

## **SY03 - SOMMAIRE**

1. Introduction (*5 pages*)
2. Energie - Puissance (*10 pages*)
3. Mécanique (*12 pages*)
4. Transmission mécanique (*6 pages*)
5. Electricité (*25 pages*)
6. Electromagnétisme (*18 pages*)
7. Machines électriques (*17 pages*)
8. Convertisseurs électronique de puissance (*14 pages*)
9. Association convertisseurs-machines (*5 pages*)
10. Sources d'énergie électrique (*21 pages*)
11. Contrôle des machines électriques (*13 pages*)

# Chapitre 1. INTRODUCTION

## 1. GENERALITES

Les études, les développements et les installations actuelles nécessitent souvent la coopération de spécialistes de domaines différents.

Lors de ces travaux, la liaison entre ces spécialistes est située au niveau des entraînements électriques.

Pour les étudiants se destinant à cette spécialité :

*cette UV permettra de présenter les éléments composant un système électrique d'entraînement, qui seront étudiés de manière plus approfondie dans d'autres UV.*

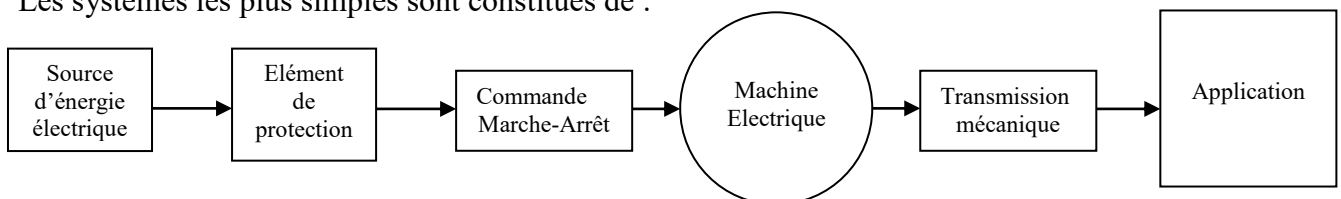
Pour les étudiants ne s'y destinant pas :

*le contenu de cette UV doit fournir à chacun les bases nécessaires, pour assurer la communication avec les spécialistes, la compréhension des phénomènes et la possibilité de choix entre les solutions.*

## 2. DESCRIPTION

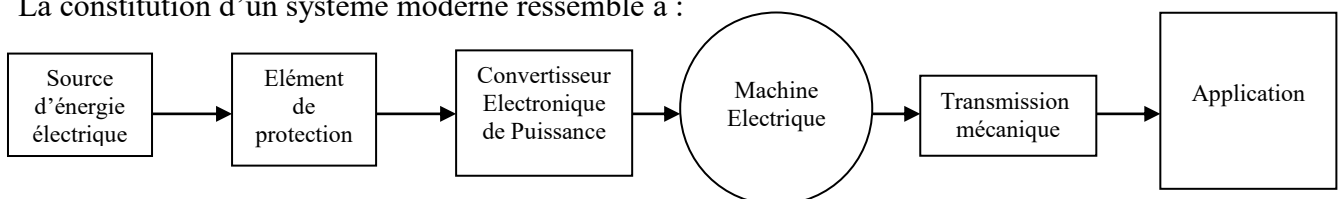
Les systèmes électriques d'entraînement assurent la conversion d'énergie électrique d'une source en énergie mécanique, nécessaire à l'application.

Les systèmes les plus simples sont constitués de :



C'est la forme la plus ancienne de ce type d'entraînement, mais limitée aux applications à vitesse constante. Les progrès des composants électroniques de puissance ont permis d'augmenter les possibilités d'application.

La constitution d'un système moderne ressemble à :



Cette fois, le convertisseur électronique permet de modifier et de contrôler la vitesse et/ou le couple du moteur : ce qui permet de l'adapter à de multiples applications, en plus des fonctions de marche-arrêt qui lui sont aussi dévolues.

Aujourd'hui, 75 à 80 % des applications d'entraînements électriques fonctionnent à vitesse constante.

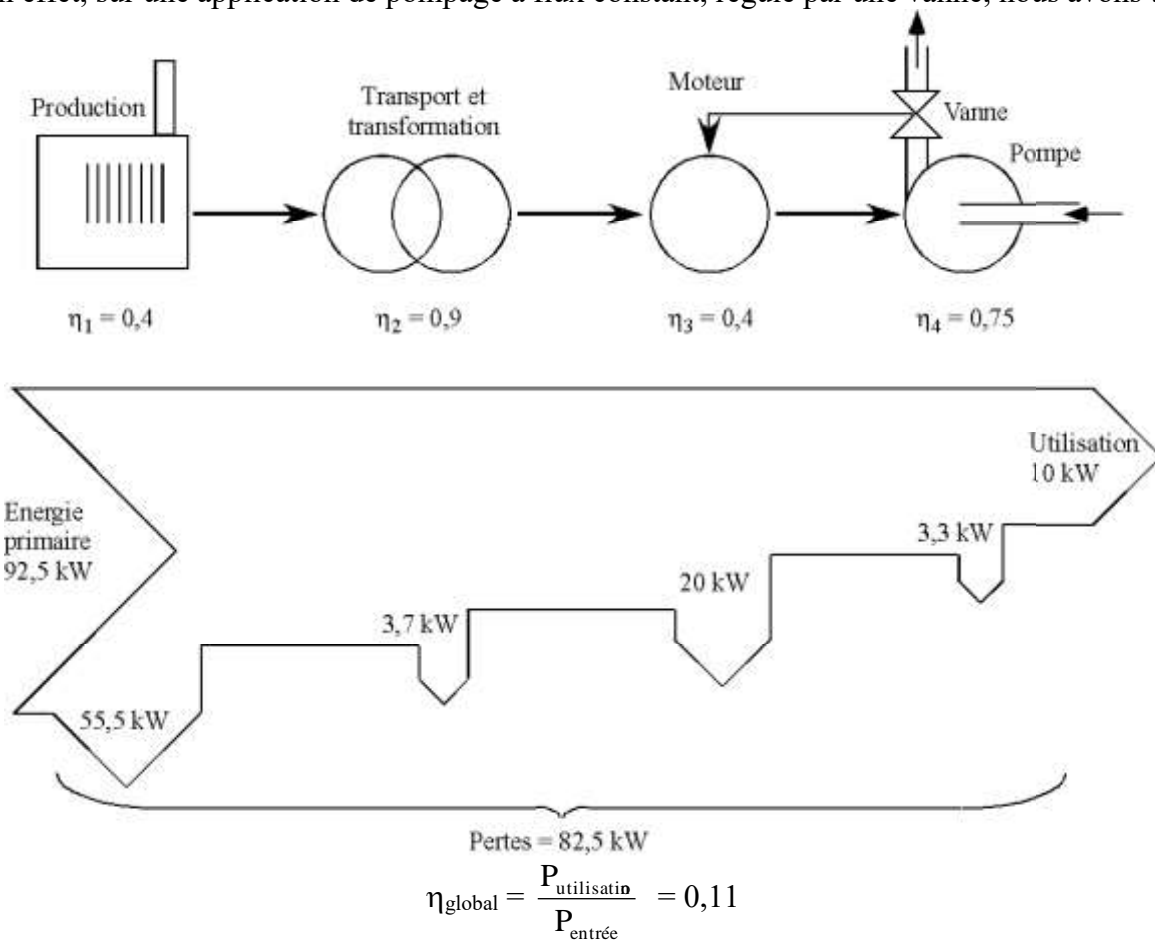
Les 20 à 25 % des applications restantes augmentent avec un taux d'expansion annuel très important.

### 3. INTERET

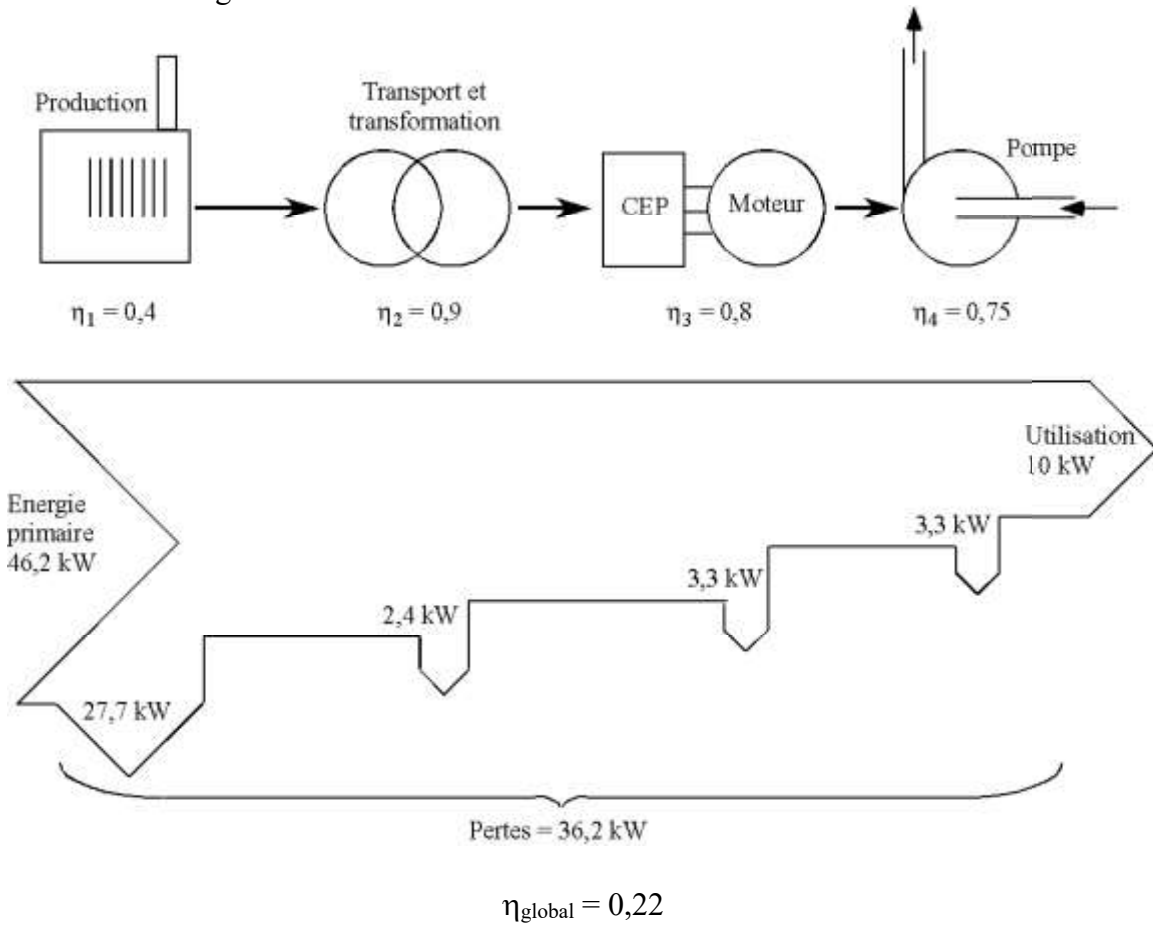
Aujourd'hui, près de la moitié de l'énergie électrique produite est utilisée par des entraînements électriques.

Les convertisseurs électroniques de puissance permettent d'optimiser l'utilisation de l'énergie.

En effet, sur une application de pompage à flux constant, régulé par une vanne, nous avons :



Si nous utilisons un convertisseur électronique de puissance pour assurer la régulation, la distribution d'énergie devient :

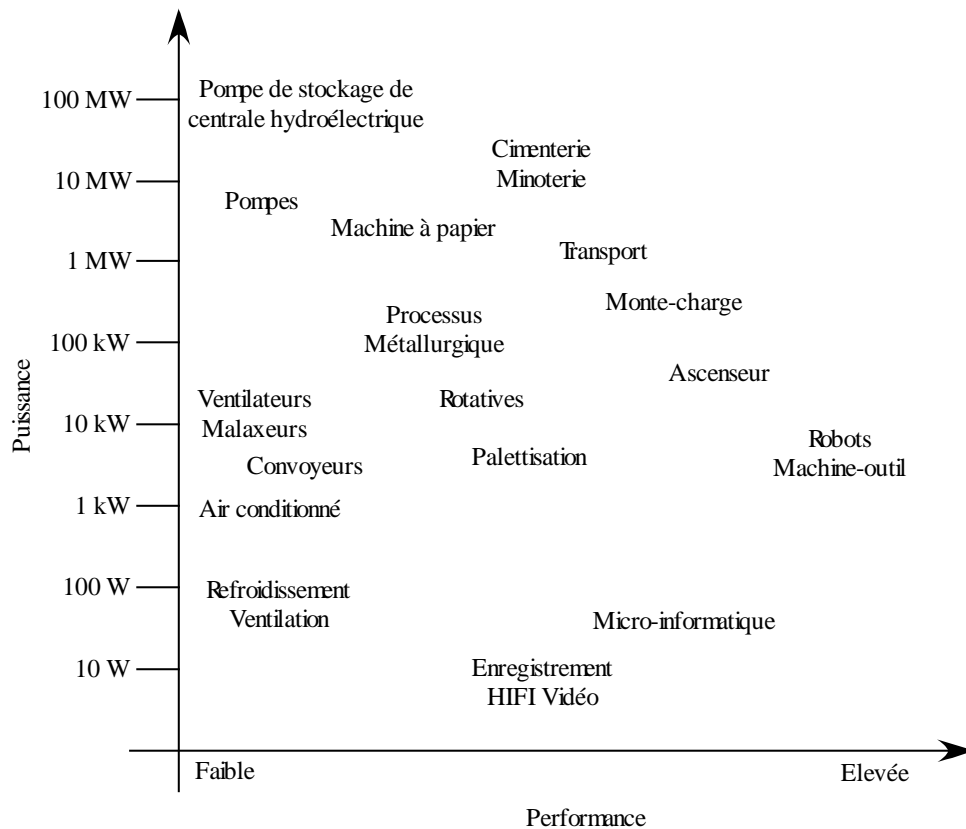


Donc, un gain direct sur l'énergie consommée de l'ordre de 2, pour l'utilisateur bien sûr, visible directement sur le coût énergétique, mais également d'un point de vue plus général par le gain sur la consommation d'énergie primaire.

#### 4. APPLICATIONS

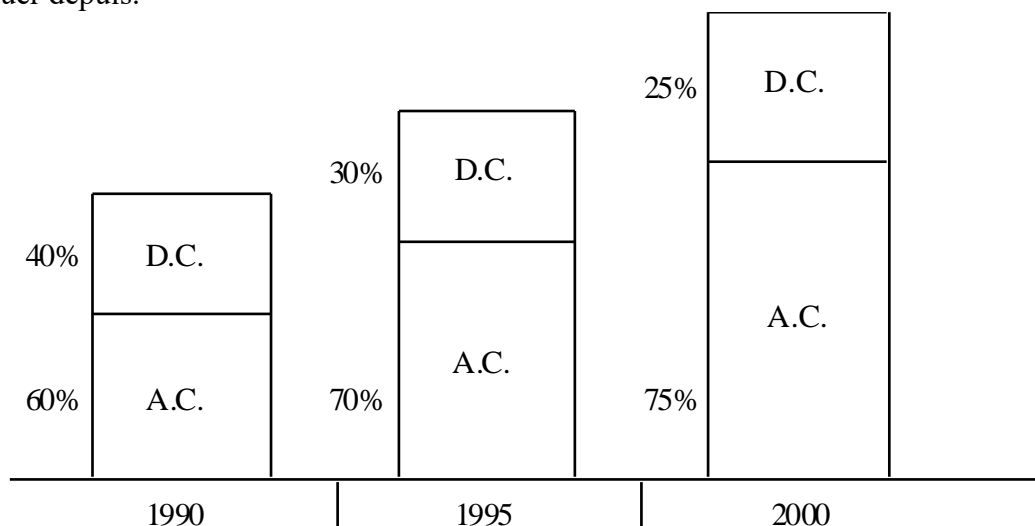
Faire une liste exhaustive des applications possibles nous prendrait sans doute trop de temps.

Nous pouvons présenter les applications sur un graphique (Puissance – Performances):



La performance est jugée par rapport aux grandeurs vitesse, effort ou position, voir suivant plusieurs de ces grandeurs.

Traditionnellement, la vitesse variable était dévolue à l'utilisation d'un convertisseur de puissance, associé à un moteur à courant continu (CC ou DC). Mais, il y a quelques années (1990), les progrès des composants de puissance ont permis de multiplier les applications utilisant des moteurs à courant alternatif (CA ou AC). Et la part des applications à courant alternatif a, à ce moment, rattrapé celle des moteurs à courant continu, qui n'a cessé de diminuer depuis.



Les moteurs à courant alternatif ont une puissance massique (kW/kg), supérieure aux machines à courant continu, et sont moins coûteux sur l'investissement initial et, surtout, sur la maintenance.

En effet, les convertisseurs de puissance, pour machines à courant continu ou à courant alternatif, sont d'un coût sensiblement identique, mais ces dernières sont moins coûteuses.

C'est, avec la puissance massique et les performances, un critère important pour que leur développement s'intensifie.

Le coût du convertisseur est encore plus important que le moteur, mais le rapport diminue progressivement.

$$\frac{\text{prix du CEP}}{\text{prix Moteur à CA}} = 5 \div 2$$

selon la puissance et les fonctions.

Mais, nous avons vu précédemment que l'utilisation des systèmes électriques d'entraînement conduisait à des gains appréciables sur le coût énergétique. Ces économies sont capables de compenser l'achat du convertisseur, en moins de 5 années d'utilisation pour des puissances moyennes (jusqu'à quelques dizaines de kW).

## **5. ETUDE D'UN ENTRAINEMENT**

L'étude d'un système électrique d'entraînement va se décomposer par :

- l'analyse des fonctions à réaliser
- la définition des mouvements en termes :
  - de vitesse
  - d'accélération
  - de positionen fonction du temps si nécessaire
- le calcul des efforts d'accélération et de fonctionnement, pour déterminer, sur tous les mouvements, les chronographes :
  - des vitesses
  - des efforts
  - de la puissance
- le premier choix des actionneurs
- le choix des éléments mécaniques d'accouplement et de transmission
- le calcul des efforts d'accélération et de fonctionnement (inertie + rendement des éléments)
- le choix de l'actionneur et de son convertisseur
- le choix de l'alimentation

# Chapitre 2. ENERGIE - PUISSANCE

## 1. INTRODUCTION

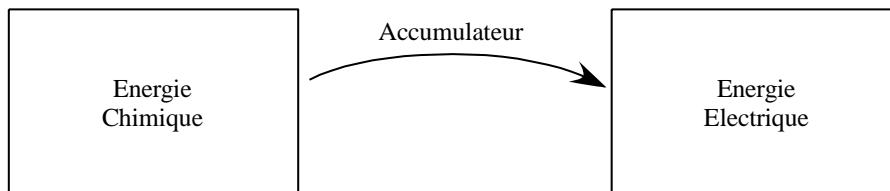
Entre tous les éléments constitutifs d'un entraînement électrique, l'énergie assure leur liaison. En effet, chaque élément échange de l'énergie avec l'élément qui le précède et avec l'élément qui le suit, afin d'assurer les besoins énergétiques de l'application.

**Energie** = Point commun (liaison) entre tous les éléments d'un système d'entraînement électrique

Chaque élément échange de l'énergie avec l'élément suivant (ou précédent)

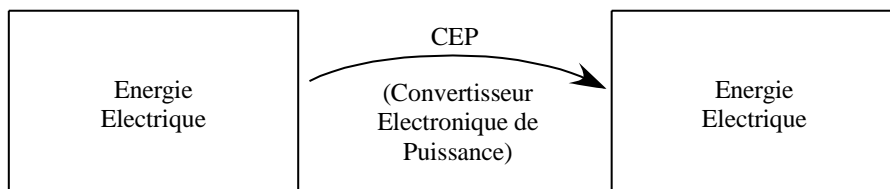
Chaque élément fait subir à cette énergie une transformation soit sur le type d'énergie :

exemple : l'accumulateur qui transforme l'énergie chimique en énergie électrique



soit sur la forme de cette énergie :

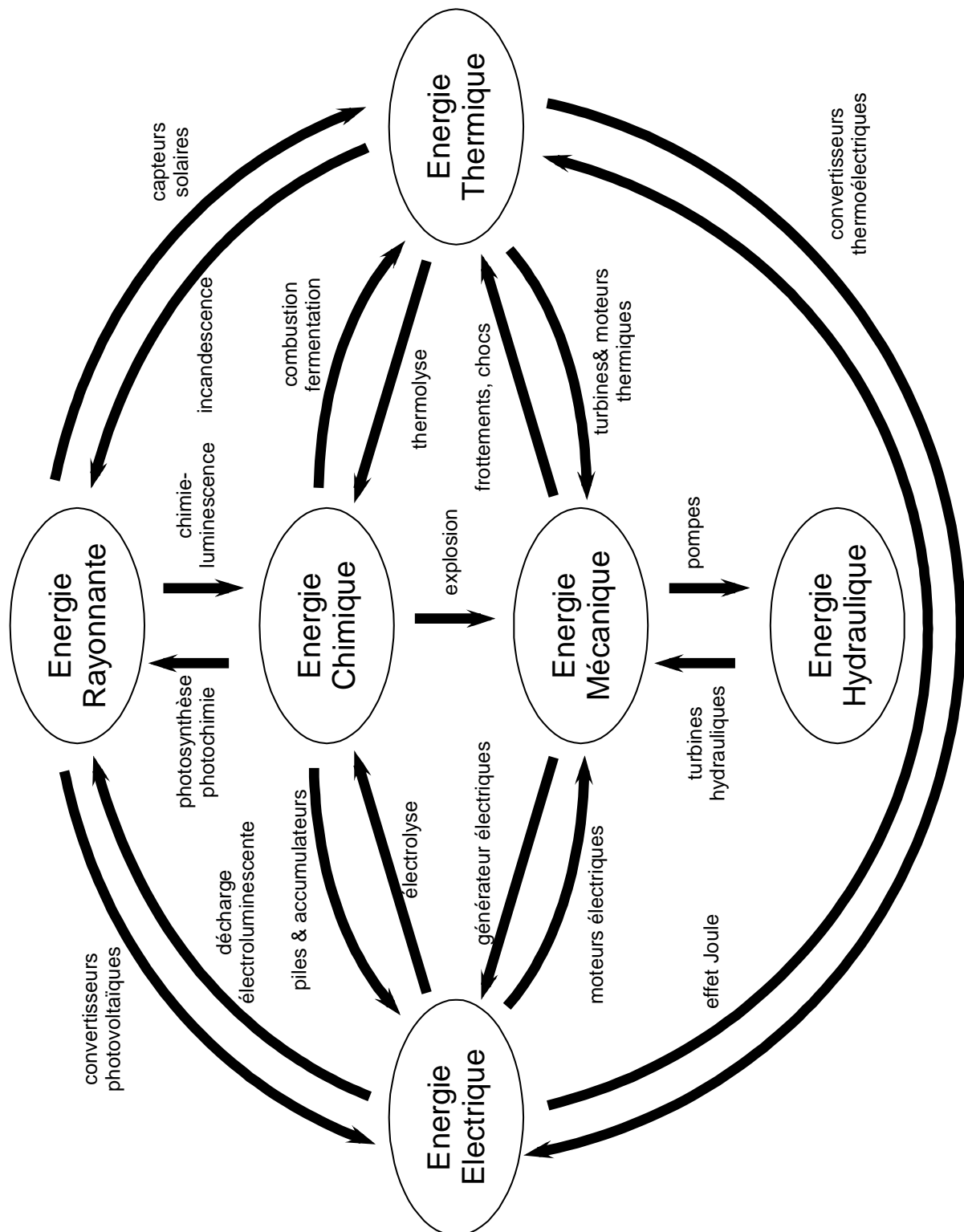
exemple : le convertisseur électronique de puissance qui modifie les caractéristiques de l'énergie électrique



## 2. ENERGIE

L'énergie est une grandeur caractérisant la capacité d'un système à produire du travail, de la chaleur ou à émettre un rayonnement.

L'énergie se présente sous des types divers, qui peuvent se transformer les uns dans les autres (cf diagramme). Les types d'énergie sont électrique, mécanique, chimique, thermique, hydraulique et rayonnante.



Les échanges, qui nous concernent dans les systèmes d'entraînements électriques, sont :

- les échanges entre l'énergie électrique et l'énergie mécanique,
- les échanges entre l'énergie chimique et l'énergie électrique,
- les échanges entre l'énergie rayonnante et l'énergie électrique,
- les échanges entre l'énergie électrique et l'énergie thermique.

L'énergie ne se crée pas, elle ne fait que se transformer ; donc, lors d'un échange, toute l'énergie, qui quitte un élément, doit se retrouver dans l'élément qui la reçoit.



De même, lors de la transformation dans un élément, toute l'énergie reçue est transformée.

***Premier principe de la thermodynamique.***

La quantité d'énergie transformée peut l'être dans plusieurs types que nous pourrions séparer en énergie utile et énergie inutilisable (souvent chaleur).

=> *définition du rendement*

Une quantité d'énergie s'exprime par le produit d'une force par un déplacement. Selon le type de force (gravitationnelle, électromagnétique), nous avons affaire à un type d'énergie.

L'énergie peut apparaître sous deux formes principales :

- *l'énergie potentielle* due à une situation, dont la représentation dépend du type d'énergie :

mécanique    altitude  
                   ressort tendu (ou comprimé)

électrique    force électrostatique  
                   (tension)

- *l'énergie de mouvement ou cinétique* : nous nous intéresserons aux mouvements ordonnés, qui peuvent être caractérisés par une vitesse ou un débit :

mécanique    liée à la vitesse

électrique    liée au courant

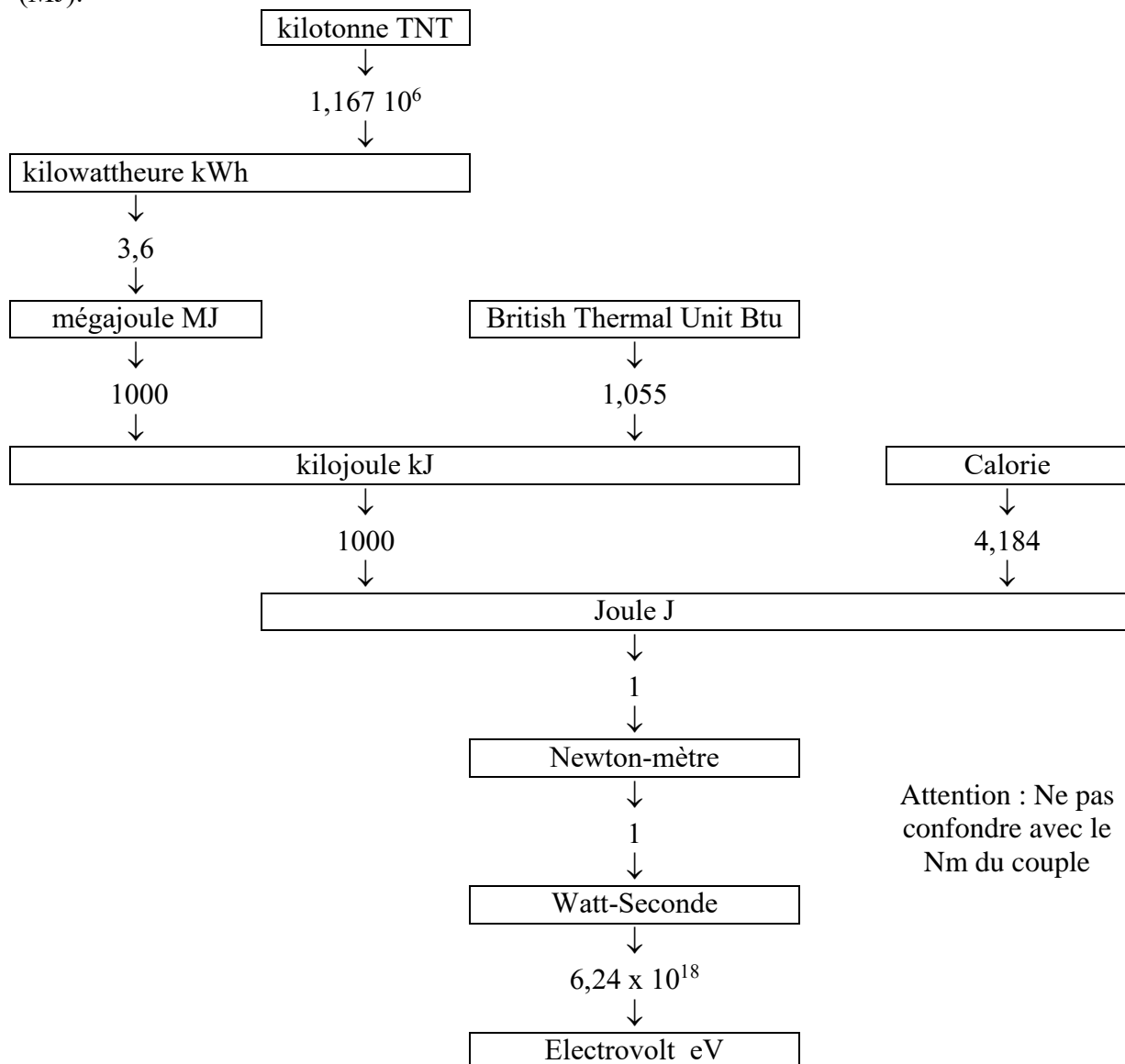
Les mouvements désordonnés caractérisent l'énergie thermique ou chaleur.

**2.1. Expression de l'énergie**

Type	Energie	Energie potentielle	Energie cinétique
Mécanique translation	$F \cdot x$	$M g h$	$\frac{1}{2} M v^2$
Electrique	$U \cdot Q$	$\frac{1}{2} C U^2$	$\frac{1}{2} L I^2$
Mécanique rotation	$C \cdot \theta$		$\frac{1}{2} J \Omega^2$
Hydraulique	$P \cdot V$ (pression . volume)		
Thermodynamique	$T \cdot S$		
Magnétique	$\lambda \cdot \phi$ (force magnétomotrice . flux)		

## 2.2. Unité d'énergie

L'unité légale d'énergie du système international est le Joule (J). Mais, cette unité étant relativement petite, nous utilisons couramment ses multiples : kilojoule (kJ) et mégajoule (MJ).



### ATTENTION :

*Parfois, la notion d'énergie est cachée et nécessite une interprétation pour être utilisée.*

### Exemple des batteries (piles) :

L'énergie disponible dans une batterie est exprimée par la charge électrique contenue dans celle-ci. En effet, nous verrons, en étudiant les sources d'énergie, que la tension aux bornes d'une batterie est sensiblement constante ; donc, si nous possédons une batterie de tension égale à 6 V et dont la capacité vaut 100 Ah, celle-ci pourra débiter un courant de 100 A pendant 1 h (ou plutôt 1 A pendant 100 h) : ce qui correspond à une énergie de :

$$E_{\text{batterie}} = U_{\text{batterie}} \cdot Q_{\text{batterie}}$$

$$\begin{aligned}
&= U_{\text{batterie}} \cdot I_{\text{batterie}} \cdot t_{\text{décharge}} \\
&= V \cdot A \cdot s \\
&= J \\
&= 6 \cdot 100 \cdot 3600 \\
&= 2,16 \text{ MJ}
\end{aligned}$$

### **3. PUISSANCE**

Cette notion est nécessaire, pour pouvoir comparer deux systèmes qui effectuent le même travail.

En effet, un treuil, qui soulève une masse de 10 kg sur une hauteur de 10 m, fournit une énergie (un travail) de :

$$\begin{aligned}
W &= M \cdot g \cdot x \\
&= 10 \cdot 9,81 \cdot 10 \\
W &= 981 \text{ J}
\end{aligned}$$

Si le temps mis pour effectuer ce travail est de 1 ou 100 s, le travail effectué est le même, mais le treuil utilisé n'est pas le même. Le débit d'énergie est multiplié par 100. Ce débit d'énergie est la puissance :

$$P = \frac{W}{t}$$

$$P_1 = 981 \text{ W} \quad ; \quad P_2 = 9,81 \text{ W}$$

Cette puissance s'exprime en watts (W).

(autre unité : CV = cheval-vapeur - 1 CV = 736 W)

En général, sauf cas particulier où le stockage est recherché, la quantité d'énergie stockée dans les différents éléments de notre système d'entraînement électrique est faible. Donc, le transfert d'énergie entre les différents éléments peut être très souvent étudié par le transfert de puissance.

#### **3.1. Expression de la puissance**

Dans tous les domaines de la physique, la puissance s'exprime par le produit d'un " effort " par un flux.

	Effort	Flux	Puissance
Electrique	Tension U (V)	Courant I (A)	$U \cdot I$
Mécanique translation	Force F (N)	Vitesse v (m s <sup>-1</sup> )	$F \cdot v$
Mécanique rotation	Couple C (Nm)	Vitesse angulaire $\Omega$ (rd/s)	$C \cdot \Omega$
Hydraulique	Pression P (N m <sup>-2</sup> )	Débit Q (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	$P \cdot Q$
Magnétique	FMM $\lambda$ (A)	Dérivée flux $\dot{\phi}$ (Wb s <sup>-1</sup> )	$\lambda \cdot \dot{\phi}$
Thermodynamique	Température T (k)	Dérivée entropie $\dot{S}$ (J K <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )	$T \cdot \dot{S}$
Chimique	Potentiel chimique $\mu_c$ (J mol <sup>-1</sup> )	Flux molaire $\dot{N}$ (mol <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )	$\mu_c \cdot \dot{N}$

## 4. PUISSANCE

Nous avons rappelé, dans le paragraphe 2, que l'énergie ne pouvait ni être créée, ni être détruite, mais uniquement transformée.

D'un point de vue énergétique, la transformation subie par l'énergie nous permet d'obtenir une forme d'énergie utilisable et souvent une partie sous une forme non désirée et inutilisable.

On définit le rendement énergétique comme le rapport :

$$\eta_{\text{énergie}} = \frac{\text{Energie utilisable}}{\text{Energie fournie}}$$

Comme nous l'avons vu, l'énergie stockée est faible et elle est donc fournie et consommée pendant des durées identiques : ce qui permet de définir aussi le rendement sur la puissance :

$$\eta = \frac{\text{puissance utile}}{\text{puissance fournie}}$$

Si la transformation est parfaite, le rendement est égal à 1, mais, sur une transformation réelle, le rendement est inférieur à 1.

### 4.1. Valeurs du rendement

Transmission mécanique :	0,6 à 0,98
	selon le rapport de réduction et la solution choisie
Moteur électrique :	0,8 à 0,98

Convertisseur électronique :	0,9 à 0,98
Source d'énergie :	0,5 à 0,8 batterie 0,9 à 1 réseau

Autres cas :

Moteur à explosion :	0,25 à 0,35
Turbine à gaz :	0,2 à 0,4
Centrale thermique :	0,4

La partie d'énergie fournie, non transformée en énergie utilisable, est transformée en chaleur.

Cette chaleur provoque l'échauffement de l'élément concerné et doit être évacuée pour éviter sa détérioration (ou la diminution de ses caractéristiques).

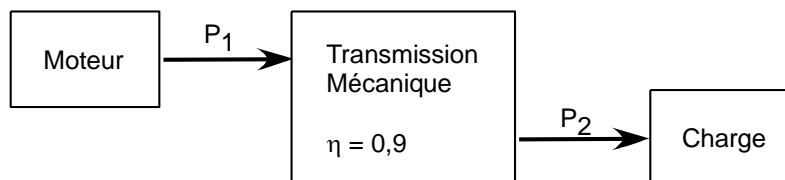
En particulier, un moteur à explosion de 50 kW, ayant un rendement de 33%, produit 100 kW de chaleur à évacuer dans les gaz d'échappement et par le refroidissement du moteur.

REMARQUE :

$$\eta = \frac{\text{puissance utile}}{\text{puissance fournie}}$$

Il faut donc faire attention au sens de transfert de l'énergie.

Exemple :



La transmission mécanique permet d'adapter les caractéristiques du moteur à la charge.

Pendant un fonctionnement normal, le moteur entraîne la charge. Autour de la transmission mécanique ; la puissance utile est  $P_2$  et la puissance fournie est  $P_1$  :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

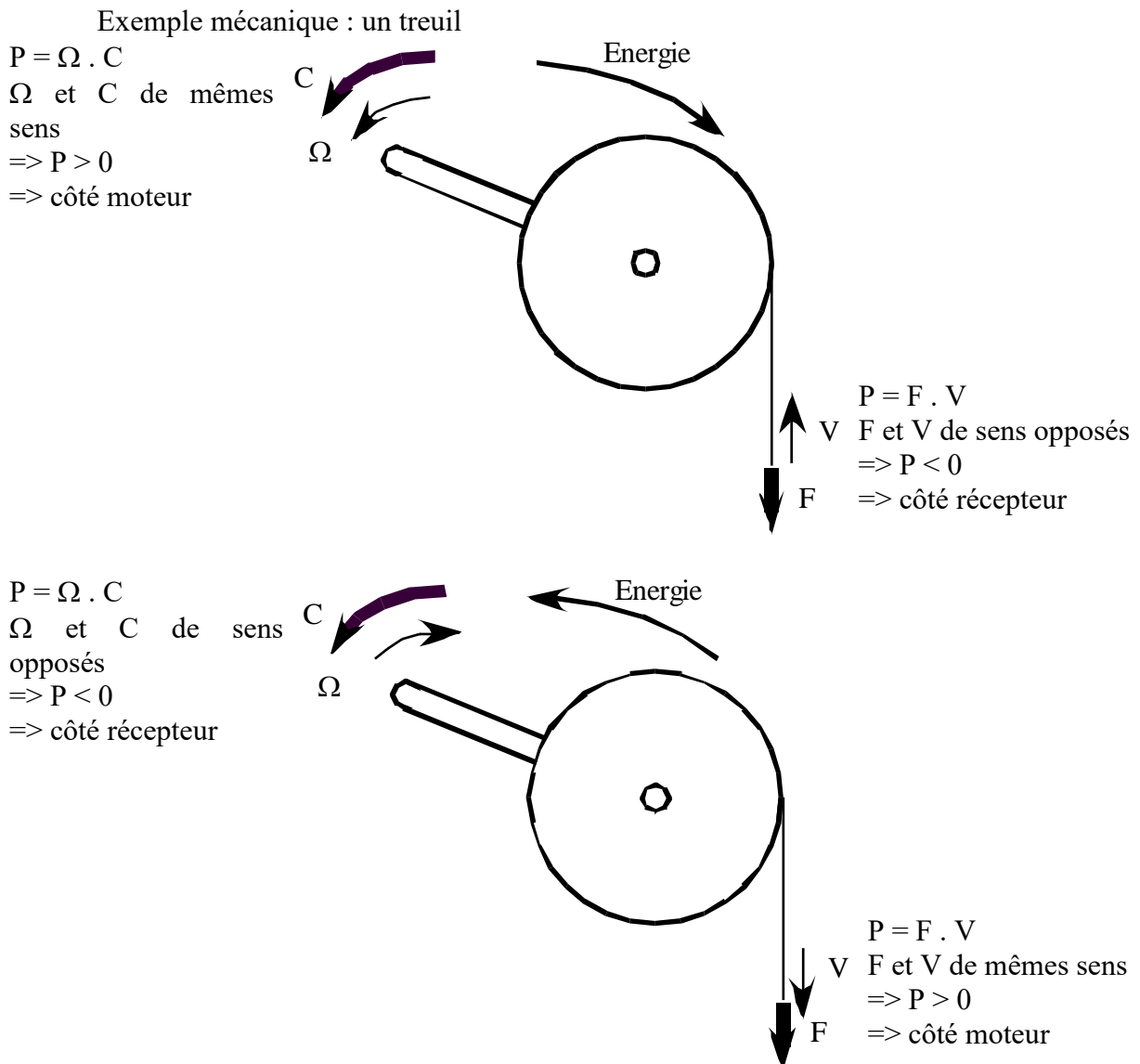
Si la charge devient entraînant, le moteur retient la charge (exemple du monte-charge lors d'une descente). Dans ce cas, au niveau de la transmission, la puissance reçue est  $P_2$  et la puissance fournie est  $P_1$  :

$$\eta = \frac{P_1}{P_2} !$$

## 5. SENS DE TRANSFERT DE L'ENERGIE

En général, les systèmes que nous étudierons auront un sens de transfert de l'énergie assez simple à déterminer.

Si cela n'était pas le cas, ou si le fonctionnement était complexe, la détermination du sens de transfert de l'énergie pourrait se faire en isolant un élément et en calculant la puissance à chacune de ses extrémités.

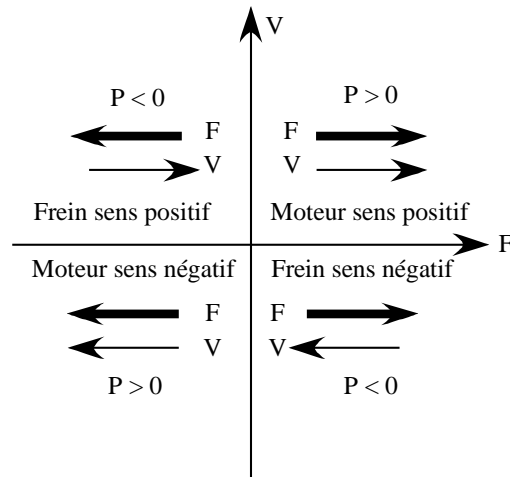


## 6. DOMAINES DE FONCTIONNEMENT

Le fonctionnement de notre système sera, selon l'élément du système considéré, défini par les grandeurs " effort " et " flux " caractéristiques de la puissance échangée.

Si le fonctionnement est modifié (variable), au moins une de ces deux grandeurs sera modifiée et nous pouvons représenter le point de fonctionnement correspondant dans l'espace (repère) " effort " - " flux ".

## Exemples : déplacement linéaire



Remarque : le choix du sens positif ou négatif, pour la vitesse, est arbitraire ; mais, une fois, celui-ci choisi, le sens positif pour la force permet d'obtenir une puissance positive, donc un fonctionnement moteur.

Ceci permet de définir 4 quadrants de fonctionnement, délimitant des sens “aller-retour” (positif-négatif) et des fonctionnements moteur-frein.

Ces domaines de fonctionnement pourront être tracés :

- pour l'application dans le repère  $F - V$  (par exemple) ;
- pour le moteur  $C - \Omega$  ;
- pour l'alimentation du moteur  $U - I$  ;
- pour l'alimentation du convertisseur  $U - I$  ;
- et ainsi de suite.

### 6.1. Notion de réversibilité

Sur l'espace de fonctionnement, des points se situent dans des quadrants, où la puissance change de signe : cela signifie que l'énergie devra pouvoir être transférée dans des sens différents.

Les éléments devront pouvoir le permettre : ceci conditionnera notre choix.

