

La conversion de l'énergie

Chapitre 1 : L'énergie et les variables énergétiques

- **1. Introduction**
- L'énergie est, de manière générale, la capacité de faire un travail, c'est-à-dire d'agir. Elle a la propriété de se transmettre d'un objet à un autre, souvent en se transformant. Mais elle n'est jamais ni créée ni détruite : l'Univers en contient une quantité finie et constante.

- L'énergie est multiple, elle se présente sous de nombreuses formes et provient de diverses sources. Le soleil, le bois, le charbon, le pétrole, le gaz, les matériaux nucléaires, les réserves d'eau, le vent ... sont des sources d'énergie primaires.

2. Les différentes formes d'énergie

- L'énergie peut se présenter sous des formes très diverses :
- **2.1 L'énergie mécanique**
- L'énergie mécanique, associée aux objets, est la somme de deux autres énergies : l'énergie cinétique et l'énergie potentielle :

- -**l'énergie cinétique** est l'énergie des objets en mouvement ; plus la vitesse d'un objet est grande, plus son énergie cinétique est importante. L'énergie des cours d'eau (énergie hydraulique) et celle du vent (énergie éolienne) sont des énergies cinétiques. Elles peuvent être transformées en énergie mécanique (moulin à eau, moulin à vent, pompe reliée à une éolienne) ou en électricité, si elles entraînent un générateur.

- -**l'énergie potentielle** est l'énergie stockée dans les objets immobiles. Elle dépend de la position de ces derniers. Comme son nom l'indique, elle existe potentiellement, c'est-à-dire qu'elle ne se manifeste que lorsqu'elle est convertie en énergie cinétique.
- Par exemple, une balle acquiert, quand on la soulève, une énergie potentielle dite de pesanteur, qui ne devient apparente que lorsqu'on la laisse tomber.

- **2.2 L'énergie thermique**

- Il s'agit tout simplement de la chaleur. Celle-ci est causée par l'agitation, au sein de la matière, des molécules et des atomes. L'énergie thermique représente donc l'énergie cinétique d'un ensemble au repos.
- Dans une machine à vapeur, elle est transformée en énergie mécanique ; dans une centrale thermique, elle est convertie en électricité. Le sous-sol renferme de l'énergie thermique (géothermie), qui est utilisée soit pour produire du chauffage, soit pour générer de l'électricité.

- **2.3 L'énergie chimique**

- L'énergie chimique est l'énergie associée aux liaisons entre les atomes constituant les molécules. Certaines réactions chimiques sont capables de briser ces liaisons, ce qui libère leur énergie (de telles réactions sont dites exothermiques).

- Lors de la combustion, qui est l'une de ces réactions, le pétrole, le gaz, le charbon ou encore la biomasse convertissent leur énergie chimique en chaleur et souvent en lumière. Dans les piles, les réactions électrochimiques qui ont lieu produisent de l'électricité.

• 2.4 L'énergie rayonnante

- C'est l'énergie transportée par les rayonnements. L'énergie lumineuse en est une, ainsi que le rayonnement infrarouge. Les deux sont émis, par exemple, par le Soleil ou les filaments des ampoules électriques.
- L'énergie des rayonnements solaires peut être récupérée et convertie en électricité (énergie photovoltaïque) ou en chaleur solaire récupérée (solaire thermique).

• 2.5 L'énergie nucléaire

- L'énergie nucléaire est l'énergie stockée au cœur des atomes, plus précisément dans les liaisons entre les particules (protons et neutrons) qui constituent leur noyau. Les réactions nucléaires s'accompagnent d'un dégagement de chaleur.
- Dans les centrales nucléaires, on réalise des réactions de fission des noyaux d'uranium, et une partie de la chaleur dégagée est transformée en électricité.

- Dans les étoiles comme le Soleil, l'énergie des atomes est libérée par des réactions de fusion des noyaux d'hydrogène.
- **2.6 L'énergie électrique**
- L'énergie électrique représente de l'énergie transférée d'un système à un autre (ou stockée dans le cas de l'énergie électrostatique) grâce à l'électricité.

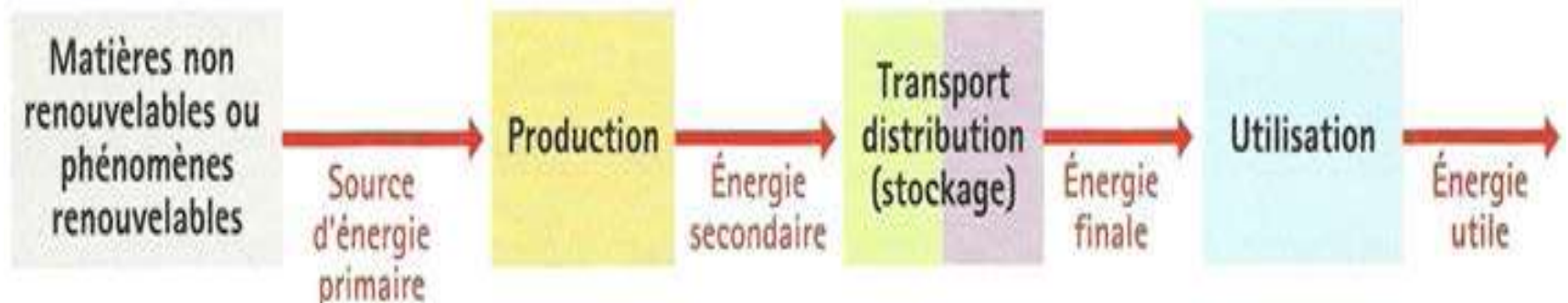
- Les systèmes pouvant fournir ces transferts électriques sont par exemple les alternateurs ou les piles. Les systèmes receveurs de ces transferts sont par exemple les résistances, les lampes ou les moteurs électriques.
- Elle se caractérise par une grande facilité de distribution mais présente une difficulté de stockage.

• 3. Unités d'énergie

- L'énergie se note W ou E. Elle s'exprime en Joule (J).
- Dans certains cas, on utilise d'autres unités :
- – l'électronvolt : $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
- – la calorie : $1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J}$
- – la thermie : $1 \text{ Th} = 1000000 \text{ cal}$
- – la tonne équivalent pétrole : $1 \text{ tep} = 42 \text{ GJ}$
- – le wattheure : $1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J}$
- **Remarque** : La tep est une unité de comparaison.
- $1000 \text{ kWh} = 0,086 \text{ tep}$ ou inversement : $1 \text{ tep} = 11630 \text{ kWh}$

