone

Fonctionnement moteur (cf. TD 24) :

Dans ce mode de fonctionnement, le champ tournant est créé par le bobinage du stator.

Le rotor peut être vu comme un moment magnétique tournant à la vitesse ω_0 en interaction avec le champ tournant à la vitesse ω .



$$\vec{\Gamma} = mB \sin(\theta - \alpha) \vec{u}_z = mB \sin((\omega - \omega_0)t + \theta_0) \vec{u}_z$$

Pour des fréquences raisonnables de rotation, la constante de temps mécanique (ou temps de réponse) du moteur τ est très grande devant la période de rotation du champ $T = 2\pi/\omega$. Dans ce cas, la machine n'est ainsi sensible qu'aux valeurs moyennes. On voit alors que pour $\omega_0 = \omega$ le couple moyen appliqué est nul. Ainsi pour avoir un couple non nul, on a $\omega_0 \neq \omega$ d'où le nom de machine synchrone.

Expérimentalement, on remarque que si le moteur à l'arrêt est alimenté par une tension de 50 Hz il ne démarre pas. Si on réduit la fréquence, il démarre pour des fréquences faibles. On augmente ensuite progressivement la fréquence de rotation et le moteur suit. En se plaçant à basse fréquence, on a augmenté la période T pour qu'il soit de l'ordre de τ ce qui a permis à la machine d'accrocher.

En régime permanent on a donc $\omega = \omega_0$ et le couple moteur est $\vec{\Gamma} = mB \sin(\theta_0) \vec{u}_z$.

Fonctionnement génératrice (cf. TD 25) :

Le champ magnétique tournant est ici engendré par le rotor de la machine synchrone, appelée aussi **alternateur**. Il est assimilable à celui crée par un aimant permanent en rotation autour de son axe. Le stator est composé d'un système de bobinage dans lequel apparait une f.é.m. induite.

Considérons donc un moment magnétique en rotation à la vitesse angulaire ω autour d'un axe passant par un point fixe O et placé près d'une bobine comportant N spires de section S et d'axe (Ox). Ce moment magnétique engendre un champ tournant :

$$\vec{B} = B(\cos(\omega t)\vec{u}_x + \sin(\omega t)\vec{u}_y).$$

Le flux dans la bobine est $\Phi = BNS \cos(\omega t)$

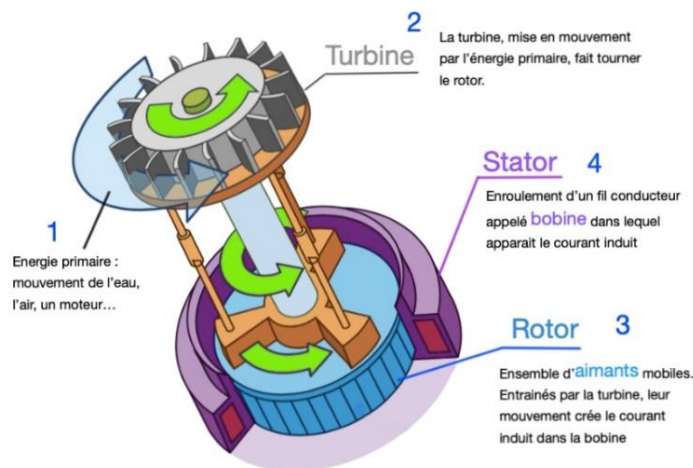
D'après la loi de Faraday la force électromotrice induite est donc :

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = \omega NSB \sin(\omega t)$$

Par rapport à une machine à courant continu, une machine synchrone est plus robuste et plus simple à fabriquer. Comme elle ne comporte pas de balais, son rendement est également nettement supérieur. Les principaux mérites du moteur synchrone sont l'excellent contrôle qu'il permet sur la vitesse de rotation (il suffit de contrôler la fréquence du champ), tout en pouvant fournir une très forte puissance.

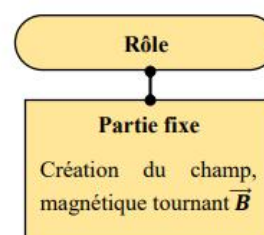
L'inconvénient majeur réside dans son démarrage : en raison de l'inertie du rotor, il ne peut pas se mettre à tourner spontanément à n'importe quelle fréquence. Une augmentation progressive de la fréquence de commande ou l'utilisation d'une autre machine sont donc nécessaires pour démarrer un tel moteur.

Les alternateurs sont utilisés par exemple en sortie des centrales électriques vers le réseau. On retrouve également des moteurs synchrones dans des systèmes industriels exigeant une forte puissance et dans les motrices du TGV Atlantique.

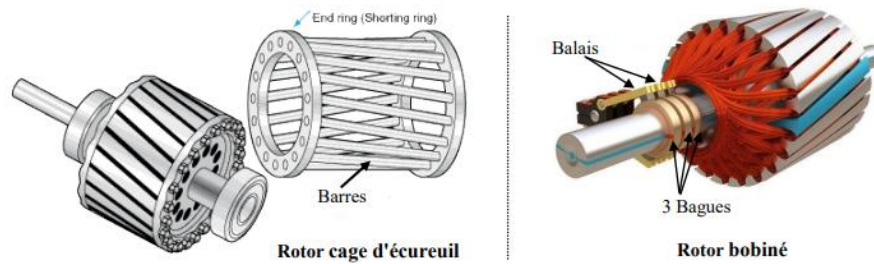


3. Principe de la machine asynchrone

Le stator porte trois bobinages qui créent un champ magnétique tournant.



Le rotor, cylindrique, porte soit un bobinage (d'ordinaire triphasé comme au stator) accessible par trois bagues et trois balais soit une cage d'écureuil non accessible, à base de barres conductrices en aluminium.



L'enroulement au rotor est soumis à des variations de flux magnétique. Une force électromotrice induite apparaît et crée des courants induits (dits rotoriques). Ces courants sont responsables de l'apparition d'un couple qui tend à mettre le rotor en mouvement afin de s'opposer à la variation de flux : loi de Lenz-Faraday. Le rotor se met donc à tourner pour tenter de suivre le champ statorique.

La machine est dite *asynchrone* car elle est dans l'impossibilité, sans la présence d'un entraînement extérieur, d'atteindre la même vitesse que le champ statorique. En effet, dans ce cas, vu dans le référentiel du rotor, il n'y aurait pas de variation de champ magnétique ; les courants induits s'annuleraient, de même que le couple qu'ils produisent, et la machine ne serait plus entraînée.

Les moteurs asynchrones sont les moteurs les plus fréquemment employés dans l'industrie du fait de leurs avantages : simplicité, robustesse, prix peu élevé et entretien facile. Ils sont en particulier utilisés pour la traction du TGV ou dans l'électroménager (lave-linge, lave-vaisselle...).

Les moteurs asynchrones sont les moteurs les plus largement utilisés, grâce à leur rapport coût/puissance le plus faible et des rendements très proches de 1 rendus possibles par l'absence de balais. Ces moteurs sont utilisés dans de nombreuses machines tournantes nécessitant un couple important sans pour autant requérir une vitesse de rotation précise. Ils sont robustes, bon marché (pas d'aimant !), sans entretien. Un inconvénient est le faible couple au démarrage, souvent inférieur au couple résistant dû à la charge à entraîner voire même aux frottements.

Au quotidien, on trouve des moteurs asynchrones dans toutes les applications industrielles et domestiques de moyenne puissance : machines outils, congélateurs, climatiseurs, machines à laver, pompes diverses, etc. Ils équipent aussi de nombreux TGV, dont la ligne Eurostar.