Les éléments irréversibles ou à réversibilité limitée seront proscrits.

Exemple : pignon – vis sans fin

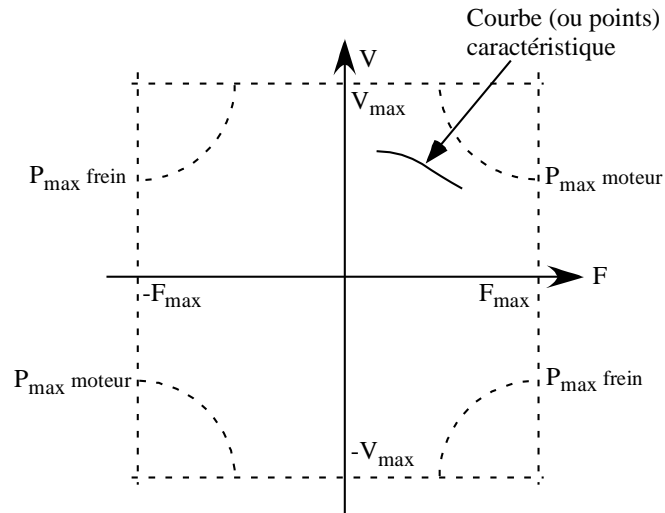
vis – écrou : limite de réversibilité

convertisseur – électronique de puissance :  
si impossibilité  $\Rightarrow$  astuce de consommation interne  
dissipation de l'énergie, plutôt que transfert

## 6.2. Courbes limites

Sur le domaine de fonctionnement, il sera utile de porter les limites de fonctionnement, qui pourront être définies en termes de “ flux ” - “ effort ” - “ puissance ”.

Exemple : mouvement linéaire





# Chapitre 3. MECANIQUE

## 1. DIVERSITE DES ENTRAINEMENTS ELECTRIQUES

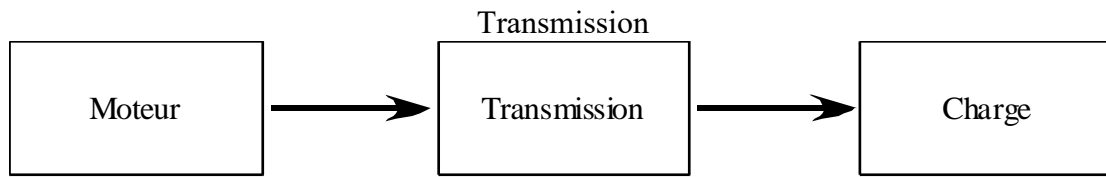
Les mouvements engendrés par les entraînements électriques :

- sont de tous types :
  - rotation, translation (ligne, plan, 3D, machine-outil)
  - ou trajectoires complexes (robot)
  
- correspondent à des vitesses s'étendant sur une large gamme :
  - très lente (téléscope 1 tr/jour)
  - à rapide (usinage, TGV 8 000 tr/mn)
  - voir très rapide (usinage 12 000 tr/mn)
  
- avec des grandeurs mécaniques pilotées, aussi diverses que :
  - couple ou effort : machine d'essai, enroulage
  - vitesse : véhicule, train, lecteur (bande, CD...)
  - position : machine-outil
  - trajectoire : machine-outil, robot

Les moteurs électriques sont des machines tournantes, dans leur grande majorité, et sont disponibles, en standard, pour des vitesses maxi comprises entre 1 000 à 3000 tr/mn.

La transmission mécanique est indispensable pour réaliser l'adaptation entre le moteur et l'application.

## 1.1. Transmission ou accouplement direct

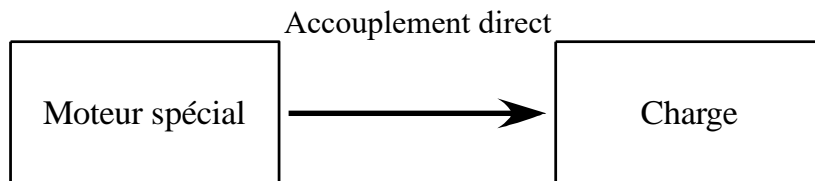


### Avantages

Moteur standard  
économique et compact

### Inconvénients

Elément supplémentaire : transmission  
⇒ jeux, élasticité de la transmission  
⇒ pertes supplémentaires



- mécanique simple et précise  
- performance dynamique  
souvent excellente (⇒ M.O.)

moteur spécial  
- moteur tournant : plus gros  
- moteur linéaire : plus cher  
montage mécanique

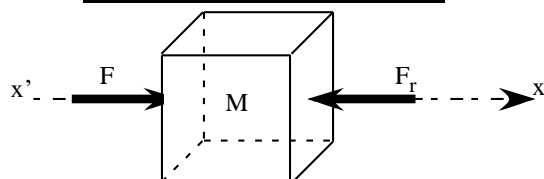
## 2. RAPPELS DE MECANIQUE

Dans le cas des mouvements de translation, on peut énoncer ainsi les lois fondamentales de la mécanique :

- Tout solide reste au repos ou en mouvement linéaire uniforme, si aucune force extérieure ne lui est appliquée.
- La dérivée de la quantité de mouvement  $Mv$ , d'un solide (produit de la masse  $M$  par la vitesse  $v$ ), est égale à la résultante des forces qui lui sont appliquées.
- Tant en régime permanent qu'en régime transitoire, à toute action correspond une réaction, de même valeur et directement opposée.

Ces lois s'appliquent également aux mouvements de rotation.

### 2.1. Mouvement de translation



Soit un solide de masse  $M$ , qui se déplace suivant un axe horizontal  $x'x$ .

Sous l'action de la force motrice  $F$  et d'une force résistante  $F_r$  (dirigées suivant  $x'x$  pour  $F$  et  $xx'$  pour  $F_r$ ), ce solide se déplace à une vitesse  $v$  égale à  $dx/dt$ .

Loi de la quantité de mouvement  $\Rightarrow$

$$F - F_r = \frac{d}{dt}(Mv) = M \frac{dv}{dt} + v \frac{dM}{dt}$$

Si  $F$  et  $F_r$  dépendent de la vitesse  $v$  et de la position  $x$ , la masse est généralement constante :

$$\Rightarrow F - F_r = M \frac{dv}{dt} = M \frac{d^2x}{dt^2}$$

Comme  $dv/dt$  est l'accélération notée  $\gamma$ , nous avons :

$$\boxed{\sum F = M\gamma}$$

## 2.2. Mouvement de rotation

Soit un solide élémentaire de masse  $m$ , se déplaçant à une vitesse  $v$ , sur une trajectoire circulaire de rayon  $r$ , sous l'effet d'une force élémentaire  $f - f_r$ , de même direction et de même sens que la vitesse.

Force et quantité de mouvement sont liées par :

$$f - f_r = \frac{d}{dt}(mv)$$

La vitesse s'exprime par :

$$v = r \Omega = r 2\pi N$$

$\Omega$  = vitesse angulaire en rd/s

$N$  = nb de tours par seconde

$$\Rightarrow f - f_r = \frac{d}{dt}(m r \Omega)$$

en multipliant par  $r$  les 2 membres de l'égalité :

$$f \cdot r - f_r \cdot r = c - c_r = \frac{d}{dt}(m r^2 \Omega)$$

avec  $c$  et  $c_r$  : couples élémentaires.

Si on considère un solide formé de nombreuses parties élémentaires :

$$\sum fr - \sum f_r r = \frac{d}{dt} \left[ \left( \sum m r^2 \Omega \right) \right]$$

$$\text{ou } C - C_r = \frac{d}{dt}(J \Omega)$$

$C$  : couple moteur résultant

$C_r$  : couple résistant résultant

$J$  : égal à  $\sum m r^2$  ( $\int m r^2$ ) est le moment d'inertie du solide

Ce qui devient :

$$C - C_r = \frac{d}{dt} (J \Omega) = J \frac{d\Omega}{dt} + \Omega \frac{dJ}{dt}$$

Le terme  $\Omega \frac{dJ}{dt}$  ne diffère de zéro que dans les entraînements, où l'inertie de la charge varie (cas des centrifugeuses, bobineuses, où la géométrie dépend de la vitesse et du temps) (cas des robots qui changent de géométrie).

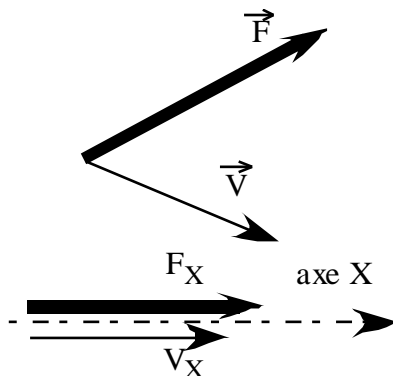
Autres cas :  $J = \text{constante}$  :

$$C - C_r = J \frac{d\Omega}{dt}$$

### 3. TRANSFERT D'ENERGIE MECANIQUE

#### 3.1. Puissance mécanique (watts)

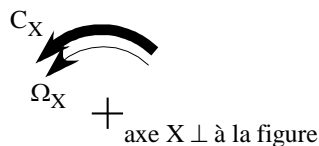
\* Mouvement de translation : vitesse  $\vec{V}$ , force  $\vec{F}$



$$P_M = \vec{F} \cdot \vec{V}$$

$$P_{MX} = F_X \cdot V_X \text{ projeté sur l'axe X}$$

\* Mouvement de rotation : vitesse  $\vec{\Omega}$ , couple  $\vec{C}$



$$P_M = \vec{C} \cdot \vec{\Omega}$$

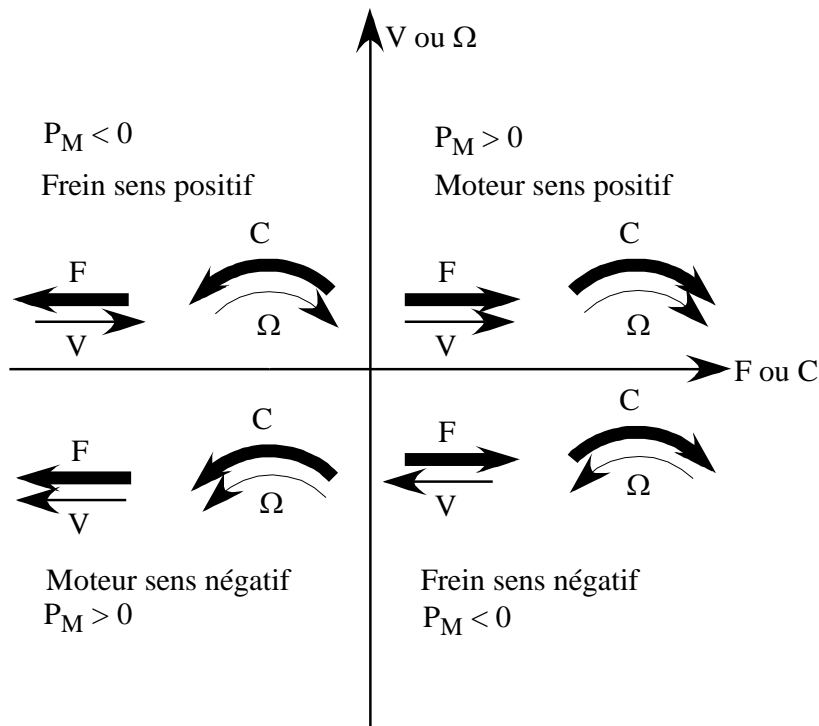
$$P_{MX} = C_X \cdot \Omega_X \text{ projeté sur l'axe X}$$

Si  $P_M > 0$  : force (ou couple) moteur

$\Rightarrow$  le système, qui produit la force (ou le couple) est générateur de puissance mécanique.

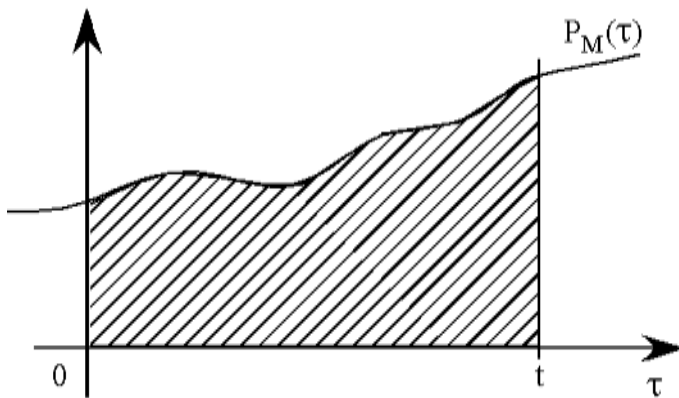
Si  $P_M < 0$  : force (ou couple) frein

$\Rightarrow$  le système, qui produit la force (ou le couple) est récepteur de puissance mécanique.



Remarque : le choix du sens positif pour la vitesse (et la force ou le couple) est arbitraire. Il est identique pour la vitesse et la force, quand  $P$  est positif.

### 3.2. Energie mécanique (Unité Joule = W.s)



Energie transmise entre 0 et t :

$W_M(t) = \text{Aire hachurée du dessin}$

$$W_M(t) = \int_0^t P_M(\tau) d\tau$$

$$P_M = \frac{dW_M}{dt}$$

Exemple : un moteur fournit :  $P_M = 1 \text{ CV} = 736 \text{ W}$  pendant 2h

$\Rightarrow$  il fournit :  $W_M = 2 \times 736 = 1,472 \text{ kWh}$  (soit 5,3 MJ)

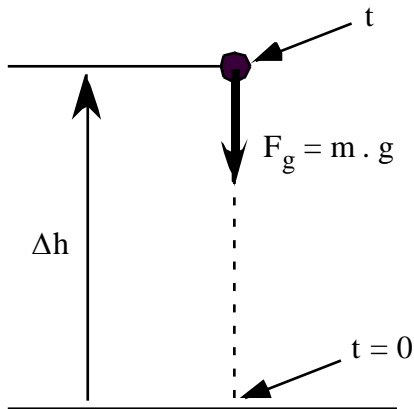
Rappels des cours de thermodynamique :

Propriété fondamentale : conservation de l'énergie globale d'un système isolé.

Les modifications que peut subir l'énergie, portent sur son type ou sa forme : transformation d'énergie d'électrique en mécanique et/ou thermique.

### 3.3. Stockage de l'énergie mécanique

- Energie potentielle (pesanteur)

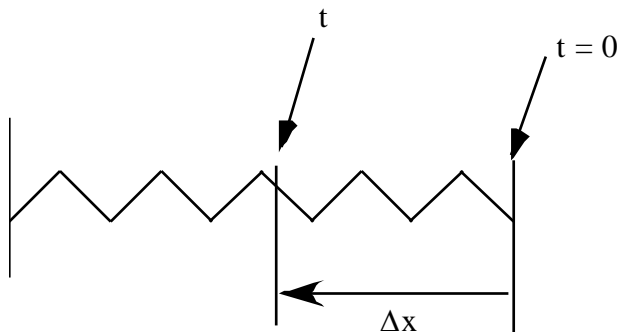


$$\Delta W_p = \int_0^t P_M(\tau) d\tau = \int_0^t F_g \cdot \frac{dh}{d\tau} d\tau$$

$$\Delta W_p = \int_0^{\Delta h} m \cdot g \cdot dh$$

$$\Delta W_p = m \cdot g \cdot \Delta h$$

- Energie potentielle d'un ressort

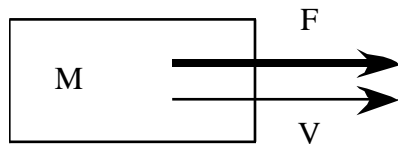


$$\Delta W_r = \int_0^t F_r \cdot \frac{dx}{d\tau} d\tau$$

$$\Delta W_p = \int_0^{\Delta x} K_R \cdot x \cdot dx$$

$$\Delta W_p = \frac{1}{2} \cdot K_R \cdot \Delta x^2$$

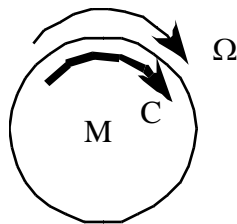
- Energie cinétique d'une masse ou d'un volant d'inertie



$$F = m \frac{dV}{dt}$$

$$W_C = \int_0^t m \cdot \frac{dV}{d\tau} \cdot V \cdot d\tau = \int_0^{V(t)} m V dV$$

$$W_C = \frac{1}{2} m \cdot V^2(t)$$



$$C = J \frac{d\Omega}{dt}$$

$$W_C = \frac{1}{2} J \cdot \Omega^2$$

Une approche globale par l'énergie procure certaines simplifications.

Exemple : un objet (pot de fleurs) tombe de  $h = 20$  m (8<sup>ème</sup> étage).

Quelle est sa vitesse au sol ?

$$t = 0 \quad W_p = mgh \rightarrow W_c = 1/2 mV^2 \quad V^2 = 2gh \quad V \cong 20 \text{ m/s}$$

### 3.4. Sens du flux d'énergie

Approche intuitive ou systématique (système complexe) :

- Eléments réversibles : générateur ou récepteur d'énergie mécanique

⇒ convertisseur réversible d'énergie

Machine électrique :

- en moteur : absorbe  $P_{\text{élect}}$  et fournit  $P_{\text{méca}}$
- en générateur électrique : absorbe  $P_{\text{méca}}$

- Stockage d'énergie :

Si l'énergie stockée augmente, le système absorbe de l'énergie (frein).

Si l'énergie stockée diminue, le système fournit de l'énergie (moteur).

Energie	Augmentation de $W_m$	Baisse de $W_m$
Pesanteur $W_g = mgh$	h augmente	h diminue
Ressort $W_R = 1/2 K_R X^2$	x  augmente	x  diminue
Cinétique $W_c = 1/2 m V^2$	v  ou $ \Omega $ augmente	v  ou $ \Omega $ diminue

⇒ frein

⇒ moteur

- Eléments non réversibles :

. Conversion d'énergie non réversible : moteur thermique.

. Dissipation d'énergie sous forme thermique : frottements secs, visqueux ou aérodynamiques.

. Frottements secs :  $F_s = - K_s \text{signe}(V) \Rightarrow P_{fs} = - K_s \text{signe}(V) \cdot (V)$   
 $= - K_s |V| < 0$

. Frottements visqueux :  $F_v = - K_v \cdot V \Rightarrow P_{fv} = - K_v V^2 < 0$

. Frottements aérodynamiques :  $F_a = - K_a V^2 \text{signe}(V) \Rightarrow P_{fa} = - K_a |V|^3$

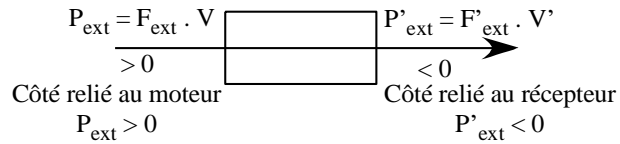




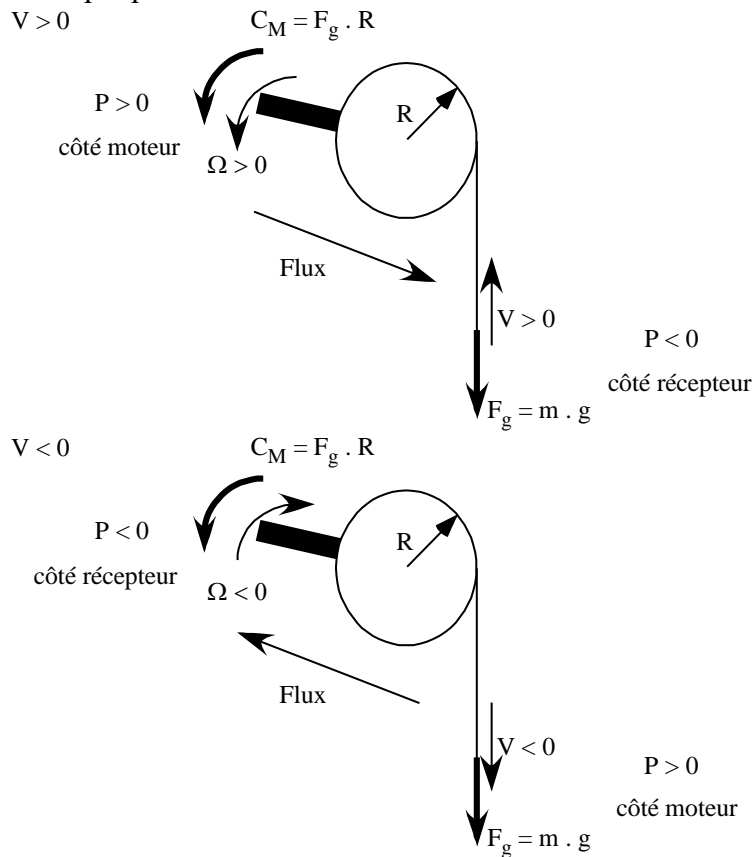
- Technique pratique de détermination du sens du flux :

On isole un élément et on calcule la puissance des forces externes, qui lui sont appliquées.

Le flux d'énergie va de  $P_{\text{ext}} > 0$  à  $P_{\text{ext}} < 0$

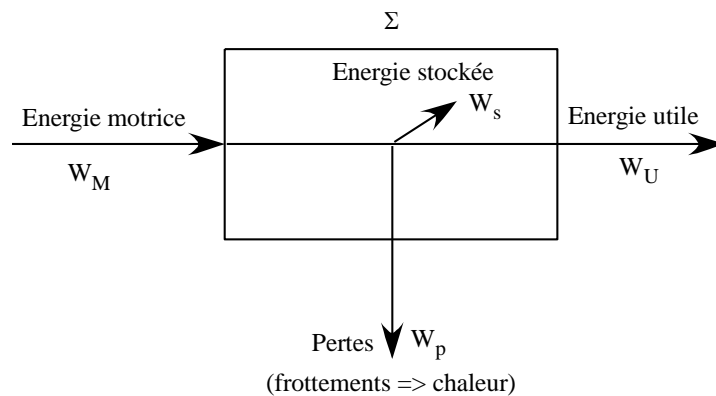


Exemple précédent : on isole  $\Sigma 2$



**3.5. Bilan énergétique**

Système isolé :



Bilan des énergies :  
 $W_M = W_U + W_s + W_p$

Bilan de puissance :  
 $P_M = P_U + \dot{W}_s + P_p$

$\dot{W}_s$  nous embête, il faut pouvoir l'estimer !

\* si  $\dot{W}_s = 0$  (régime permanent, pas d'énergie potentielle)

$$P_M = P_U + P_p$$

$$\text{Rendement : } \eta = \frac{P_U}{P_M} = 1 - \frac{P_p}{P_M}$$

\* si fonctionnement cyclique de période  $T_c$  :

$$\int_0^{T_c} \dot{W}_s(t) dt = W_s(T_c) - W_s(0) = 0$$

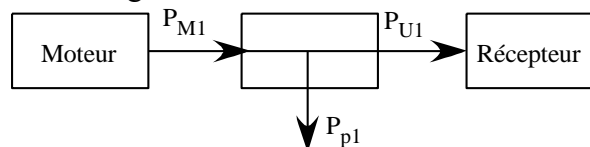
$$\text{Puissance moyenne : } \bar{P}_M = \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} P_M dt = \bar{P}_U + \bar{P}_p$$

$$\text{Rendement moyen : } \bar{\eta} = \frac{\bar{P}_U}{\bar{P}_M} = 1 - \frac{\bar{P}_p}{\bar{P}_M}$$

Réversibilité de la transmission :

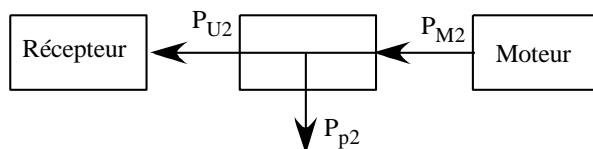
Cela signifie que le flux d'énergie est inversé.

sens direct



$$\bar{\eta} = \frac{\bar{P}_{U1}}{\bar{P}_{M1}}$$

sens inverse

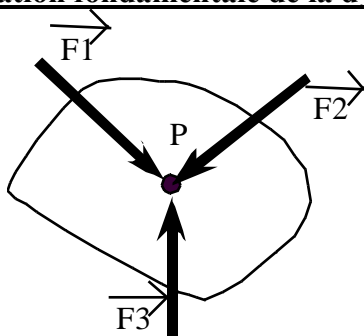


$$\bar{\eta} = \frac{\bar{P}_{U2}}{\bar{P}_{M2}}$$

Le système est irréversible, si cette inversion est impossible (exemple : système vis-écrou).

## 4 Dynamique :

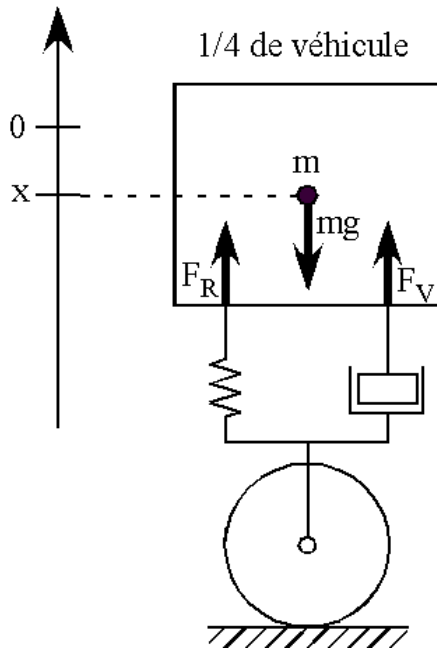
### 4.1 Equation fondamentale de la dynamique en translation :



$$\sum_i \vec{F}_i = m \frac{d^2 \vec{P}}{dt^2} \quad (\text{dans l'espace})$$

$$\sum_i f_{xi} = m \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (\text{projection sur un axe } x)$$

Exemple : amortisseur de voiture



- Raideur de suspension :  $K_R$

$$F_R = -K_R \cdot X$$

( $F_R$  opposé à  $X$ )

- Amortisseur :  $K_V$

$$F_V = -K_V \cdot \dot{X}$$

( $F_V$  opposé à  $V$ )

- Bilan :

$$\sum F_{Xi} = -mg - K_R X - K_V \dot{X} = m \ddot{X}$$

Equation différentielle d'ordre 2

$$m \ddot{X} + K_V \dot{X} + K_R X = -m g$$

Equilibre :

$$X = -\frac{m g}{K_R} < 0$$

#### 4.2 Equation fondamentale de la dynamique en rotation :

$$\sum_i \vec{C} = [J] \frac{d^2}{dt^2} \vec{\theta}$$

$\vec{\theta}$  position angulaire

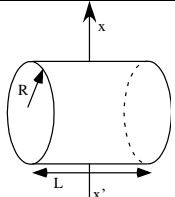
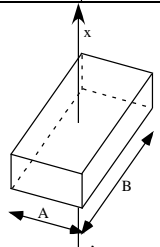
$$\sum_i C_{xi} = J_x \frac{d^2}{dt^2} \theta_x$$

$\theta_x$  position angulaire suivant l'axe  $x$

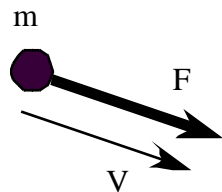
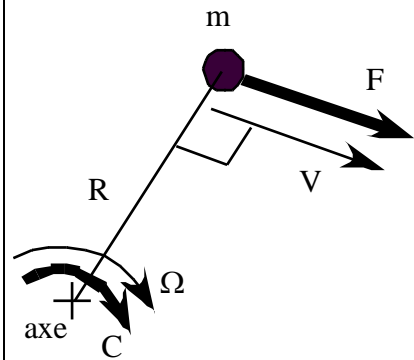
Valeurs du moment d'inertie de quelques solides :

Le moment d'inertie est calculé par rapport à l'axe de rotation  $x'x$ .

		Moment d'inertie
Cylindre plein		$J = \frac{1}{2} M R^2$
Cylindre annulaire		$J = \frac{1}{2} M (R_2^2 + R_1^2)$
Cylindre annulaire mince		$J = M R^2$

Cylindre plein transverse		$J = \frac{1}{4} M \left( R^2 + \frac{L^2}{3} \right)$
Parallélépipède rectangle		$J = \frac{1}{12} M (A^2 + B^2)$

### 5 Comparaison translation – rotation :

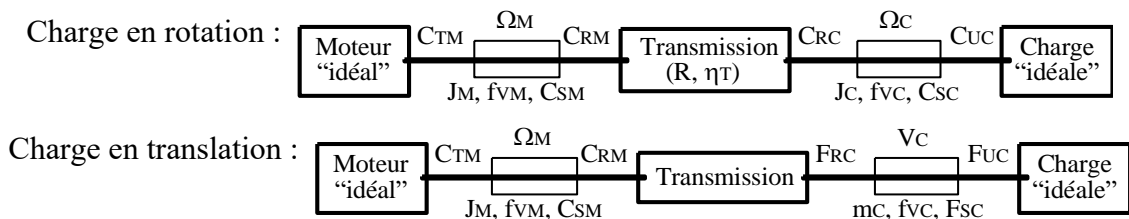
	Translation	Rotation
		 $C = F \cdot R$ (couple équivalent) $\Omega = \frac{V}{R}$ ; $V = R \cdot \Omega$
Equation dynamique	$F = m \frac{dV}{dt}$	$\frac{C}{R} = m \frac{dR \Omega}{dt}$ $C = m R^2 \frac{d\Omega}{dt} = J \frac{d\Omega}{dt}$
Puissance	$P = F \cdot V$	$P = \frac{C}{R} \cdot R \Omega = C \cdot \Omega$
Energie cinétique	$W_C = \frac{1}{2} m V^2$	$WC = \frac{1}{2} m R^2 \Omega^2$ $= \frac{1}{2} J \Omega^2$

# Chapitre 4. TRANSMISSIONS MECANIQUES POUR ENTRAINEMENTS ELECTRIQUES

## 1. INTRODUCTION

### 1.1. Notations

On considère une transmission qui a pour but, soit de fournir une augmentation ou, plus souvent, une réduction de vitesse (conversion rotation-rotation), soit de réaliser une transformation de mouvement rotation-translation.



• **Coté moteur :**

- |   |   |
|---|---|
| $\Omega_M$ : Vitesse de rotation.           | $J_M$ : Inertie sur l'arbre moteur.             |
| $C_{TM}$ : Couple délivré par le moteur.    | $f_{VM}$ : Coefficient de frottements visqueux. |
| $C_{RM}$ : Couple reçu par la transmission. | $C_{SM}$ : Frottements secs.                    |

$f_{VM}$  et  $C_{SM}$  représentent tous les frottements sur l'arbre coté moteur: ils peuvent provenir du moteur ou de la transmission. De même,  $J_M$  caractérise l'inertie de tout ce qui tourne à la vitesse moteur  $\Omega_M$ . Le couple  $C_{TM}$  est le couple électromagnétique total délivré par le moteur et  $C_{RM}$  est le couple à l'entrée d'une transmission sans inertie interne.

• **Coté charge (en rotation) :**

- |   |   |
|---|---|
| $\Omega_C$ : Vitesse de rotation.             | $J_C$ : Inertie sur l'arbre de la charge.       |
| $C_{UC}$ : Couple utile reçu par la charge.   | $f_{VC}$ : Coefficient de frottements visqueux. |
| $C_{RC}$ : Couple fourni par la transmission. | $C_{SC}$ : Frottements secs de la charge.       |

$f_{VC}$  et  $C_{SC}$  représentent les frottements sur l'arbre coté charge (charge et transmission).  $J_C$  est l'inertie de tout ce qui tourne à la vitesse  $\Omega_C$ . Le couple  $C_{UC}$  est le couple réellement utile, reçu par la charge, et  $C_{RC}$  le couple en sortie de transmission.

• **Coté charge (en translation) :**

- |   |   |
|---|---|
| $V_C$ : Vitesse de translation.               | $m_C$ : Masse en mouvement coté charge.         |
| $F_{UC}$ : Force utile reçue par la charge.   | $f_{VC}$ : Coefficient de frottements visqueux. |
| $F_{RC}$ : Force fournie par la transmission. | $F_{SC}$ : Frottements secs de la charge        |

### 1.2. Caractéristiques d'une transmission

• **Rapport de réduction:**

$$R = \frac{\text{Vitesse de moteur}}{\text{Vitesse charge}}$$

$$\text{Rotation : } R = \frac{\Omega_M}{\Omega_C} \text{ (s. u.)} \quad \text{Translation : } R = \frac{\Omega_M}{V_C} \text{ (rad/m)}$$

• **Rendement de la transmission (moteur entraînant):**

$$\eta_T = \frac{\text{Puissance fournie par la transmission}}{\text{Puissance reçue par la transmission}}$$

$$\text{Rotation : } \eta_T = \frac{\Omega_C C_{RC}}{\Omega_M C_{RM}} \quad \text{Translation : } \eta_T = \frac{V_C F_{RC}}{\Omega_M C_{RM}}$$

• **Rendement global (moteur entraînant):**

$$\eta_G = \frac{\text{Puissance utile reçue par la charge}}{\text{Puissance fournie par le moteur}}$$

$$\text{Rotation : } \eta_G = \frac{\Omega_C C_{UC}}{\Omega_M C_{TM}} \quad \text{Translation : } \eta_G = \frac{V_C F_{UC}}{\Omega_M C_{TM}}$$

• **Raideur de transmission:**

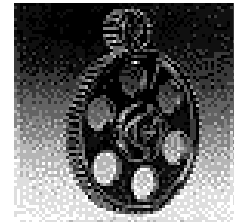
$$K_R = \frac{\text{Couple coté moteur}}{\text{Ecart sur position moteur}} = \frac{C_{RM}}{\theta_{Mr\acute{e}el} - \theta_{Mid\acute{e}al}} \text{ (Nm/rad)}$$

$$\text{Rotation : } K_R = \frac{C_{RM}}{\theta_M - R\theta_C} \quad \text{Translation : } K_R = \frac{C_{RM}}{\theta_M - RP_C}$$

## 2. CONVERSION ROTATION-ROTATION

### 2.1. Réducteur à engrenages

$$R = \frac{\Omega_M}{\Omega_C} = (-1)^{C_{ext}} \frac{\text{Nombre de dents du pignon coté charge}}{\text{Nombre de dents du pignon coté moteur}}$$

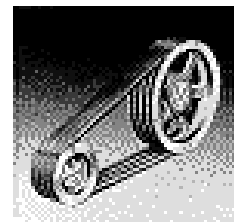


Caractéristiques: Liaison rigide et réversible. Inversion de sens. Axes // (parfois  $\perp$ ).  
 Avantages: Rendement très bon. Simplicité et fiabilité.  
 Inconvénients: Encombrement et poids. Jeux moyens. R grand => plusieurs étages.

### 2.2. Poulies et courroies

• **Courroie lisse:**

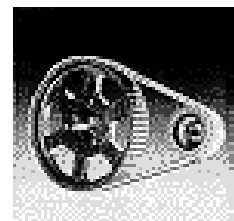
$$R = \frac{\Omega_M}{\Omega_C} = \frac{\text{Diamètre de la poulie coté charge}}{\text{Diamètre de la poulie coté moteur}}$$



Caractéristiques: Liaison peu rigide, glissement possible. Axes //.  
 Avantages: Simplicité. Distance entre les axes.  
 Inconvénients: Encombrement. Elasticité et glissement. Pas de R grand.

• **Courroie crantée:**

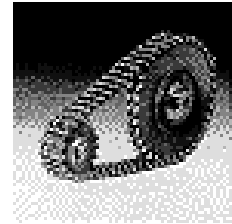
$$R = \frac{\Omega_M}{\Omega_C} = \frac{\text{Nombre de dents de la poulie coté charge}}{\text{Nombre de dents de la poulie coté moteur}}$$



Caractéristiques: Liaison peu rigide (sauf courroies armées). Axes //.  
 Avantages: Simplicité et fiabilité. Distance entre les axes.  
 Inconvénients: Encombrement. Elasticité (sauf courroies armées: acier, Kevlar). Pas de R grand.

• **Chaîne et pignons:**

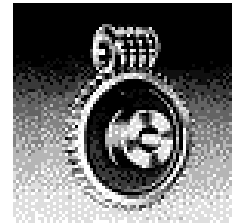
$$R = \frac{\Omega_M}{\Omega_C} = \frac{\text{Nombre de dents du pignon coté charge}}{\text{Nombre de dents du pignon coté moteur}}$$



Caractéristiques: Liaison rigide. Axes //.  
 Avantages: Simplicité et fiabilité. Distance entre les axes.  
 Inconvénients: Encombrement et inertie (chaîne longue). Pas de R grand.

**2.3. Système pignon et vis sans fin**

$$R = \frac{\Omega_M}{\Omega_C} = \frac{\text{Nombre de dents du pignon coté charge}}{\text{Nombre de filets de la vis coté moteur}}$$

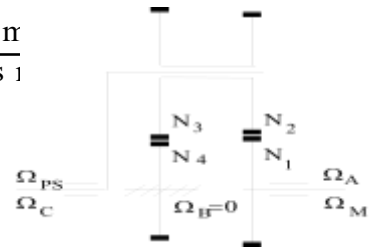


Caractéristiques: Liaison rigide rarement réversible. Axes ⊥.  
 Avantages: Précision. Compacité même pour R grand.  
 Inconvénients: Jeux (sauf syst. de rattrapage de jeu). Mauvais rendement, durée de vie limitée.

**2.4. Train épicycloïdal**

• **Relation de Willis:**

$$\frac{\Omega_B - \Omega_{PS}}{\Omega_A - \Omega_{PS}} = (-1)^{C_{ext}} \frac{\text{Produit des nombres de dents des roues } n}{\text{Produit des nombres de dents des roues } 1}$$



$\Omega_A$ : Vitesse planétaire A (menant).  
 $\Omega_B$ : Vitesse planétaire B (mené).  
 $\Omega_{PS}$ : Vitesse porte-satellite.  
 $C_{ext}$ : Nombre de contacts extérieurs entre roues.

Exemple →

$$\frac{0 - \Omega_C}{\Omega_M - \Omega_C} = (-1)^2 \frac{N_1 \cdot N_3}{N_2 \cdot N_4}$$

$$R = \frac{\Omega_M}{\Omega_C} = \frac{N_1 \cdot N_3 - N_2 \cdot N_4}{N_1 \cdot N_3}$$

Caractéristiques: Liaison rigide. Réversible (si R pas trop grand). Axes //.  
 Avantages: Compacité pour R grand.  
 Inconvénients: Jeux moyens. Complexité. Poids, inertie du porte-satellite.

**2.5. Caractéristiques des principaux réducteurs**

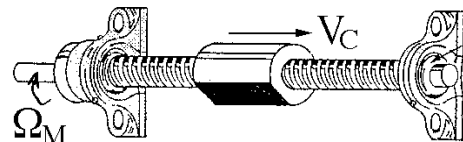
Les principaux critères de sélection d'un réducteur sont : le rapport de réduction R, le jeu (exprimé sur l'arbre de sortie) et le rendement. Le coût global sera réduit si le réducteur existe en standard dans un ensemble moto-réducteur et si les coûts de mise en oeuvre et de maintenance sont réduits. Le tableau ci-dessous est extrait du Technoguide E de l'ADEPA.

Réducteur	Standard		A faible ou très faible jeu		Sans jeu	
	à engrenages (axes // ou ⊥)	roue et vis (axes ⊥)	épicycloïdaux ou dérivés	à engrenages	à roue et vis précontrainte	à engrenage à rattrapage de jeu
Gamme de rapports	1 à 3 par étage	5 à 20	10 à 400 (voir plus)	1 à 3 par étage	jusqu'à 150	10 à 50
Jeu mesuré en sortie	> 15' 30' standard	> 15'	stand: 3 à 10' précis: 1 à 3'	3' à 5'	nul	nul (< 0.5')
Rendement	très bon > 0.9	faible (< 0.6) et variable	moyen 0.5 à 0.85	très bon > 0.9	faible (< 0.5) et variable	bon à très bon
Motoréducteur standard	oui	possible	oui, souvent	oui	non	oui
Coût	limité	moyen	moyen	assez élevé	très élevé	moyen à élevé
Durée de vie	très élevée	moyenne	fonction de la qualité	élevée	moyenne	moyenne
Mise en oeuvre	très aisée	aisée	aisée	aisée	délicate	aisée
Maintenance	Faible	périodique	faible	faible	nécessaire	faible
Dimensions standard	oui	oui	non	non en général	non	non
Exemples d'applications	toutes applications	toutes applications	machines spéciales		plateaux diviseurs	robotique de précision

### 3. CONVERSION ROTATION-TRANSLATION

#### 3.1. Système vis écrou

$$R = \frac{\Omega_M}{V_C} = \frac{2\pi}{\text{Pas de la vis}} \quad (\text{rad/m})$$



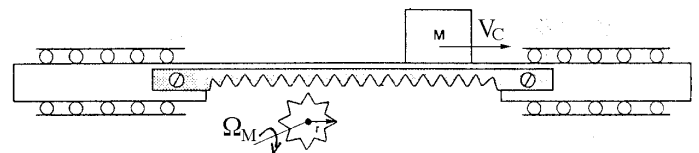
Caractéristiques: Liaison rigide. Rarement réversible (sauf pas important et vis-à-billes).

Avantages: Précision. R grand facile à réaliser.

Inconvénients: Rendement faible (sauf vis à bille). Course limitée. Inertie et flambage de la vis. Vitesse critique faible.

#### 3.2. Système pignon-crémaillère

$$R = \frac{\Omega_M}{V_C} = \frac{1}{\text{Rayon moyen du pignon}} \quad (\text{rad/m})$$



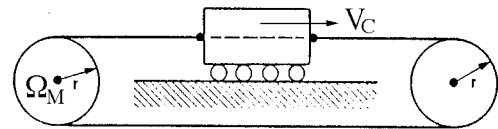
Caractéristiques: Liaison rigide, réversible.

Avantages: Rendement correct.

Inconvénients: Course limitée. Masse de la crémaillère. Précision moyenne. Pas de R grand.



### 3.3. Cabestan ou tapis roulant



$$R = \frac{\Omega_M}{V_C} = \frac{1}{\text{Rayon du cabestan ou du rouleau d'entraînement}} \quad (\text{rad/m})$$

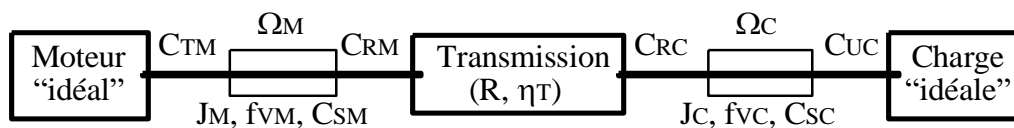
Caractéristiques: Peu rigide. Réversible. Glissement possible (sauf système à ruban ou chaîne).

Avantages: Bon rendement. Simplicité. Grande course.