- **4. Chaîne d'utilisation des énergies**

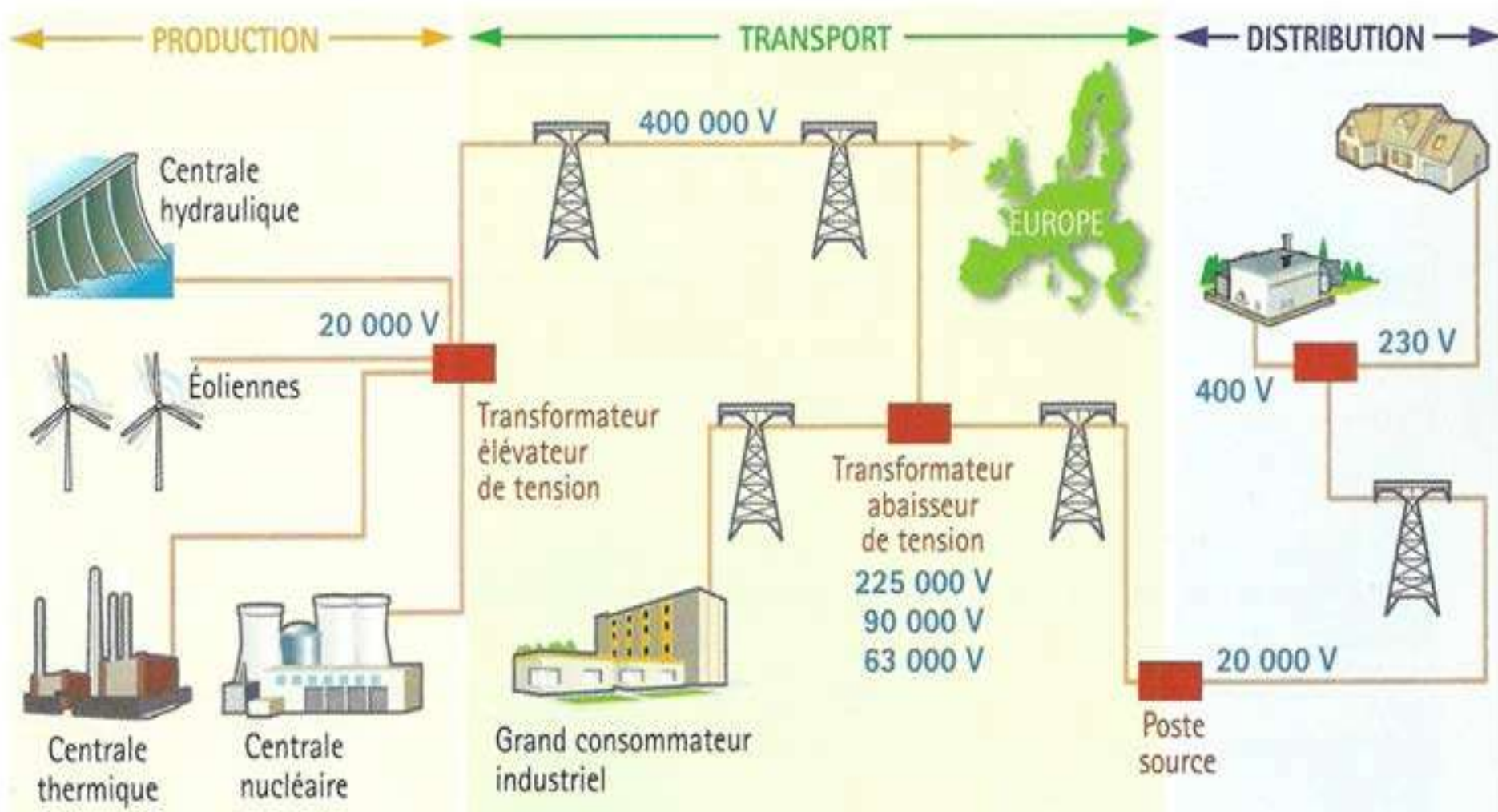
- Une fois produite, l'énergie est acheminée par un vecteur énergétique jusqu'à son utilisation:



- -**L'énergie secondaire** est l'énergie obtenue après transformation d'une source d'énergie primaire. L'électricité est une énergie secondaire.

- -**L'énergie finale** est l'énergie livrée aux consommateurs après transport et distribution pour être convertie en énergie utile (électricité domestique, carburants à la pompe, gaz de réseau ou bouteille...).
- - **L'énergie utile** est l'énergie dont dispose le consommateur après la conversion par ses équipements (lumière, chaleur, force motrice...).

- Exemple de chaîne de production, transport et distribution du vecteur énergétique d'électricité



- Plus du tiers de l'énergie primaire est convertie en énergie électrique. L'électricité est donc un vecteur énergétique essentiel qui facilite l'exploitation industrielle des sources d'énergie primaire. Elle permet le transport de grandes quantités d'énergie facilement utilisables pour des usages industriels ou domestiques : déplacer une charge, fournir de la lumière et de la chaleur, etc.

• **5. Le transfert et la conversion de l'énergie**

- Lorsque l'énergie d'un corps est transmise à d'autres corps on parle alors de transfert d'énergie.
- Lorsque l'énergie d'un corps change de forme on parle alors de conversion d'énergie.
- Lorsqu'une énergie diminue celle-ci n'est pas perdue: elle soit transférées à d'autres corps soit convertie en d'autres formes d'énergie.
- Lorsqu'une énergie augmente elle ne se crée pas à partir de rien: elle provient d'autre corps ou résulte de la conversion d'autres énergies.

• 6. Transformations de l'énergie

- Dans toute transformation, l'énergie se conserve en quantité.
- Exemple : un moteur électrique absorbe de l'énergie électrique et produit de l'énergie mécanique (rotation) et de l'énergie thermique (frottements et échauffement des fils).
- Donc seule l'énergie mécanique produite par le moteur est utile E_u . La chaleur qui apparaît est une perte E_p . L'énergie électrique consommée par le moteur est l'énergie absorbée E_a .
- On peut écrire la relation de l'énergie utile E_u en fonction de E_a et E_p :

- $E_u = E_a - E_p$

- **7. Rendement énergétique**
- -Le rendement η est le rapport entre l'énergie utile E_u et l'énergie absorbée E_a : $\eta = E_u / E_a$
- -Les pertes sont présentées à tous niveaux de la chaîne énergétique en résumé :
- Energie primaire x rendement de conversion= Energie secondaire.
- Energie secondaire x rendement de transport= Energie final.
- Energie final x rendement d'utilisation= Energie utile.
- Donc :
- -Energie utile = rendement de conversion x rendement de transport x rendement d'utilisation x Energie primaire
- - $\eta = \text{rendement de conversion} \times \text{rendement de transport} \times \text{rendement d'utilisation}$.

8. Grandeurs électriques

• 8.1 Relation énergie puissance

- La puissance se note P et s'exprime en watt (W). La puissance d'une machine est l'énergie qu'elle fournit par seconde,
- c'est la dérivée de l'énergie électrique $W_e(t)$ reçue par le dipôle :

$$p(t) = \frac{dW_e(t)}{dt}$$

- **8.2 Grandeurs instantanées**

- courant $i(t)$ ou $j(t)$ (en A)
- tension $u(t)$ ou $v(t)$ (en V)
- puissance $p(t) = u(t) i(t)$ (W)

- **8.3 Mesures en régime périodique**

- valeur moyenne $\langle u(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_T u(t) dt$
- valeur efficace (i.e. valeur RMS) $I_{\text{eff}} = \sqrt{\langle i^2(t) \rangle}$
- puissance moyenne $P = \langle p(t) \rangle$ (W)

- **8.4 Analyse de la puissance**

- -On appelle puissance moyenne ou puissance active la valeur moyenne de la puissance :

$$P = \langle p(t) \rangle \text{ (W)}$$

- -La puissance apparente **S** (unité VA) est définie comme le produit des valeurs efficaces de la tension et du courant :

$$S = U_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \text{ (VA)}$$

- La puissance apparente est supérieure ou égale à la puissance moyenne. Le facteur de puissance F_p caractérise le rapport entre ces deux grandeurs :

$$F_p = P/S \quad (F_p \in [0; 1])$$

- Un facteur de puissance proche de 1 (0,9 par exemple) correspond à une bonne utilisation de l'électricité alors qu'un facteur de puissance nul ou très faible correspond à de la tension et du courant avec pas ou peu d'échange d'énergie.

- **-Le régime continu** est caractérisé par des valeurs moyennes non nulles. Dans ce cas, c'est aux valeurs moyennes des signaux que l'on s'intéresse.
- **-Le régime alternatif** est caractérisé par des valeurs moyennes nulles. Dans ce cas, c'est aux valeurs efficaces que l'on s'intéresse.