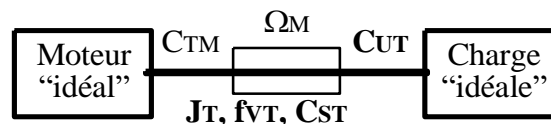
Inconvénients: Précision moyenne (sauf système à ruban).

## 4. CHARGE RAMENEE SUR L'ARBRE MOTEUR

Modèle réel :



Modèle équivalent :



Bilan des couples coté moteur :

$$\sum_i C_{iM} = C_{TM} - C_{RM} - C_{SM} = J_M \dot{\Omega}_M + f_{VM} \Omega_M$$

### 4.1. Conversion idéale ( $\eta_T = 1$ )

Conversion rotation-rotation	Conversion rotation-translation
<p>Conversion idéale : <math>\eta_T = 1</math></p> $\left. \begin{array}{l} \Omega_C C_{RC} = \Omega_M C_{RM} \\ R \Omega_C = \Omega_M \end{array} \right\} \Rightarrow C_{RC} = R C_{RM}$	<p>Conversion idéale : <math>\eta_T = 1</math></p> $\left. \begin{array}{l} V_C F_{RC} = \Omega_M C_{RM} \\ R V_C = \Omega_M \end{array} \right\} \Rightarrow F_{RC} = R C_{RM}$
<p>Bilan des couples coté charge :</p> $\sum_i C_{iC} = C_{RC} - C_{SC} - C_{UC} = J_C \dot{\Omega}_C + f_{VC} \Omega_C$	<p>Bilan des forces coté charge :</p> $\sum_i F_{iC} = F_{RC} - F_{SC} - F_{UC} = m_C \dot{V}_C + f_{VC} V_C$
<p>Charge équivalente sur l'arbre moteur:</p> $C_{TM} = J_T \dot{\Omega}_M + f_{VT} \Omega_M + C_{ST} + C_{UT}$ <p> <math>J_T = J_M + \frac{1}{R^2} J_C</math>    Inertie totale  <math>f_{VT} = f_{VM} + \frac{1}{R^2} f_{VC}</math>    Frottements visqueux  <math>C_{ST} = C_{SM} + \frac{1}{R} C_{SC}</math>    Frottements secs  <math>C_{UT} = \frac{1}{R} C_{UC}</math>    Couple utile équivalent                 </p>	<p>Charge équivalente sur l'arbre moteur:</p> $C_{TM} = J_T \dot{\Omega}_M + f_{VT} \Omega_M + C_{ST} + C_{UT}$ <p> <math>J_T = J_M + \frac{1}{R^2} m_C</math>    Inertie totale  <math>f_{VT} = f_{VM} + \frac{1}{R^2} f_{VC}</math>    Frottements visqueux  <math>C_{ST} = C_{SM} + \frac{1}{R} F_{SC}</math>    Frottements secs  <math>C_{UT} = \frac{1}{R} F_{UC}</math>    Couple utile équivalent                 </p>

#### 4.2. Conversion réelle ( $\eta_T < 1$ )

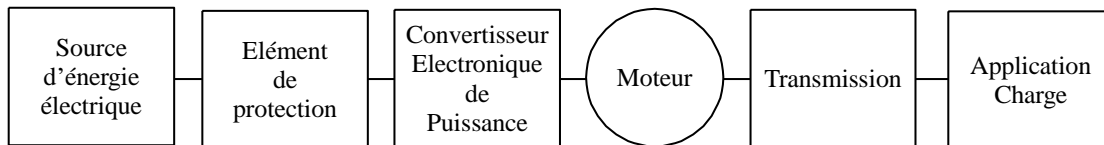
<b>Conversion rotation-rotation</b>	<b>Conversion rotation-translation</b>
<p>Influence du rendement (moteur entraînant):</p> $\left. \begin{array}{l} \Omega_C C_{RC} = \eta_T \Omega_M C_{RM} \\ R \Omega_C = \Omega_M \end{array} \right\} \Rightarrow C_{RC} = \eta_T R C_{RM}$	<p>Influence du rendement (moteur entraînant):</p> $\left. \begin{array}{l} V_C F_{RC} = \eta_T \Omega_M C_{RM} \\ R V_C = \Omega_M \end{array} \right\} \Rightarrow F_{RC} = \eta_T R C_{RM}$
<p>Charge équivalente sur l'arbre moteur:</p> $C_{TM} = J_T \dot{\Omega}_M + f_{VT} \Omega_M + C_{ST} + C_{UT}$ <p><math>J_T = J_M + \frac{1}{\eta_T R^2} J_C</math>      Inertie totale</p> <p><math>f_{VT} = f_{VM} + \frac{1}{\eta_T R^2} f_{VC}</math>      Frottements visqueux</p> <p><math>C_{ST} = C_{SM} + \frac{1}{\eta_T R} C_{SC}</math>      Couple total</p> <p><math>C_{UT} = \frac{1}{\eta_T R} C_{UC}</math>      Couple utile équivalent</p>	<p>Charge équivalente sur l'arbre moteur:</p> $C_{TM} = J_T \dot{\Omega}_M + f_{VT} \Omega_M + C_{ST} + C_{UT}$ <p><math>J_T = J_M + \frac{1}{\eta_T R^2} m_C</math>      Inertie totale</p> <p><math>f_{VT} = f_{VM} + \frac{1}{\eta_T R^2} f_{VC}</math>      Frottements visqueux</p> <p><math>C_{ST} = C_{SM} + \frac{1}{\eta_T R} F_{SC}</math>      Frottements secs</p> <p><math>C_{UT} = \frac{1}{\eta_T R} F_{UC}</math>      Couple utile équivalent</p>

# Chapitre 5. NOTIONS D'ELECTRICITE

## 1. POSITION DANS UN ENTRAINEMENT ELECTRIQUE

Dans l'introduction, nous avons vu qu'un entraînement électrique était constitué :

- d'une source d'énergie électrique,
- d'un convertisseur électronique de puissance,
- d'un moteur,
- d'une transmission mécanique,
- de la charge.



Les parties très concernées par l'électricité sont :

- la source,
- le convertisseur,
- le moteur (machine)

Naturellement, il existe plusieurs types de sources :

- les piles (CC),
- le réseau (CA),
- ...

et plusieurs principes de machines :

- synchrones,
- à réluctance,
- ...

Afin de pouvoir aborder la présentation de ces parties, il nous faut rappeler (présenter) quelques notions générales d'électricité.

Les grandeurs communes entre les éléments précédemment cités sont : l'énergie et la puissance.

Essayons de présenter les notions d'électricité nécessaires à partir de ces grandeurs.

## 2. TRANSFERT D'ENERGIE ELECTRIQUE

### 2.1. Energie

Définition du dictionnaire :

*“Energie : faculté que possède un système de fournir du travail mécanique ou son équivalent. Elle s'exprime en joules (J).”*

L'énergie peut être :

- mécanique
- chimique
- électrique
- nucléaire
- calorifique
- lumineuse

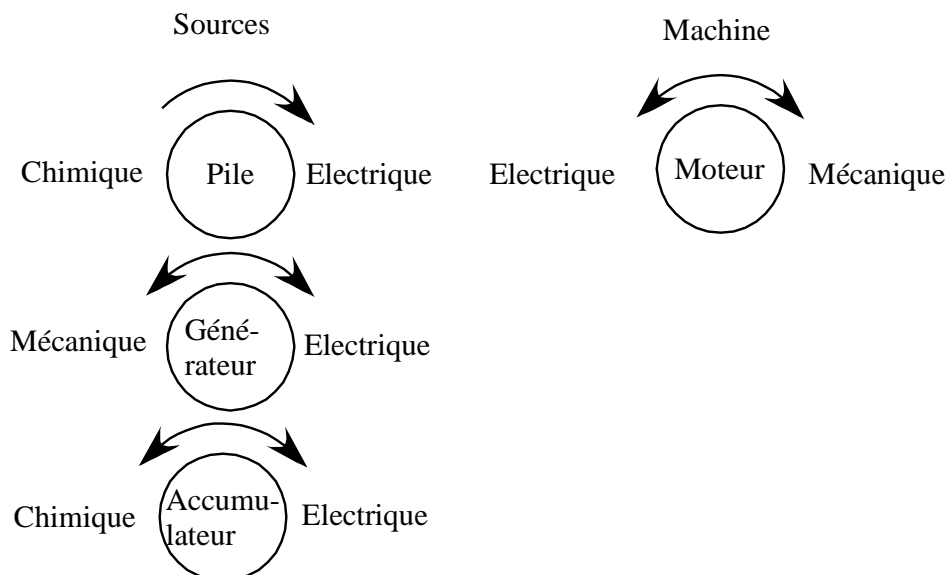
Vous avez vu qu'en mécanique, l'énergie d'un système peut s'exprimer sous 2 formes :

- énergie potentielle : dépend de la position
- énergie cinétique : dépend de la vitesse

Transformation de l'énergie :

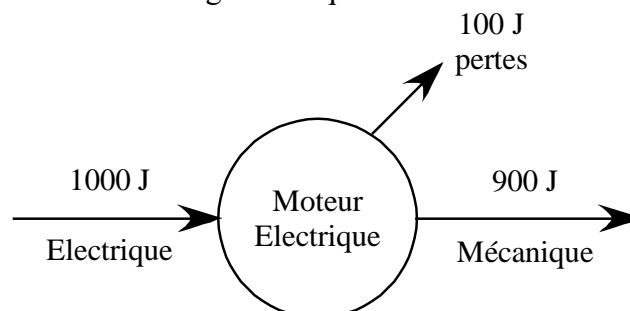
Il existe des systèmes qui permettent de transformer l'énergie d'une forme dans une autre.

Vous en connaissez, sans doute, et, sur notre entraînement électrique, nous en trouvons plusieurs :



### 2.1.1. Principe de transformation (1<sup>er</sup> principe)

Lors d'une transformation d'énergie d'une forme en une ou plusieurs autres formes, la somme des quantités d'énergie obtenues est égale à la quantité initiale.





### 2.1.5. Unités

Le joule est une unité très petite, pour simplifier les écritures ; il est couramment utilisé avec les multiples suivants :

- le kilojoule (kJ) :

$$1 \text{ kJ} = 1\,000 \text{ J}$$

- le kilowatt-heure (kWh) :

$$1 \text{ kWh} = 1\,000 \text{ Wh} = 3\,600\,000 \text{ J} \\ = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$$

- anciennes unités plus utilisées :

la thermie (th) et la calorie (cal)

$$1 \text{ th} = 1\,000\,000 \text{ cal} = 4,18 \cdot 10^6 \text{ J}$$

### 2.2. Puissance

La notion d'énergie est insuffisante pour caractériser un fonctionnement, car des machines très différentes peuvent transformer des quantités d'énergie identiques, mais pendant des temps très différents.

Un moteur de traction absorbe :

$$1\,000 \text{ kWh en } 2 \text{ h}$$

Un moteur de machine à laver absorbe :

$$1\,000 \text{ kWh en } 2\,000 \text{ h}$$

La puissance se mesure par l'énergie transformée (absorbée ou fournie) en une unité de temps.

Elle se calcule par le rapport de l'énergie échangée sur le temps d'échange.

$$\text{Puissance} = \frac{\text{Energie}}{\text{temps}}$$

$$P = \frac{W}{t}$$

$$\text{unité : } [W] = \left[ \frac{J}{s} \right] ; \text{ watt} = \frac{\text{joule}}{\text{seconde}}$$

Les relations précédentes sur l'énergie, si nous les écrivons pour une durée égale à une unité de temps, sont identiques pour les puissances :

$$P_a = P_u + P_p$$

Puissance absorbée = puissance utile + puissance perdue

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

$$\text{Rendement} = \frac{\text{Puissance utile}}{\text{Puissance absorbée}}$$

Remarque : ici, nous négligeons les phénomènes d'accumulation et de stockage.

### 3. GRANDEURS CARACTERISTIQUES

#### 3.1. Courant électrique

En fait, à l'origine, l'étude de l'électricité portait sur ces effets :

- effet thermique (échauffement du filament d'une lampe) ;
- effet magnétique (déviation de boussole) ;
- effet chimique (dégagement aux électrodes d'un voltamètre).

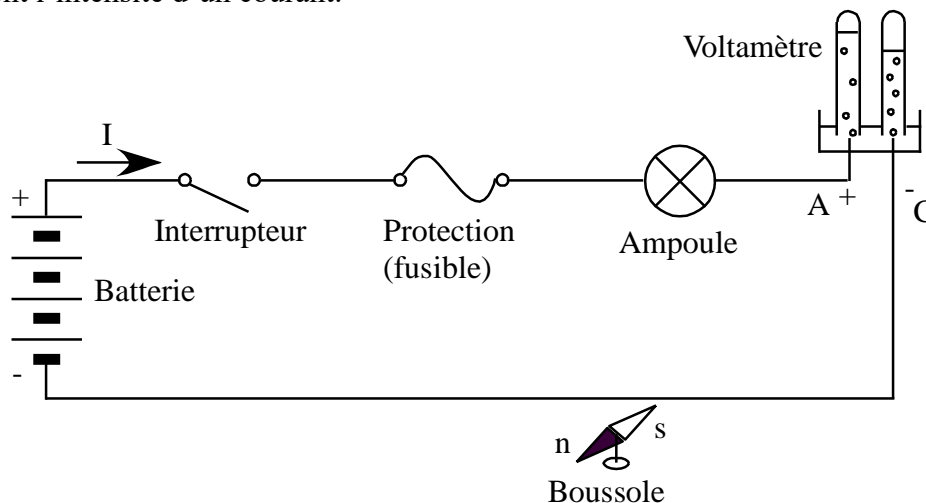
Et, c'est cet effet chimique, qui a été choisi pour mesurer l'électricité, en fait : la quantité d'électricité.

Cette quantité d'électricité, qui traverse les éléments d'un circuit, dépend du temps durant lequel passe le courant : ce qui permet de définir l'intensité du courant électrique, comme le rapport de la quantité d'électricité sur le temps de passage :

$$I = \frac{Q}{t} ; [A] = \left[ \frac{C}{s} \right] \text{ (l'ampère)}$$

C'est cette unité qui est devenue l'unité principale de l'électricité et qui définit toutes les autres.

Depuis, sont apparus d'autres moyens de mesure de l'électricité, permettant de mesurer directement l'intensité d'un courant.



Si nous fermons l'interrupteur, un courant circule dans le circuit, et nous constatons :

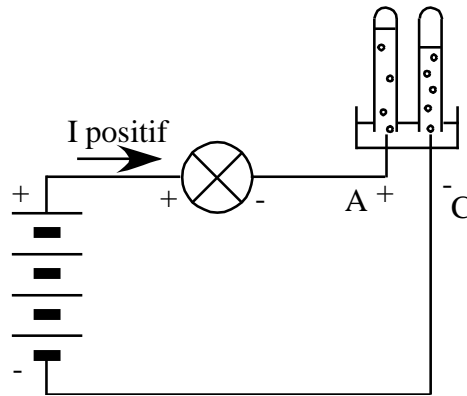
- thermique : échauffement du filament de la lampe ;
- chimique : dégagement de gaz aux électrodes du voltamètre (A : anode → □oxygène ; C : cathode → □hydrogène) ;
- magnétique : déviation de la boussole.

Si nous inversons les bornes de l'accumulateur :

- thermique : inchangé ;
- chimique : les dégagements de gaz sont inversés ;
- magnétique : déviation de la boussole dans l'autre sens.

Donc, certains effets sont polarisés.

A l'origine, l'électricité était supposée être la manifestation du déplacement des particules positives ; on a donc choisi le sens positif du courant électrique, comme étant celui indiqué :



et on a défini la polarité + du générateur, comme la borne d'où " sort " l'électricité, et la polarité + des récepteurs, comme la borne reliée à la + du générateur : là où " rentre " l'électricité.

### 3.2. Différence de potentiel ou tension

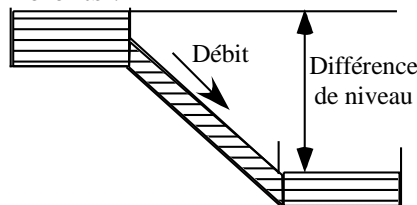
#### Analogie hydraulique :

2 bassins au même niveau :



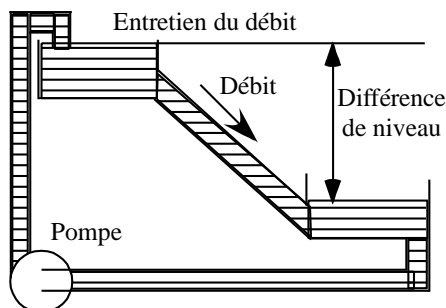
pas d'écoulement entre les deux bassins

2 bassins de niveaux différents :



la différence de niveau permet la circulation d'un débit (d'un courant) d'eau.

Entretien du débit :



la pompe entretient la différence de niveau, donc le courant.

Energie de la chute :

$$W = F \cdot l$$

F = poids de l'eau

l = hauteur de chute ou différence de niveau

W = énergie

D'où :

$$F = \frac{W}{l}$$

De même, si je relie 2 éléments au même niveau électrique par un conducteur, je ne constate pas de circulation de courant.



Si je relie les 2 bornes d'un générateur électrique, un courant circule ; ces 2 bornes sont à un niveau électrique différent.

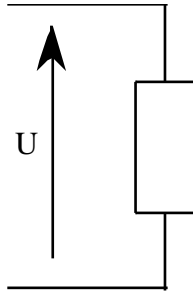
Si le générateur peut entretenir cette différence de niveau électrique, le courant circule indéfiniment ; sinon, cela dure jusqu'à ce que les 2 pôles du générateur soient au même niveau électrique (cas d'une pile déchargée).

La différence de potentiel ou tension est le rapport du travail sur la quantité d'électricité :

$$U = \frac{W}{Q} \quad [V] = \frac{[J]}{[C]}$$

le Volt

Elle est indiquée dans le sens des potentiels croissants :



Si nous divisons W et Q par le temps t :

$$U = \frac{P}{I} \quad [V] = \frac{[W]}{[A]}$$

Nous avons vu que l'énergie s'exprime par :

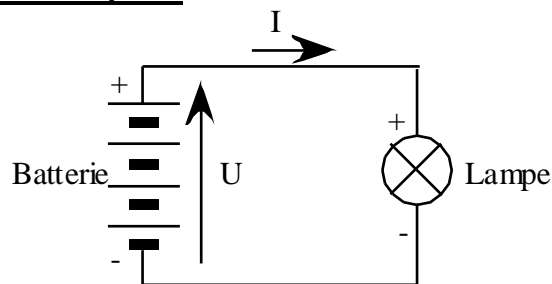
$$W = P t$$

Des relations précédentes, nous pouvons tirer :

$$W = U I t$$

$$P = U I$$

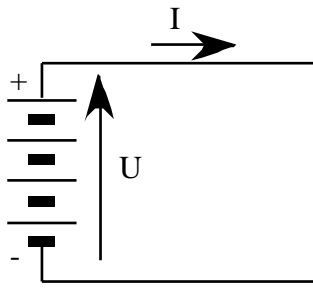
### 3.3. Convention générateur ou récepteur



U : positive dans le sens des potentiels croissants

I : positif du plus vers le moins

On regarde la batterie seule :



U : sens des potentiels croissants

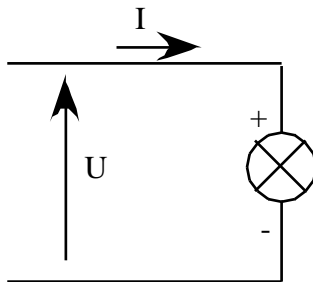
I : sortant

$U > 0$

$I > 0$

$P = UI > 0$

On regarde la lampe seule :



U : sens des potentiels croissants

I : entrant

$U > 0$

$I > 0$

$P = UI > 0$

INCOHERENCE !

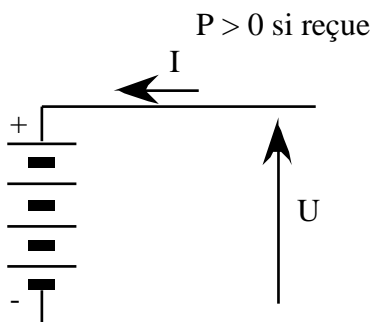
Non, car nous avons changé de notations :

$I > 0 \equiv$  I sortant devient I entrant

La première notation correspond à la convention générateur, qui donne  $P > 0$  si fournie par l'élément.

La seconde notation correspond à la convention récepteur, qui donne  $P > 0$  si reçue par l'élément.

Observons la batterie avec la convention récepteur :



$U > 0$

$I < 0$  car I réel dans le sens opposé

$P = UI < 0$

la puissance reçue est négative

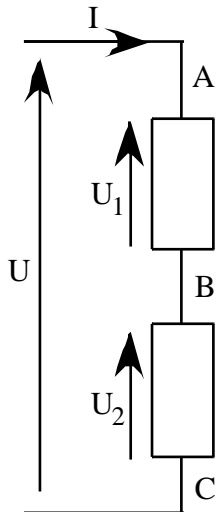
donc elle est fournie  $\Rightarrow$  la batterie est générateur

De même, nous pourrions observer la lampe avec la convention générateur, et nous trouverions une puissance négative ; donc, si la puissance fournie est négative, c'est qu'elle est reçue.

En fait, dans un montage aussi simple, le rôle générateur et récepteur de chaque élément est facile à déterminer, mais c'est très important d'utiliser des notations cohérentes, pour déterminer le rôle de chaque élément dans un circuit compliqué.

### 3.4. Association d'éléments

- en série :

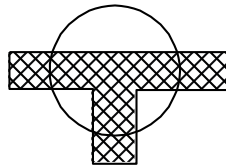
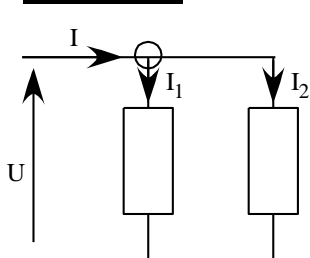


Le courant I parcourt tous les éléments.

La tension totale U est égale à la somme des tensions  $U_1$  et  $U_2$  aux bornes de chacun des éléments.

$$U = V_A - V_C = V_A - V_B + V_B - V_C = U_1 + U_2$$

- en parallèle :



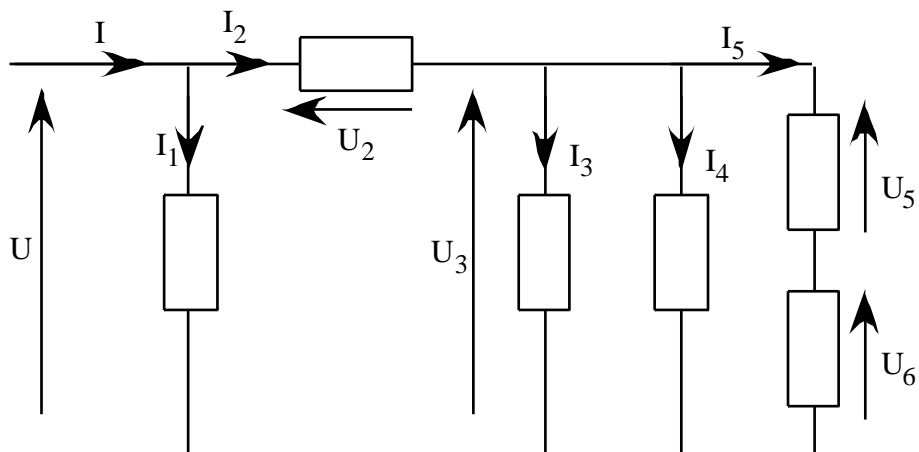
Quantité d'électricité entrante  
=  
Quantité d'électricité sortante

La tension U est présente aux bornes de tous les éléments.

Le courant total I est égal à la somme des courants  $I_1$  et  $I_2$ , qui parcourent chacun des éléments.

$$I = I_1 + I_2$$

- mixte :



$$\begin{array}{l|l}
 I = I_1 + I_2 & \\
 I_2 = I_3 + I_4 + I_5 & \text{lois des noeuds} \\
 \\ 
 U = U_2 + U_3 & \\
 U_3 = U_5 + U_6 & \text{lois des mailles}
 \end{array}$$

## **4. ELEMENTS DES CIRCUITS**

### **4.1. Effet Joule : la résistance**

Lorsqu'un courant parcourt un conducteur ou un appareil, celui-ci s'échauffe. Ce phénomène est l'effet Joule.

Cet effet est utilisé dans la transformation de l'énergie électrique en chaleur (radiateur, ...), mais il existe aussi lors des autres transformations, et c'est pour cela que les moteurs électriques s'échauffent (perceuse, aspirateur, ...).

Cet effet Joule est l'énergie thermique prévue au principe de dégradation (2-1-2).

Quand on mesure la quantité de chaleur produite par le passage du courant dans un élément, où seule cette transformation existe, nous nous apercevons que cette quantité de chaleur est proportionnelle :

- à la durée du passage du courant ;
- au carré du courant ;
- à une constante caractéristique de l'élément : sa résistance.

$$\begin{array}{l}
 W = R I^2 t \quad \Rightarrow \quad P = R I^2 \\
 [J] = [\underbrace{\Omega}_{\text{ohm}}] [A]^2 [s]
 \end{array}$$

La résistance d'un conducteur dépend du matériau constituant ce conducteur, de sa longueur et de sa section :

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

$\rho$  : résistivité [ $\Omega\text{m}$ ] « constante » du matériau

$l$  : longueur du conducteur [m]

$S$  : section du conducteur [ $\text{m}^2$ ]

### **4.2. Loi d'Ohm**

Sur un récepteur, nous pouvons calculer la puissance électrique absorbée par :

$$P_a = U I$$

et la puissance transformée sous forme thermique :

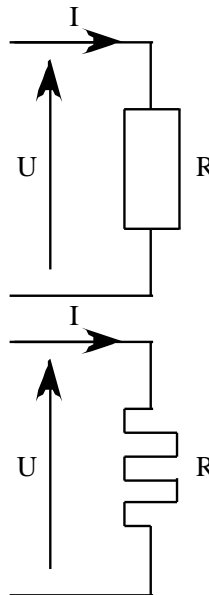
$$P_t = R I^2$$

Cas où l'élément transforme toute l'énergie électrique en énergie thermique (résistance) :

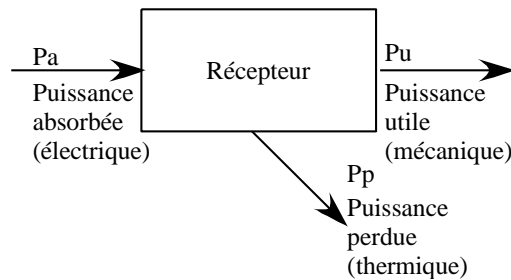
$$P_a = P_t$$

$$U I = R I^2$$

$$U = R I$$



### 4.3. Cas où l'élément ne transforme pas toute l'énergie en chaleur



$$P_a = UI \quad \text{puissance absorbée}$$

$$P_p = R I^2 \quad \text{puissance thermique perdue par effet Joule, si } R \text{ est la résistance interne du récepteur}$$

La différence entre ces deux puissances est seule transformée, c'est la puissance électrique utile :

$$P_{EU} = P_A - P_p$$

$$P_{EU} = U I - R I^2$$

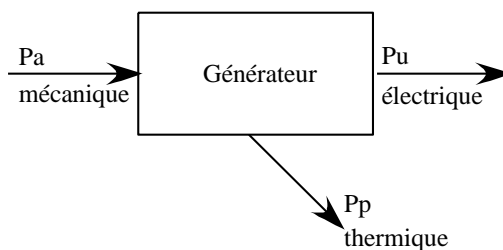
$$\frac{P_{EU}}{I} = U - R I$$

Cette grandeur s'exprime en volts et nous l'appellerons " force électromotrice " : E :

$$E = U - R I$$

$$U = E + R I \quad \text{loi d'Ohm sur le récepteur}$$

Cas d'un générateur :



$$P_u = UI$$

$$P_p = R I^2 \quad R \text{ est la résistance interne du générateur}$$

$P_{ET}$  = Puissance électrique totale

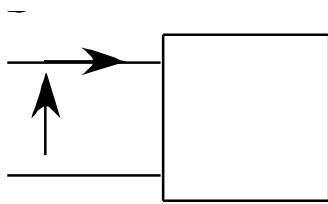
$$P_{ET} = P_u + P_p$$

$$P_{ET} = U I + R I^2$$

$$\frac{P_{ET}}{I} = E = U + RI$$

$$\boxed{U = E - R I} \quad \text{loi d'Ohm sur le générateur}$$

Remarque : générateur en convention récepteur



$$U = E + R I$$

$$I < 0 \Rightarrow U = E - R I \text{ relation de la convention générateur !}$$

#### **4.4. Inductance :**

Une inductance est un élément, qui transforme, de façon réversible, l'énergie électrique en énergie magnétique, sous la forme d'un flux magnétique.

L'énergie emmagasinée vaut :

$$W = \frac{1}{2} L I^2 \quad \text{énergie de forme cinétique (associée à un mouvement)}$$

Les équations, qui régissent son fonctionnement, sont :

$$\psi = L I$$

$$U = \frac{d\psi}{dt}$$

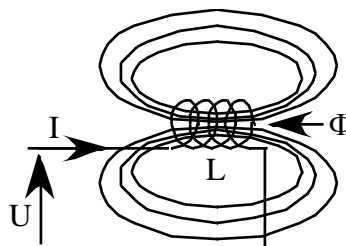
avec  $\psi = \text{flux total} = n \cdot \Phi$

$n$  = nombre de spires de l'inductance

$\Phi$  = flux magnétique dans l'inductance

Des équations précédentes, nous tirons (si  $L$  est constante) :

$$U = L \frac{dI}{dt} \quad \text{sinon } U = L \frac{dI}{dt} + I \frac{dL}{dt}$$



Une inductance peut être considérée comme une source de courant transitoire.

On utilise des bobines supraconductrices, pour stocker l'énergie : ce sont d'excellentes sources de courant rechargeables.

#### 4.5. Capacité

Une capacité est un élément, qui transforme, de façon réversible, l'énergie électrique en énergie électrostatique, sous la forme de champ électrique.

L'énergie emmagasinée vaut :

$$W = \frac{1}{2} C U^2 \text{ énergie de forme potentielle (associée à une situation)}$$

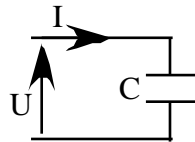
Les équations, qui régissent son fonctionnement, sont :

$$Q = C \cdot U$$

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

d'où nous tirons :

$$I = C \frac{dU}{dt}$$



Une capacité peut être considérée comme une source de tension transitoire.

#### 4.6. Loi d'Ohm généralisée

Dans un circuit électrique, on rencontre des associations d'éléments : résistances, inductances et capacités. Les équations, régissant le fonctionnement de ce circuit, sont :

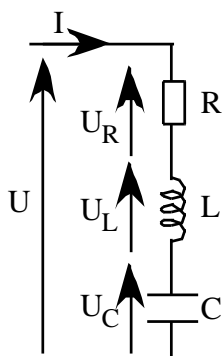
$$U_R = R \cdot I$$

$$U_L = L \frac{dI}{dt} \quad + \text{ les équations de mailles et de noeuds}$$

$$U_C = \frac{1}{C} \int I dt$$

Exemple :

Circuit RLC



$$U = U_R + U_L + U_C$$

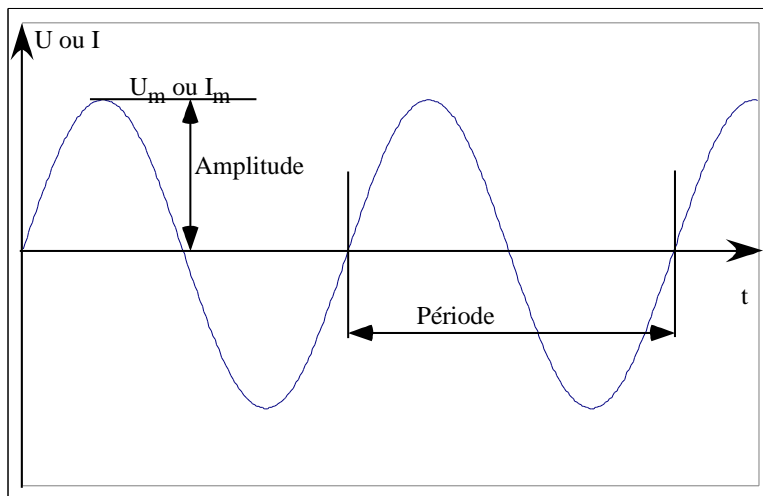
$$U = R I + L \frac{dI}{dt} + \frac{1}{C} \int I dt$$

Equation différentielle du second ordre

## 5 ALTERNATIF SINUSOIDAL

La production, la distribution et la consommation de l'énergie électrique se font, pour une très grande part, sous la forme d'un courant alternatif sinusoïdal.

Dans ce cas, les grandeurs (courants et tensions) ont une évolution temporelle, qui est alternative sinusoïdale.



$$\text{fréquence} = \frac{1}{\text{période}}$$

$$[\text{Hz}] = [\text{s}^{-1}]$$

Si nous appliquons une tension  $U$  alternative sinusoïdale aux bornes d'une résistance  $R$ , nous constatons la circulation d'un courant alternatif sinusoïdal, de même fréquence et dont l'amplitude répond à la relation suivante :

$$U_m = R \cdot I_m$$

$$u(t) = U_m \sin \omega t$$

$$i(t) = I_m \sin \omega t$$

Amplitude	$U_m$	$I_m$
pulsation	$\omega$	$\omega$
Phase	0	0

### 5.1. Valeurs efficaces

Dans la résistance précédente, la puissance dissipée vaut :

$$p(t) = R \cdot (i(t))^2$$

Cette puissance a aussi une évolution temporelle sinusoïdale.



La détermination de l'énergie consommée serait assez compliquée, d'où l'intérêt de définir une puissance moyenne sur une période.

Celle-ci nous permettra de calculer l'énergie consommée par la relation :

$$W = P \cdot t$$

Energie = Puissance moyenne . temps (durée) de l'échange

La puissance moyenne s'exprime par :

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T R i^2(t) dt$$

$$P = R \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt$$

Appelons I : valeur efficace du courant, la grandeur s'exprime par :

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad \text{en sinusoïdal : } I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

La relation précédente devient :

$$P = R I^2$$

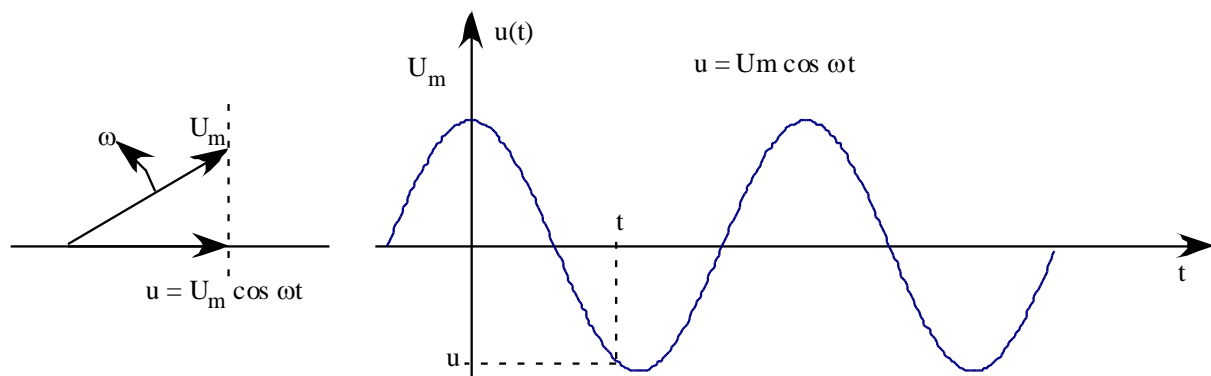
De même, nous pouvons définir U : valeur efficace de la tension, qui s'exprime par :

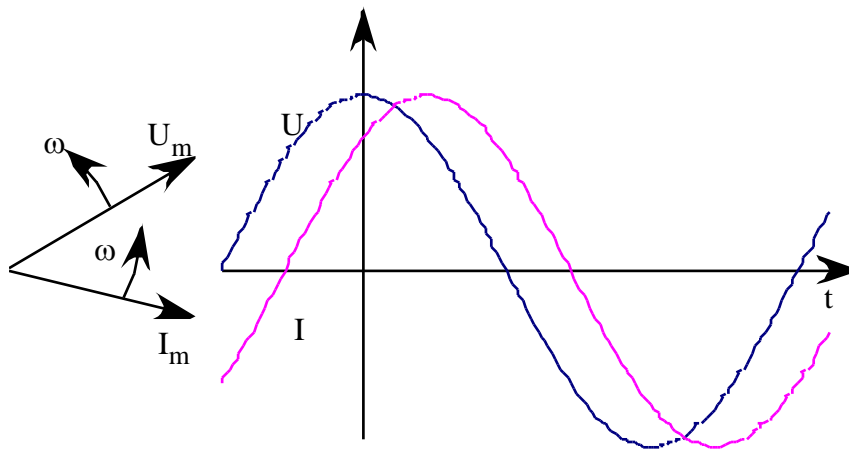
$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}$$

Nous pourrions montrer que :

$$\boxed{U = R I}$$

## 5.2. Représentation graphique et notation complexe





Les grandeurs sinusoïdales sont représentées par des vecteurs, tournant à la vitesse  $\omega$ , correspondant à la pulsation de la grandeur.

Leurs modules sont proportionnels à l'amplitude de la grandeur sinusoïdale.

Représentation de Fresnel :

1. le repère tourne à  $\omega$  également
  - $\Rightarrow$  les vecteurs sont immobiles
  - $\Rightarrow$  on choisit de les représenter au temps  $t = 0$  ou on choisit une grandeur comme origine des phases
2. le module des vecteurs est proportionnel à la valeur efficace de la grandeur
  - $\Rightarrow$  la construction donne directement les valeurs efficaces

Le déphasage entre deux grandeurs est l'angle compris entre les deux vecteurs représentatifs de ces grandeurs. Dans le cas d'un courant et d'une tension, cet angle est compté (orienté) du courant vers la tension.



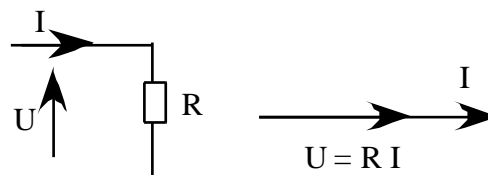
La manipulation de ces vecteurs peut être mathématiquement étudiée grâce à l'algèbre complexe.

$$\bar{U} = U e^{j\varphi}$$

### 5.3. Loi d'Ohm

#### 5.3.1 Cas de la résistance

$$u = R \cdot i$$



$$\begin{aligned} \text{si} \quad & i = I_m \sin \omega t \\ \Rightarrow \quad & u = R \cdot I_m \sin \omega t \\ & u = U_m \sin \omega t \end{aligned}$$

La loi d'Ohm peut s'écrire :

$$\begin{aligned} & U_m = R \cdot I_m \\ \text{et devient} \quad & U = R \cdot I \quad \text{avec les valeurs efficaces} \\ \text{ou} \quad & \bar{U} = R \cdot \bar{I} \quad \text{en complexe} \end{aligned}$$

### 5.3.2 Cas de l'inductance

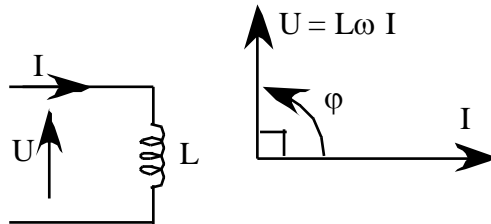
$$u = L \cdot \frac{di}{dt}$$

$$\begin{aligned} \text{si} \quad & i = I_m \sin \omega t \\ & \frac{di}{dt} = I_m \omega \cos \omega t \end{aligned}$$

$$u = L I_m \omega \cos \omega t$$

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \quad & U_m = L \omega I_m \quad \Rightarrow \quad U = L \omega I \\ & \varphi = \frac{\pi}{2} \end{aligned}$$



La loi d'Ohm devient :

$$\begin{aligned} & U = L \omega I \quad \text{avec les valeurs efficaces} \\ \text{et} \quad & \bar{U} = jL \omega \bar{I} \quad \text{en complexe} \end{aligned}$$

### 5.3.3 Cas de la capacité

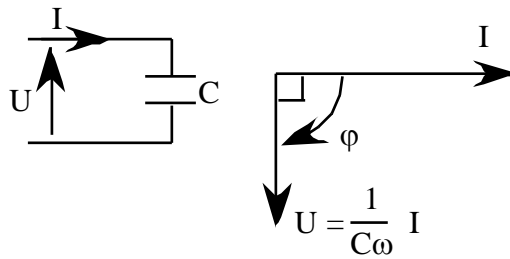
$$i = C \frac{du}{dt}$$

$$\begin{aligned} \text{si} \quad & u = U_m \sin \omega t \\ & \frac{du}{dt} = U_m \omega \cos \omega t \end{aligned}$$

$$i = C U_m \omega \cos \omega t$$

$$i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \quad & I_m = C \omega U_m \quad \Rightarrow \quad U_m = \frac{1}{C \omega} I_m \quad \Rightarrow \quad U = \frac{1}{C \omega} I \\ & \varphi = - \frac{\pi}{2} \end{aligned}$$



La loi d'Ohm devient :

$$U = \frac{1}{C\omega} I \quad \text{avec les valeurs efficaces}$$

et  $\bar{U} = \frac{1}{jC\omega} \bar{I}$  en complexe

#### 5.3.4 Cas général :

Sur une charge quelconque, nous écrivons la loi d'Ohm :

$$\bar{U} = \bar{Z} \bar{I}$$

avec  $\bar{Z} = Z e^{j\varphi} = \text{impédance complexe}$

$\bar{Z}$  est un complexe caractéristique de la charge, dont le module  $Z$  vaut le module de l'impédance et  $\varphi$  le déphasage imposé entre le courant et la tension.

	$Z$	$\varphi$	$\bar{Z}$
Résistance	$R$	$0$	$R$
Inductance	$L\omega$	$\frac{\pi}{2}$	$jL\omega$
Capacité	$\frac{1}{C\omega}$	$-\frac{\pi}{2}$	$\frac{1}{jC\omega} = -\frac{j}{C\omega}$
quelconque R L série	$\sqrt{R^2 + L^2\omega^2}$	$\text{Arctg} \frac{L\omega}{R}$	$R + jL\omega$

#### 5.4. Association d'éléments

Nous retrouvons les mêmes types d'équations que précédemment. En effet, dans le paragraphe 3.4, nous avons donné les relations liant les tensions d'éléments en série ou les courants d'éléments en parallèle.

Ces relations sont toujours valables, mais il faut cette fois les écrire en complexe.