- **8.5 Puissance en régime alternatif**

- **a/Réseau monophasé**

- Dans le cas d'un réseau monophasé dont les grandeurs électriques sont :

$$u(t) = U\sqrt{2}\cos(\omega t + \alpha)$$

$$i(t) = I\sqrt{2}\cos(\omega t + \alpha - \phi)$$

- où ϕ est le déphasage arrière du courant par rapport à la tension, la puissance moyenne ou puissance active, notée en Watt (W) est :

$$P = UI\cos(\phi)$$

- La puissance apparente est le produit des valeurs efficaces, soit :

$$S = UI$$

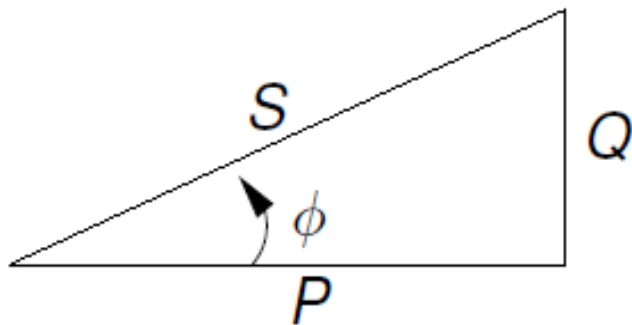
- On définit aussi la puissance réactive qui est liée aux échanges de puissance à valeur moyenne nulle dans les éléments réactifs (inductances et condensateurs):

$$Q = UI \sin(\phi) \text{ (var)}$$

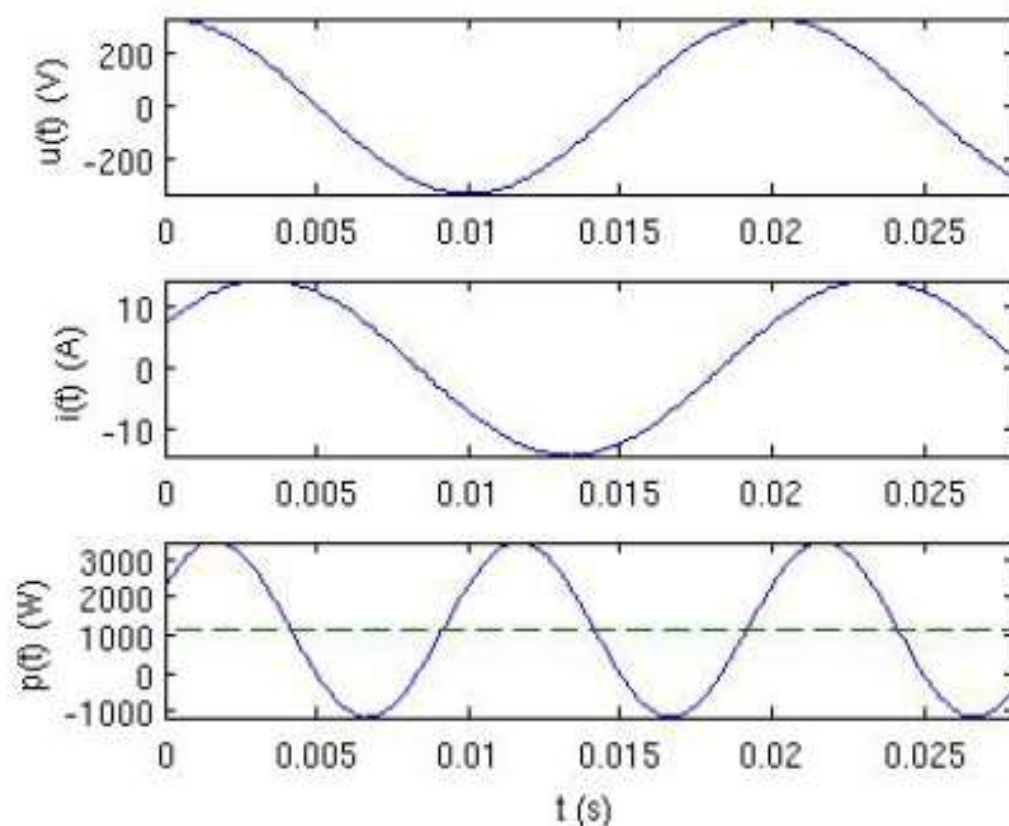
- On a aussi :

$$F_p = \cos(\phi)$$

- Ces relations se retrouvent dans le triangle des puissances :



Régime sinusoïdal monophasé : illustration (230 V, 10 A et $\phi = \pi/3$)



- puissance pulsée à 100 Hz

- **b/ Régime triphasé**

- Le régime triphasé équilibré est caractérisé par une valeur efficace identique sur les trois phases et un déphasage de $2\pi/3$ entre chacune des phases. Par exemple, en prenant la tension $v_a(t)$ comme référence des phases, on a pour les tensions simples (entre phase et neutre) :

$$v_a(t) = V\sqrt{2}\cos(\omega t)$$

$$v_b(t) = V\sqrt{2}\cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$v_c(t) = V\sqrt{2}\cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

- et pour les courants :

$$i_a(t) = I\sqrt{2}\cos(\omega t - \phi)$$

$$i_b(t) = I\sqrt{2}\cos(\omega t - \phi - \frac{2\pi}{3})$$

$$i_c(t) = I\sqrt{2}\cos(\omega t - \phi - \frac{4\pi}{3})$$

- La valeur efficace des tensions composées est

$$: U = \sqrt{3}V$$

- La puissance instantanée est constante identique à la puissance active :

$$P = p(t) = \sqrt{3}UI \cos(\phi)$$

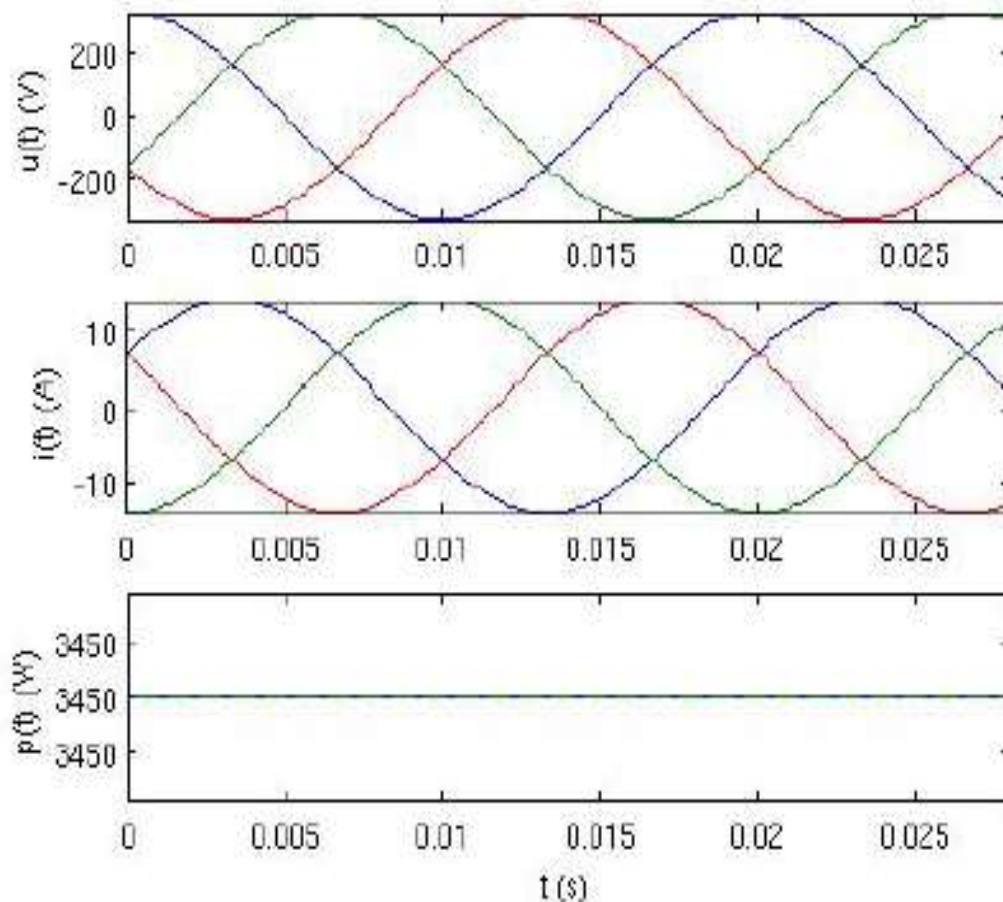
- On a aussi :