	$\bar{U} = \bar{U}_1 + \bar{U}_2$ $\bar{U} = \bar{Z}_1 \bar{I} + \bar{Z}_2 \bar{I}$
	$\bar{I} = \bar{I}_1 + \bar{I}_2$

Toutes les méthodes de calcul s'appliquent aux circuits en alternatif sinusoïdal, si on utilise les grandeurs complexes.

### 5.5. Puissance

Si un récepteur est alimenté par une tension  $u(t)$  de la forme  $u(t) = U_m \sin \omega t$  et qu'il absorbe un courant  $i(t) = I_m \sin(\omega t - \varphi)$ , alors la puissance qu'il absorbe est de la forme :

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin(\omega t - \varphi)$$

que l'on peut encore écrire :

$$p(t) = \frac{1}{2} U_m \cdot I_m \cos \varphi - \frac{1}{2} U_m \cdot I_m \cos(2 \omega t - \varphi)$$

car :  $\sin a \cdot \sin b = \frac{1}{2} \cos(a - b) - \frac{1}{2} \cos(a + b)$

avec  $a = \omega t$  et  $b = \omega t - \varphi$

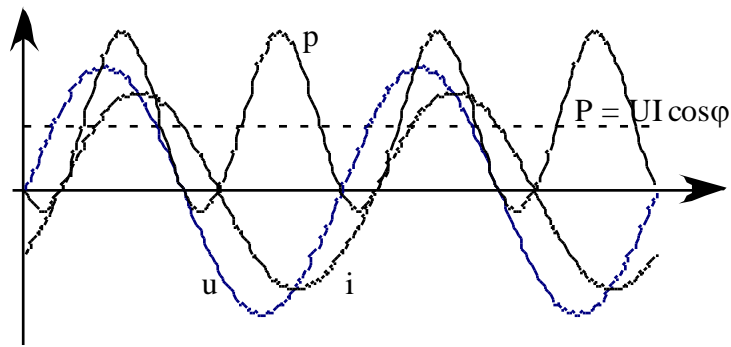
Donc, la puissance instantanée est la somme d'un terme constant :  $\frac{1}{2} U_m \cdot I_m \cos \varphi$

et d'un terme sinusoïdal :  $-\frac{1}{2} U_m \cdot I_m \cos(2 \omega t - \varphi)$  que l'on peut écrire, en utilisant les relations liant valeurs efficaces et valeurs maximales :

$$U \sqrt{2} = U_m$$

$$I \sqrt{2} = I_m$$

$$p(t) = U I \cos \varphi - U I \cos(2 \omega t - \varphi)$$



La puissance moyenne sur une période est :

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt$$

C'est-à-dire la valeur moyenne de  $p(t)$ , dont la partie sinusoïdale a une valeur moyenne nulle ;

donc :  $P = U I \cos \varphi$

Cette puissance, c'est celle qui est liée à l'énergie ; on l'appelle également : "puissance active".

Mais, pour faire circuler cette puissance  $P$  dans un élément, comme  $\varphi$  est lié à cet élément (c'est une caractéristique de l'élément), il faut appliquer la tension  $U$  et faire circuler le courant  $I$ .

Ces deux grandeurs sont importantes :

- $U$  définit le niveau d'isolation à assurer, donc influence le choix des isolants.
- $I$  définit la section des conducteurs, dans lesquels il circule.

Donc, ces grandeurs sont dimensionnantes.

On a donc défini une puissance dite "apparente" par la relation :

$$\boxed{S = U I}$$

Celle-ci s'exprime en volt-ampère, noté VA ; ce n'est pas une puissance au sens énergétique du terme (sauf si  $\cos \varphi = 1$ ).

Le rapport de  $P$  sur  $S$  s'appelle le facteur de puissance :

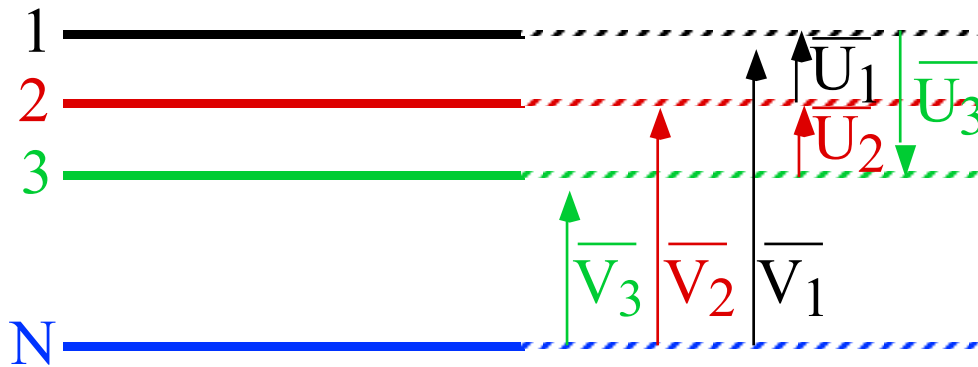
$$f_p = \frac{P}{S} = \cos \varphi \text{ en alternatif sinusoïdal.}$$

## 5.6. Triphasé

Afin d'utiliser au mieux l'espace disponible dans les générateurs électriques sinusoïdaux, la production et la distribution d'énergie électrique sont effectuées en triphasé.

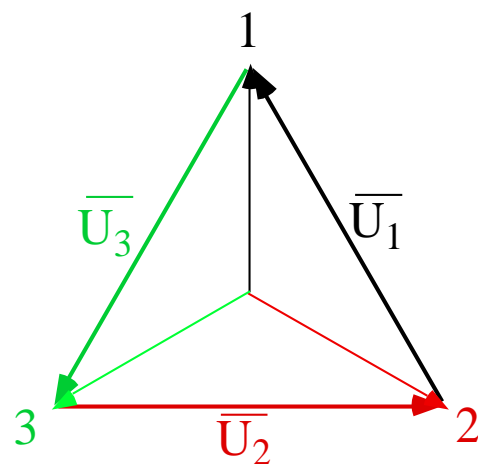
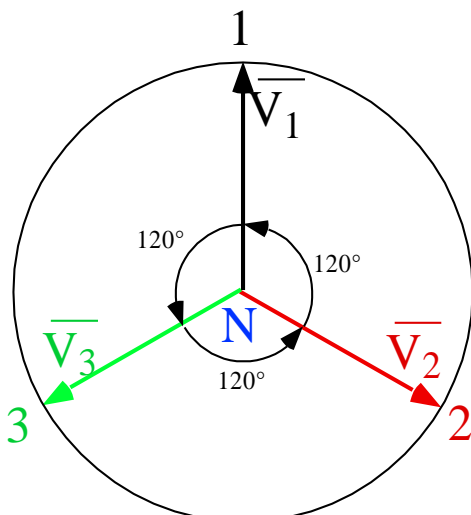
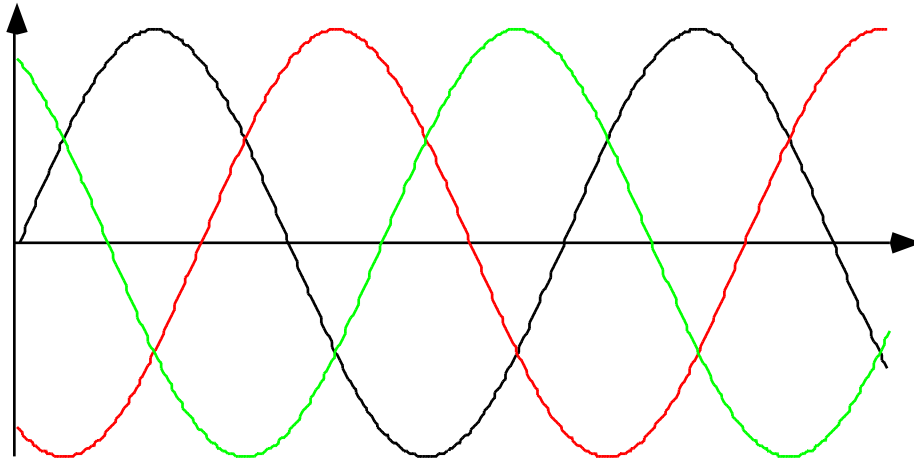
Dans une distribution en triphasé, nous trouvons trois fils de phase et un fil de neutre.

Entre le neutre et chaque fil de phase, nous avons trois tensions, que nous appellerons :  
 “ tensions simples ” :  $\bar{V}_1, \bar{V}_2, \bar{V}_3$

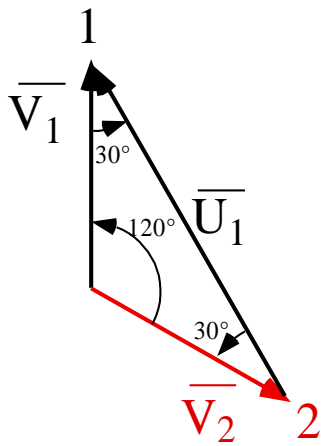


Et, entre les fils de phases, nous avons trois tensions appelées : “ tensions composées ” :  $\bar{U}_1, \bar{U}_2, \bar{U}_3$

Les trois tensions simples sont égales en amplitude et déphasées de  $2\pi/3$  entre elles.



si  $V_1 = V_2 = V_3$  et si déphasage de  $120^\circ$  entre elles  
 $\Rightarrow U_1 = U_2 = U_3$  et  $120^\circ$  entre elles également.



$$U_1 = V_1 \cos 30^\circ + V_2 \cos 30^\circ$$

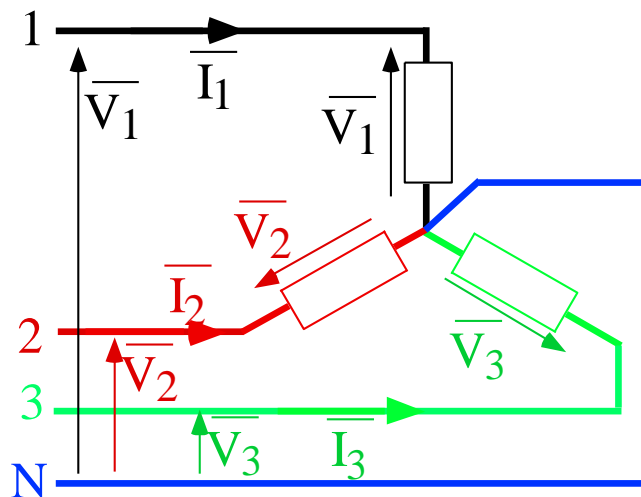
$$U_1 = V_1 \cdot 2 \cdot \cos 30^\circ$$

$$U_1 = V_1 \sqrt{3}$$

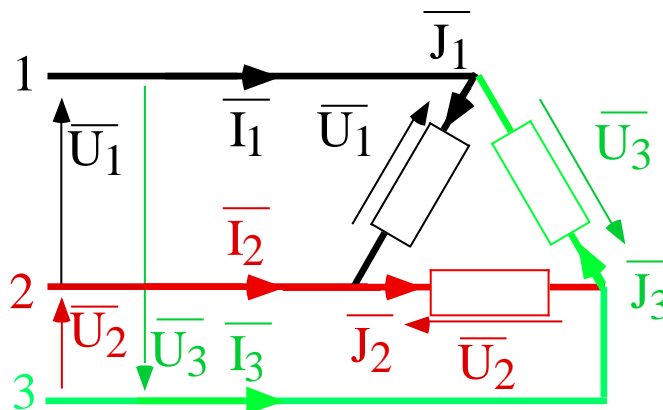
$$U = V \sqrt{3}$$

Couplage :

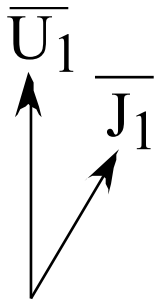
Une charge triphasée est constituée de trois éléments identiques, que l'on peut brancher sur chaque tension simple en étoile.



ou sur chaque tension composée en triangle :

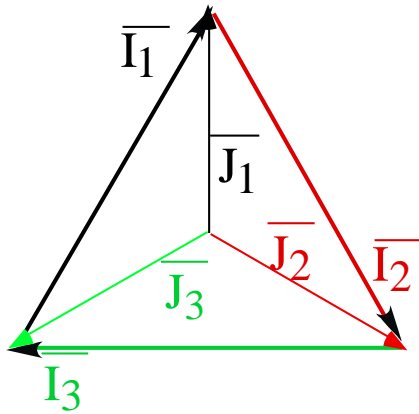






même chose pour  $\bar{U}_2, \bar{J}_2$  et  $\bar{U}_3, \bar{J}_3$

donc



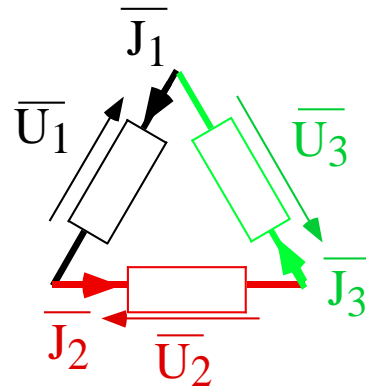
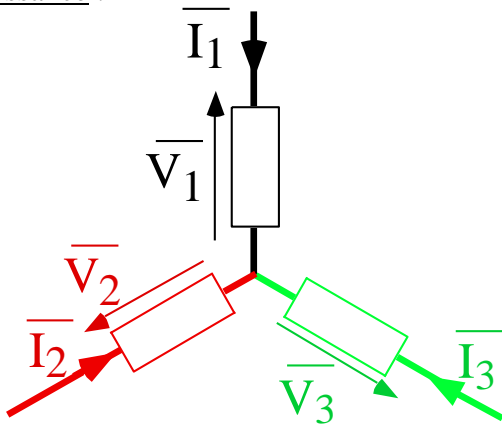
$$\bar{I}_1 = \bar{J}_1 - \bar{J}_3$$

$$\bar{I}_2 = \bar{J}_2 - \bar{J}_1$$

$$\bar{I}_3 = \bar{J}_3 - \bar{J}_2$$

$$\Rightarrow \boxed{I = J \sqrt{3}}$$

Puissance :



$$P = V_1 I_1 \cos\varphi_1 + V_2 I_2 \cos\varphi_2 + V_3 I_3 \cos\varphi_3$$

$$V_1 = V_2 = V_3 = V$$

$$I_1 = I_2 = I_3 = I$$

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi$$

$$P = 3 V I \cos\varphi$$

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

$$P = U_1 J_1 \cos\varphi_1 + U_2 J_2 \cos\varphi_2 + U_3 J_3 \cos\varphi_3$$

$$U_1 = U_2 = U_3 = U$$

$$J_1 = J_2 = J_3 = J$$

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi$$

$$P = 3 U J \cos\varphi$$

$$I = \sqrt{3} J$$

$$\boxed{P = \sqrt{3} U I \cos\varphi}$$

U et I grandeurs externes.

De même, on peut définir une puissance apparente :

$$S = 3 V I$$

$$S = 3 U J$$

$$\boxed{S = \sqrt{3} U I}$$

et un facteur de puissance :

$$\boxed{f_P = \frac{P}{S} = \cos\varphi}$$

### Avantages du triphasé :

La puissance instantanée, absorbée par un récepteur triphasé, est la somme des puissances absorbées par chaque élément (phase) du récepteur :

$$p(t) = p_1(t) + p_2(t) + p_3(t)$$

si  $v_1(t) = V\sqrt{2} \cos \omega t$

$$v_2(t) = V\sqrt{2} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$v_3(t) = V\sqrt{2} \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

et  $i_1(t) = I\sqrt{2} \cos(\omega t - \varphi)$

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

$$i_3(t) = I\sqrt{2} \cos\left(\omega t - \varphi - \frac{4\pi}{3}\right)$$

$$p(t) = v_1(t) i_1(t) + v_2(t) i_2(t) + v_3(t) i_3(t)$$

$$p(t) = VI \cos \varphi + VI \cos(2\omega t - \varphi)$$

$$+ VI \cos \varphi + VI \cos\left(2\omega t - \varphi - \frac{4\pi}{3}\right)$$

$$+ VI \cos \varphi + VI \cos\left(2\omega t - \varphi - \frac{8\pi}{3}\right)$$

$$p(t) = 3 VI \cos \varphi + 0$$

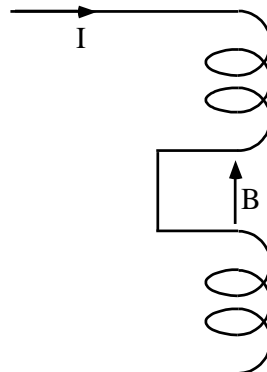
$$p(t) = P = \text{puissance moyenne}$$

La puissance instantanée est constante et égale à la puissance moyenne.

⇒ □ Dans une machine électrique, si on absorbe une puissance constante, on peut espérer fournir une puissance constante, donc si :  $\Omega = \text{constante} \Rightarrow C = \text{constante}$

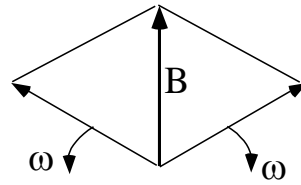
sinon (machine monophasée), puissance variable en fonction du temps ⇒ □ C variable en fonction du temps ⇒ problèmes mécaniques

### Création d'un champ tournant :

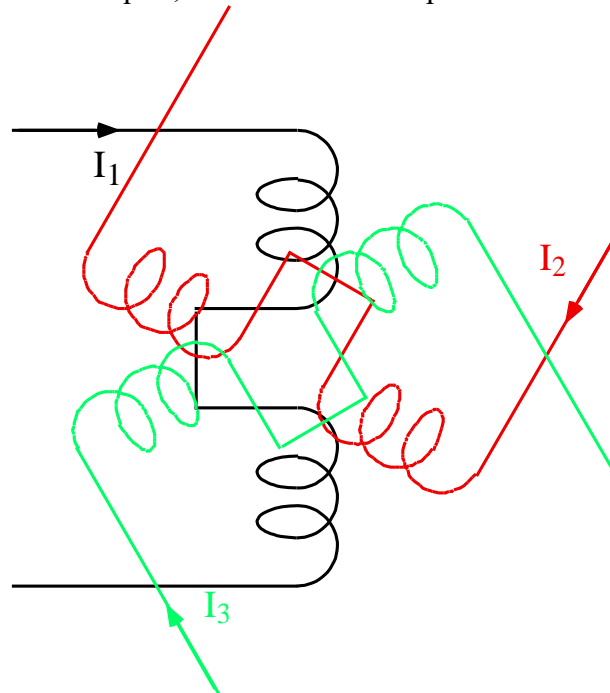


I alternatif sinusoïdal ⇒ □ champ magnétique ⇒ induction B alternative sinusoïdale  
B pulsante dans l'axe de la bobine

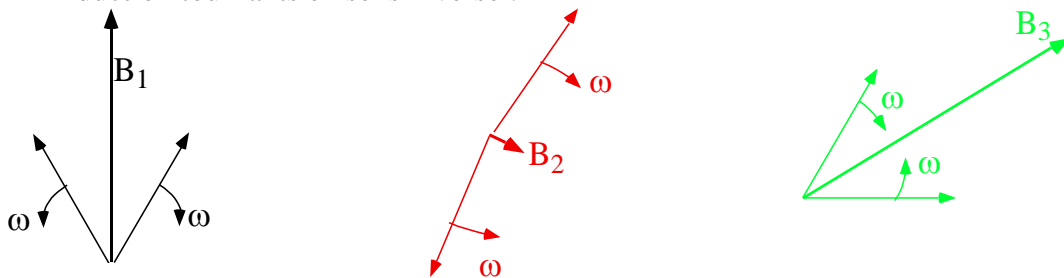
On peut décomposer cette induction en deux inductions tournantes en sens inverse à la vitesse  $\omega$  :



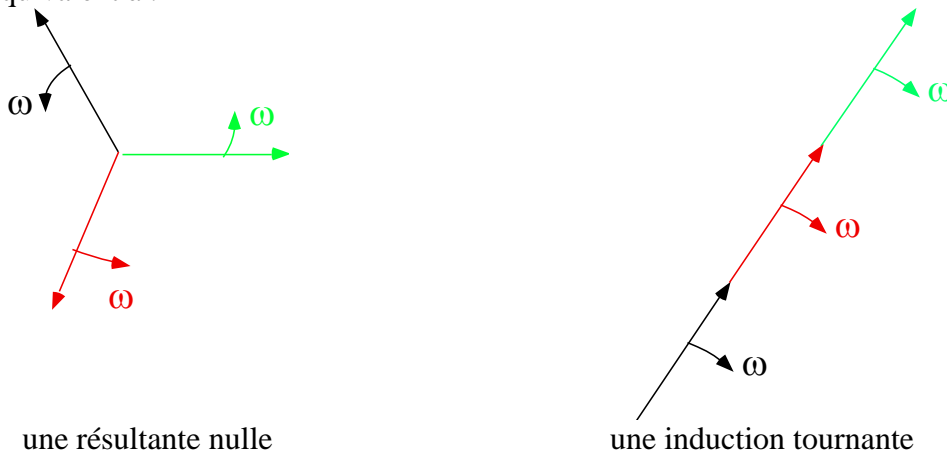
Si on place trois bobines identiques, décalées dans l'espace de  $2\pi/3$ .



Ces bobines sont parcourues par trois courants d'un système triphasé ; elles créent trois couples d'induction tournants en sens inverse :



Ce qui est équivalent à :



# Chapitre 6. ELECTROMAGNETISME

## 1. MAGNETISME

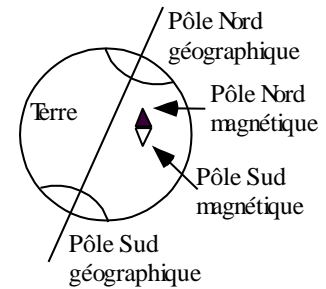
Le magnétisme est un phénomène fondamental dans les machines électriques.

Vous savez que les aimants ont la propriété d'attirer le fer.

Il existe des aimants naturels, qui possèdent cette propriété, qu'ils sont en mesure de communiquer à des morceaux d'acier, qui deviennent aussi des aimants que nous désignerons par aimants artificiels.

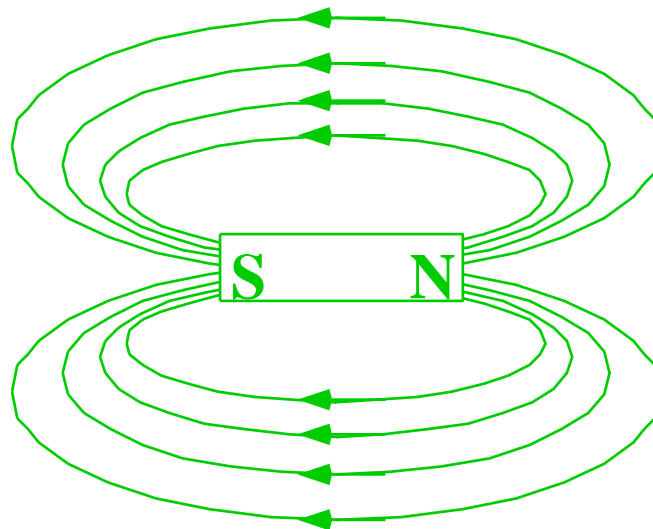
Si l'on plonge un barreau aimanté dans de la limaille de fer, les particules de limaille se collent sur le barreau, mais surtout aux extrémités. Ces extrémités, qui possèdent des propriétés magnétiques plus fortes, sont appelées : " pôles ".

Ces deux extrémités ne sont pas identiques, car si nous laissons, libre de tout mouvement, un aimant, il s'oriente de lui-même dans la direction Nord-Sud géographique. C'est toujours la même extrémité qui est dirigée vers le Nord : nous l'appellerons : " pôle Nord ", l'autre sera le " pôle Sud ".



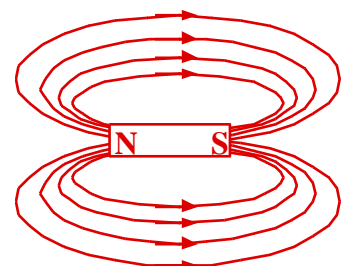
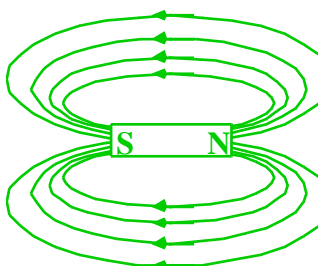
Quand nous approchons les pôles de deux aimants, nous constatons que si les pôles sont de noms contraires s'attirent, les pôles de même nom se repoussent.

Nous pouvons visualiser l'influence d'un aimant dans l'espace environnant, en traçant l'orientation d'une boussole approchée de cet aimant. Ce sont les " lignes de force ".

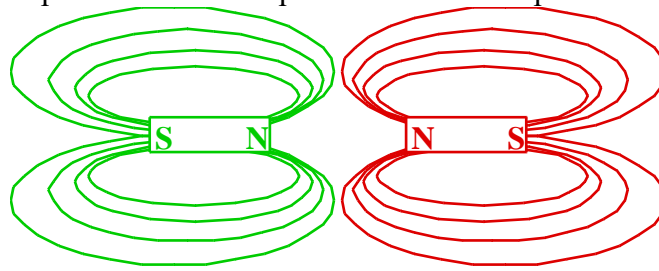


Par convention, on donne, à ces lignes, l'orientation du pôle Nord au pôle Sud, à l'extérieur de l'aimant.

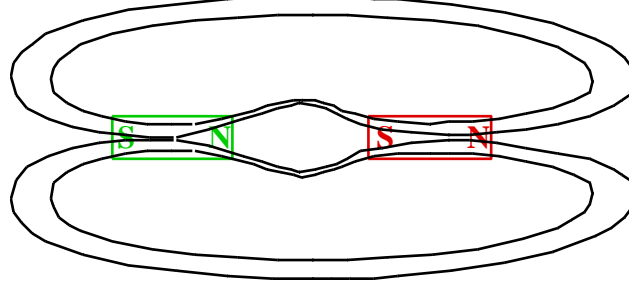
Voici deux aimants :



Si nous les approchons, nous constatons une déformation des lignes de force, de telle sorte qu'elles ne se coupent (croisent) jamais, permettant de comprendre l'effet de répulsion.



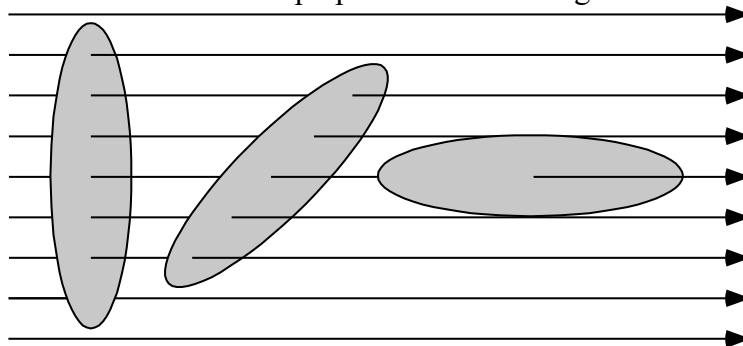
et, de même, pour l'attraction.



Le flux magnétique, à travers une surface, est l'ensemble des lignes de force, qui traversent cette surface.

Ce flux est d'autant plus grand que :

- la surface est grande ;
- les lignes de force sont serrées ;
- l'orientation de la surface est perpendiculaire aux lignes de force.



Ce flux magnétique s'exprime en Weber (Wb).

La densité de flux magnétique, appelée " induction magnétique ", permet de traduire le fait que les lignes de champ soient plus ou moins rapprochées.

Cette induction magnétique s'exprime en Tesla (T) et 1 T vaut 1 Wb par m<sup>2</sup> :

$$1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/ m}^2$$

Exemple :

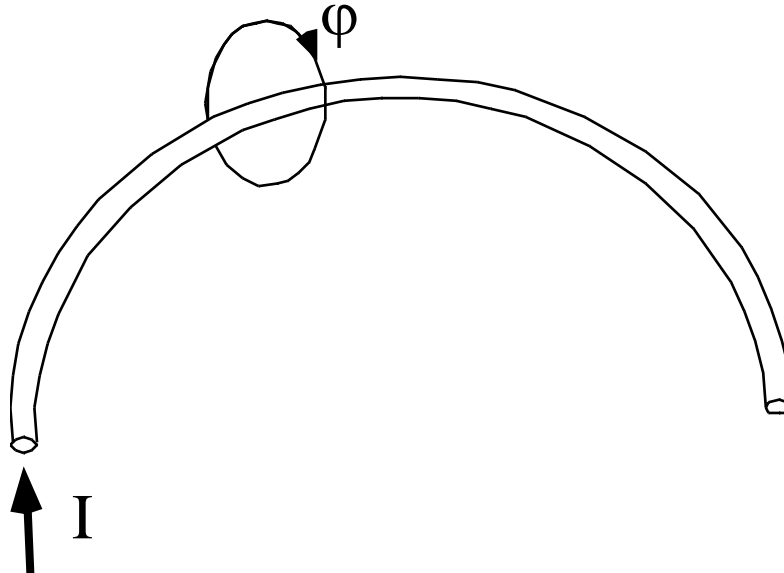
Induction magnétique du champ magnétique terrestre :	25 à 50 μT
Induction magnétique maximum obtenue en recherche avec matériaux spéciaux :	10 T
Induction magnétique maximum dans une machine électrique :	< 2 T

## 2. Courants électriques et champs magnétiques

Si on déplace une boussole le long d'un fil parcouru par un courant, l'aiguille s'oriente perpendiculairement au fil.

Si on change le sens de parcours du courant, l'aiguille change de sens et, de même, si on place la boussole au-dessus ou au-dessous du fil.

Si le courant est annulé, la boussole reprend son orientation normale dans la direction du champ terrestre.



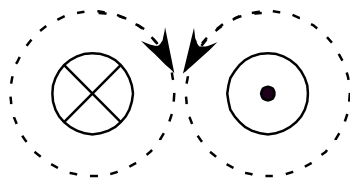
lignes de champ concentriques autour d'un conducteur parcouru par un courant I

L'induction magnétique (densité de flux) décroît au fur et à mesure que l'on s'éloigne du conducteur.

Champ créé par

<p>plusieurs conducteurs</p> <p>100 conducteurs avec 5 A</p>		<p>ou un seul conducteur</p> <p>1 conducteur avec 500 A</p>
<p>Champ identique si</p> <p>le produit nombre de conducteurs . courant (N . I) est identique</p>		

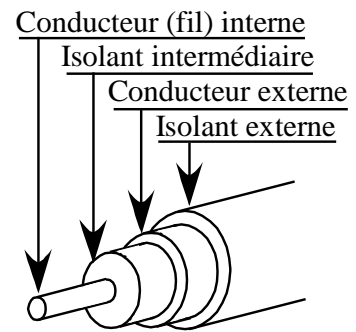
⇒ □ 2 conducteurs voisins, parcourus par le même courant en sens contraire, produisent un champ résultant très faible



Champ négligeable

⇒ application : câble co-axial

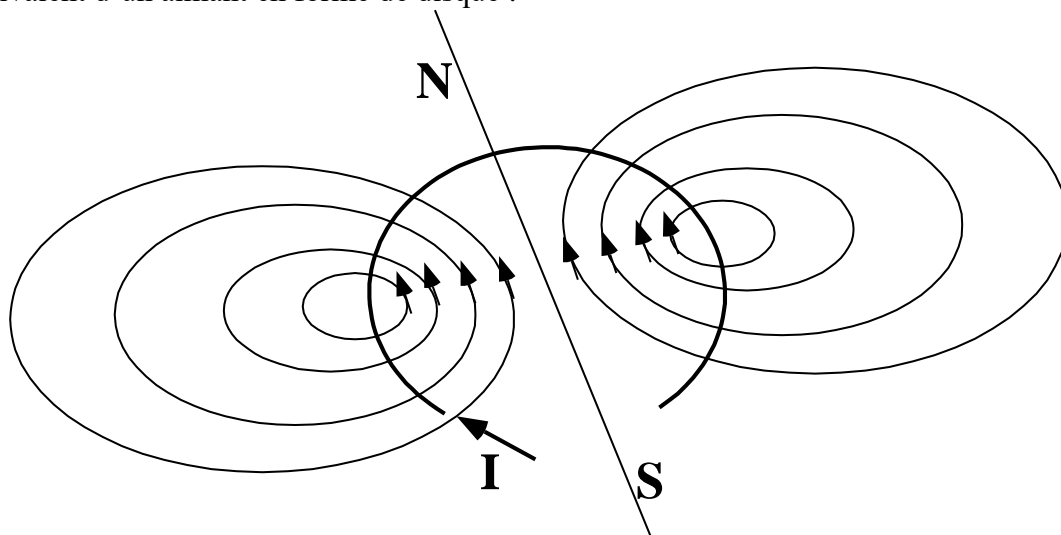
= 1 conducteur central + 1 conducteur de retour cylindrique externe



Le champ externe, créé par ce câble, est nul ;(mais il existe un champ entre les 2 conducteurs) : ceci est utilisé sur les câbles de soudure à l'arc, pour éviter qu'ils se collent sur les pièces métalliques, ou en haute fréquence, pour éviter les interférences électromagnétiques entre circuits voisins.

## 2.1. Spire, bobine et solénoïde

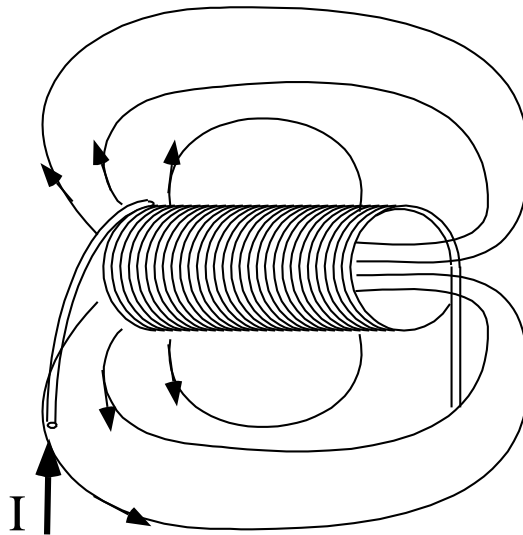
Si l'on réalise une spire circulaire avec notre fil parcouru par le courant  $I$ , on crée ainsi l'équivalent d'un aimant en forme de disque :



Le champ créé est identique, que nous ayons :

- 1 spire parcourue par 500 A,
- ou 1 bobine de 100 spires parcourues par 5 A.

Si nous bobinons les spires régulièrement, pour former une bobine longue, nous obtenons, en faisant circuler un courant dans cette bobine, la création d'un champ magnétique similaire à celui produit par un barreau aimanté.



## 2.2. Force magnéto-motrice

Que la bobine ait une spire et soit parcourue par 10 A, ou qu'elle ait 10 spires et soit parcourue par 1 A, est identique d'un point de vue magnétique.

Nous définissons la force magnéto-motrice (FMM), comme le produit du courant par le nombre de spires :

$$\begin{aligned} \text{FMM} &= N \cdot I = [\text{A}] \text{ ampère} \\ &= [\text{At}] \text{ ampère-tour pour qu'il n'y ait pas d'erreur de} \end{aligned}$$

confusion avec les courants.

## 3. CIRCUITS MAGNETIQUES

Si nous désirons créer, avec un solénoïde, un champ d'intensité identique à celui que nous aurions avec un aimant permanent, il nous faudrait une FMM très intense. Si nous plaçons un noyau en fer à l'intérieur du solénoïde, l'induction magnétique augmente.

Donc, certains matériaux concentrent les lignes de force.

Un circuit magnétique est un circuit fermé, constitué d'un assemblage d'éléments ferromagnétiques ou non.

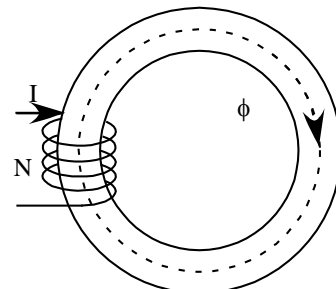
Considérons un circuit simple, constitué d'un seul matériau. Sur ce circuit, une bobine est parcouru par un courant ; nous avons une force magnéto-motrice de  $NI$ .

Dans le circuit magnétique, circule un flux magnétique  $\Phi$ .

Par analogie avec les circuits électriques, nous pouvons écrire la relation suivante :

$$NI = \mathcal{R} \cdot \Phi$$

avec  $NI$  = la force magnétomotrice (FMM)  
 $\Phi$  = le flux magnétique dans le circuit  
 $\mathcal{R}$  = la réluctance du circuit



La loi d'Ampère :



$$H \cdot l = N I$$

permet de définir le champ magnétique  $H$  (c'est la force magnéto-motrice par unité de longueur). Il s'exprime en A/m (ampère par mètre).

Pour un matériau donné, le champ magnétique  $H$  et l'induction magnétique  $B$  sont liés par la relation :

$$B = \mu \cdot H$$

avec  $\mu$  = perméabilité du matériau

Dans le vide, ce paramètre est une constante :

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ en H/m (en Henry par mètre)}$$

c'est une constante caractéristique et l'on s'en sert pour caractériser les autres matériaux, par leur perméabilité relative (par rapport au vide) :

$$B = \mu_0 \mu_r H$$

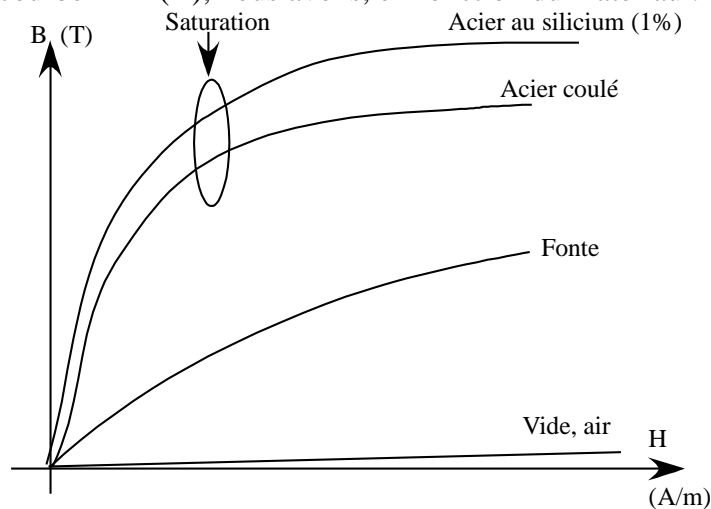
avec  $\mu_r$  = perméabilité relative (sans dimension)

$\mu_r = 1$  pour le vide, l'air, le bois, ...

$\mu_r = 500$  à  $10000$  pour les matériaux ferromagnétiques (~2000 pour le fer silicium)

Mais, cette perméabilité relative n'est pas une constante, elle dépend, en particulier, de l'induction dans le matériau. Nous sommes en présence d'une non-linéarité.

Si nous traçons la courbe  $B = f(H)$ , nous avons, en fonction du matériau :



Donc, des relations précédentes, nous tirons une relation similaire à celle donnant la résistance électrique :

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu S}$$

avec  $\mathcal{R}$  = la réluctance du circuit magnétique

$\mu$  = la perméabilité magnétique du circuit

$l$  = la longueur du circuit

$S$  = la section du circuit

Cette relation est obtenue en combinant les différentes relations :

$$NI = \mathcal{R} \Phi$$

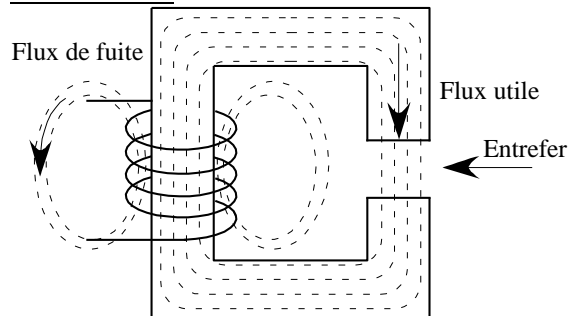
$$\Phi = B S$$

$$NI = H l$$

$$B = \mu_0 \mu_r H$$

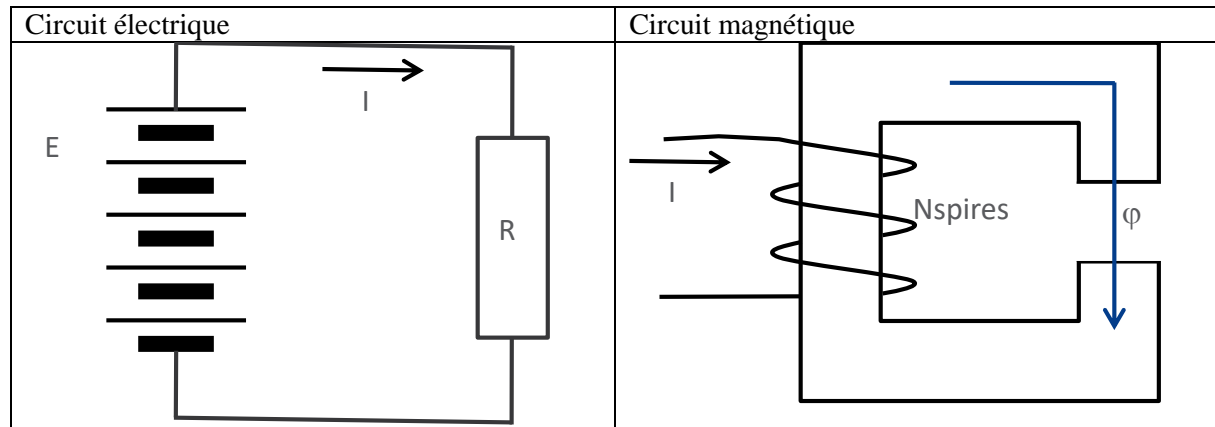
La résolution des circuits magnétiques est donc similaire à celle des circuits électriques. La difficulté réside dans la non-linéarité introduite par la variation de  $\mu$  ( $\mu_r$ ).

Flux de fuite :



Les matériaux ferro-magnétiques ont tendance à canaliser les lignes de champ, mais les circuits industriels sont à la limite de la saturation, et certaines lignes se reformeront sans passer par la partie active du circuit. Elles sont appelées : “ lignes de fuite ”.