$$Q = \sqrt{3}UI \sin(\phi)$$

$$S = \sqrt{3}UI$$

$$F_p = \cos(\phi)$$

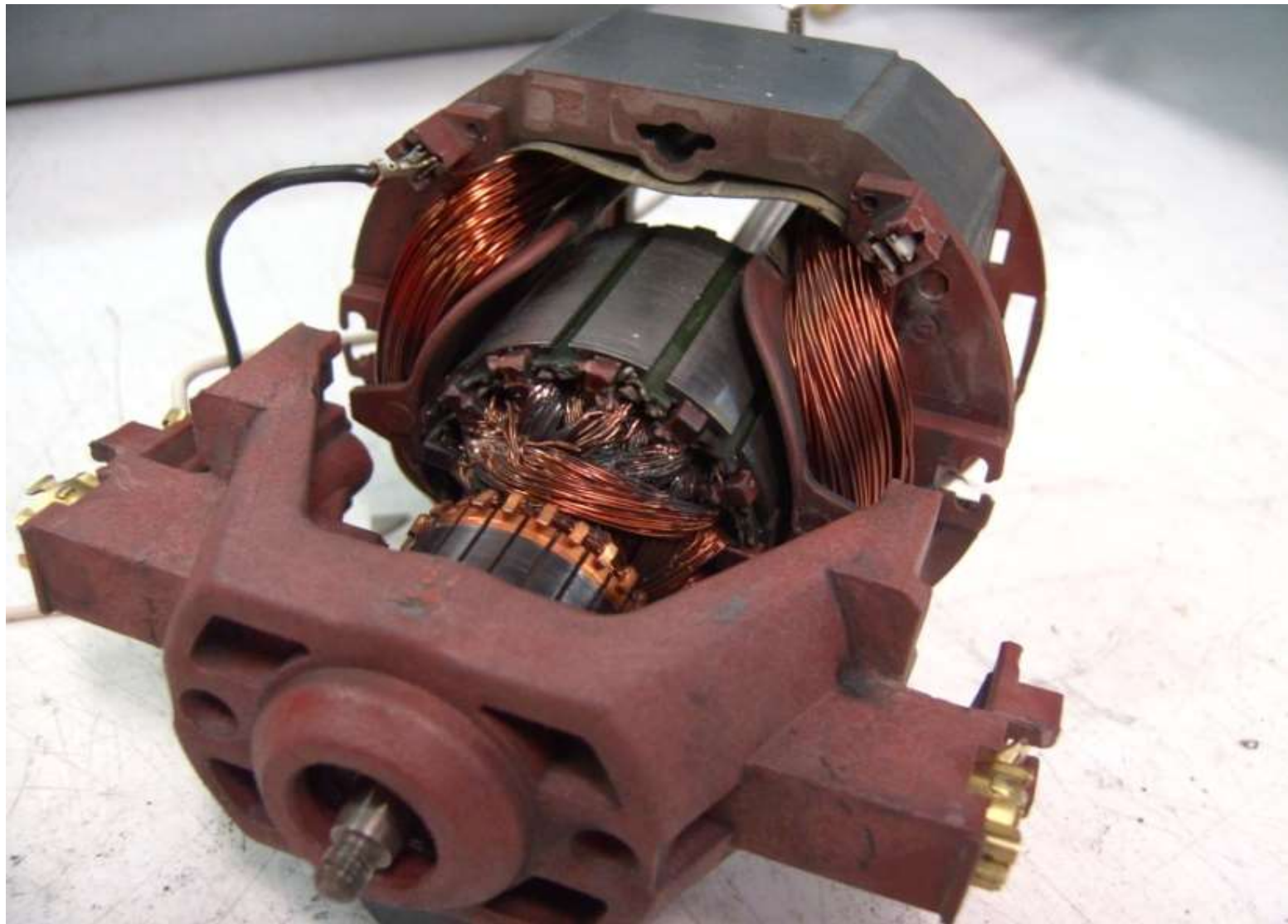
Systeme triphasé équilibré direct : illustration (230 V, 10 A et $\phi = \pi/3$)



- puissance instantanée constante

9. Magnétostatique : Production de couple et de force

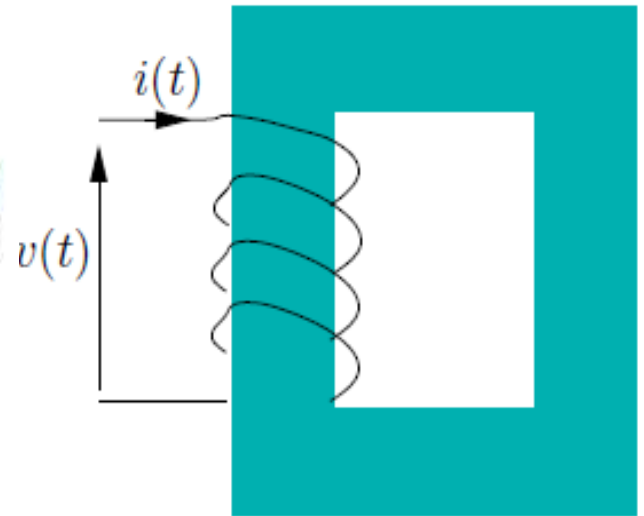
- Le **principe** de fonctionnement du **moteur électrique** est très simple. En physique, on sait que l'application d'un courant **électrique** dans un champ magnétique génère une force mécanique. Un **moteur électrique** contient des bobinages de fil **électrique** (fil identique à celui qui sert à transporter le courant).



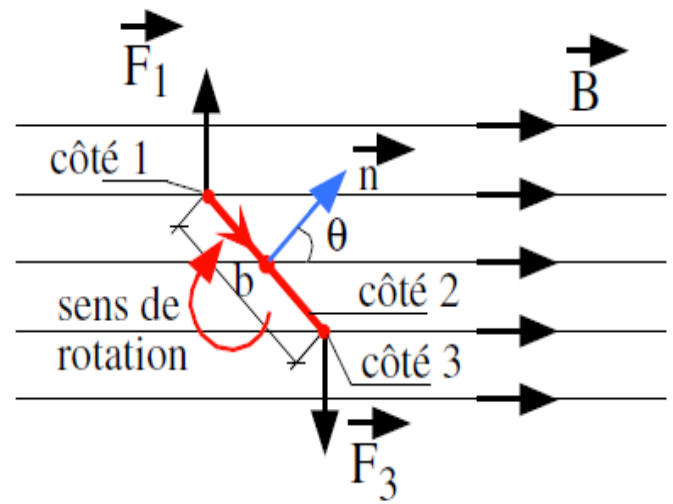
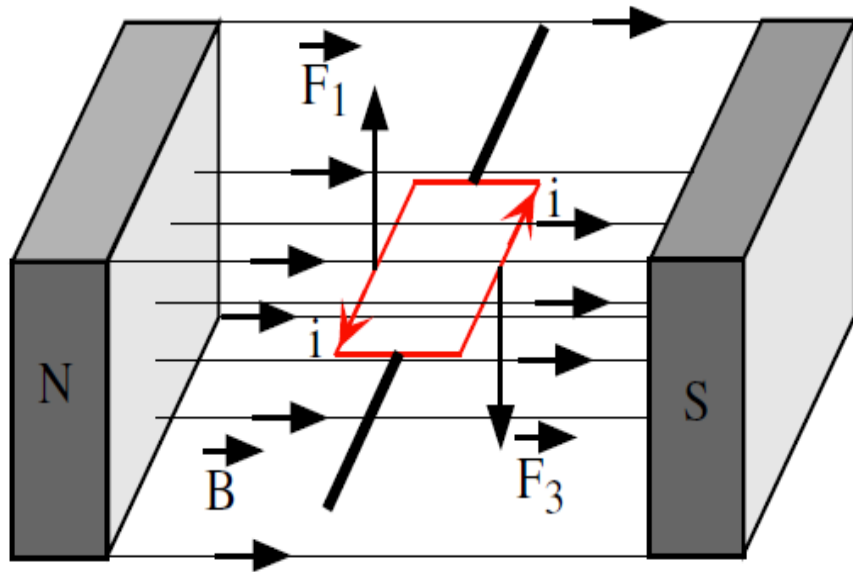
- **9.1 Circuit magnétique (ou bobine d'inductance)**

- Soit un circuit magnétique entouré par un circuit électrique. Le circuit est alimenté par le courant $i(t)$ et la tension à ses bornes est $v(t)$.

- Flux coupé par la bobine : $\phi = Li$
- Inductance L (coefficient d'auto-inductance)
- Loi d'induction $v(t) = d\phi/dt = Ldi/dt$
- Energie magnétique $W_m = \frac{1}{2}Li^2 = \frac{1}{2}\phi^2/L$

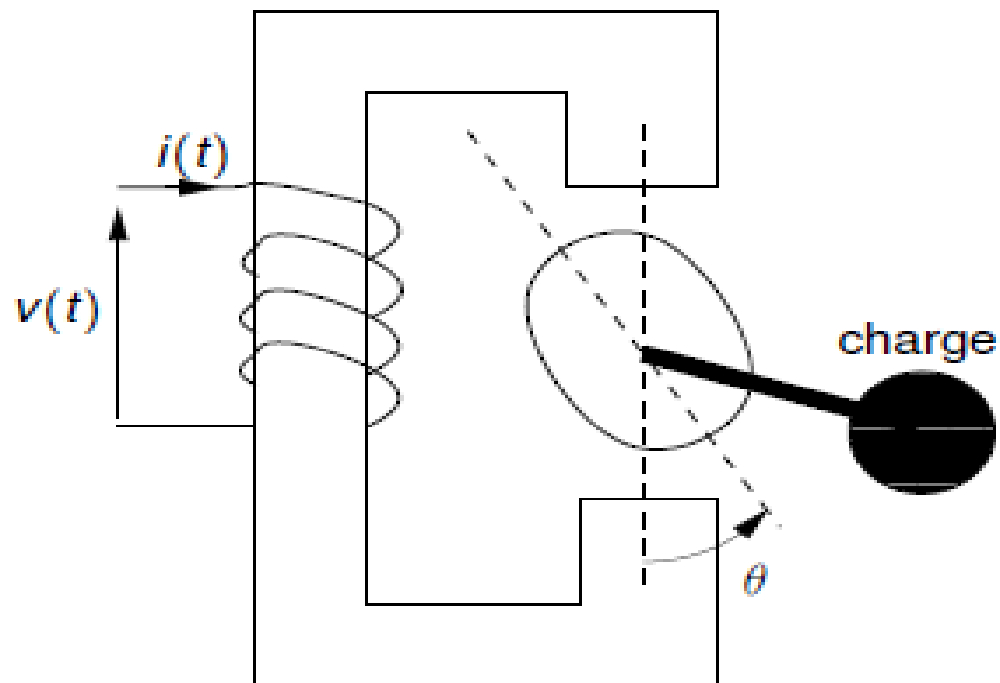


- **9.2 Action d'un champ magnétique sur une boucle de courant**
- C'est le principe des moteurs électriques que nous examinons ici ; soit une boucle parcourue par un courant est immergée dans un champ magnétique, les forces de Laplace qui en résultent créent un couple qui fait tourner la boucle autour de son axe.



- **9.3 Principe du moteur élémentaire**

- Soit un système électromécanique comportant un degré de liberté en rotation et comportant un circuit électrique.



- Le système reçoit de la puissance électrique, fournit de la puissance mécanique et peut stocker de l'énergie magnétique W_m .
 - Puissance électrique reçue $v(t)i(t)$
 - Puissance mécanique transmise à la charge $C\dot{\theta}$ (C est le couple)
- Le bilan de d'énergie pendant un intervalle de durée dt donne

$$dW_m = u i dt - C \Omega dt$$

où $\Omega = \frac{d\theta}{dt}$. Avec $u = \frac{d\phi}{dt}$, on obtient :

$$dW_m = i d\phi - C d\theta$$

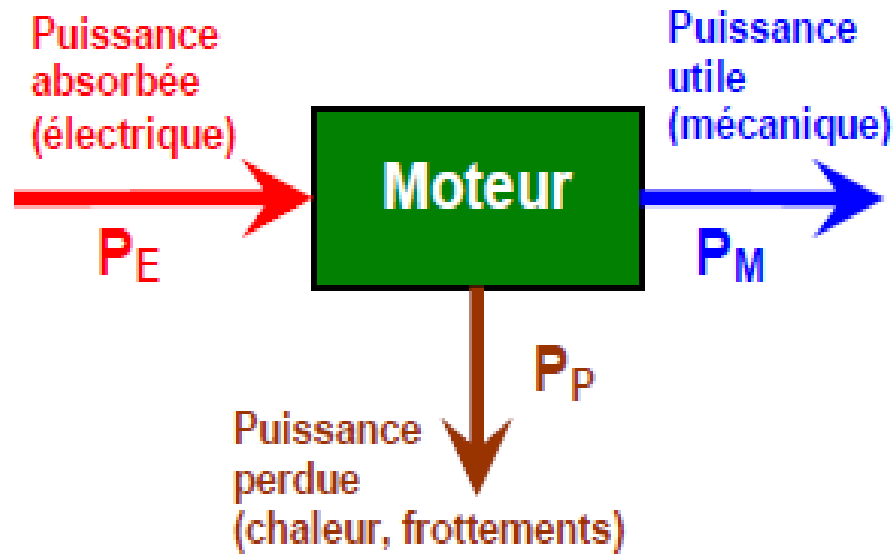
- Bilan de puissance :
- $dW_m/dt = ui - C\dot{\theta} = i\dot{\phi} - C\dot{\theta}$
- Avec $W_m = W_m(\phi, \theta)$, on a $dW_m/dt = \frac{\partial W_m}{\partial \phi} \dot{\phi} + \frac{\partial W_m}{\partial \theta} \dot{\theta}$
- En identifiant, on obtient $\frac{\partial W_m(\phi, \theta)}{\partial \phi} = i$ et $C = -\frac{\partial W_m(\phi, \theta)}{\partial \theta}$

Chapitre 2 : La conversion d'énergie électromécanique

- **1. Généralités**
- L'énergie électrique est une forme secondaire d'énergie qui présente une forme intermédiaire très intéressante par sa facilité de transport, sa souplesse et ses possibilités de conversion.
- Parmi toutes les possibilités de transformation, la forme électromécanique joue un rôle particulièrement important. Il faut savoir que 95% de la production d'énergie électrique résulte d'une conversion mécanique –électrique.

- La conversion d'énergie électromécanique est une partie intégrale de la vie de tous les jours.
- Que ce soit les grandes centrales hydroélectriques qui transforment l'énergie de l'eau en énergie électrique, la traction électrique (transports publics, voitures électriques et hybrides), ou bien le moteur qui fait tourner un séchoir, la conversion d'énergie est très répandue.