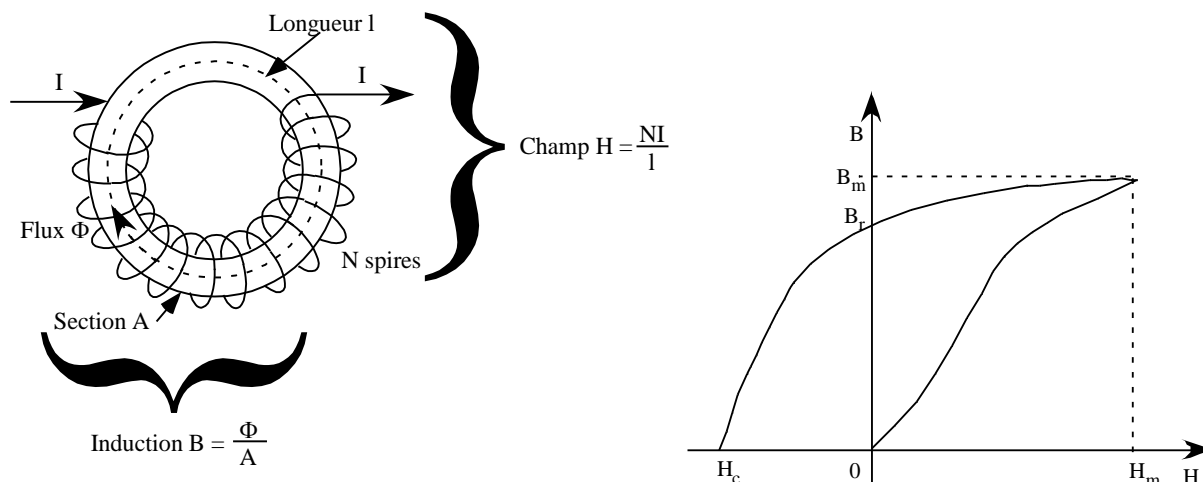
### Analogie circuits électriques-circuits magnétiques



Force électro-motrice (fem) E	Source	Force magnéto-motrice (fmm) F = NI
Courant I	Circulation	Flux $\phi$
Résistance $R = \frac{\rho l}{A} = \frac{l}{\gamma A}$	Impédance	Réductance $\mathcal{R} = \frac{\nu l}{A} = \frac{l}{\mu A}$
$E = R I$	Loi d'Ohm	$F = \mathcal{R} \phi$
$\varepsilon = \frac{E}{l}$	Gradient de potentiel	$H = \frac{\mathcal{F}}{l} = \frac{NI}{l}$
$E_{ab} = R_{ab} \cdot I_{ab}$	Chute de potentiel	$U_{ab} = \mathcal{R}_{ab} \cdot \phi_{ab}$
$J = \frac{I}{A} = \frac{E}{AR}$ $= \frac{\varepsilon l}{A \rho l / A} = \frac{\varepsilon}{\rho}$	Densité de courant et de flux	$B = \frac{\phi}{A} = \frac{F}{\mathcal{R}A}$ $= \frac{Hl}{A l / \mu A} = \mu H$

#### 4. HYSTERESIS ET AIMANTS PERMANENTS

Nous avons vu, dans le paragraphe précédent, que la perméabilité d'un matériau n'est pas linéaire. Si nous prenons un tore, sur lequel nous bobinons des spires, nous allons pouvoir faire varier le champ magnétique  $H$ , (en faisant varier le courant  $I$  dans le bobinage) et mesurer l'induction  $B$  dans le matériau (supposons que l'on puisse).



En augmentant le courant  $I$  de 0 à  $I_m$ , nous parcourons la courbe de 0,0 à  $H_m, B_m$ . Si le courant  $I$  décroît à partir de ce point jusqu'à 0, le champ  $H$  décroît de  $H_m$  à 0, mais le flux et l'induction décroissent plus lentement, en suivant une courbe située au-dessus de la précédente.

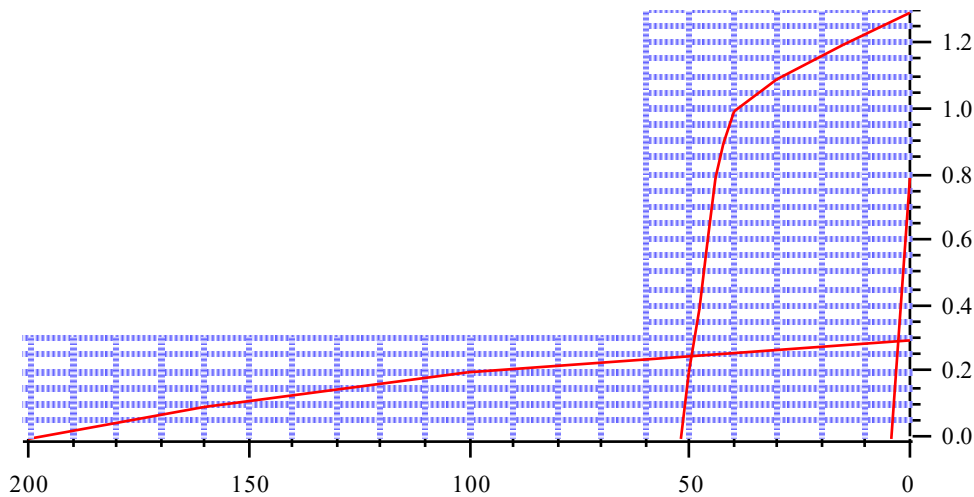
Quand  $I$  (et  $H$ ) vaut zéro, l'induction (et le flux) vaut encore  $B_r$ , induction rémanente.

Pour annuler le champ  $B$  dans le circuit, il faut faire circuler un courant  $I$ , en sens opposé au précédent (un courant négatif, donc qui crée un champ magnétique  $H$  négatif également).

La valeur du champ, qui annule l'induction, est appelée : " champ coercitif " ( $H_c$ ).

C'est grâce à cette propriété des matériaux, que l'on réalise des aimants permanents.

	Induction Rémanente teslas	Champ Coercitif kA/m	Produit Energétique kJ/m <sup>3</sup>	Point de Curie °C
Alnico V	1,3	52	40	860
Acier au carbone	0,85	4	1,2	800
Acier pour électro-aimant	0,7	0,06	0,015	800
Acier au silicium pour transformateur	1,3	0,008	0,005	730
Samarium-Cobalt SmCo	1,05	720	225	
fer Néodynebore	1,3	1200	360	310



Nous avons vu que nous pouvions obtenir un flux dans un matériau, (par exemple : notre tore), en l'absence de tout courant. Mais avoir un flux dans cet élément torique n'est pas très utile, s'il n'y a pas un entrefer, où nous puissions accéder à ce flux.

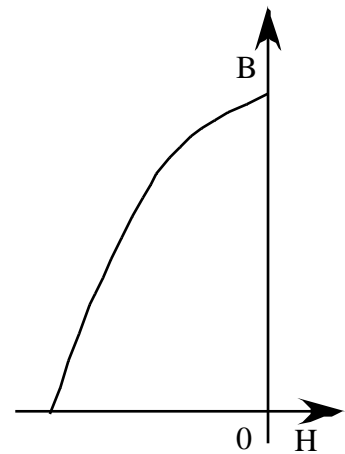
Que se passe-t-il donc quand nous plaçons un entrefer dans notre circuit ?

Un entrefer correspond à une réluctance comme :

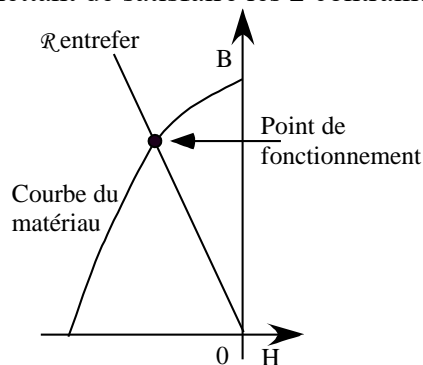
$$\mathcal{R} = \frac{1}{\mu_0} \frac{l}{S}$$

et impose une relation entre les grandeurs B et H.

Les grandeurs doivent satisfaire le comportement du matériau  $B = f(H)$  :

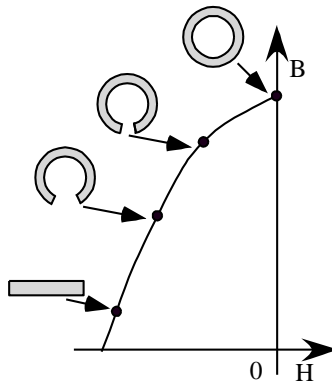


Nous avons donc les grandeurs dans le circuit magnétique, qui s'établissent à un niveau permettant de satisfaire les 2 contraintes ci-dessus.

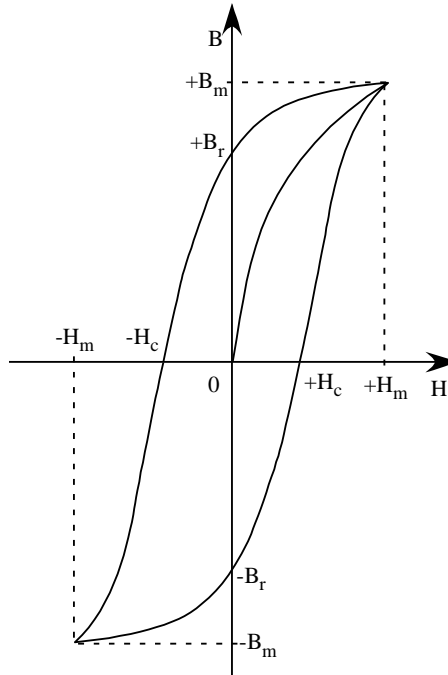


Ainsi, au fur et à mesure que l'entrefer augmente, l'induction B diminue et le champ H augmente, en suivant la courbe du matériau.

Notre matériau (aimant permanent) impose un champ H comme une bobine. Il se comporte comme une force magnéto-motrice (FMM).



Sur notre circuit torique, si nous poursuivons l'exploration de la réponse  $B = f(h)$  de notre matériau, en augmentant (en sens négatif) la valeur du courant, puis en la diminuant, l'inversant et l'augmentant, pour revenir à  $H_m$ , nous obtenons une courbe comme suit :



C'est le cycle d'hystérésis du matériau.

Dans une application à courant alternatif, par la variation du courant, ce cycle est parcouru à chaque période.

Cette réponse du matériau correspond à un positionnement des aimants élémentaires, constituant la matière (les domaines magnétiques). Quand on parcourt un cycle, ces aimants élémentaires sont obligés de se tourner, pour s'orienter, dans le sens du champ.

Cette rotation consomme une certaine quantité d'énergie, c'est ce que l'on appelle " les pertes par hystérésis ".

Nous pourrions montrer que ces pertes sont proportionnelles à la surface du cycle.

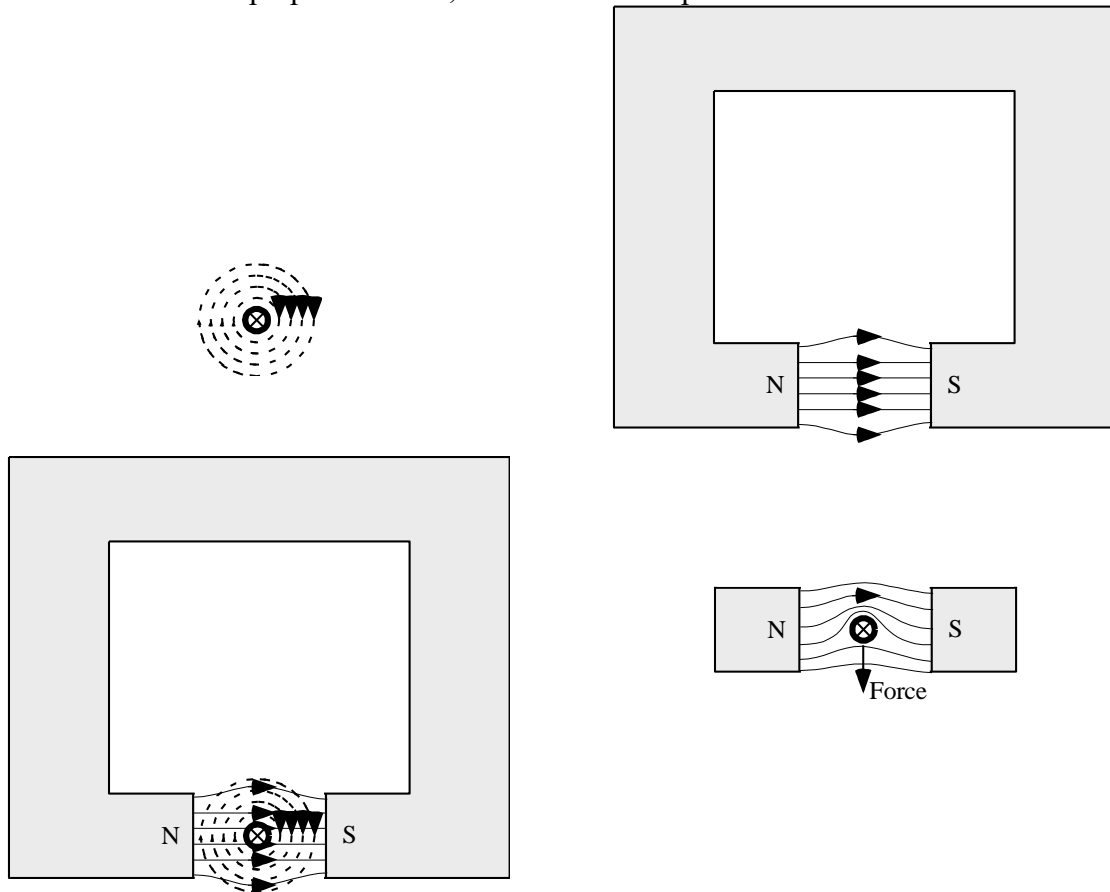
En effet, le produit  $BH$  a pour dimension  $J/m^3$ .

$$B \cdot H = [T] \cdot [A/m] = [Wb/m^2] \cdot [A/m] = [V] \cdot [s] \cdot [A] / [m^3] = [W] \cdot [s] / [m^3] = [J] / [m^3]$$

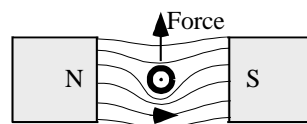
## 5. FORCE ELECTROMAGNETIQUE

Nous avons vu qu'un conducteur, parcouru par un courant, crée un champ magnétique autour de lui.

Si nous le plaçons dans l'entrefer d'un aimant permanent, nous constatons que le conducteur est soumis à une force perpendiculaire, à la fois au champ et au courant.



Si on inverse le courant, on inverse le sens de la force :



Si on admet que les lignes de force (de champ) se comportent comme des fils élastiques, qui se repoussent, on sent bien qu'une force va agir sur le conducteur et le sens de la force devient évident.

L'intensité de la force dépend :

- de l'intensité du courant,
- de la densité de flux magnétique (l'induction),
- de la longueur du conducteur soumise à l'induction,
- de l'orientation du conducteur dans le champ.

Elle a pour expression :

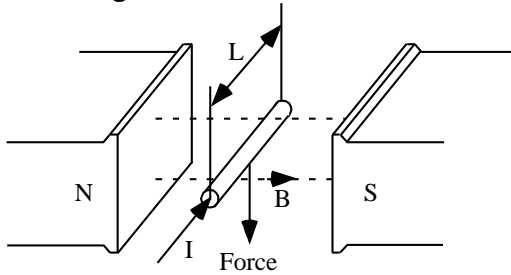
$$F = B \cdot I \cdot L \cdot \sin\alpha$$

F = force agissant sur le conducteur

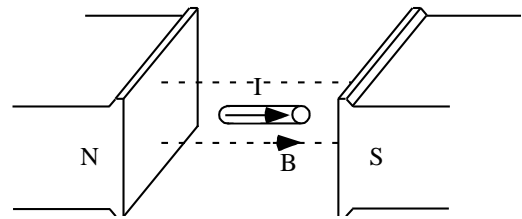
B = induction magnétique

I = courant dans le conducteur

$L$  = longueur du conducteur soumise à  $B$   
 $\alpha$  = angle entre la direction du conducteur et celle du champ



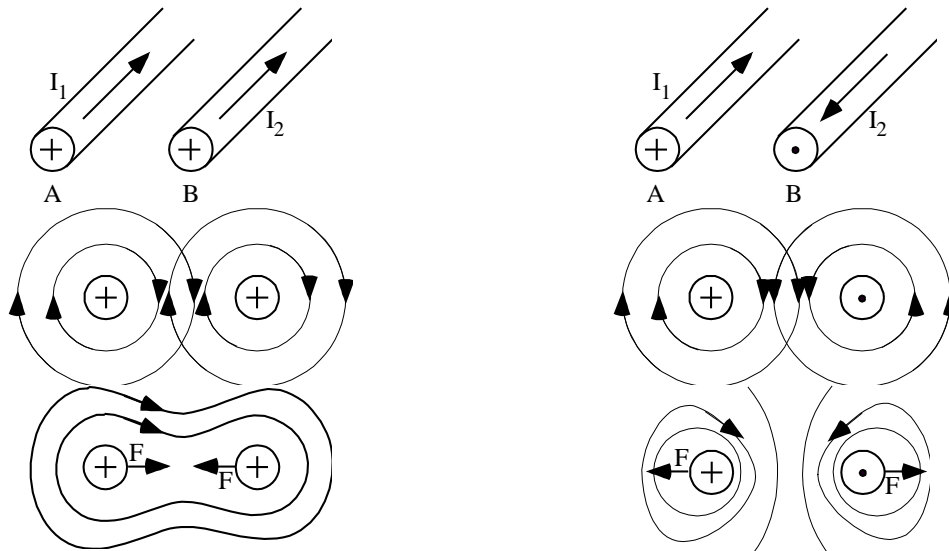
La force sur un conducteur est maximale si le conducteur est perpendiculaire au champ magnétique.



Si le conducteur est parallèle au champ magnétique, la force est nulle.

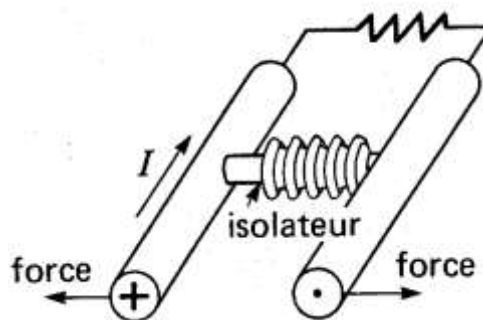
Nous savons qu'un conducteur, parcouru par un courant, crée un champ ; qu'un conducteur, parcouru par un courant soumis à un champ, subit une force.

Quand deux conducteurs, parcourus par des courants, sont proches, des forces s'appliquent sur eux :

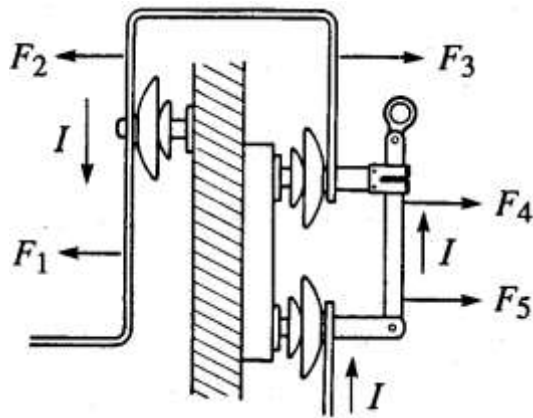


Applications :

Fixation des conducteurs d'alimentation //

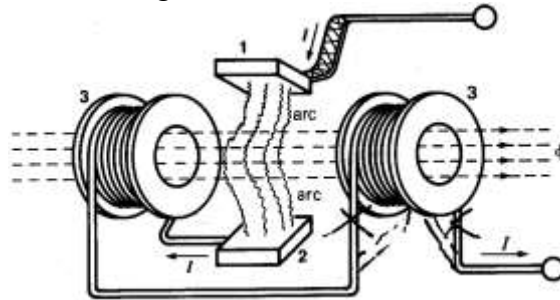


Aide à l'ouverture d'appareillage  $\Rightarrow$  disjoncteur



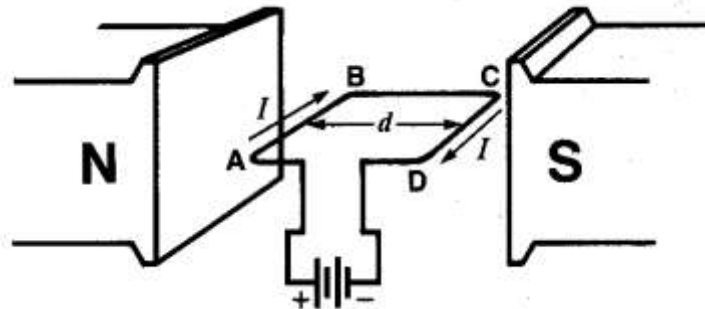
Il faut par contre empêcher l'ouverture des sectionneurs.

Soufflage d'arc dans les contacteurs



et de multiples autres

Dans le cas d'un cadre constitué de deux conducteurs //, soumis au champ magnétique d'un aimant et parcouru par un courant, grâce à une source placée entre A et D et un conducteur de fermeture BC :

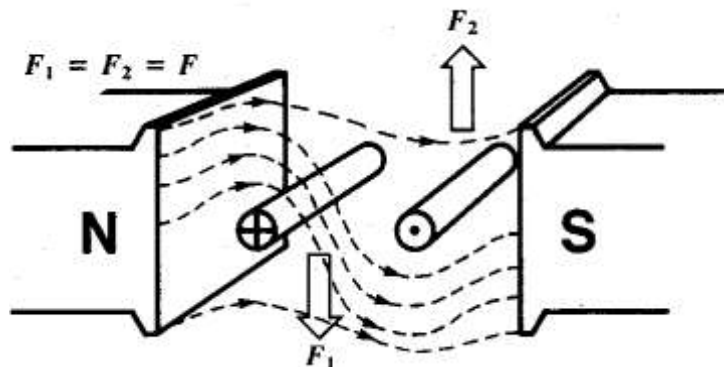


Si  $d$  est la distance séparant les 2 conducteurs AB et CD et que ceux-ci puissent tourner autour de leur axe de symétrie, situé à  $d/2$  de chacun d'eux, nous constatons que l'action du champ sur le courant crée des forces  $F_1$  et  $F_2$  en sens opposé, qui donne un couple autour de l'axe de rotation.

Ce couple vaut :  
 $C = F \cdot d$

Si notre système comporte  $N_{\text{spires}}$ , nous aurons :

$$C = N_{\text{spires}} \cdot F \cdot d$$





## 6. TENSION INDUITE DANS UN CONDUCTEUR

Si nous déplaçons, perpendiculairement, un conducteur dans un champ magnétique (en coupant les lignes de flux à angle droit), nous constatons qu'apparaît, entre les extrémités du conducteur, une tension induite, proportionnelle à :

- la longueur du conducteur soumise à B,
- l'induction magnétique,
- la vitesse de déplacement,

s'exprimant par :

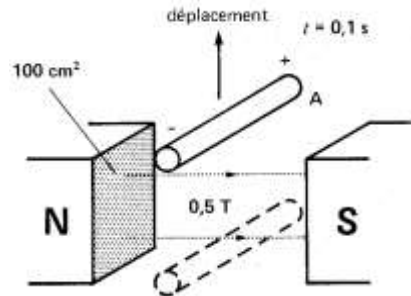
$$E = B \cdot l \cdot v$$

E = tension induite en volt

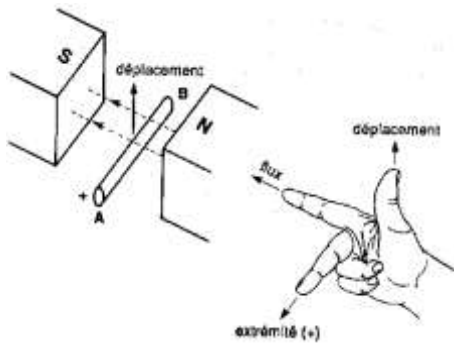
B = induction magnétique en tesla

l = longueur en mètre

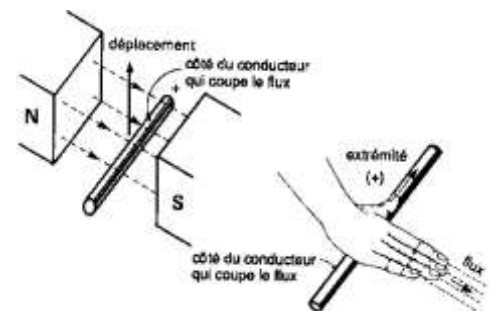
v = vitesse en mètre par seconde



Sens de la tension :



Solution plus facile si c'est B qui se déplace par rapport au conducteur =>

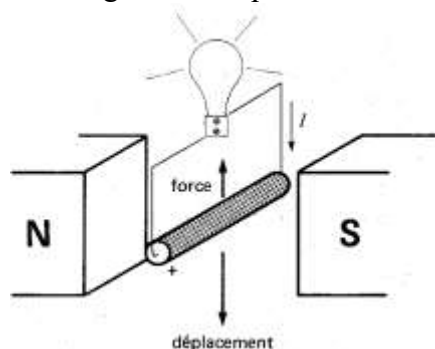


Si nous raccordons les extrémités du conducteurs aux bornes d'une résistance, la tension induite provoque la circulation d'un courant (induit aussi, mais c'est la tension qui est induite), qui crée, grâce au champ, l'apparition d'une force. Le sens de cette force s'oppose au déplacement.

déplacement . force = énergie mécanique fournie au conducteur

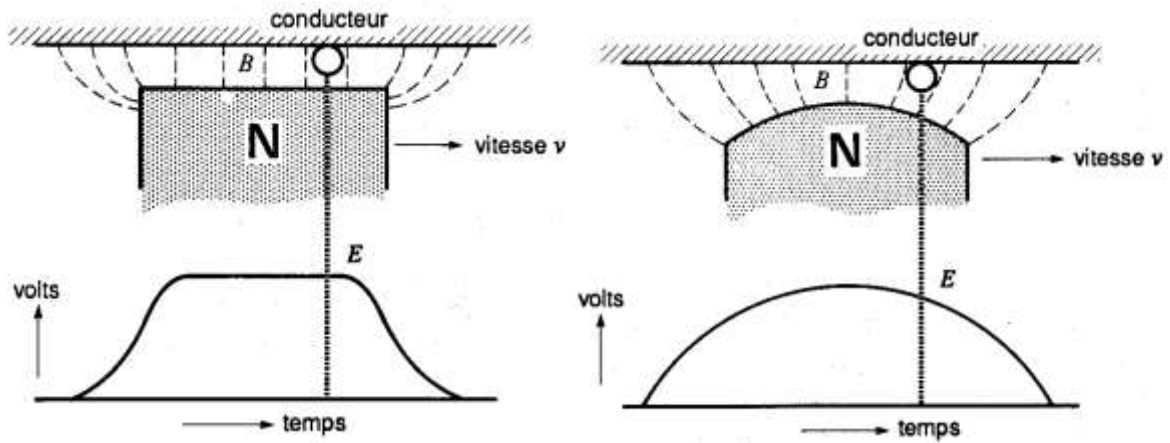
résistance . courant<sup>2</sup> = énergie électrique fournie par le conducteur

Nous venons de transformer une énergie mécanique en une énergie électrique.



La formule  $E = Blv$  donne la valeur instantanée de la tension induite.

Si nous déplaçons, à vitesse constante, un conducteur dans un entrefer, où règne un champ ayant une répartition spatiale donnée, nous obtenons une tension induite, ayant une répartition temporelle, de même allure :

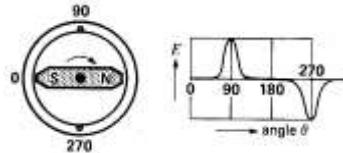


On peut déplacer le conducteur dans le champ ou déplacer le champ par rapport au conducteur.

La vitesse,  $v$ , de la formule est la vitesse relative du conducteur par rapport au champ.

Effet de la vitesse :

Si je fais tourner un barreau aimanté dans un circuit magnétique torique, portant un conducteur, la répartition du champ dans l'entrefer est :

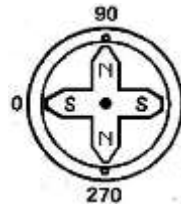


L'évolution temporelle de la tension induite est la même.

Si l'aimant fait 1 tour/seconde, la tension décrit 1 période/seconde, sa fréquence vaut 1 Hz.

Si l'aimant fait 2 tr/s  $\Rightarrow$  tension 2 périodes/s  $\Rightarrow f = 2$  Hz

Si je prends un rotor à 4 pôles : 2 N et 2 S.



Si aimant 1tr/s  $\Rightarrow$  tension 2 périodes/s  $\Rightarrow f = 2$  Hz

2 tr/s                      4 périodes/s  $\Rightarrow f = 4$  Hz

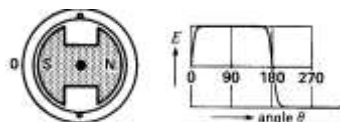
$$f = p \cdot n$$

avec  $f$  = fréquence en Hz

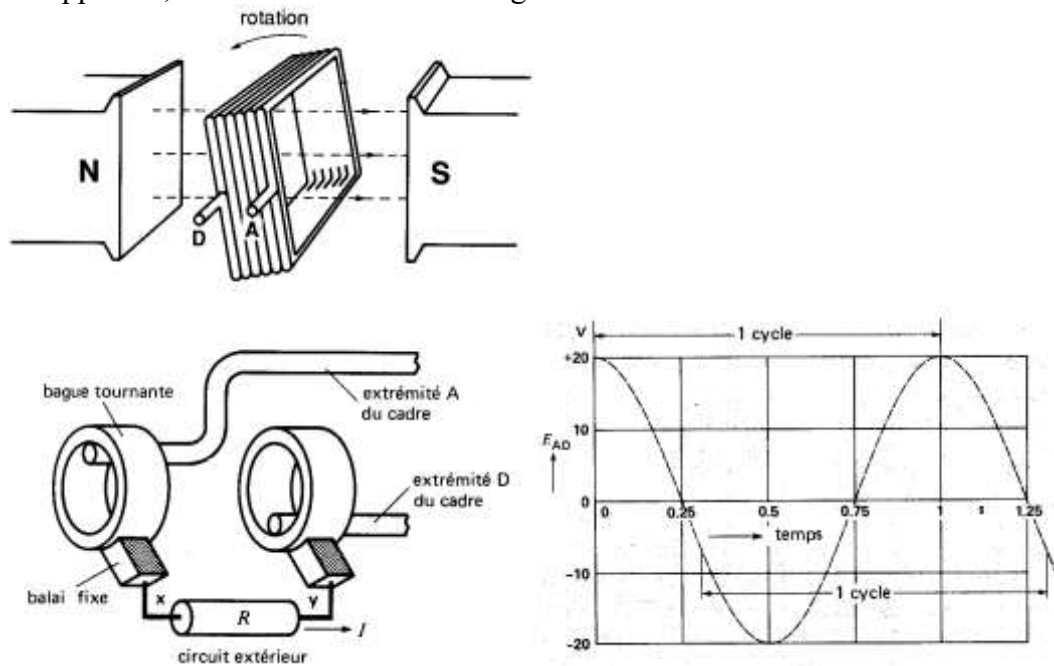
$p$  = nombre de **paires** de pôles

$n$  = vitesse en tr/s

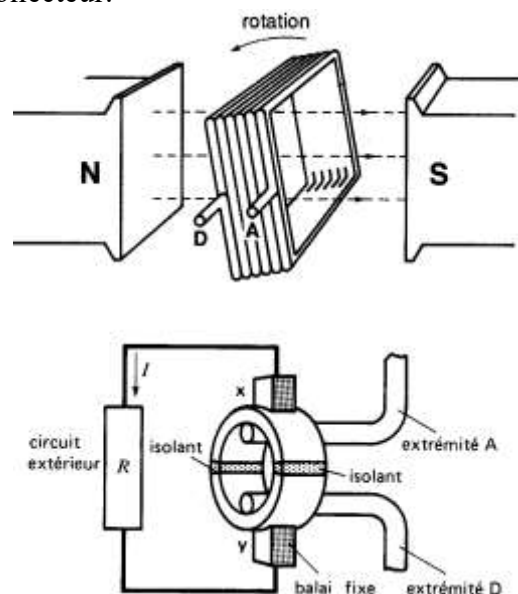
Si la forme de l'aimant change, la répartition spatiale de l'induction est modifiée et l'évolution temporelle de la tension aussi :



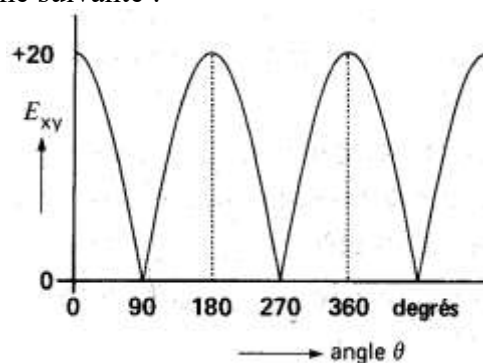
En utilisant des spires, on augmente la longueur du conducteur soumise au champ, donc la tension induite ; les conducteurs opposés sont soumis à des déplacements opposés, donc à des tensions opposées, mais leur mise en série augmente la tension totale.



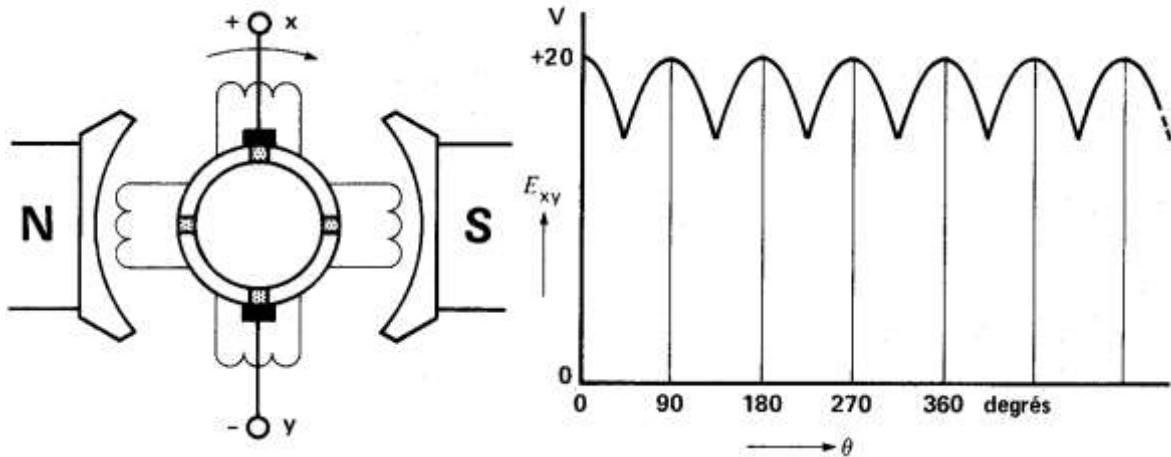
Afin d'obtenir une tension toujours positive, nous allons modifier les connexions à chaque demi-tour à l'aide d'un collecteur.



La tension obtenue a la forme suivante :



Si cette évolution temporelle fluctue trop, il faut augmenter le nombre de lames au collecteur et le nombre de bobines. C'est la génératrice à courant continu.



## 7. INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE

Ce phénomène, découvert par Faraday, est très utilisé dans les machines électriques.

Cette loi de l'électromagnétisme s'énonce par :

- si le flux, à l'intérieur d'une spire (ou boucle), varie avec le temps, une tension est induite entre ses bornes ;
- cette tension est proportionnelle au taux de variation du flux :

$$E = \frac{d\Phi}{dt}$$

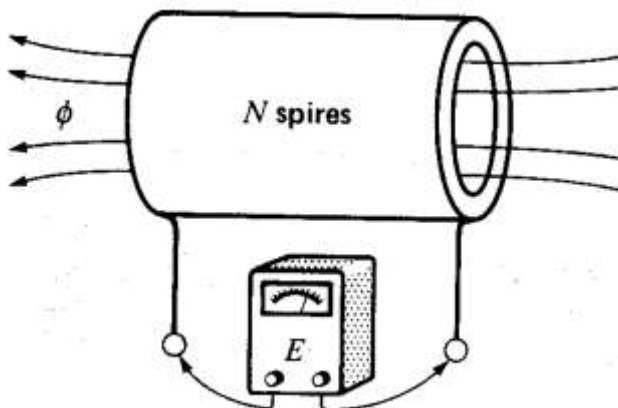
Si la variation est uniforme, on peut écrire :

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

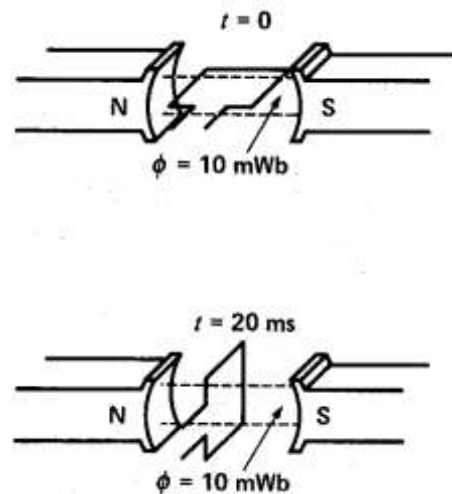
et si  $\Phi$  varie entre  $\Phi_1$  et  $\Phi_2$  :

$$E = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{\Delta t}$$

Induction dans une bobine :

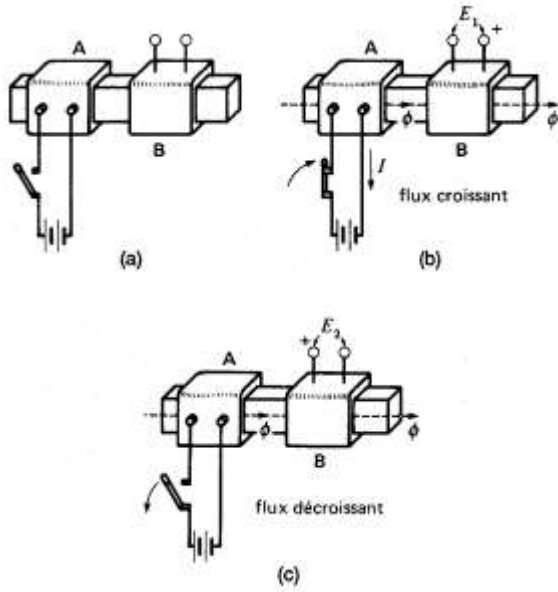


Tension induite dans un cadre :



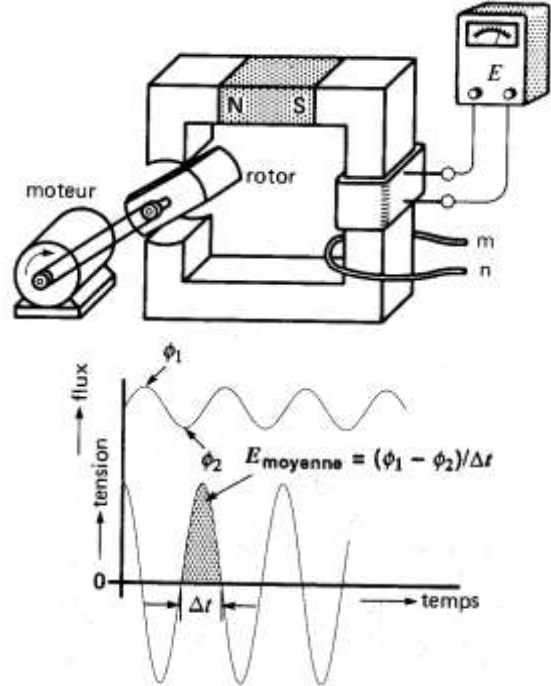
Tension précédemment calculée par :  $B l v$ ,  
mais peut être calculée par :  $\frac{d\Phi}{dt}$

Induction mutuelle :



Principe du transformateur

Variation de flux par variation de réluctance



Principe des générateurs à réluctance variable

# Chapitre 7. MACHINES ELECTRIQUES

## 1 Introduction :

### 1-1 - Limite thermique :

Nous avons jusqu'à présent, représenté une machine (mais aussi les autres parties d'une transmission électrique) par une boîte recevant une énergie du composant précédent (ou puissance) et restituant tout ou partie de cette énergie au composant suivant. La différence entre ces deux énergies étant supposée être transformée en énergie calorifique dissipée par notre machine.

Oui, la machine transforme une partie de l'énergie reçue en énergie calorifique. Mais celle-ci sert d'abord à élever la température de la machine. Dès que sa température s'élève par rapport à l'environnement, la machine peut échanger vers cet environnement une partie de l'énergie calorifique. Un corps chaud échange naturellement de la chaleur avec des corps plus froids environnants. Cet échange s'effectue à la fois par conduction (contact), convection (mouvement) et radiation. Ces trois types d'échange sont régis par des équations connues que nous pourrions résoudre. Pour simplifier, comme la température de notre machine doit rester faible, l'effet de la radiation est faible et peut être négligé en première approximation. L'effet de la conduction peut être représenté, comme son nom l'indique, par une conductance thermique. Enfin l'effet de la convection régi par des équations, à la fois de la thermodynamique et de la mécanique des fluides, peut être représenté par une conductance non linéaire, que nous allons linéariser pour le point de fonctionnement étudié.

L'échauffement d'un corps soumis à une puissance thermique produite en son sein est donc régi par l'équation :

$$P_{th} = m \cdot c \frac{d\theta}{dt} + S_r \cdot \alpha_k \cdot \theta$$

avec  $P_{th}$  = puissance thermique produite dans le corps

$m$  = masse du corps

$c$  = chaleur massique en joules par K et par kg

$S_r$  = surface d'évacuation thermique en  $m^2$

$\alpha_k$  = coef. total de transmission thermique vers l'extérieur en watts par  $m^2$  et par kelvin

$\theta$  = écart de température entre l'extérieur et le corps

dont on peut simplifier l'écriture en utilisant les relations :

$C = m \cdot c$  = capacité thermique du corps

$G = S_r \cdot \alpha_k$  = conductance thermique du corps

$$P_{th} = C \frac{d\theta}{dt} + G \theta$$

La quantité d'énergie dissipée depuis la surface du corps augmente avec l'échauffement. Si la quantité de chaleur produite reste constante, il en résulte que le premier terme correspondant à l'accroissement de température diminue avec le temps et il s'établit progressivement un équilibre entre la puissance produite et la puissance dissipée.