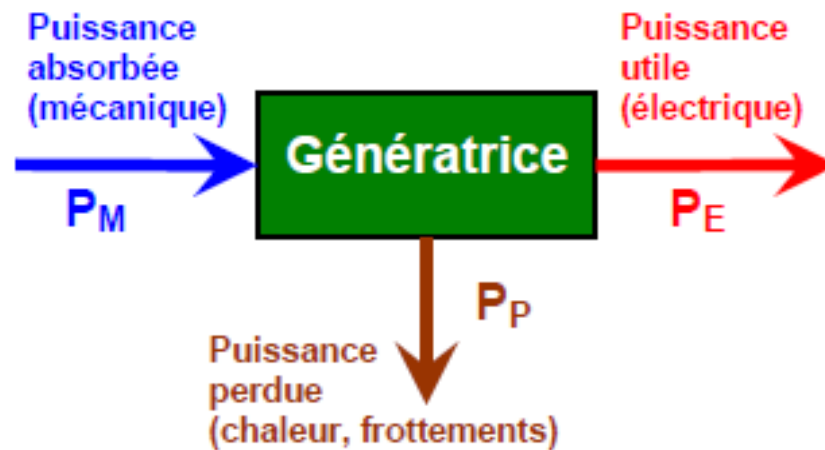
- **2. Conversion d'énergie électromécanique**
- Un convertisseur électromagnétique ou "machine tournante" effectue une transformation entre l'énergie électrique et l'énergie mécanique. Deux régimes de fonctionnement peuvent alors exister :
- **a/ Fonctionnement "moteur"**
- L'énergie électrique est transformée en énergie mécanique :



- On peut définir le rendement :

$$\eta = \frac{P_M}{P_E} = \frac{P_M}{P_M + P_P}$$

- **b/ Fonctionnement "génératrice"**
- L'énergie mécanique est transformée en énergie électrique:



- On peut définir le rendement :

$$\eta = \frac{P_E}{P_M} = \frac{P_E}{P_E + P_P}$$

- **3. Caractéristiques de la conversion électromécanique**
- L'étude de la conversion électromécanique est basée sur le principe de conservation de l'énergie. Celui-ci fait appel à une forme d'énergie intermédiaire stockable, il s'agit de l'énergie **électromagnétique**.
- La force ou le couple électromécanique résulte de trois formes possibles d'interactions :
 - – l'interaction entre deux courants,

- – l'interaction entre un courant et un circuit ferromagnétique,
- – l'interaction entre un aimant et un courant ou un circuit ferromagnétique.
- **4. Réversibilité des machines électriques tournantes**
- Les machines électriques tournantes sont **réversibles**, la même machine peut fonctionner en moteur ou en génératrice, cela est possible sur le plan physique que sur le plan technologique (exemples ci-dessous avec trois familles de moteurs).

- **a/ Le moteur à courant continu:**
- Une action mécanique sur le rotor produit une tension continue au stator, c'est la **génératrice à courant continu** (dynamo).
- **b/ Le moteur à courant alternatif:**
- **Le moteur synchrone** utilisé en génératrice va produire une tension de fréquence directement proportionnelle à la vitesse de rotation c'est la **génératrice synchrone** (alternateurs des centrales électriques).

➤ **Le moteur asynchrone** utilisé en génératrice va produire une tension de fréquence légèrement inférieure au cas de la génératrice synchrone c'est la **génératrice asynchrone** (centrales éoliennes).

- **5. Structure technologique des machines électriques tournantes**

- -La structure de ces machines comprend toujours un circuit magnétique, lieu de stockage et de la conversion d'énergie en deux temps (électrique-magnétique et magnétique-mécanique).

- -Le circuit magnétique est constitué de :
- **a/ Le stator :**
- Le stator est la partie fixe de la machine.
- Dans le cas d'un moteur, le stator est alimenté en électricité et produit un **champ magnétique inducteur**.
- Dans le cas d'un générateur, le stator produit une **tension induite** par le champ magnétique variable produit par le rotor en rotation.

- **b/ Le rotor**

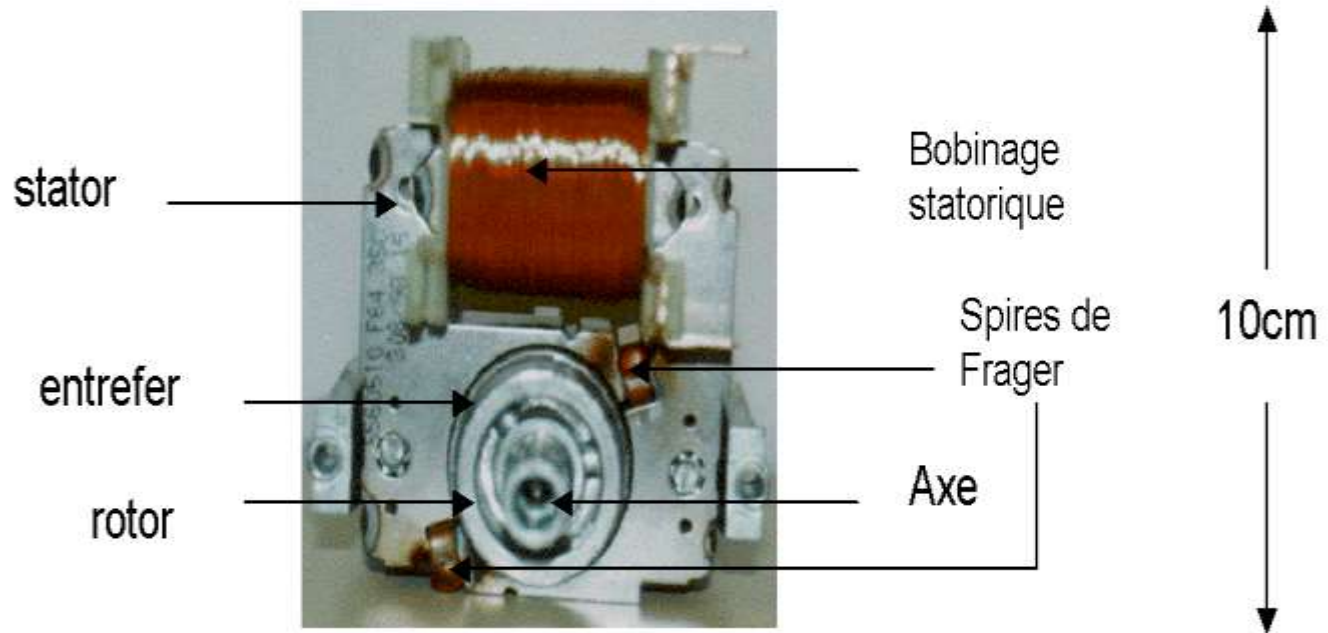
- Le rotor est la partie tournante de la machine, les courants rotoriques produisent un champ magnétique (champ induit) qui réagit mécaniquement avec le champ inducteur (stator) et produit un couple de rotation.

- **c/ Un entrefer**

- L'entrefer est un milieu de perméabilité μ_0 , les deux parties (stator et rotor) canalisent le flux magnétique vers l'entrefer. Alors il présente le lieu de stockage principal et donc de conversion de l'énergie magnétique.

- -Le circuit magnétique est constitué de tôles magnétiquement douces ou d'aimants permanents.
- - Le circuit magnétique est feuilleté pour limiter les pertes des courants de Foucault.
- -Les tôles sont excitées par des bobinages fortement inductifs, recevant l'énergie électrique et qui sont aussi le siège de pertes Joule.

- Du point de vue mécanique, la position du rotor ne dépend que d'un paramètre de position linéaire ou angulaire.



Petit moteur électrique

6. Les deux modèles théoriques de convertisseurs tournants

- On écrit d'abord le bilan d'énergie dans un moteur :

$$W_{el} = \Delta W_{em} + W_m + Q$$

- W_{el} est l'énergie électrique reçue.
- W_m est l'énergie mécanique fournie
- Q la chaleur fournie
- W_{em} l'énergie libre stockée dans le circuit magnétique sous forme électromagnétique.