Celui-ci est atteint quand  $P_{th} = G \theta$  et l'échauffement est alors maximum  $\theta_M$ .

$$\theta_M = \frac{P_{th}}{G} = \frac{P_{th}}{S_r \cdot \alpha_k} = R_{th} \cdot P_{th}$$

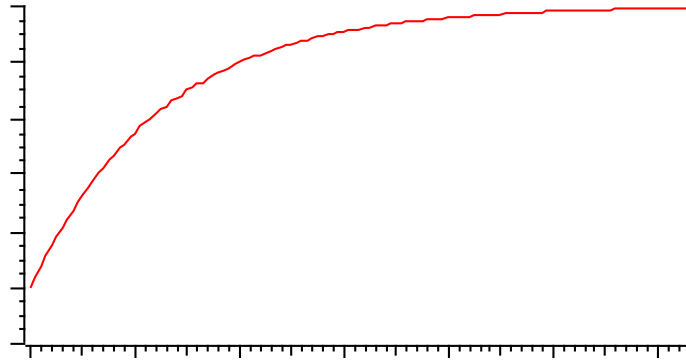
avec  $R_{th}$  = résistance thermique (inverse de la conductance)

La résolution de l'équation initiale permet d'obtenir l'évolution de l'écart de température en fonction du temps :

$$\theta = \theta_M (1 - e^{-t/\tau_t})$$

avec  $\tau_t = \frac{m \cdot c}{S_r \cdot \alpha_k} = C \cdot R_{th}$  = constante de temps thermique

L'évolution de la température du corps suit une courbe semblable à la suivante :

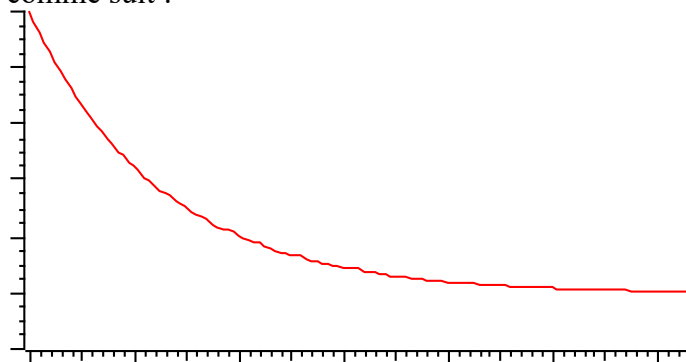


Si à l'instant  $t$  tel que  $\theta = \theta_M$ , la puissance produite devient nulle, nous pouvons écrire l'équation régissant le refroidissement du corps :

$$\theta = \theta_M e^{-t/\tau'_t}$$

avec  $\tau'_t =$  constante thermique lors du refroidissement souvent différente de  $\tau_t$  (car les conditions sont différentes machine arrêtée sans refroidissement).

La température évolue comme suit :



Dans une machine électrique, les sources de pertes calorifiques sont dues :

- aux pertes par effet Joule dans les conducteurs,
- les pertes par hystérésis et courants de Foucault dans les matériaux ferromagnétiques
- et par frottements sec et visqueux sur les parties mobiles.

Lors du fonctionnement d'une machine électrique, la puissance perdue par toutes ces pertes augmente la température de la machine pour répondre à une série d'équations similaires aux équations précédentes (équations différentielles).

Parmi ces pertes, les pertes par effet Joule sont les plus importantes, nous pouvons donc dire que l'échauffement de la machine est lié à ces pertes, et que si la puissance perdue par effet Joule augmente, la température de la machine augmente aussi.

Dans une machine électrique, il y a :

- du cuivre,
- du fer,
- des aimants,
- des isolants.

Chacun de ces éléments a une température limite de fonctionnement.

Pour le cuivre, la température limite est imposée par sa tenue mécanique et elle est la plus élevée. La température limite du fer (au sens matériaux ferromagnétiques) est imposée par la modification des caractéristiques magnétiques et est aussi importante ( $\sim 700^\circ\text{C}$ ).

Celle des aimants est imposée également par les caractéristiques magnétiques et selon les aimants, la limite est de l'ordre de  $60^\circ\text{C}$  à  $150^\circ\text{C}$ .

Les isolants sont des matériaux synthétiques et ont une température limite imposée à la fois par leur tenue mécanique et leurs caractéristiques diélectriques (propriétés d'isolation). Cette température dépend du matériau utilisé et ceux-ci sont répartis entre différentes classes dites classes d'isolation,

imposant des températures limites d'utilisation qui s'échelonnent de 120°C à 180°C pour les machines.

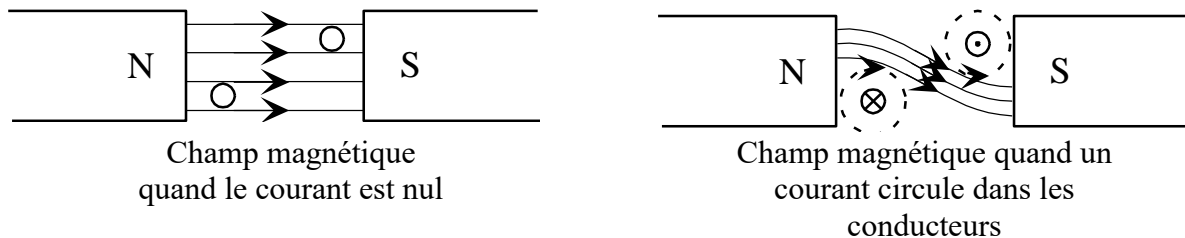
Donc, on ne peut pas augmenter la charge d'une machine sans augmenter ses pertes et ainsi augmenter sa température interne, ce qui risque de détruire certaines parties constitutives ou au moins de réduire ses performances.

En d'autres termes, les matériaux utilisés pour la réalisation d'une machine électrique imposent une température limite de fonctionnement qui limite les pertes maximales dans la machine. Ces pertes, étant pour une grande part due aux pertes joules, elles imposent un courant maximum d'utilisation permanente.

### 1-2 Limite magnétique :

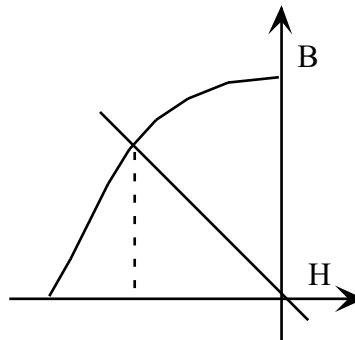
Donc un courant provoque des pertes et une élévation de température de la machine. Mais cette élévation est progressive et liée à la capacité calorifique de cette machine. Nous pourrions envisager d'augmenter le courant, donc les pertes, pendant un temps très court sans atteindre la température limite.

Dans ce cas, quel est le courant limite que nous pourrions imposer ?



Quand le courant circule dans les conducteurs, l'état magnétique du circuit est modifié. Le courant a tendance à démagnétiser le circuit.

Si l'on travaille avec un aimant permanent, il faut limiter la démagnétisation pour ne pas démagnétiser l'aimant.



Le courant maximum instantané est donc imposé par la limite magnétique de l'aimant.

S'il n'y a pas d'aimant, la magnétisation du circuit magnétique est réalisée par un électro-aimant. Cette limite magnétique est plus éloignée et surtout réversible.

Cette fois le courant maximum est limité par l'effort maximum développé sur les conducteurs.

Dans l'espace de fonctionnement de la machine, nous trouverons donc :

- une limite de fonctionnement permanent imposée par la température,
- et une limite de fonctionnement transitoire imposée par une limite magnétique.



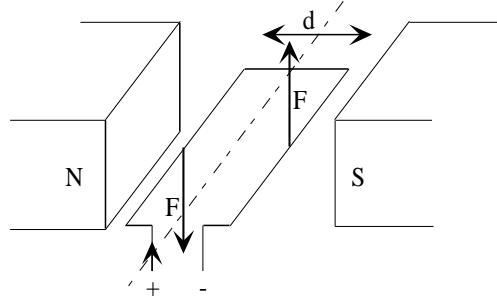
## 2 Machine à courant continu :

### 2-1 Principe de fonctionnement :

Reprenons l'exemple traité dans le § 5 "Force électromagnétique" du chapitre sur l'Electromagnétisme. Nous y avons montré que la force s'exerçant sur un conducteur, parcouru par un courant et soumis à un champ électromagnétique vaut :

$$\boxed{F = B I L} \quad (\sin \alpha)$$

Nous avons même étudié le cas d'un cadre conducteur :



Le couple s'exerçant sur le cadre vaut :

$$C = F d$$
$$C = B I L d$$

Si plusieurs (N) spires :

$$C = N B I L d$$

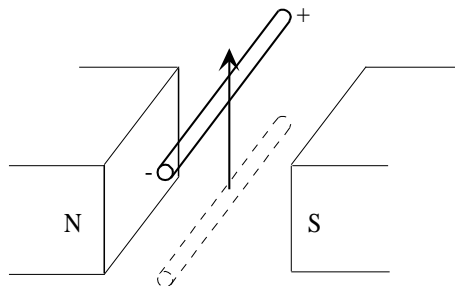
$L d =$  surface du cadre

$B L d =$  flux dans le cadre =  $\Phi$

$$C = N \Phi I$$

Donc, le couple est proportionnel au courant, qui circule dans le cadre, et au flux imposé dans l'entrefer.

Nous avons également, dans le paragraphe suivant (6. Tension induite dans un conducteur), étudié la tension induite dans un conducteur, qui se déplace dans un entrefer.

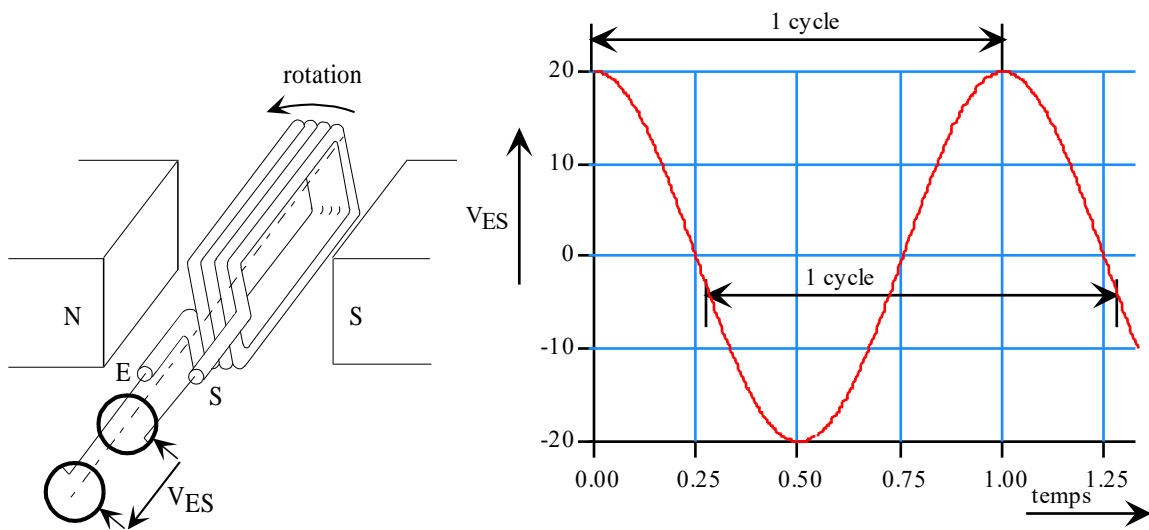


$$\boxed{E = B l v} = \frac{\Phi}{S} l v$$

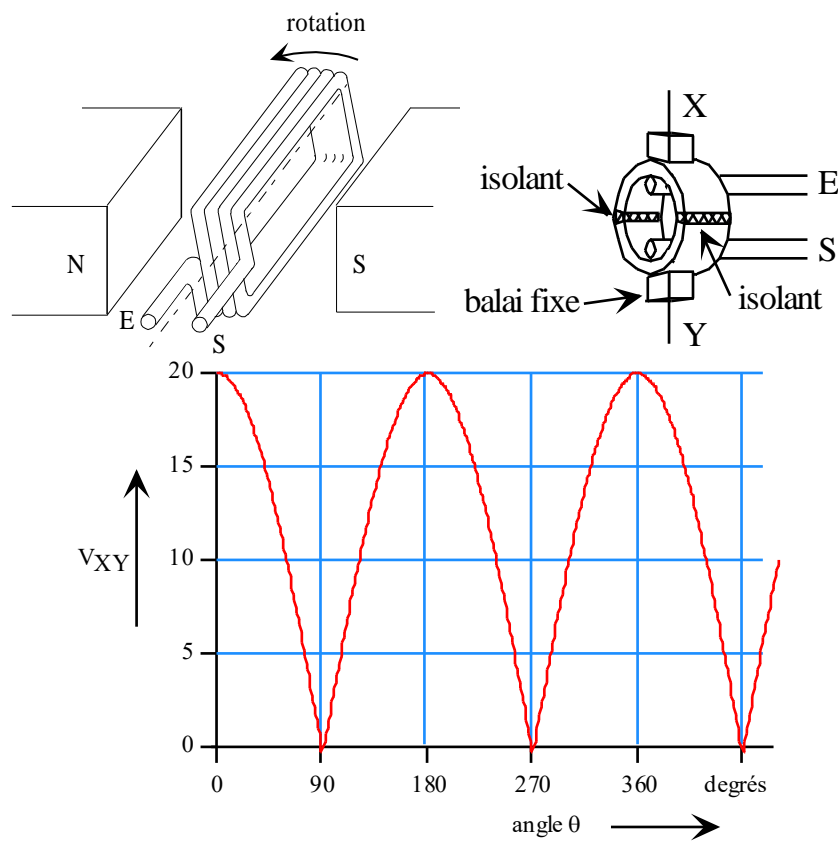
Cette tension est donc proportionnelle à la vitesse de déplacement et au flux imposé dans l'entrefer.

Si nous prenons un cadre, constitué de plusieurs spires (N spires = 2 N conducteurs), que nous faisons tourner dans l'entrefer précédent :

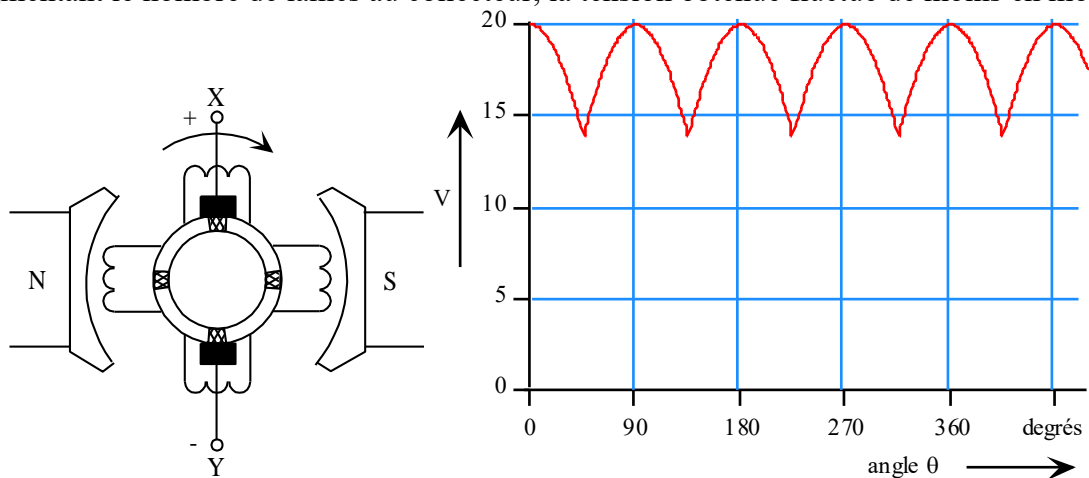
$$E = \frac{\Phi}{S} l v = \frac{\Phi l}{2 l r} v = \frac{\Phi l}{2 l r} r \Omega = \frac{\Phi}{2} \Omega = 2 N \frac{\Phi}{2} \Omega = N \Phi \Omega$$



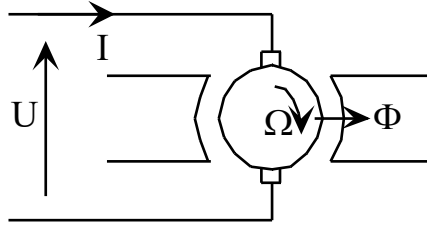
Pour obtenir une tension toujours positive, nous allons modifier les connexions, à chaque demi-tour, à l'aide d'un collecteur :



En augmentant le nombre de lames au collecteur, la tension obtenue fluctue de moins en moins.



Si nous prenons maintenant une machine à courant continu réelle, le nombre de lames est élevé (suffisamment pour que la f.e.m. soit supposée continue).



La f.e.m. est proportionnelle au flux  $\Phi$  et à la vitesse de rotation  $\Omega$ .

$$E = K \Phi \Omega$$

Le courant  $I$  circule et l'action du flux sur celui-ci crée un couple proportionnel à ce courant et à ce flux :

$$C = K \Phi I$$

Naturellement, les conducteurs, qui constituent le bobinage du rotor, ont une certaine résistance, et la circulation du courant  $I$  provoque, dans cette résistance, une chute de tension. Donc, la tension extérieure  $U$  vaut la somme de la f.e.m. induite  $E$  et de la chute de tension  $RI$  :

$$U = E + RI$$

Cette résistance, parcourue par ce courant, provoque des pertes  $RI^2$ , que nous avons intérêt à minimiser.

Ne pouvant diminuer  $I$  (imposé par le couple), il faut minimiser  $R$ .

En première approximation, on peut négliger l'influence de  $R$  et, ainsi, supposer que  $U = E$ . Donc, la tension d'alimentation  $U$ , comme  $E$ , peut être considérée proportionnelle à la vitesse de rotation et au flux dans l'entrefer.

Donc, la puissance mécanique :

$$P_u = C \Omega = K \Phi I \frac{U}{K \Phi} = U I = P_e$$

Le rendement de la machine est égal à 1 : normal, nous avons négligé les sources de pertes.

## **2.2. Caractéristiques de fonctionnement**

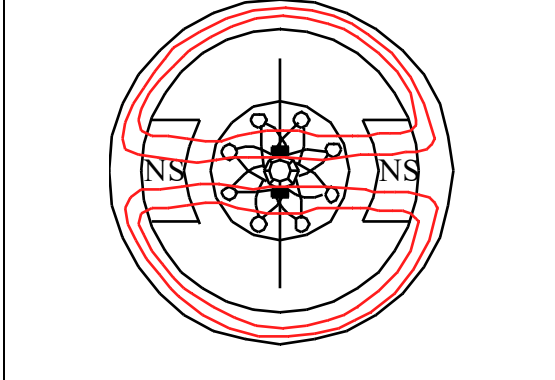
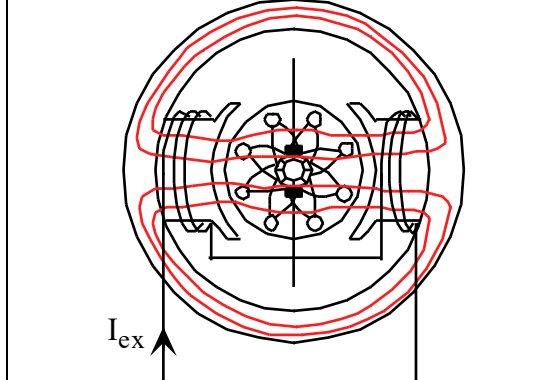
Pour tracer les caractéristiques de fonctionnement de la machine, il faut connaître le couple et la vitesse, qui dépendent du courant et de la tension, aux bornes du rotor : ce que nous venons de voir, mais il faut également connaître le flux dans l'entrefer.

Ce flux est créé par la partie fixe du moteur : le stator.

Nous devons donc la préciser.

Deux cas peuvent se présenter :

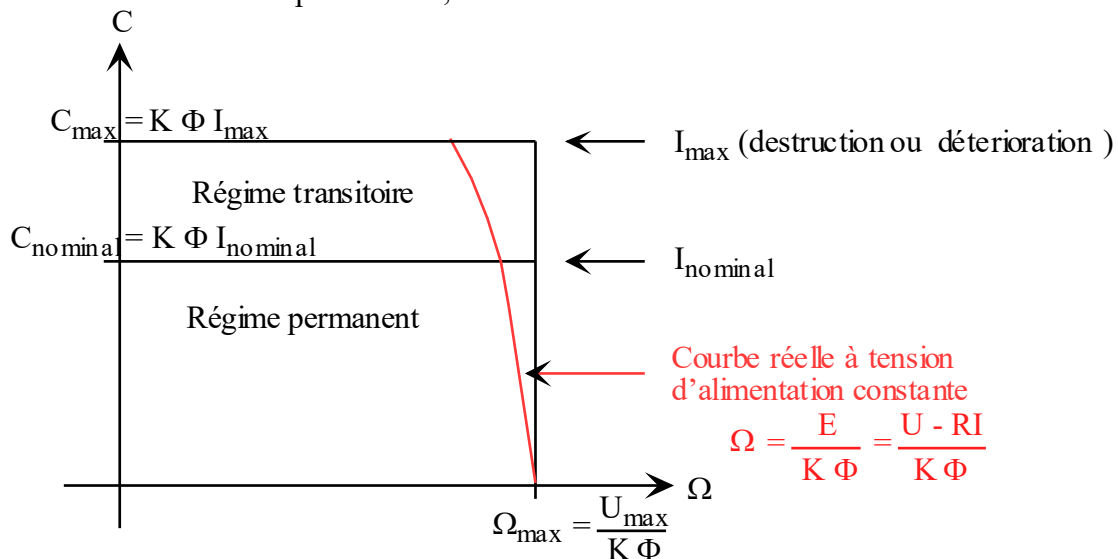
- Le champ est créé par des aimants permanents.
- Le champ est créé par un électro-aimant.

		
	Le champ est imposé par les aimants et est invariable	Le champ est imposé par le courant $I_{ex}$ et varie avec celui-ci
Avantage	Pas de source externe	Champ variable (réglable)
Inconvénient	Champ constant	Source externe

Donc, la caractéristique  $C = f(\Omega)$  de la machine dépend du champ, donc du type de machine.

### 2.2.1. Machine à aimants permanents

Dans les machines à aimants permanents, le domaine de fonctionnement est celui-ci :



### 2.2.2. Machine à électro-aimant

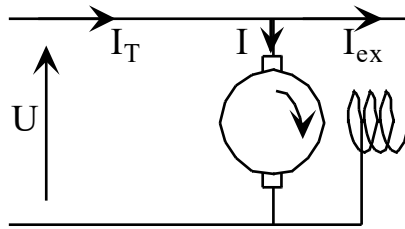
Le stator comporte des épanouissements polaires, sur lesquels sont enroulés des conducteurs, dans lesquels nous imposons un courant ; ce système crée un champ dans le circuit magnétique.

Cet enroulement peut être réalisé avec un fil fin, comportant beaucoup de spires  $\Rightarrow$  section faible – longueur importante  $\Rightarrow R_{élevée} = R_{ex}$ .

Pour créer le champ, comme il y a beaucoup de spires, un courant faible suffira :

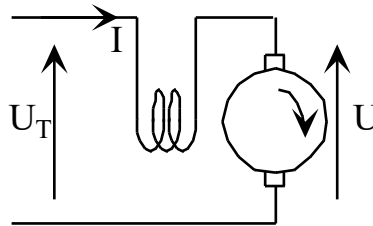
$$R_{ex} \cdot I_{ex} = U_{ex}$$

En général, la tension est de l'ordre de la tension nominale du rotor : ce qui permet d'utiliser une seule source  $\Rightarrow$  Moteur à excitation dérivation

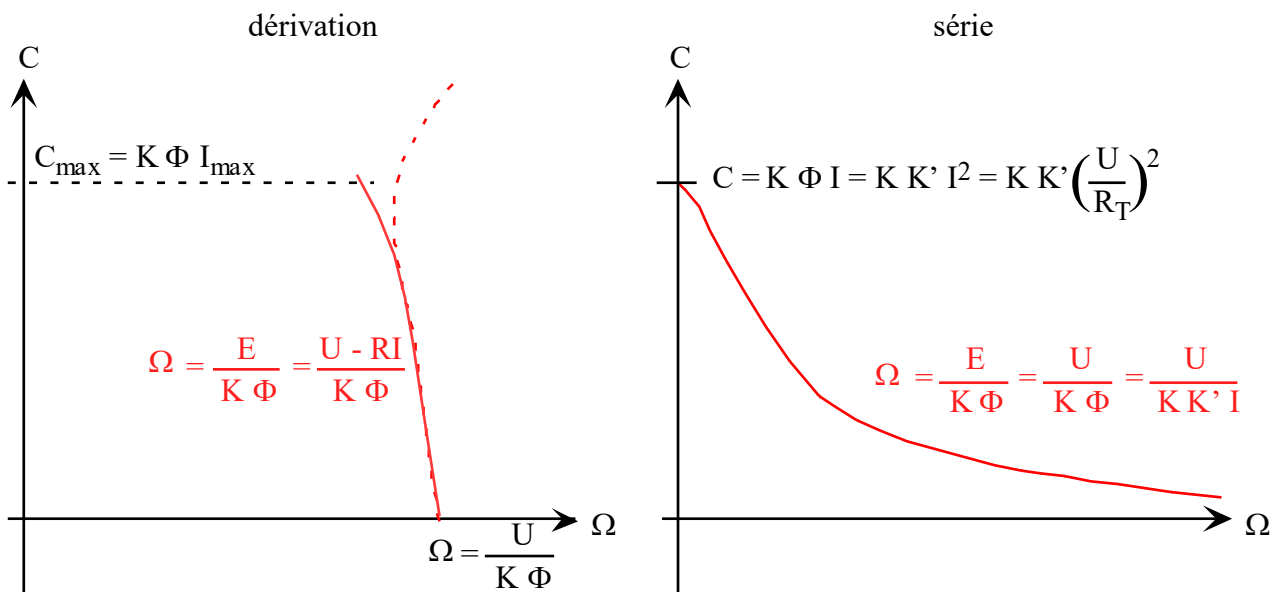


Ou cet enroulement peut être réalisé avec un gros fil, comportant peu de spires  $\Rightarrow R_{ex}$  faible.

Pour créer le champ, il faut un fort courant : en général, un courant de l'ordre du courant nominal du moteur : ce qui permet d'utiliser une seule source également  $\Rightarrow$  Moteur à excitation série

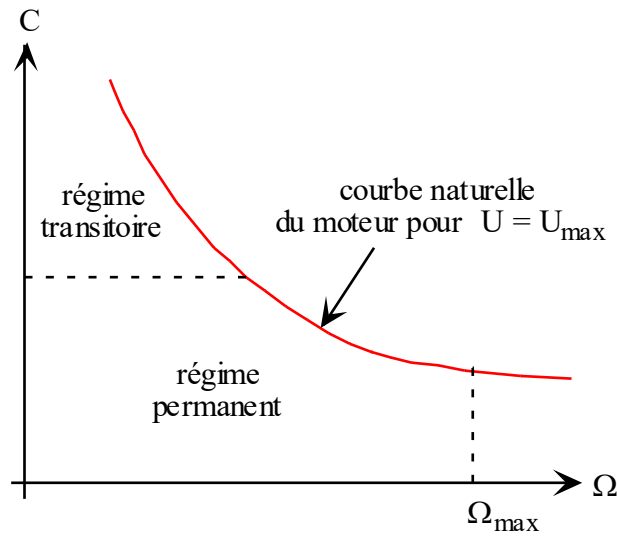


Les caractéristiques naturelles (à tension d'alimentation constante) de ces 2 moteurs sont très différentes.

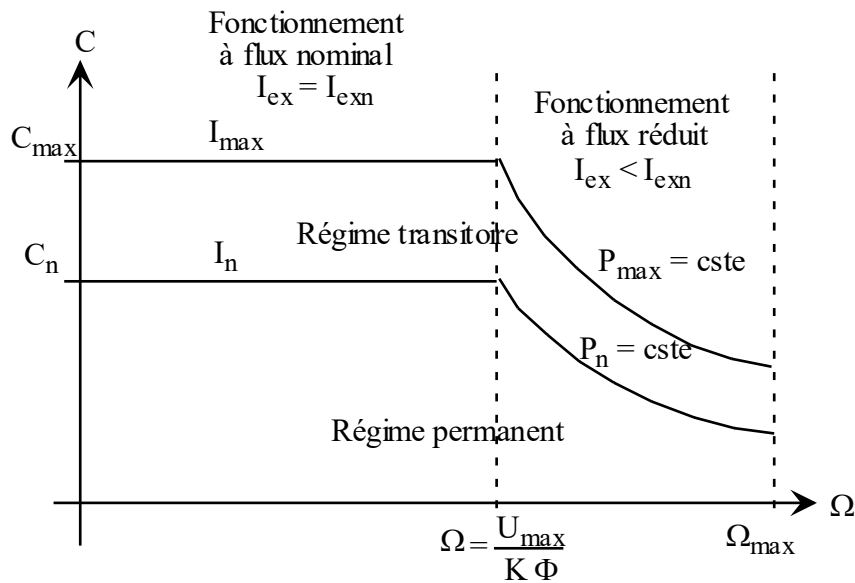


Le moteur série est presque exclusivement réservé aux applications de traction, grâce à son fort couple de démarrage ( $\sim I^2$ ) et parce que les phénomènes d'emballement ne peuvent apparaître ; le moteur est toujours accouplé à la charge, les roues.

Le domaine de fonctionnement, à tension d'alimentation variable du moteur série, est limité par une vitesse maximale.



Le domaine de fonctionnement du moteur dérivation comporte un espace identique au moteur à aimants permanents, dans lequel le champ est réglé à sa valeur maximale.



Une fois atteinte la valeur maximale de la tension, il est possible d'augmenter la vitesse, en diminuant le champ :

$$U = K \Phi \Omega \Rightarrow \Omega = \frac{U}{K \Phi}$$

Mais si  $\Phi$  diminue, le couple diminue aussi :

$$C = K \Phi I$$

donc le couple maxi permanent :

$$C_{\max} = K \Phi I_n$$

comme :

$$\Omega = \frac{U_{\max}}{K \Phi}$$

le produit :

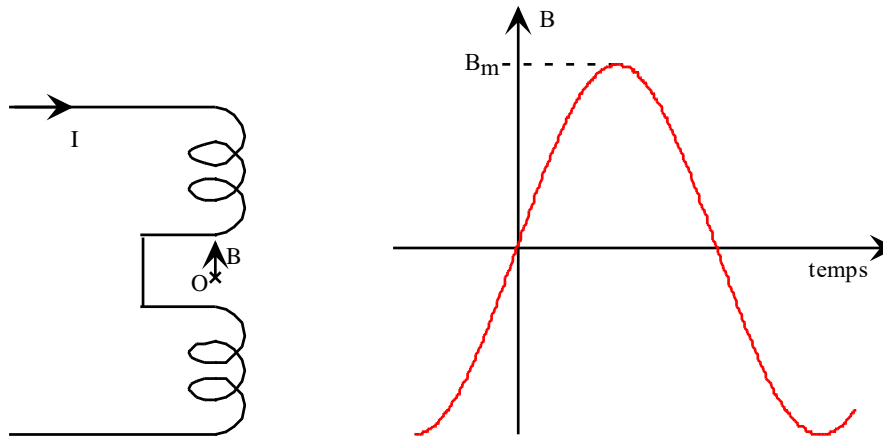
$$C_{\max} \Omega = U_{\max} \cdot I_n$$

nous impose une limite à puissance constante.

### 3. MACHINE A COURANT ALTERNATIF

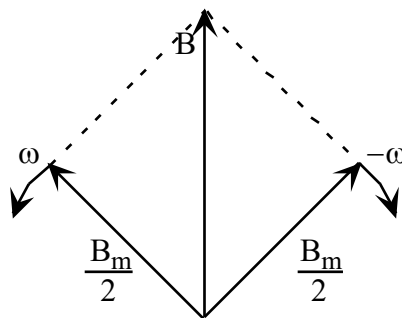
#### 3.1. Création d'un champ tournant

Soit une bobine alimentée par un courant alternatif sinusoïdal :

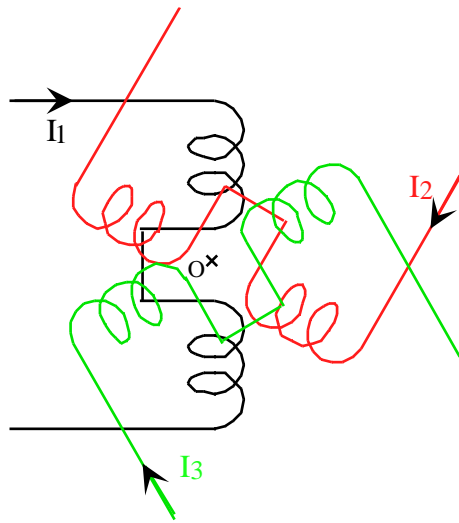


Le champ créé au centre de la bobine est dirigé selon l'axe de la bobine et est alternatif sinusoïdal.

Nous pouvons le représenter comme la somme d'un champ de module  $\frac{B_m}{2}$ , tournant autour de 0 à la vitesse angulaire  $\omega$  et d'un champ de module  $\frac{B_m}{2}$ , tournant en sens inverse (vitesse :  $-\omega$ ) :

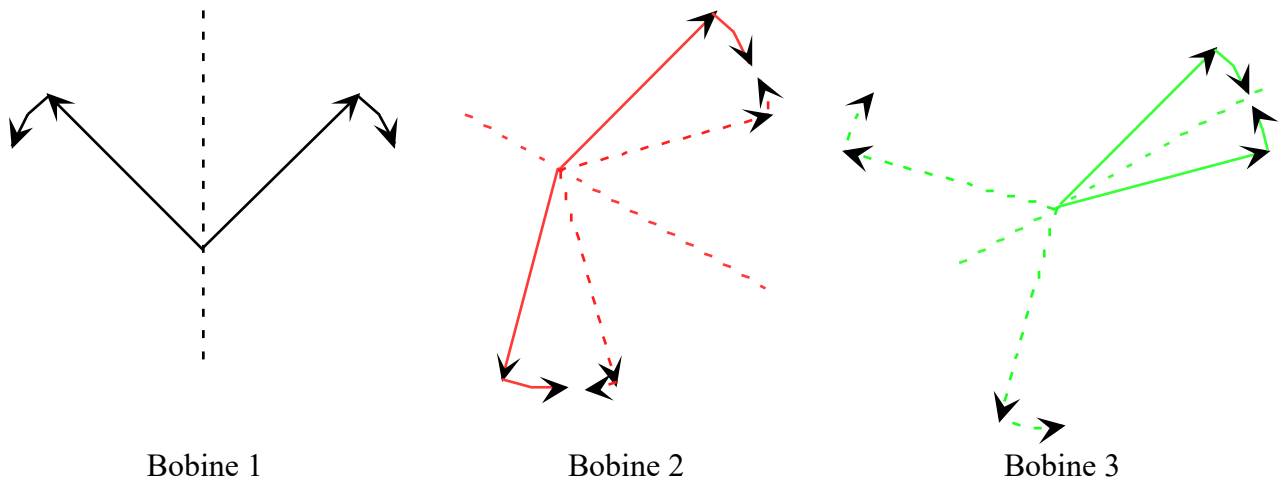


Soient trois bobines identiques, disposées régulièrement autour du point 0 (décalées d'un angle géométrique de  $\frac{2\pi}{3}$ ).



Ces trois bobines sont alimentées par les trois courants d'un système triphasé équilibré.

Le champ, créé en 0 par la bobine 1, est dans l'axe de cette bobine et est décomposé en deux champs tournants en sens inverse.



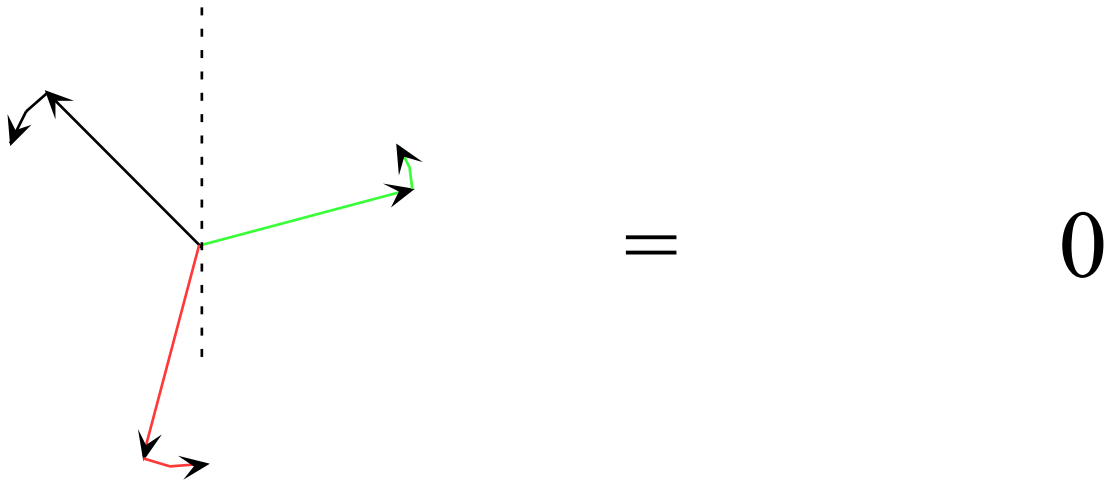
Le champ, créé en 0 par la bobine 2, est dans l'axe de cette bobine et est décomposé en deux champs tournants en sens inverse. Comme la bobine 2 est alimentée par le courant  $I_2$ , en retard de  $\frac{2\pi}{3}$  sur le premier, les deux champs sont en retard de  $\frac{2\pi}{3}$ .

De même pour la troisième bobine.

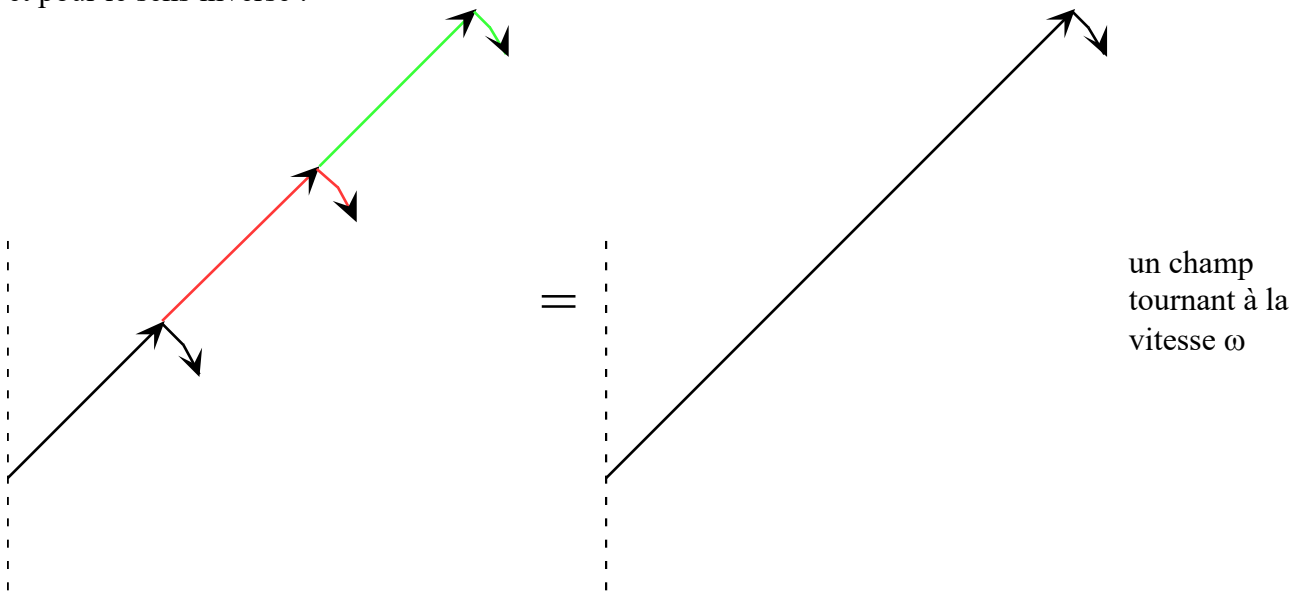
La résultante est égale à la somme de ces six champs tournants.

Ce qui donne pour le sens direct :





et pour le sens inverse :

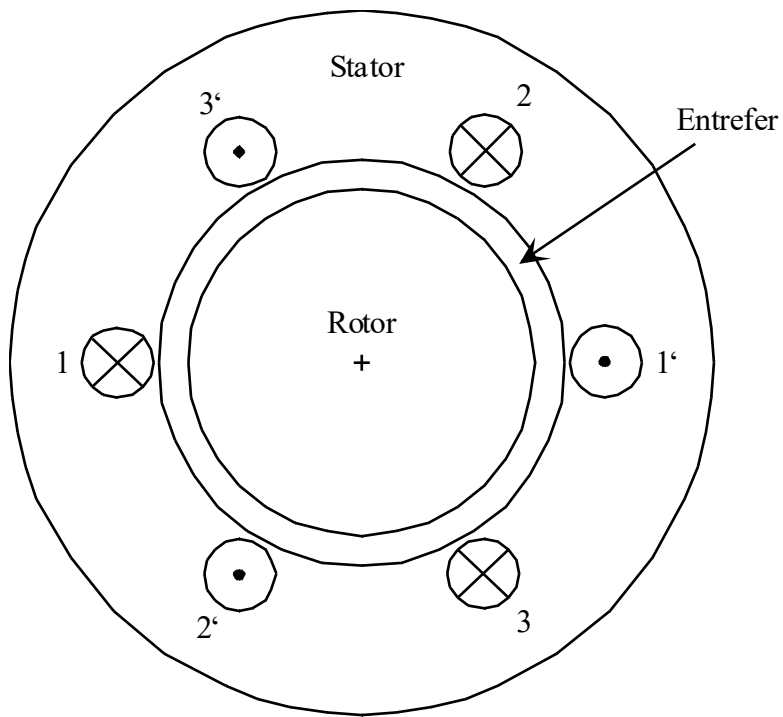


Si l'on veut que le champ tourne dans l'autre sens, il suffit d'inverser les positions de deux bobines, ou plus simplement d'échanger les courants circulant dans deux des bobines.

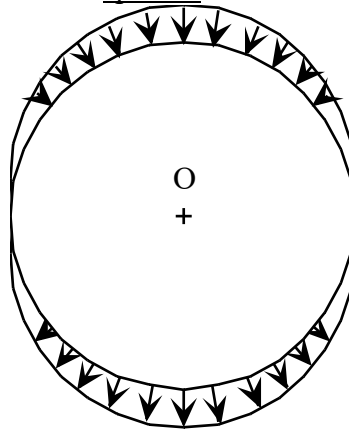
Nous venons de voir que des bobines alimentées par un système de courant polyphasé nous permettent de créer un champ magnétique tournant.

En pratique, les bobines sont réalisées dans un circuit magnétique.