- Le travail mécanique fait intervenir dans une machine tournante, le couple C et l'angle de rotation θ

$$\delta W_{em} = C.d\theta$$

- Pour exprimer le couple on utilise deux modèles:

- **a/ modèle de conversion d'énergie :**

- Dans le quel On peut utiliser le bilan de puissance la dessus. Cette voie conduit à développer **un modèle de conversion d'énergie s'appuyant sur les variations de l'énergie électromagnétique.**

- -Ce modèle est très mathématique et il permet de traiter beaucoup de situations sur le plan quantitatif.

- -S'il n'est pas très simple, il permet une étude systématique des convertisseurs d'énergie : la théorie généralisée des machines électriques.

- **b/ Modèle du champ tournant :**

- Dans ce modèle en attachant à l'étude directe des forces électromagnétiques dans le système tournant. On montre qu'il y a **production d'un couple par interaction de deux systèmes de pôles magnétiques tournants.**

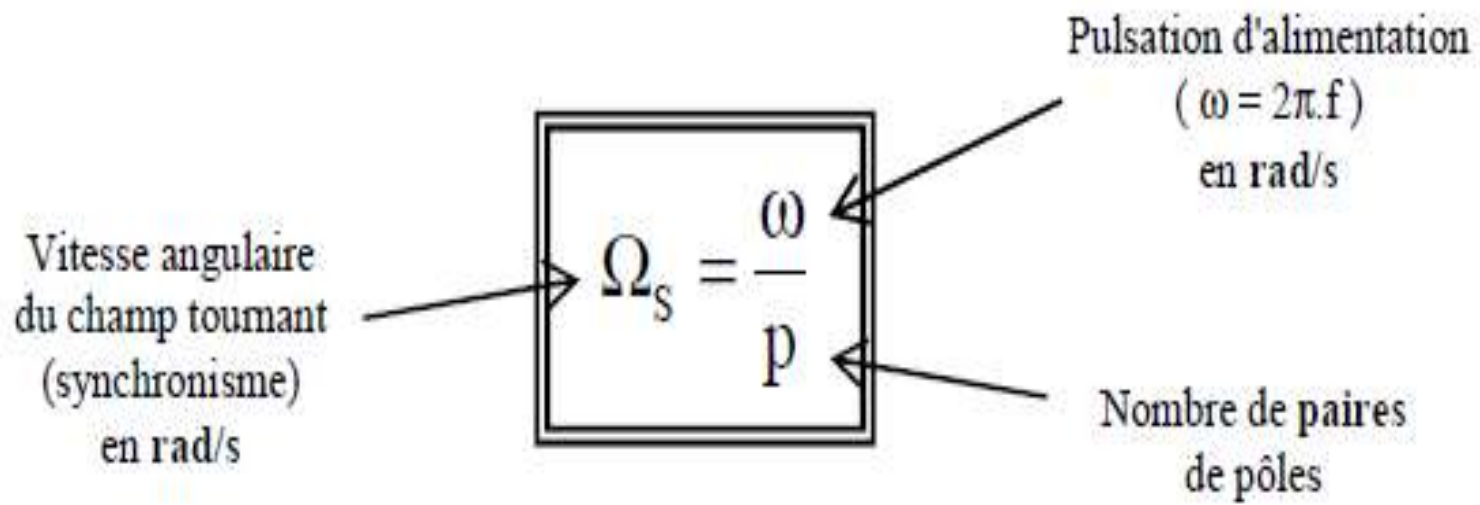
- -Ce modèle est plus qualitatif.
- -Il permet une visualisation simple des phénomènes.
- -Il est très employé.

7. La classification des convertisseurs

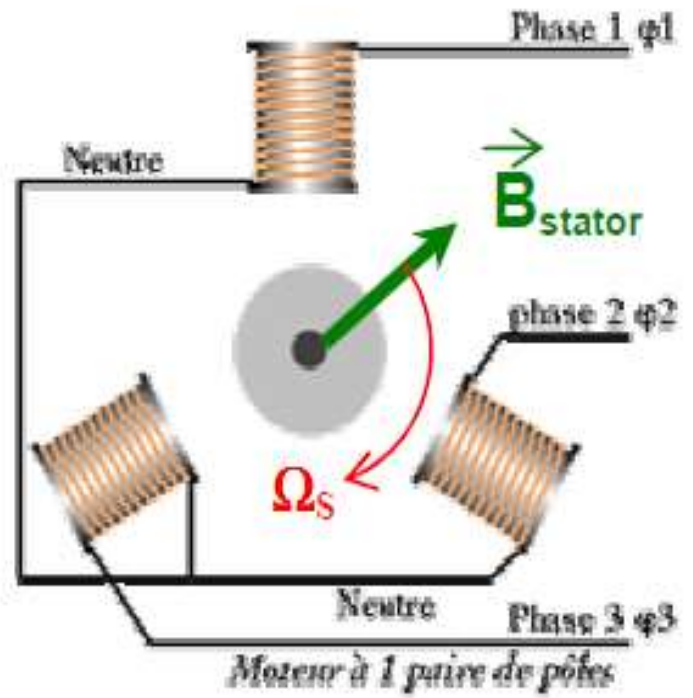
- Pour les machines à champ tournant polyphasées la condition de fréquence est :
- $$\Omega_s = \Omega_R + \Omega$$
- Ω_s : Vitesse angulaire du champ tournant pour le stator
- Ω_R : Vitesse angulaire du champ tournant pour le rotor
- Ω : la vitesse du rotor par rapport au stator
- A partir de cette relation on peut classifier les machines en deux catégories :
- -Les machines synchrones
- -Les machines asynchrones
- (On prend par la suite l'étude sur les moteurs)

7.1 Le moteur à courant alternatif synchrone triphasé

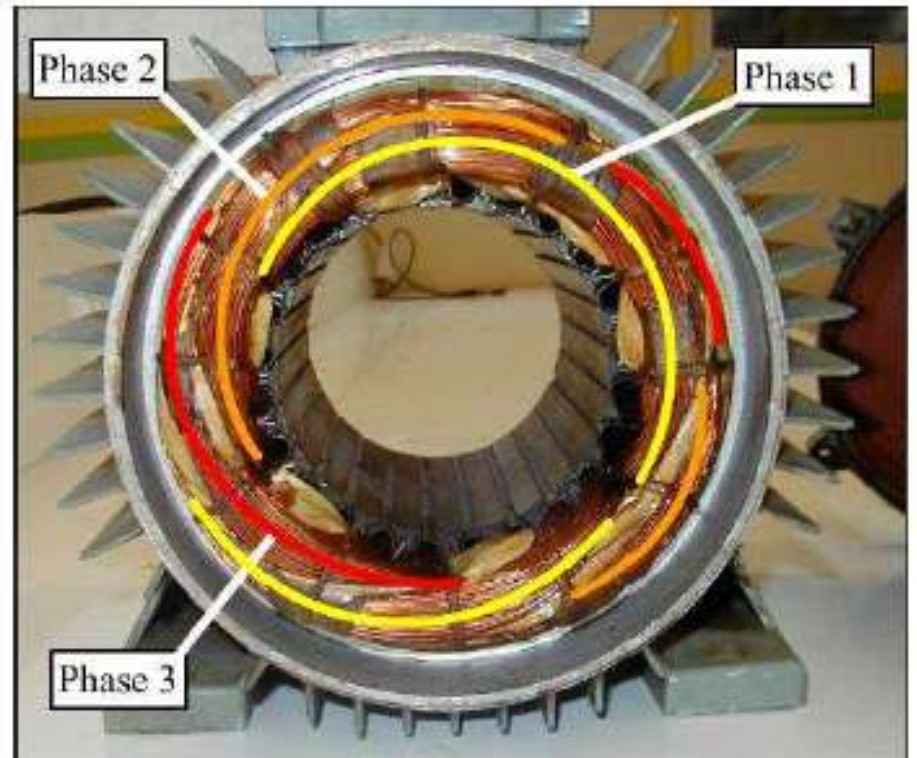
- **a/Champ magnétique tournant (stator)**
- Le principe de fonctionnement du moteur synchrone (mais aussi asynchrone) repose sur la création d'un champ magnétique tournant.
- Les bobinages triphasés du stator créent un champ magnétique tournant à la vitesse Ω_s qui dépend de la pulsation d'alimentation $\omega=2\pi f$, mais aussi du nombre de paires de pôles p du stator