Un stator (fixe) porte les bobines :

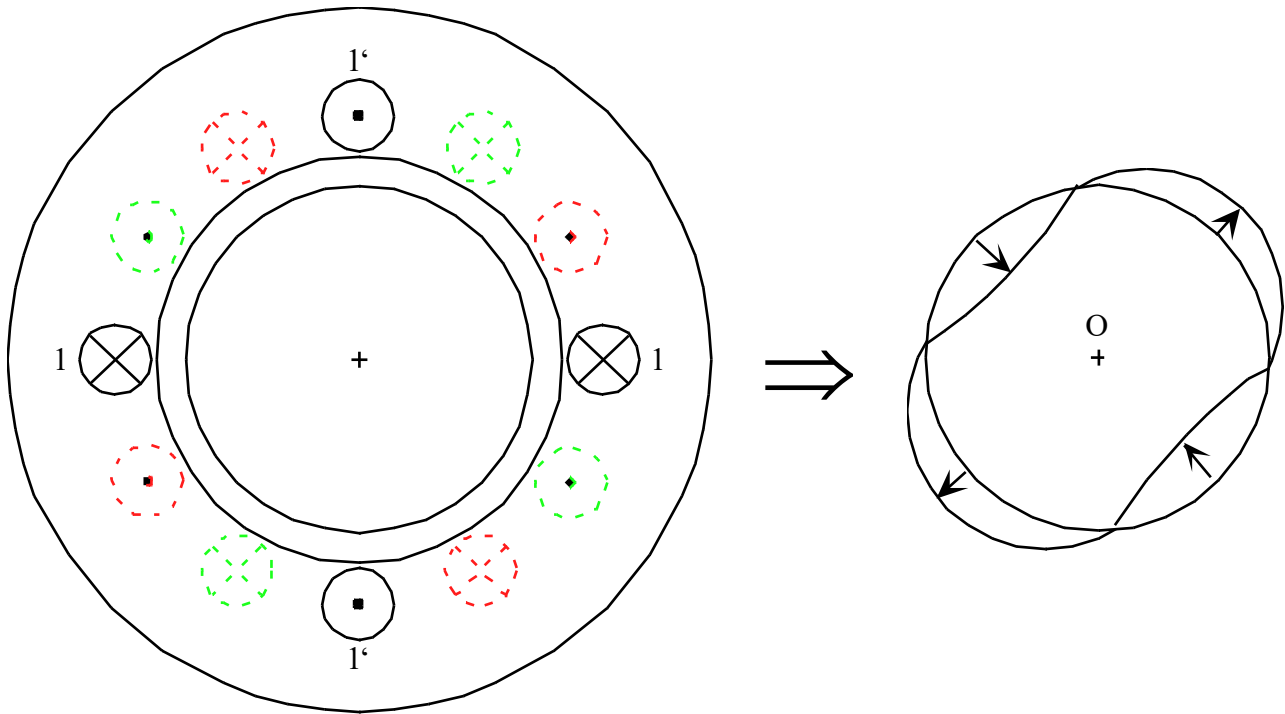


Le champ dans l'entrefer a une distribution spatiale sinusoïdale :



Le champ tourne autour de 0 à la vitesse  $\omega$  : pulsation des courants d'alimentation

Si le bobinage est réalisé de la manière suivante :



La vitesse de rotation du champ est égale à :  $\Omega = \frac{\omega}{p}$  : rapport de la pulsation électrique d'alimentation sur le nombre de paires de pôles.

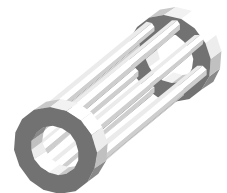
$$\begin{aligned}\Omega &= 2 \pi n \\ \omega &= 2 \pi f \\ \Omega &= \frac{\omega}{p} \Rightarrow n = \frac{f}{p}\end{aligned}$$

C'est la vitesse du synchronisme.

### **3.2. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone**

Si nous plaçons des conducteurs sur le rotor, ceux-ci sont le siège de f.e.m. Ces f.e.m. sont proportionnelles à la vitesse de déplacement du champ devant ces conducteurs.

Si, à présent, nous court-circuitons ces conducteurs, des courants induits parcourent ces conducteurs et l'action du champ sur ces courants crée un couple  $\Rightarrow$  cage d'écureuil.



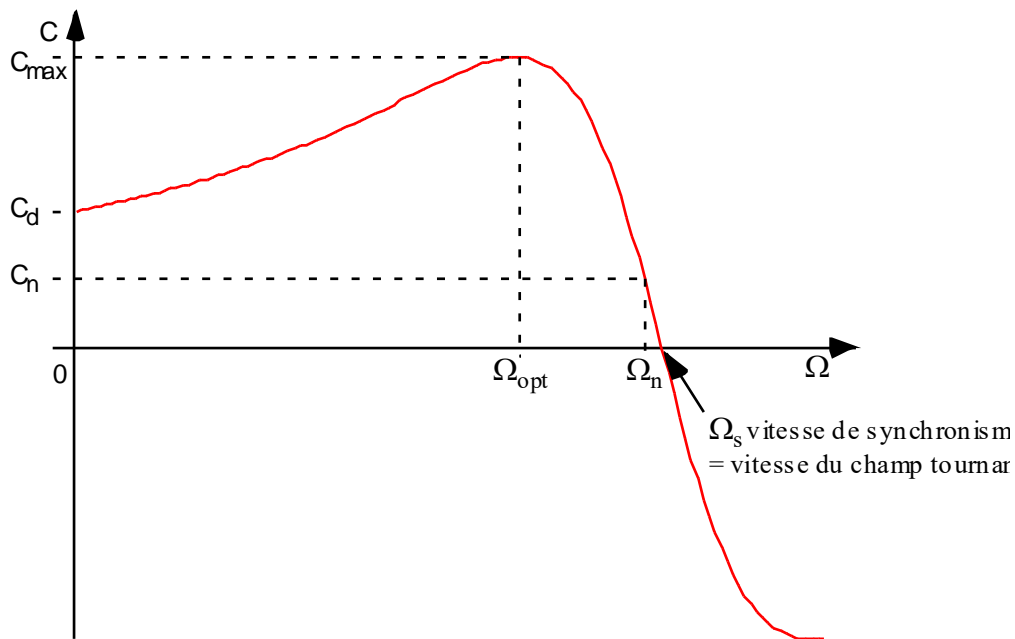
Ce couple a tendance à faire tourner le rotor dans le sens du champ tournant, pour réduire la vitesse relative du champ par rapport aux conducteurs et ainsi réduire les f.e.m. (Loi de Lenz).

Ainsi, si le rotor peut tourner, la vitesse relative diminue, donc les f.e.m., donc les courants, donc le couple diminuent.

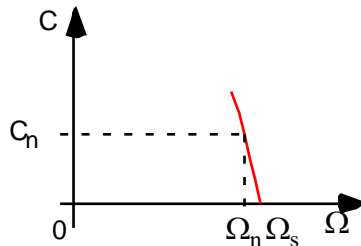
A la limite, si la vitesse du rotor est égale à celle du champ, les f.e.m. sont nulles, donc les courants et le couple aussi.

$\Rightarrow$  vitesse  $\neq$  vitesse synchronisme  $\Rightarrow$  asynchrone

### 3.3. Courbes caractéristiques de la machine asynchrone



La partie pratique de la courbe, c'est :



Cette partie est pratiquement linéaire et ressemble donc aux courbes précédentes des MCC.

Si nous modifions la fréquence d'alimentation, nous modifions la vitesse du champ tournant

$$n = \frac{f}{p} \text{ et, ainsi, la vitesse de rotation du rotor.}$$

REMARQUE : Le flux vu du stator est alternatif sinusoïdal :

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t$$

la f.e.m.

$$E = \frac{d\Phi}{dt} = \omega \Phi_m \cos \omega t = E_m \cos \omega t$$

$$\Rightarrow E_m = \omega \Phi_m$$

$$\Phi_m = \frac{E_m}{\omega} = \frac{E_m}{2\pi f}$$

aux pertes près :  $U \approx E \Rightarrow$  le flux est proportionnel au rapport  $\frac{U}{f}$ .

Donc, si nous diminuons la fréquence, il faut aussi diminuer la tension, sinon le flux augmente et, comme en conditions nominales, nous sommes proches de la saturation du circuit magnétique, il est difficile d'augmenter le flux.

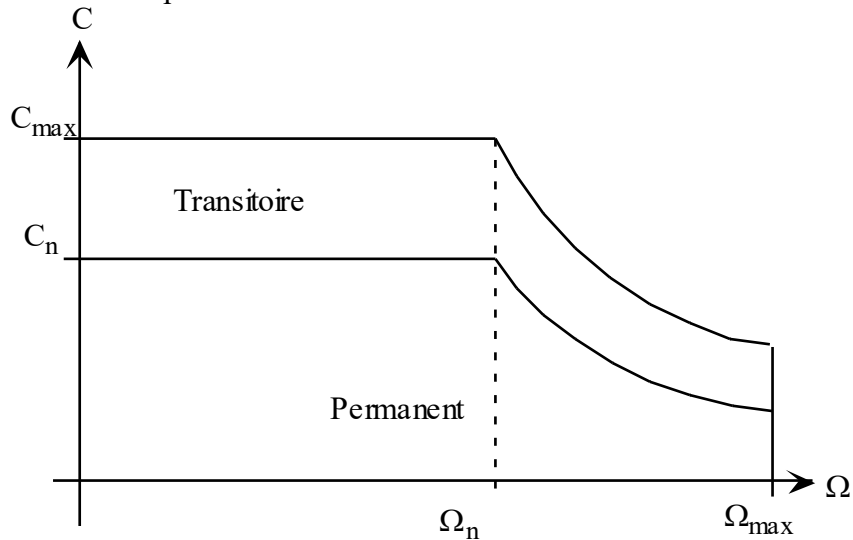
Donc, nous travaillerons à  $\frac{U}{f} = \text{constante}$  de la fréquence basse jusqu'à la fréquence nominale pour laquelle nous atteignons la tension nominale.

Cette tension atteinte par sécurité, elle ne peut plus augmenter, mais il est encore possible d'augmenter la fréquence. Dans ce cas, le flux diminue et si le flux diminue, comme le couple est proportionnel au produit  $\Phi I$ , pour le même courant, le couple est plus faible.

$$P = C \Omega \rightsquigarrow \Phi I \omega \rightsquigarrow \Phi I \frac{U}{\Phi} = \text{constante}$$

Ce qui limite le domaine de fonctionnement à un couple maximal pour  $f < f_n$

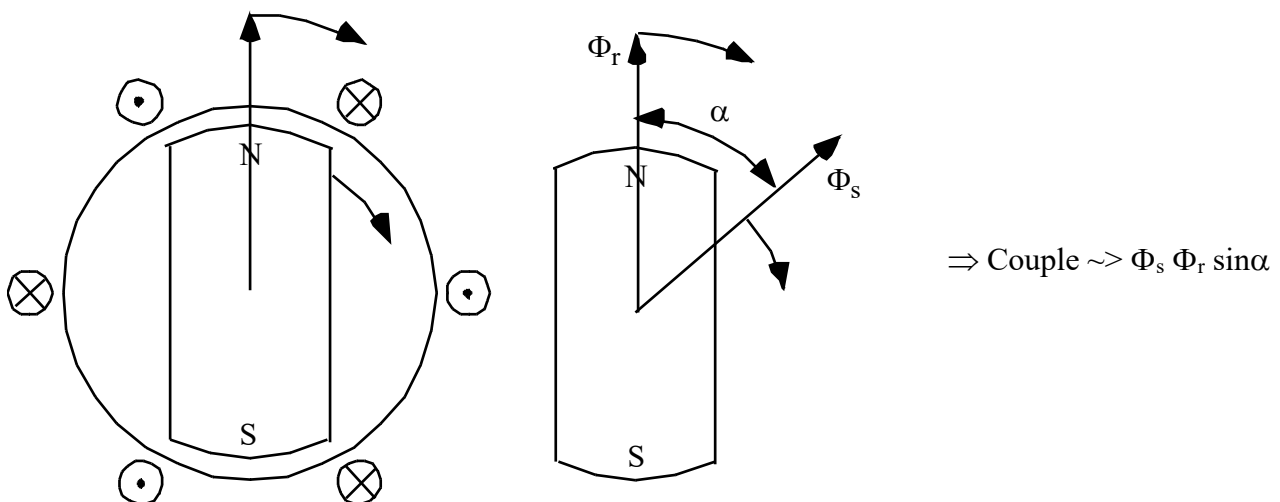
et à une puissance maximale pour  $f > f_n$



$\Omega_{\max} \approx 2 \text{ à } 3 \Omega_n$  : limite mécanique ou limite pratique « décrochage » du rotor.

### 3.4. Principe de fonctionnement de la machine synchrone

Si le rotor est constitué d'un assemblage d'aimants ou d'électro-aimants, ayant le même nombre de pôles (de paires de pôles) que le champ tournant, si le rotor tourne, il y a création d'un couple par déplacement relatif des deux systèmes de champ, le stator et le rotor.



Avantages par rapport à l'asynchrone :

- vitesse :  $\Omega = \Omega_s = \frac{\omega}{p} = \frac{2\pi f}{p}$  directement liée à la fréquence

- pas de courant au rotor  $\Rightarrow$  pas de pertes  $\Rightarrow$  rendement plus important

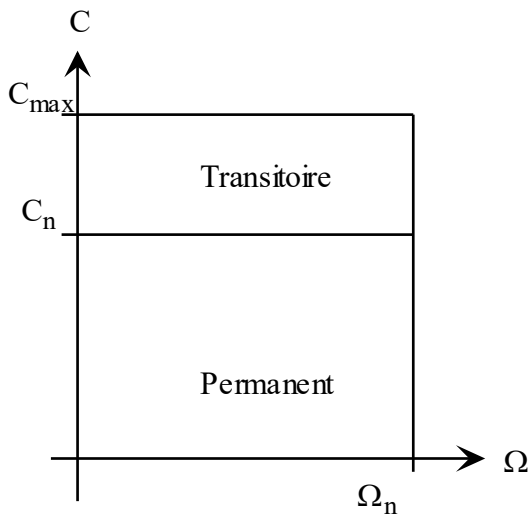
### Inconvénients :

- à l'arrêt, si  $\Phi$  tourne à  $\Omega_s \Rightarrow$  couple moyen nul  $\Rightarrow$  pas de démarrage  
il faut un artifice de démarrage : exemple : une cage !

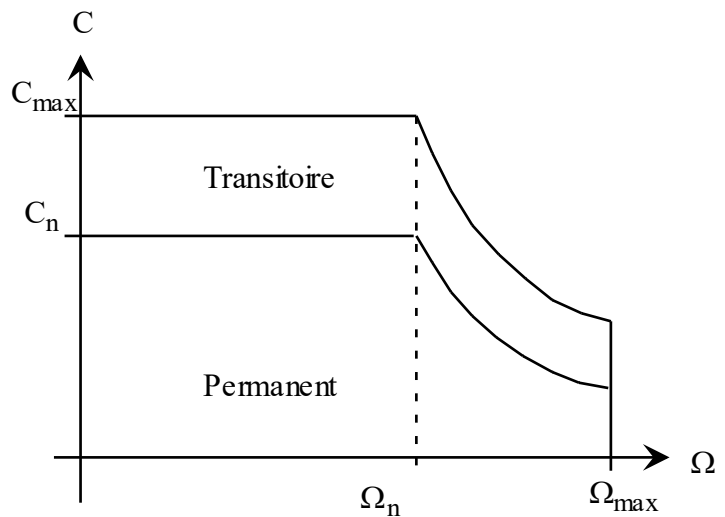
### 3.5. Courbes caractéristiques

Pour les mêmes raisons que précédemment, il faut essayer de garder  $\frac{U}{f}$  constant de l'arrêt à  $f = f_n$  et  $U = U_n$  pour  $f > f_n$ . Dans ce dernier cas, le flux dans la machine doit diminuer et, si le rotor porte des aimants, cela est impossible.

Donc, le domaine de fonctionnement est :



si la machine est à aimants permanents



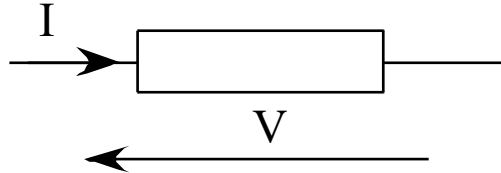
si la machine est à électro-aimant

Donc nous retrouvons des allures de courbes caractéristiques identiques à celles obtenues avec les machines à courant continu.

# Chapitre 8. CONVERTISSEURS ELECTRONIQUES DE PUISSANCE

## 1. INTRODUCTION

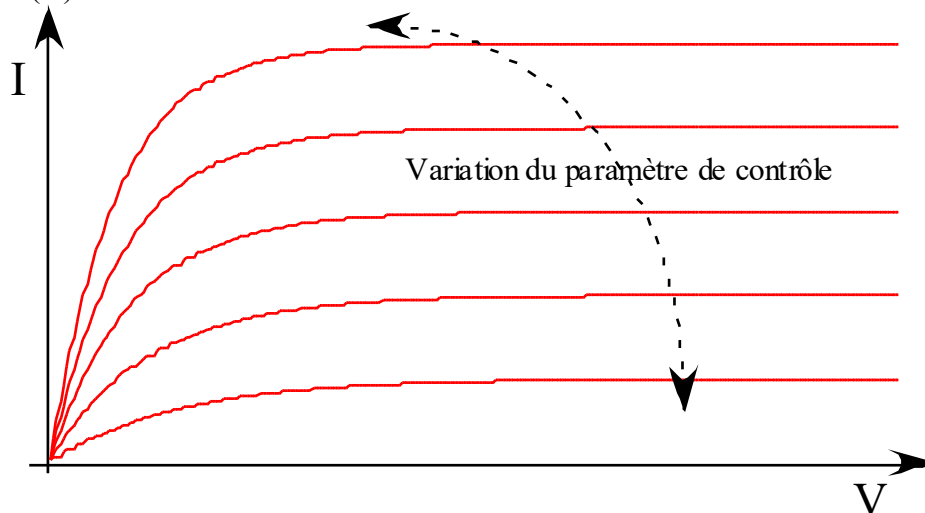
Soit un élément (bipôle ou dipôle) :



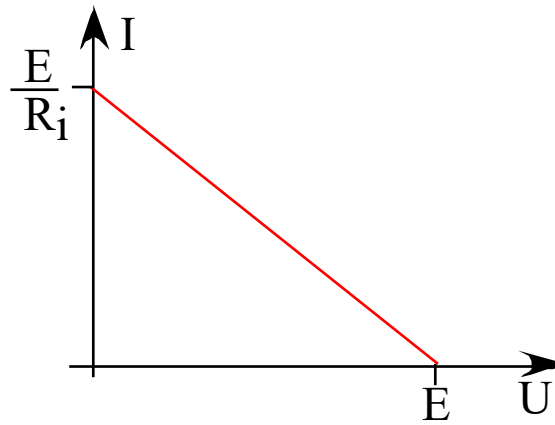
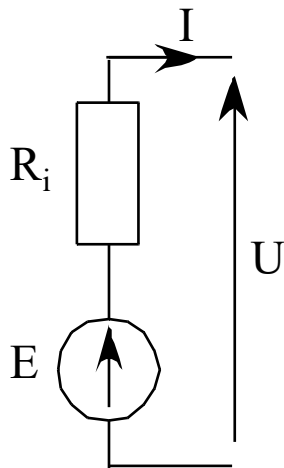
dont la caractéristique courant  $I$  en fonction de la tension appliquée  $V$  a une forme comme celle-ci :



Si cette caractéristique peut être réglée par un paramètre externe, nous aurons un réseau de courbes  $I = f(V)$ .



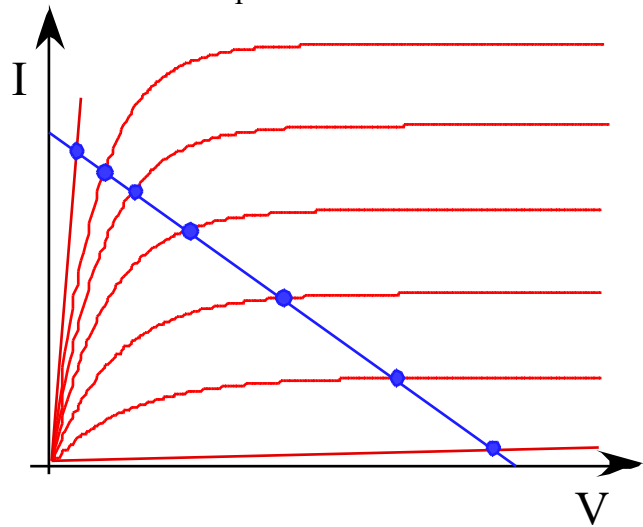
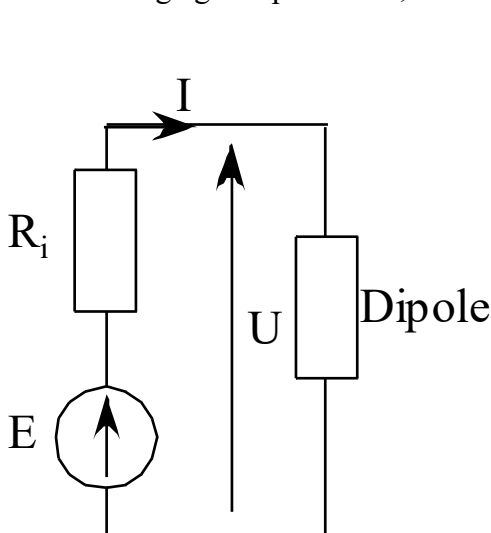
Observons maintenant le fonctionnement du circuit suivant :



La caractéristique de fonctionnement  $I = f(V)$  du circuit ne peut avoir que la forme ci-dessus.

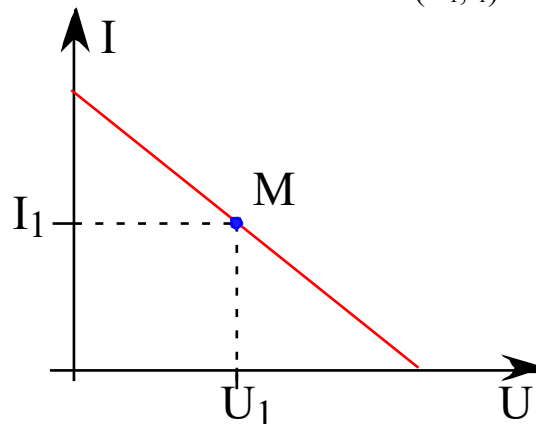
C'est une droite passant par  $(0, \frac{E}{R_i})$  et  $(E, 0)$ .

Si nous branchons le dipôle sur le circuit précédent, le point de fonctionnement dépend de la valeur de réglage du paramètre, mais ce point est sur la droite précédente.



Il est donc possible de choisir le point de fonctionnement en modifiant la valeur du paramètre de réglage.

Soit le point de fonctionnement M situé aux coordonnées  $(U_1, I_1)$ .

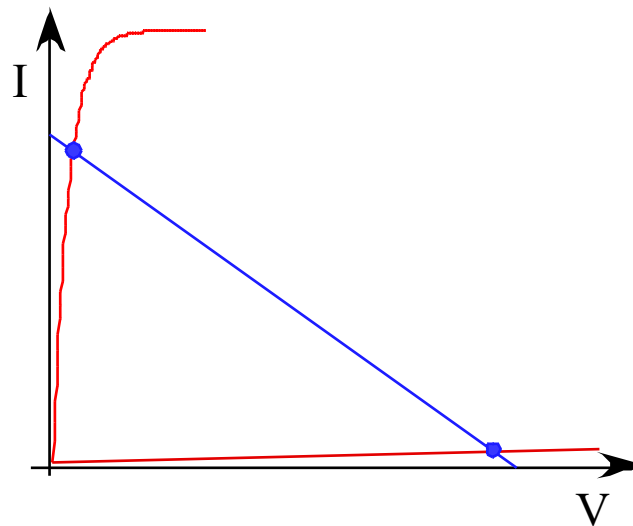


Lors de ce fonctionnement, la puissance dissipée dans le dipôle vaut :

$$P_1 = U_1 \cdot I_1$$

Pour que cette puissance soit nulle, il faut que  $U_1$  soit nulle ou  $I_1$  soit nul.





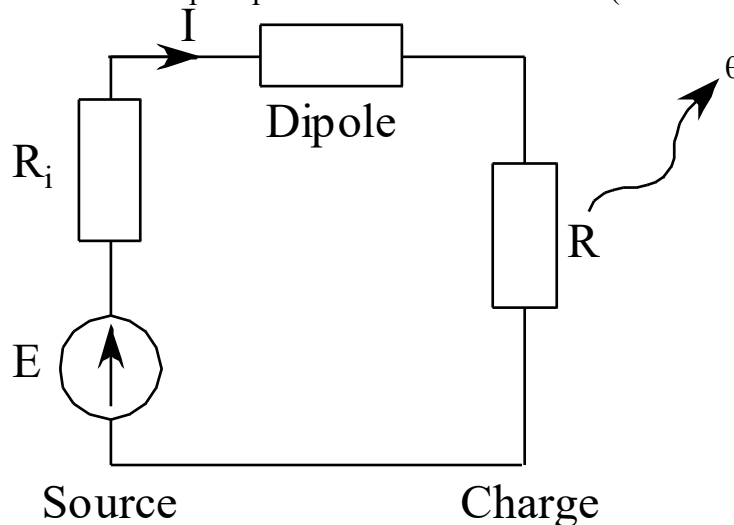
Donc pour pouvoir régler le fonctionnement de notre circuit sans dissiper d'énergie (ou très peu) dans notre dipôle, il faut lui imposer les 2 seules valeurs du paramètre de réglage qui permettent de fonctionner à tension nulle ou à courant nul.

Un élément qui n'a que deux états (tension nulle ou courant nul) et que vous connaissez : c'est l'interrupteur.

Notre dipôle sera idéalisé par un interrupteur.

### 1.1 Utilisation

Utilisons notre source et notre dipôle pour alimenter un radiateur (Résistance  $R$ ).

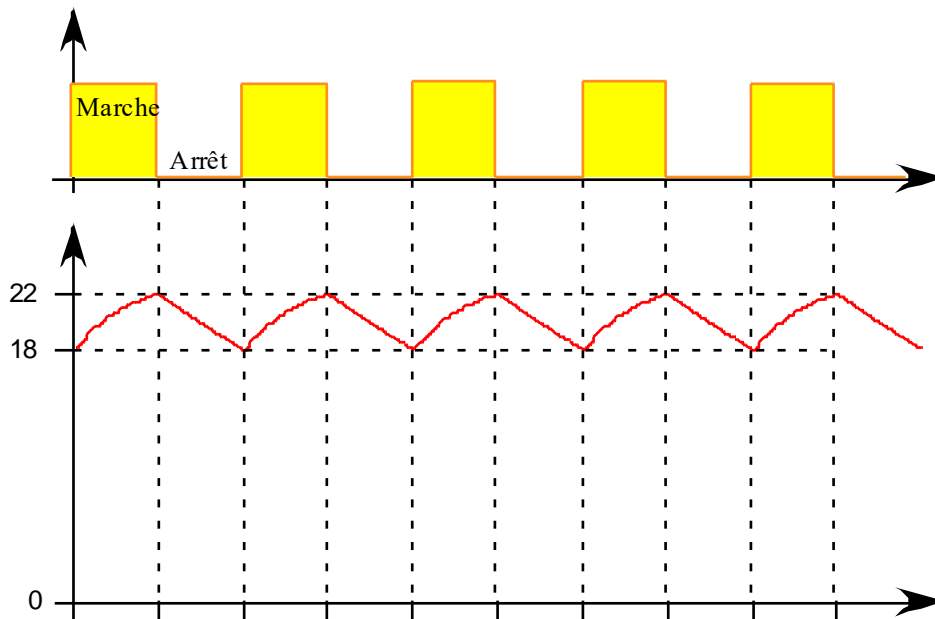


Si la température est à  $18^\circ\text{C}$ , nous réglons le dipôle (l'interrupteur) pour fonctionner à tension nulle. Le courant passe et vaut  $I = \frac{E}{(R + R_i)}$ , la puissance dissipée par le radiateur est  $R I^2$ .

La température augmente et après un certain temps (supposons 1 heure), elle atteint  $22^\circ\text{C}$ . A ce moment, nous réglons le dipôle pour que le courant soit nul. La puissance dissipée par le radiateur est donc également nulle, et la température descend progressivement. Elle atteint  $18^\circ\text{C}$  au bout d'un temps (que nous supposons égal à 1 heure également).

A ce moment, nous pouvons reprendre au début et le radiateur sera alimenté pendant un heure, puis non alimenté pendant 1 heure.

Dans cette application de chauffage, le fonctionnement, 1 heure de marche suivie d'1 heure d'arrêt, procure une température oscillant entre 18 et  $22^\circ\text{C}$ .

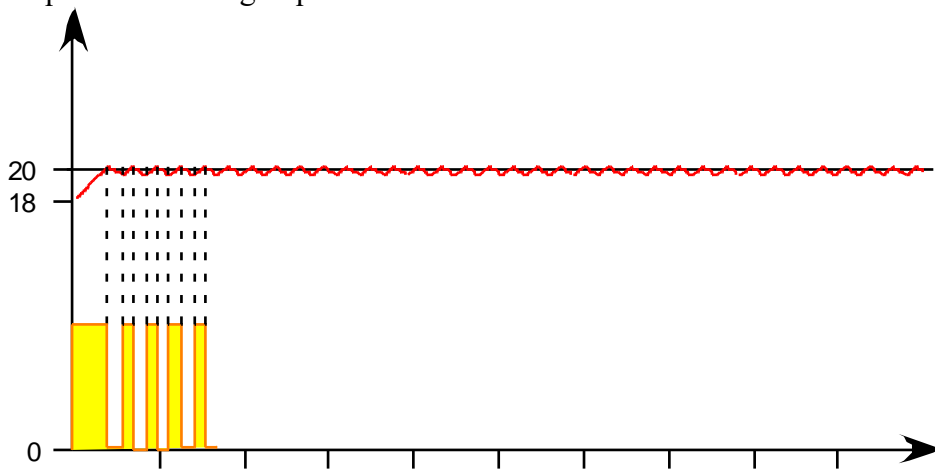


Nous pourrions améliorer le confort sans consommer plus d'énergie, en réduisant la durée des temps de marche et d'arrêt.

Si dès que nous atteignons la température de  $20^{\circ}\text{C} + \Delta\theta$  nous arrêtons d'alimenter le radiateur et que nous l'alimentons de nouveau dès que la température est redescendue sous  $20^{\circ}\text{C} - \Delta\theta$ .

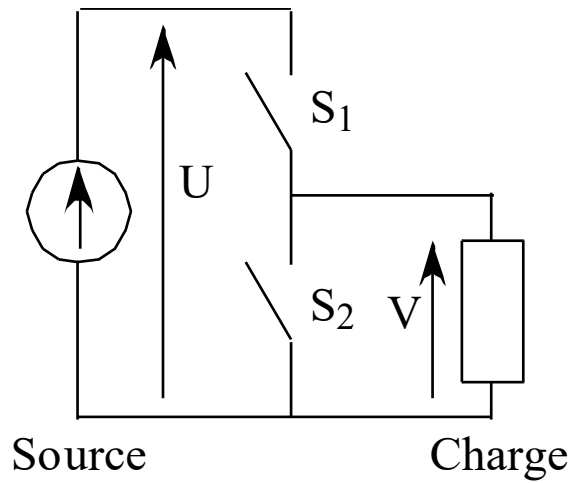
Le rapport  $\frac{\text{temps de marche}}{\text{temps total}} = \frac{\text{temps de marche}}{\text{temps de marche} + \text{temps d'arrêt}}$  est le même que

précédemment mais la température varie beaucoup moins. La sensation de confort est plus grande, sans que le coût énergétique soit modifié.

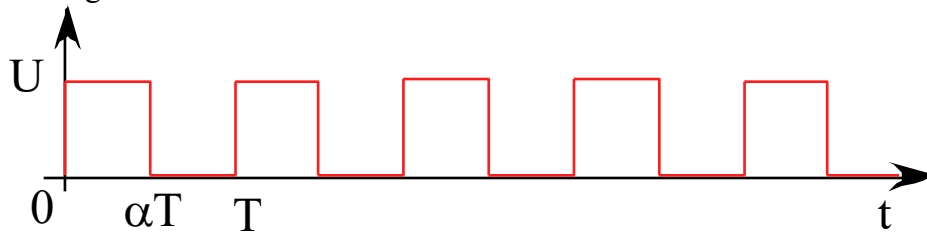


Sur une telle application, les temps de marche et d'arrêt sont suffisamment longs (quelques minutes) pour permettre d'utiliser un système d'alimentation et d'arrêt peu rapide (interrupteur ou interrupteur thermostatique).

Mais une application d'éclairage ou de motorisation sur laquelle nous désirions changer le point de fonctionnement, exige que le passage d'un mode à l'autre se fasse très rapidement pour que le fonctionnement moyen soit proche du fonctionnement recherché. En effet, dans le cas de l'éclairage, si nous alimentons une ampoule pendant quelques secondes, puis l'éteignons quelques secondes, la perception visuelle est du noir suivi d'un aveuglement. Si nous désirons que la sensation soit un éclairage moyen, il faut que la durée des temps de marche et d'arrêt soit très faible (de l'ordre de quelques fractions de secondes). De même pour une motorisation, sinon la sensation n'est qu'une suite d'accélération et freinages désagréables.

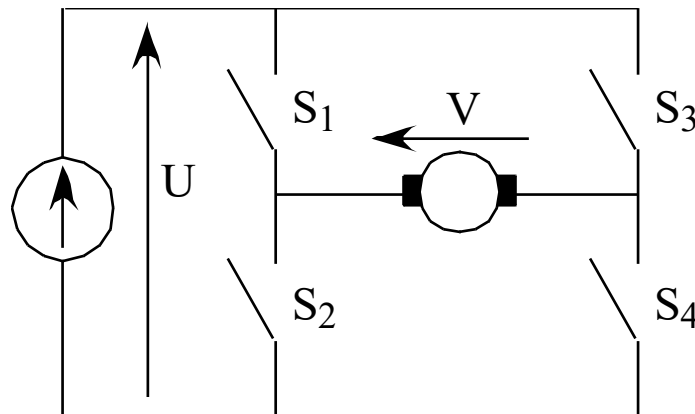


Sur une période de fonctionnement  $T$ , pendant l'intervalle de temps  $[0, \alpha T]$  l'interrupteur  $S_1$  est fermé et  $S_2$  ouvert, puis pendant l'intervalle  $[\alpha T, T]$ ,  $S_2$  est fermé et  $S_1$  ouvert, la tension aux bornes de la charge varie de la manière suivante :

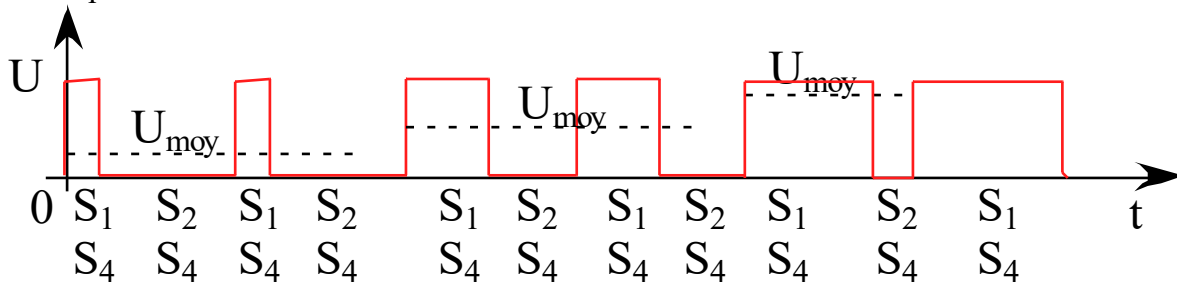


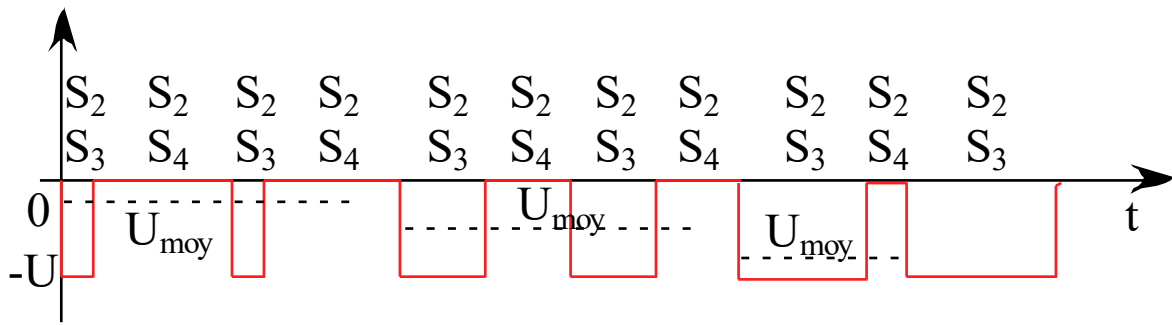
$$V_{\text{moy}} = U \cdot \frac{\alpha T}{T}$$

Si notre charge est une machine électrique, il peut être nécessaire d'alimenter la machine soit dans un sens soit dans l'autre, nous utiliserons à cette fin, le montage ci-dessous.



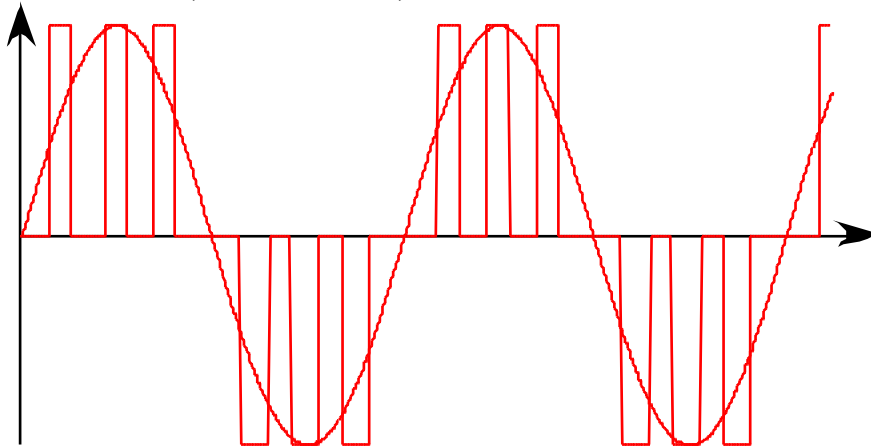
Selon les fermetures (et ouvertures) des interrupteurs  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  et  $S_4$  la tension aux bornes du moteur peut évoluer entre  $-U$  et  $+U$ .



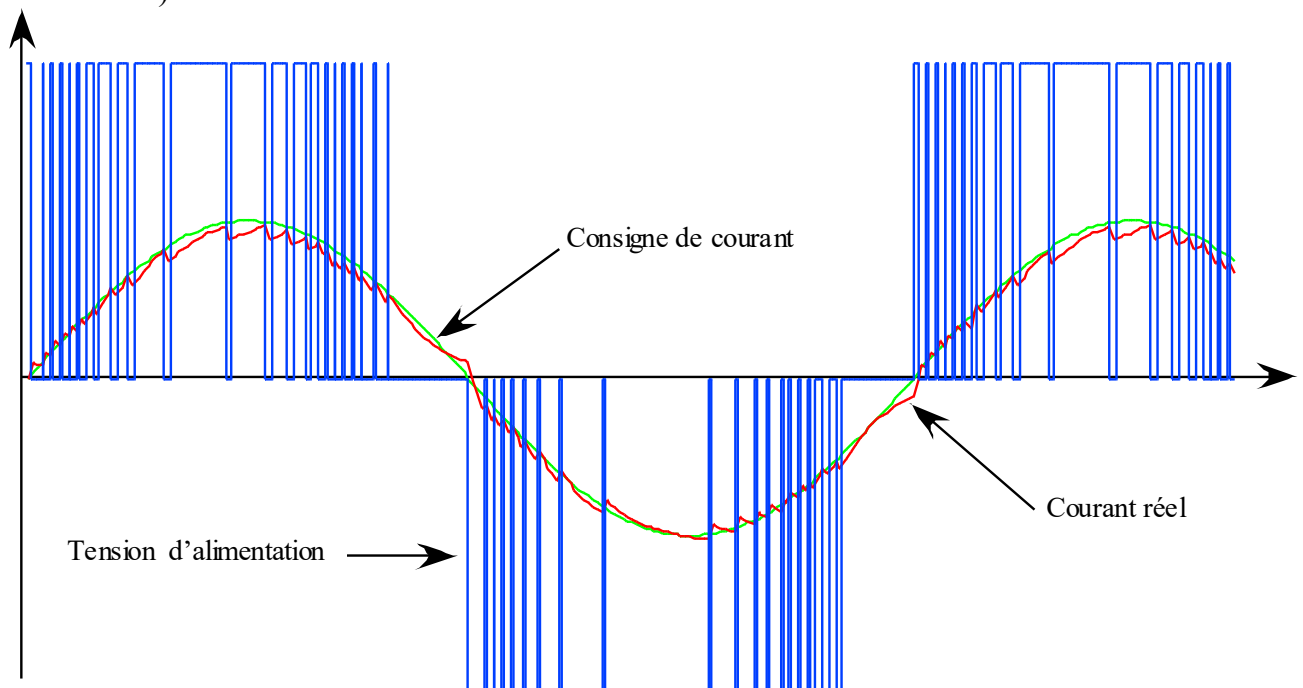


## 1.2 Applications en courant alternatif

Nous venons de voir que le choix des interrupteurs commandés permet d'obtenir une tension positive ou négative aux bornes de notre charge, si nous choisissons régulièrement les interrupteurs fermés, nous imposerons une variation régulière de la tension aux bornes de notre charge. Le choix et la répétition des interrupteurs commandés permettront d'obtenir une tension d'allure alternative (voir sinusoïdale).

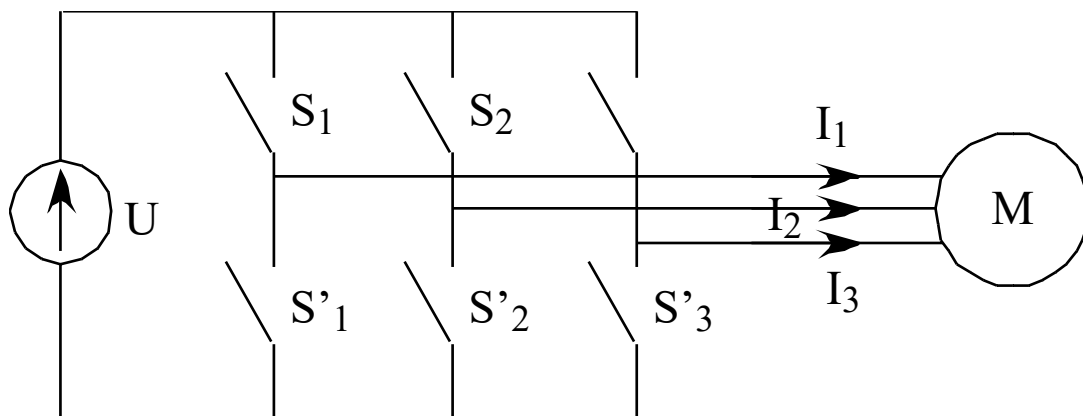


Il est même possible d'approcher au mieux la tension sinusoïdale, en modulant la largeur des impulsions de marche (MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion ou PWM : Power Wild Modulation).



Les circuits alimentés sont en général des machines électriques (utilisant le principe de conversion électromagnétique d'énergie) dont le comportement électrique est inductif. Sur ce type de circuit, le courant n'a pas de discontinuité mais une évolution exponentielle (voir figure ci-dessus).