Le schéma ci-contre montre le principe de création d'un champ tournant à une paire de pôle (un seul champ : $p=1$)

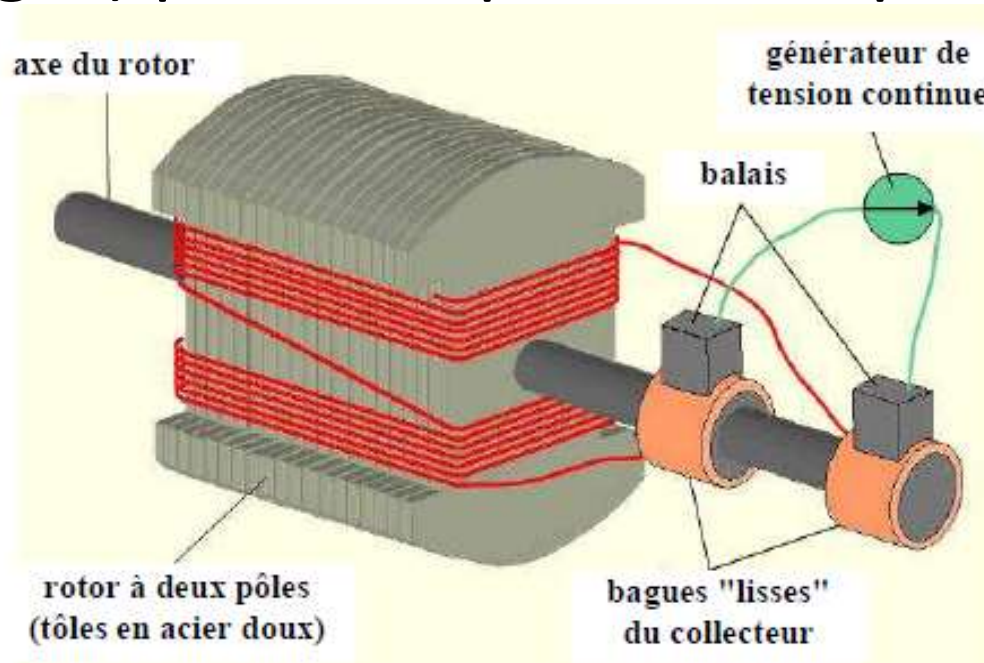


L'image ci-contre représente les bobinages d'un stator de machine synchrone triphasée à 2 pôles ($p = 1$)



- **b/ Constitution du rotor**

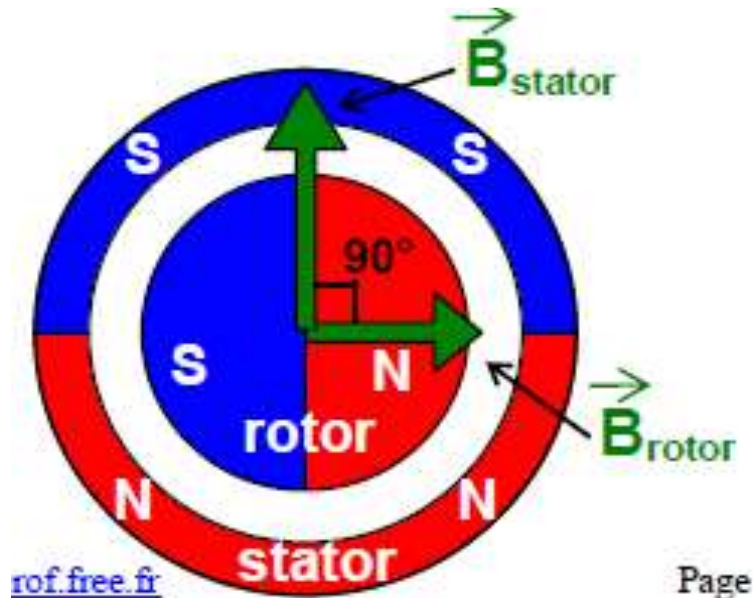
- Le rotor produit un champ magnétique fixe par rapport à lui-même.
- Il est donc composé d'aimants permanents pour des faibles puissances et d'électroaimants (bobinages) pour des puissances plus élevées



- **Le bobinage rotorique est alimenté en courant continu,**
 - -la pulsation du courant rotorique ω_R est nulle, de même pour la vitesse Ω_R .
 - -Alors : $\Omega_s = \Omega$, le rotor tourne à la vitesse de synchronisme Ω_s .
- **Le moteur est synchrone.**

- **c/ Principe de fonctionnement**

- -Le champ rotorique B_R "s'accroche" au champ tournant statorique B_S .
- -Le rotor tourne donc à la vitesse Ω_S du champ tournant (synchronisme).
- -L'angle φ entre B_R et B_S va donc augmenter avec le couple (valeur limite de 90°).



- Le **couple mécanique est maximum** lorsque le champ inducteur **B_{stator}** est **perpendiculaire** au champ induit **B_{rotor}** .

7.2 Le moteur à courant alternatif asynchrone triphasé

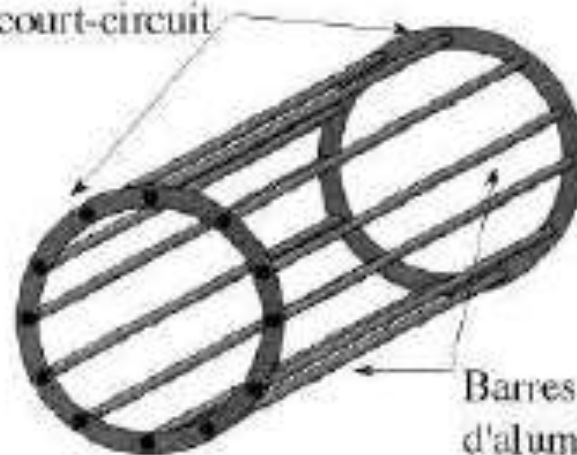
- **a/ Champ magnétique tournant (stator)**
- Le principe de fonctionnement du moteur asynchrone repose sur la création d'un champ magnétique tournant.
- Le stator sera donc identique à celui d'un moteur synchrone.

- **b/ Constitution du rotor**

- Le rotor n'est lié à aucune source d'alimentation. Il est constitué de bobinages en court circuit.
- il s'agit de barres de cuivre ou d'aluminium reliées aux extrémités par deux anneaux conducteurs (court-circuit). Le tout est noyé dans un empilement de tôles.



Anneaux de court-circuit



Barres de cuivre ou d'aluminium sièges des courants induits

- **c/ Principe de fonctionnement**

- -Le champ tournant statorique B_S (vitesse Ω_S) provoque des **courants induits** dans le rotor.
- -Les **courants induits** du rotor créent un champ rotorique B_R qui va interagir avec le champ statorique B_S et provoquer la rotation du rotor à une vitesse Ω_R légèrement inférieure à Ω_S .

- **Le bobinage rotorique est polyphasé,**
 - la condition de fréquence indique que :
 - $\omega_R \neq 0$ donc $\Omega_s \neq \Omega$
- **Le moteur est asynchrone**