Donc notre schéma à 4 interrupteurs précédemment présenté permet d'alimenter un circuit en courant alternatif « sinusoïdal » à partir d'une source à courant continu. Lors de l'alimentation d'applications nécessitant de l'alternatif triphasé, la somme des trois courants doit être nulle pour que notre système soit équilibré, ceci permet de réaliser cette alimentation, non pas avec 3 x 4 interrupteurs, mais avec seulement 6 interrupteurs.



## 2. INTERRUPTEURS

Les interrupteurs électroniques utilisés dans les convertisseurs sont dits :

- non commandables,
- semi commandables,
- complètement commandables,

selon leur possibilité de passage de l'état bloqué à l'état passant.

En effet, les premiers changent d'état selon les grandeurs appliquées aux bornes, les seconds peuvent passer d'un état à l'autre par application d'une commande, mais le retour est provoqué par les grandeurs aux bornes, et enfin les derniers changent d'état dans un sens ou dans l'autre selon les commandes appliquées.

### 2.1 Diode

La diode est un interrupteur non commandable qui est ouvert quand la tension appliquée est négative et fermé si elle est positive.

Ce fonctionnement est idéalisé dans l'espace courant-tension de ce dipôle par la courbe 2.1.b. Pour tout courant positif la tension est nulle et pour toute tension négative le courant est nul.

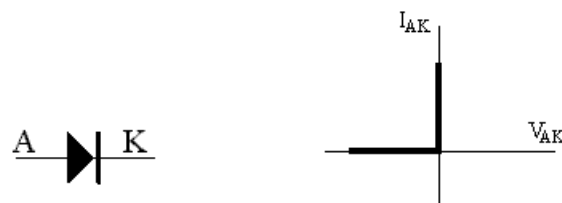


Figure 2.1. représentation symbolique de la diode et sa caractéristique idéale

### 2.2 Thyristor

Le thyristor est semi-commandable, l'état normal du thyristor est ouvert, mais quand la tension est positive, si un courant de gâchette positif est injecté, le thyristor passe à l'état passant et y reste jusqu'à ce que le courant  $I_{AK}$  s'annule.

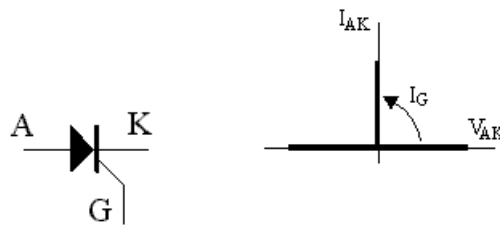


Figure 2.2. représentation symbolique du thyristor et sa caractéristique idéale  
Le thyristor est un interrupteur relativement lent et les applications dans lesquelles on l'utilise sont donc limitées en fréquence de commutation.

### 2.3 GTO

Le GTO (gate turn off thyristor) est complètement commandable, le courant  $I_G$  permet de passer de l'état bloqué à l'état passant ou le contraire selon son sens.

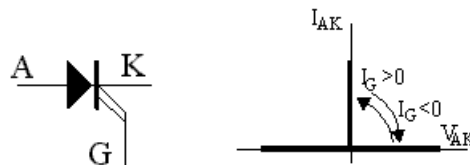


Figure 2.3. représentation symbolique du GTO et sa caractéristique idéale

De caractéristiques proches du thyristor, le GTO ne permet pas d'obtenir des fréquences de commutations élevées.

### 2.4 Transistor bipolaire

Le transistor bipolaire (BJT pour bipolar junction transistor) est aussi complètement commandable. Les différences par rapport au thyristor sont les caractéristiques en tension inverse (négative), ici inexistantes et la rapidité de passage d'un état à l'autre qui permet d'atteindre des fréquences de commutation plus élevées.

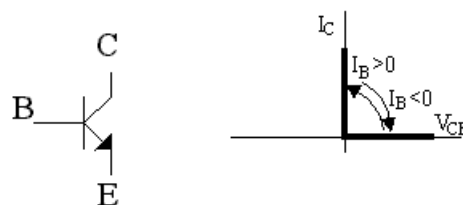


Figure 2.4. représentation symbolique du transistor bipolaire et sa caractéristique idéale

### 2.5 MOSFET

Le MOSFET a un comportement identique au transistor bipolaire, mais il est commandé par la tension  $V_{GS}$ .

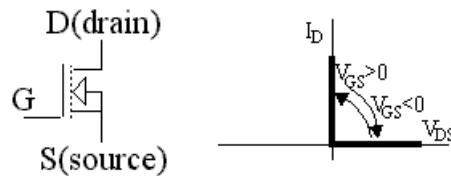


Figure 2.5. représentation symbolique du MOSFET et sa caractéristique idéale

## 2.6 IGBT

Le IGBT (insulated gate bipolar transistor) possède les avantages de la commande en tension du MOSFET avec une rapidité de commutation accrue ainsi que la large gamme de tension et courant de fonctionnement du transistor bipolaire.

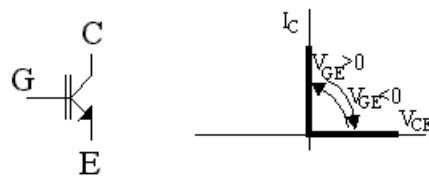


Figure 2.6. représentation symbolique de l'IGBT et sa caractéristique idéale

Les critères de choix entre les différents interrupteurs possibles sont :

- le domaine de fonctionnement,
- les limites en tension et en courant,
- la rapidité de passage de l'état bloqué à l'état passant,
- le coût.

## 3. STRUCTURES DES CONVERTISSEURS

Il n'est pas possible d'envisager de décrire ici tous les convertisseurs électroniques existants, ni d'évoquer tous les problèmes de mise en œuvre de certains d'entre eux. D'autres UV enseignées à l'UTC abordent ces sujets et les étudiants intéressés pourront y approfondir leurs connaissances.

Nous nous contenterons de présenter quelques types de convertisseurs en cherchant à montrer les notions essentielles et utiles à l'utilisateur.

### 3.1 Convertisseur AC-DC

Ce type de convertisseur est appelé redresseur. Il peut fonctionner à partir du monophasé ou du triphasé.

Voici deux exemples :

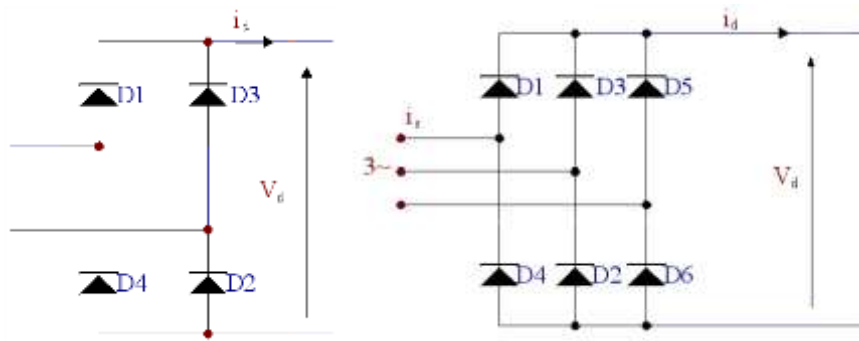
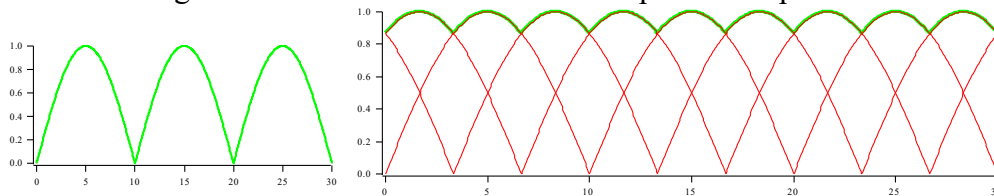
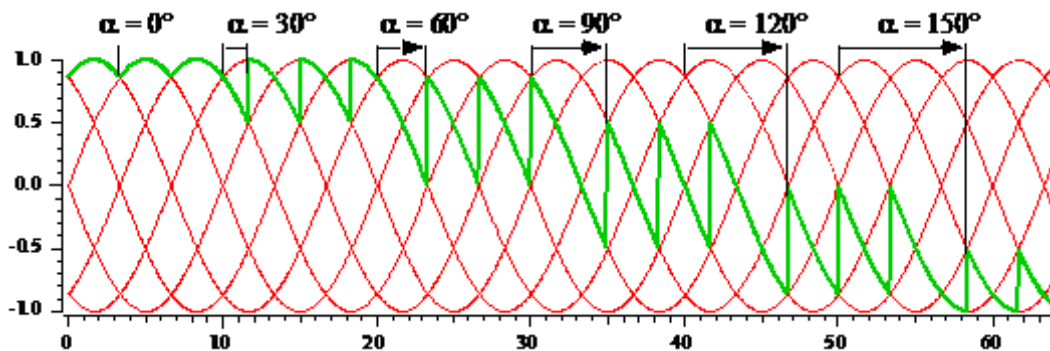
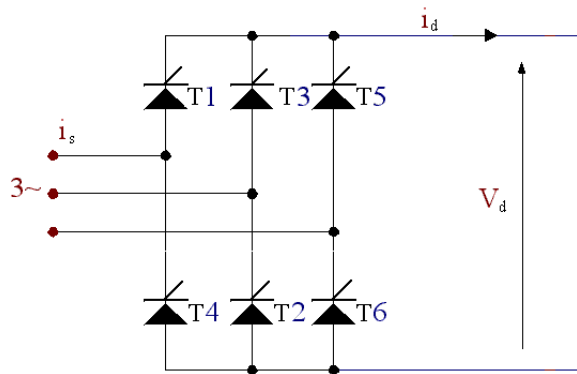


Figure 3. 1. Redresseur à diodes monophasé et triphasé



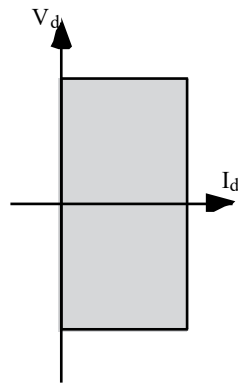
Si nous remplaçons les diodes par des thyristors, l'instant de mise en conduction des composants est contrôlé et peut être retardé par rapport à l'instant normal de mise en conduction de la diode. Ce retard est appelé retard à l'amorçage. La tension de sortie dépend du retard à l'amorçage et a l'allure suivante.



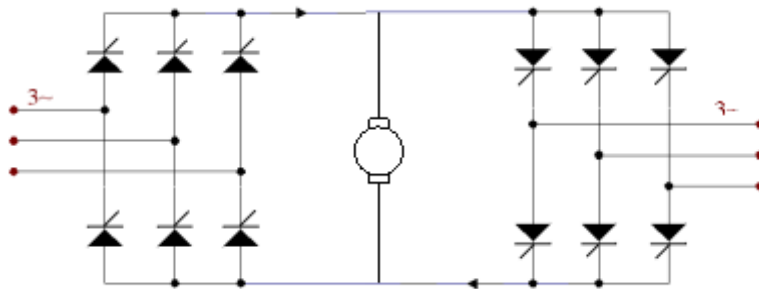
La tension de sortie  $V_d$  a sa valeur moyenne qui varie entre  $+V$  et  $-V$  selon l'angle de retard à l'amorçage. Le fonctionnement à tension moyenne négative n'est possible que si le courant  $I$  existe (et est positif). Nous avons un système qui fournit alors un courant positif et une tension négative donc l'énergie électrique échangée est négative. Elle passe donc du côté continu vers le côté alternatif. On dit que le convertisseur est réversible mais ici en tension uniquement.

Dans l'espace  $V_d$ - $I_d$  de fonctionnement de notre convertisseur, les quadrants de fonctionnement sont le premier et le quatrième.



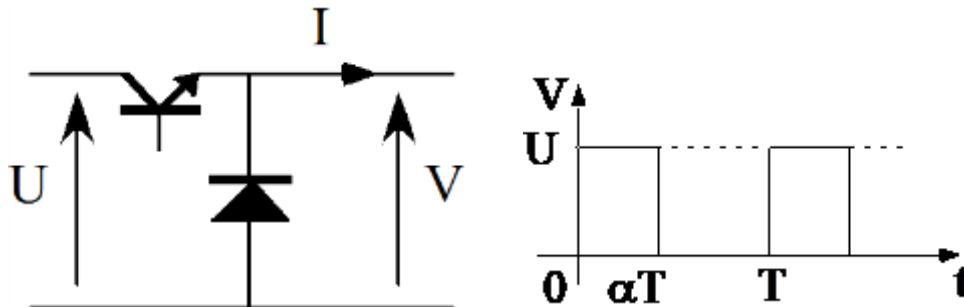


Pour obtenir la double réversibilité (réversibilité complète), il faut placer un convertisseur équivalent en opposition sur le premier.



### 3.2 Convertisseur DC-DC :

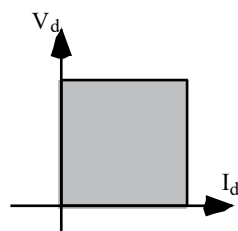
Ces convertisseurs sont appelés des hacheurs. La structure la plus simple comporte une diode et un thyristor.



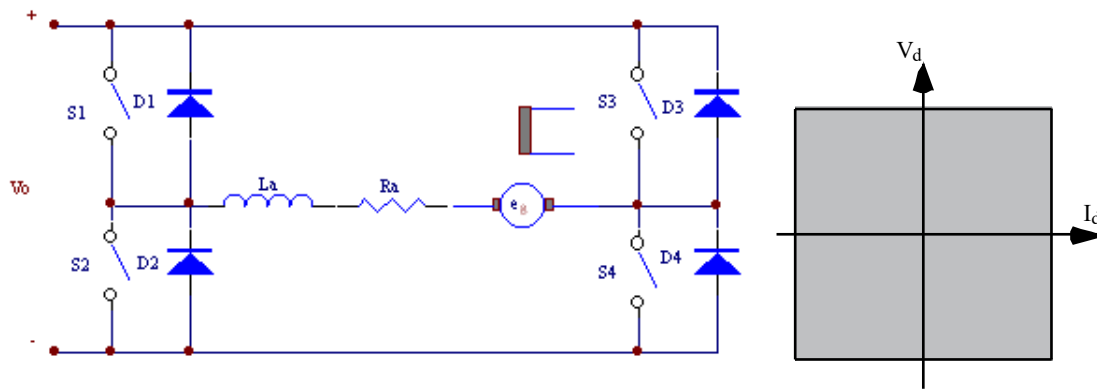
La tension moyenne  $V_{moy}$  est égale à  $\alpha U$ , avec  $\alpha$  le facteur de marche (rapport du temps de conduction sur la période).

$$V_{moy} = \alpha U \quad \text{pour } 0 < \alpha < 1 \text{ et } 0 < V_{moy} < U$$

Ici le courant  $I$  et la tension  $V$  ne peuvent être que positifs. Le fonctionnement est donc limité au premier quadrant.

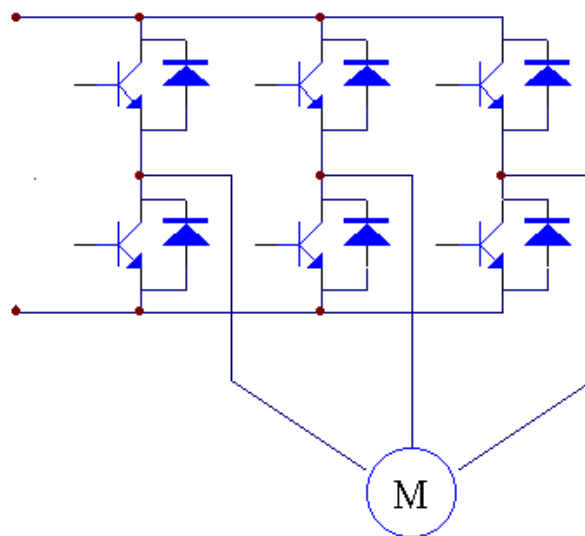


Pour permettre le fonctionnement dans les quatre quadrants, il faut reprendre la structure décrite au tout début et la compléter.



### 3.3 Convertisseurs DC-AC :

Ces convertisseurs sont appelés onduleurs.



Ils peuvent selon le mode (de pilotage) de commande des interrupteurs, avoir un motif de tension identique quelque soit la fréquence de sortie ou suivre une consigne de courant par modulation de position et de largeur d'impulsion.

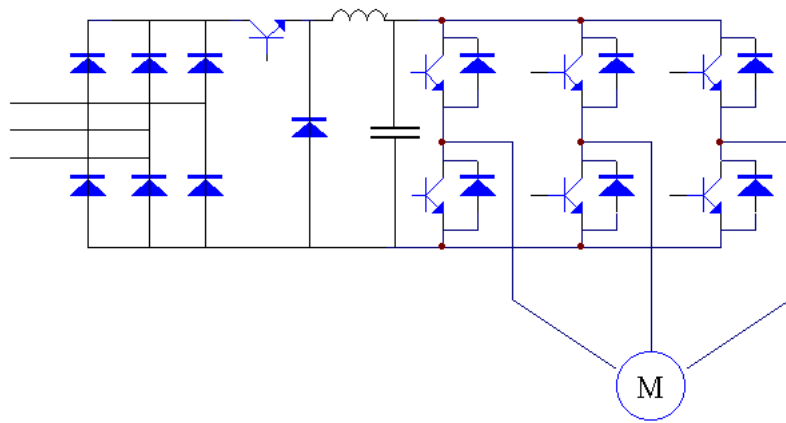
Dans le premier type, il faut associer un convertisseur continu sur la tension continue d'alimentation pour modifier le niveau de la tension de sortie.

### 3.4 Convertisseur AC-AC :

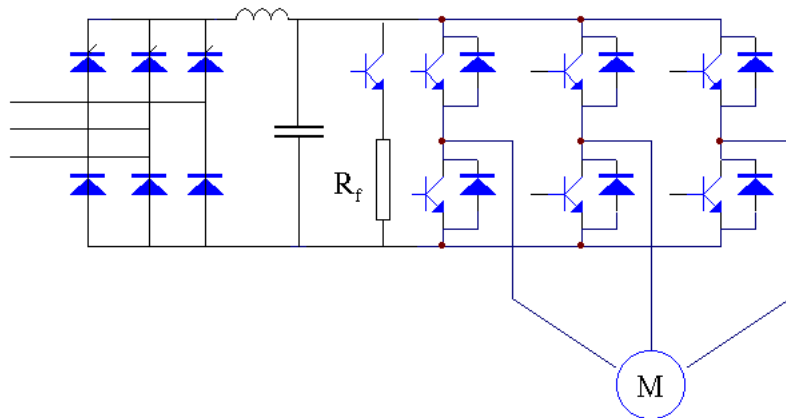
Il existe des convertisseurs indirects réalisés à partir de l'association d'un redresseur AC-DC et d'un onduleur DC-AC, ou des convertisseurs directs.

#### 3.4.1 convertisseur AC-DC + DC-AC :

Si le convertisseur AC-DC ne permet pas de régler la tension DC, il faudra lui associer un hacheur pour cela.

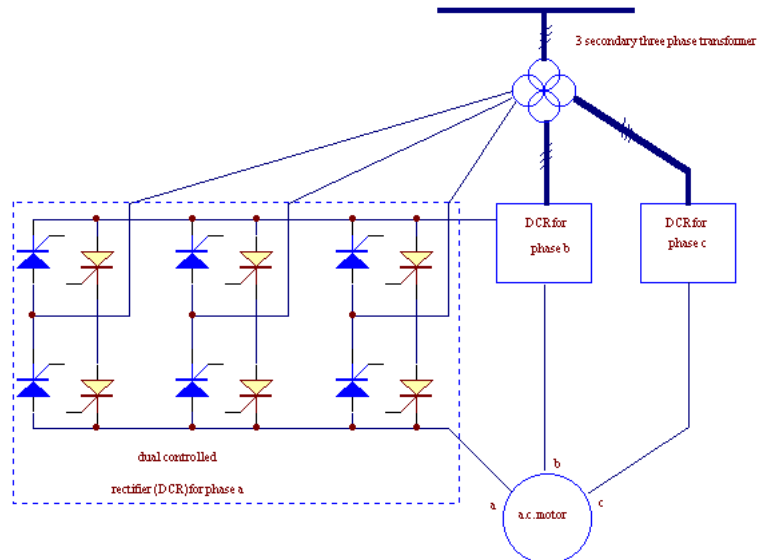


Pour palier l'impossibilité de travailler dans les 4 quadrants du convertisseur de tête, il faudra lui associer un hacheur et une résistance pour consommer l'énergie récupérée par l'onduleur.



### 3.4.2 Convertisseur direct :

Parmi les systèmes de conversion directe AC-AC, nous avons le cyclo-convertisseur.



Ce système fonctionne bien pour des fréquences de sortie inférieures à la fréquence d'entrée.

## **4 Caractéristiques et limites :**

Les caractéristiques des convertisseurs sont imposées par les caractéristiques des composants de puissance.

Ils sont caractérisés par :

- une limite en tension pendant le blocage,
- une limite en courant pendant la conduction,
- une limite en puissance dissipée dans l'élément,
- des limites en rapidité de changement d'état.

Les limites en tension et en courant caractérisent le convertisseur en terme de tension et courant, avec un coefficient de sécurité, ce qui pour l'utilisateur peut être représenté par la puissance apparente maximale ( $S = U \cdot I$ ) que peut délivrer le convertisseur.

Les limites en rapidité de changement d'état imposent la fréquence maximum de commutation des interrupteurs et ainsi la fréquence maximum des convertisseurs AC pour que le signal délivré ne soit pas trop éloigné de la forme idéale désirée.

En théorie, pendant l'état passant la tension aux bornes d'un composant est nulle et la puissance dissipée correspondante aussi, en pratique cette puissance existe et doit rester inférieure à la limite imposée.

De même, pendant le changement d'état, le courant et la tension ne changent pas instantanément de 0 à la valeur maxi mais par une évolution temporelle provoquant des pertes échauffant les composants. Ceci peut aussi limiter la fréquence des commutations et par là la fréquence des signaux de sortie.

# Chapitre 9. ASSOCIATION MACHINES ELECTRIQUES ET VARIATEURS ELECTRONIQUES

Nous avons déjà présenté les caractéristiques de fonctionnement des machines électriques dans le domaine Couple – Vitesse en supposant que les grandeurs d'alimentation, courant, tension et fréquence, pouvaient varier.

Reprenons les machines et voyons plus précisément les grandeurs à contrôler sur le variateur pour piloter les machines.

## 1. MACHINE A COURANT CONTINU

Les machines à courant continu à électro-aimants ou à aimants permanents sont régies par les équations suivantes :

$$E = k \cdot \Phi \cdot \Omega$$

$$U = E + R \cdot I \approx E$$

$$I = \frac{C}{k \Phi}$$

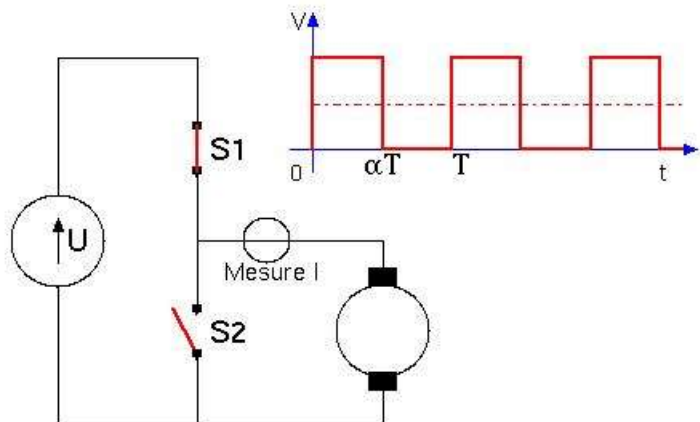
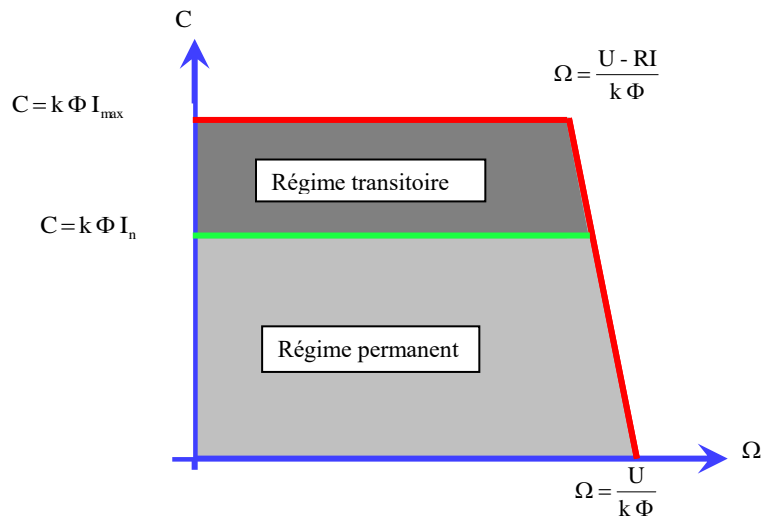
Donc, en alimentant la machine à l'aide d'un hacheur, nous pouvons modifier la tension à ses bornes en modifiant le facteur de cycle. De cette manière, nous pouvons modifier sa vitesse de rotation.

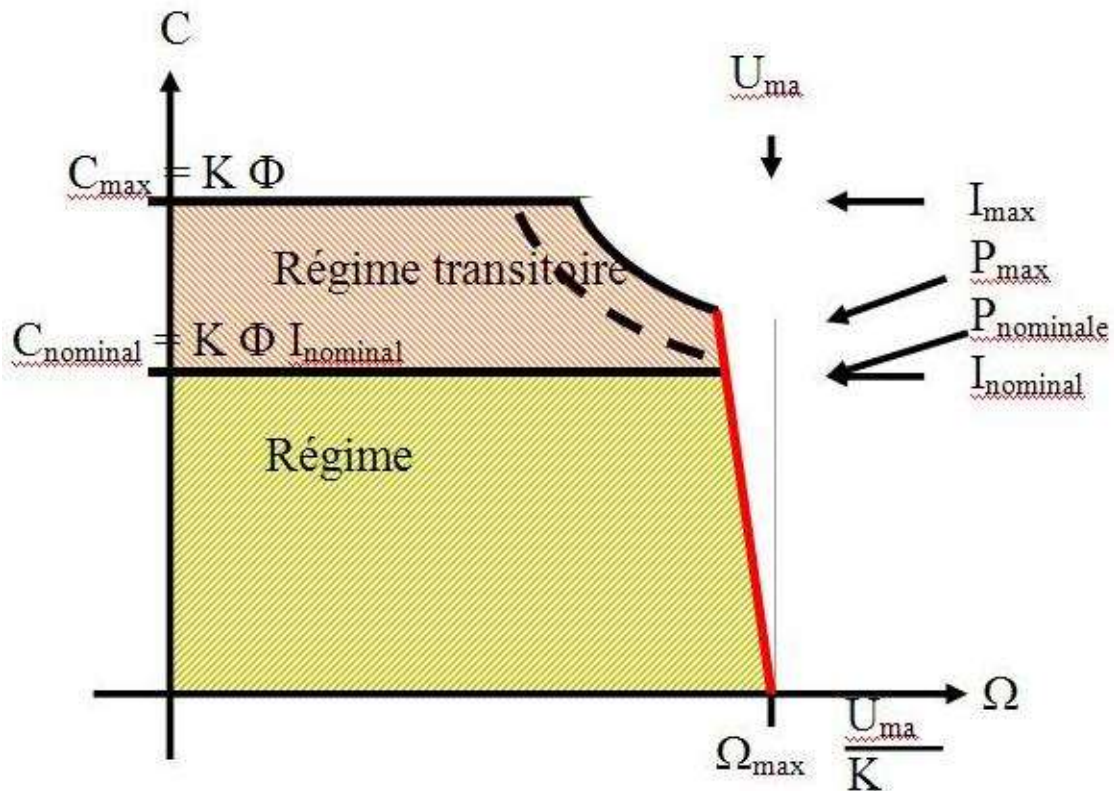
Le variateur comporte un système de mesure du courant. Si ce courant

devient trop élevé, le facteur de cycle est diminué pour diminuer le courant. Naturellement dans ce cas la tension appliquée étant plus faible la vitesse n'est plus la vitesse recherchée.

Le domaine de fonctionnement se limite donc par une vitesse maximale liée à la tension maximale, un couple maximum lié au courant maximum et un couple transitoire lié au courant transitoire.

A ceci des limites en puissance maximale peuvent être ajoutées par les capacités de la machine ou celles du variateur liées à des vitesses de commutation ou à des dissipations.





Remarque : le pilotage peut être inverse, on pilote le courant (donc le couple) et on vérifie que la tension reste dans des limites (donc la vitesse). Cette fois, nous avons un moteur couple.

## 2. MACHINE A COURANT ALTERNATIF

Les équations de ces machines sont plus compliquées, mais la tendance générale est :

$$E \rightsquigarrow \Omega$$

$$U \approx E$$

$$I \rightsquigarrow C$$

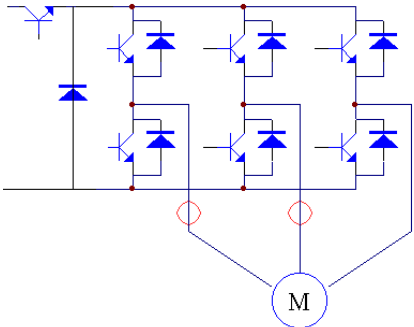
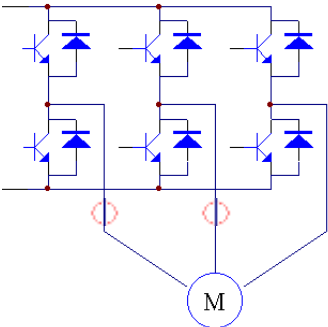
Donc une situation proche de celle que nous venons de décrire pour la machine à courant continu avec en plus une relation sur la fréquence.

$$f \rightsquigarrow \Omega \quad f = \frac{p}{2\pi} \Omega \text{ pour la machine synchrone}$$

± glissement pour la machine asynchrone

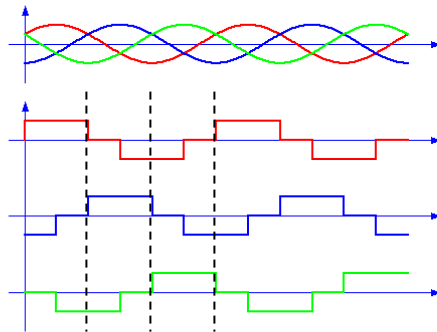
Si nous voulons pouvoir contrôler la vitesse, il faut à la fois faire varier la valeur de la tension et la fréquence.

Dans le cas d'une alimentation à partir du continu, 2 structures sont utilisables :

Onduleur à motif	Onduleur MLI (PWM)
	
<p>Le hacheur contrôle le niveau de tension, l'onduleur impose un motif et règle la fréquence des signaux de sortie. La mesure des courants agit sur le hacheur et l'onduleur pour limiter la valeur des courants.</p>	<p>Les commutations de l'onduleur permettent le suivi d'une consigne imposant la fréquence et l'amplitude des signaux de sortie. La mesure des courants modifie la consigne pour limiter leurs valeurs.</p>

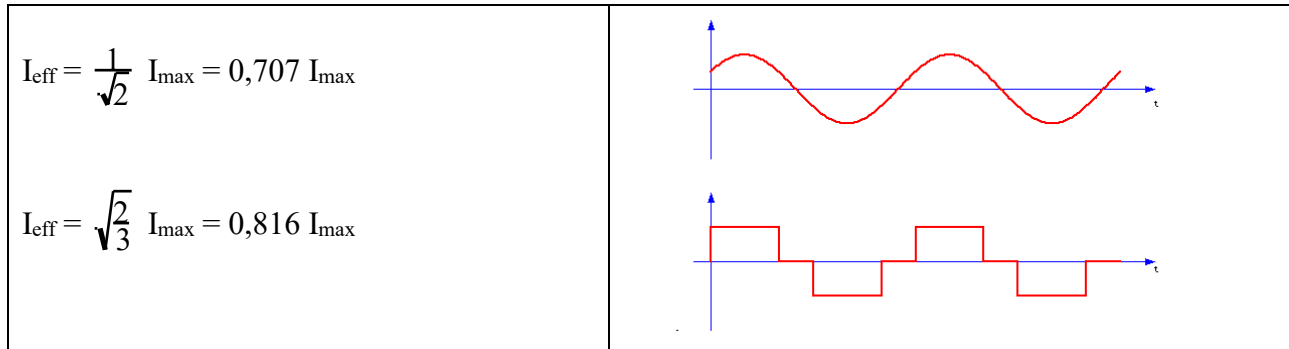
La mesure du courant sur 2 phases seulement (la 3<sup>ème</sup> étant déduite des deux mesures) permet de contrôler le courant en modifiant les commandes appliquées sur les composants.

Sur la structure précédente pour simplifier l'élaboration des ordres de commutations au lieu de suivre une consigne sinusoïdale, il est intéressant de suivre une consigne en créneaux.

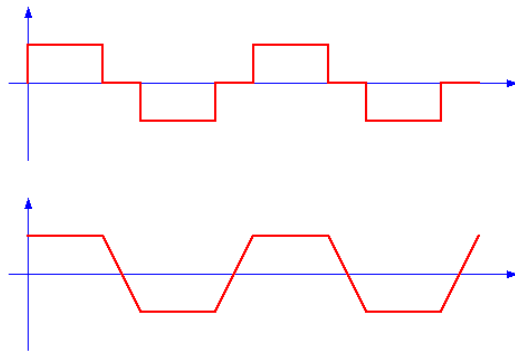


Dans ce cas, la connaissance de 3 positions du rotor de la machine suffit à l'élaboration des signaux, alors qu'il faut précisément la connaître dans le cas d'une alimentation sinusoïdale.

Pour une même valeur maximum des grandeurs (ici courants), la valeur efficace d'un signal en créneau est plus importante qu'un signal sinusoïdal.



Une valeur maximum identique nous permet d'utiliser les mêmes composants de puissance, mais dans le cas des signaux en créneaux, la puissance portée par le signal est 33% plus élevée. Pour être cohérent, il faut que les tensions et les fem soient aussi en créneaux. En fait, cela est difficile pour les fem, et la solution choisie est des fem trapézoïdales.



Nous avons donc une machine possédant :

- un capteur de position plus simple,
- un convertisseur associé réalisé avec des composants de puissance identiques,
- une puissance plus grande,
- source à courant continu.

Le fonctionnement de cette machine est (presque) identique à une machine à courant continu, mais sans balais (ni collecteur), c'est ce type de machine qui est appelé « brushless ».

Une machine Brushless est une machine synchrone à fem trapézoïdale.





# Chapitre 10. SOURCES D'ENERGIE ELECTRIQUE

## 1. INTRODUCTION

Pour assurer l'alimentation en énergie électrique de nos entraînements, nous avons à notre disposition plusieurs possibilités qui s'offrent à nous :

- les sources autonomes :
  - piles et accumulateurs,
  - cellules photo voltaïques,
  - pile à combustible.
- les sources déportées :
  - réseau de distribution,
  - groupe électrogène.

Les premières sont des sources à courant continu, les secondes, des sources à courant alternatif.

Nous rappellerons les principes de chacune et énumérerons leurs caractéristiques afin de faciliter votre choix.

Nous aborderons les problèmes communs à toutes ces sources, en particulier les protections à utiliser.

Il est bien évident que ce choix pourra être multiple, la solution idéale n'étant en définitive qu'une accumulation de compromis.

## 2. PILES ET ACCUMULATEURS

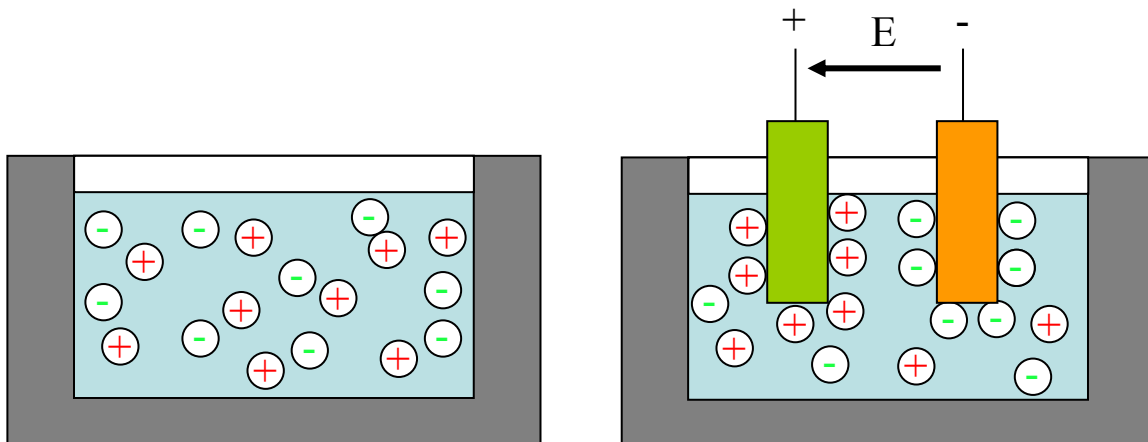
### 2.1 Principe

Très simplement, une pile est constituée de 2 électrodes et d'un électrolyte.

Les électrodes sont des conducteurs différents et l'électrolyte une solution acide ou alcaline.

La solution est un mélange d'ions positifs (cations) et négatifs (anions).

Les 2 électrodes ont une affinité différente pour les ions, l'une attire les ions positifs et l'autre les ions négatifs, ce qui crée une différence de potentiel entre elles.



Si nous plaçons une résistance sur les bornes de cette pile, un courant électrique se met à circuler.

Ce courant est dû aux électrons qui sont cédés par les ions négatifs sur l'électrode négative et absorbés par les ions positifs sur l'autre. Les ions sont « neutralisés ».

Cet échange d'électrons provoque une transformation chimique des électrodes et de l'électrolyte. Cette transformation peut se poursuivre jusqu'à complète transformation d'une des 2 électrodes (ou de l'électrolyte).

## 2.2 Différentes piles

La transformation précédente peut être réversible et dans ce cas la circulation d'un courant dans le sens opposé provoque des réactions inverses aux précédentes et la pile retrouve ces caractéristiques initiales, cette pile est dite rechargeable, on parle plus fréquemment d'accumulateurs.

Dans le cas contraire, si la réversibilité des réactions ne peut être obtenue par circulation inverse de courant, la pile est non rechargeable. Souvent ces piles utilisent des électrolytes solides ou gélatineux, ce qui permet de les qualifier de piles sèches.

Nous réserverons, les termes de piles (piles sèches) aux éléments non rechargeables et le terme d'accumulateur aux éléments rechargeables.

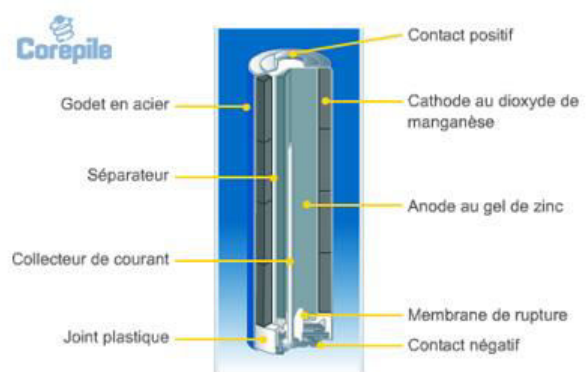
Le terme de pile venant de la forme initiale de ces éléments, réalisés par empilement (par pile) de rondelles conductrices et de rondelles de feutre imbibées d'électrolyte.

Les caractéristiques de différents types de piles dépendent des électrodes et électrolyte utilisés.

Piles sèches (non rechargeables) :



Pile saline



Pile alcaline



Accumulateur au plomb



Accumulateur NiMh

Le tableau suivant présente les caractéristiques d'une dizaine de technologies différentes, les premières étant des piles et les dernières des accumulateurs.

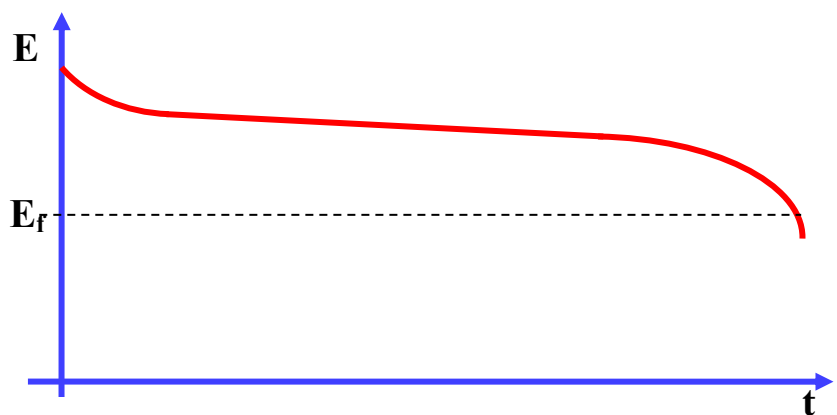
	Carbone-Zinc	Alcaline Manganèse	Argent	Zinc Air	Plomb	Nickel Cadmium	Nickel Métal hydrure	Lithium-ion	Na-ion – Li-air – LiC ...
tension à vide (V)	1,5	1,5	1,6	1,45	2	1,3	1,2	3,3 à 4	En développement dans les labos...
tension nominale (V)	0,8	0,8	0,9	1,1	1,7	1	1	3,2 à 3,7	
énergie massique (Wh/kg)	40	55	80	180	10 à 20	20 à 55	70	75 à 150	
énergie volumique (Wh/L)	80	125 à 200	450	240	40 à 80	40 à 100	170	160 à 1000	
puissance massique (W/kg)					120	220	370	260	
puissance volumique (W/L)					250	430	880	400	
taux de décharge	bas	bas	bas	très bas	haut	très haut		très haut	
électrode positive	Mn O2 + C	Zn	Zn	O2	Pb O2	Ni O OH	Ni	LCO – NMC – LMO – LFP - NCA	
électrode négative	Zn	Mn O2	Ag O2	Zn	Pb	Cd	hydrure métallique	Lithium métal – Graphite - LTO	
électrolyte	NH4 Cl Zn Cl eau	KOH + eau	KOH + eau	KOH + eau	H2 SO4 + eau	KOH + eau			
aptitude au stockage (ans)	1 à 3	4 à 5	4 à 5	3 à 4	0,1 à 0,3	0,3 à 0,5			
durée de vie					5 à 20 ans	10 à 20 2000 cycles	1200 cycles	1000 cycles	
Recharge (h)					> 8	8	< 6	< 3	

Sur ce tableau, nous remarquons que la tension disponible est relativement faible (qq volts). Les utilisations nécessitent souvent des niveaux de tension beaucoup plus importants. Pour cela, l'association en série d'éléments permet d'augmenter la tension disponible, c'est pour cela que l'on parle de batterie car il faut plusieurs (une batterie) éléments pour satisfaire un besoin spécifique. On peut réaliser une batterie de piles (non rechargeables) ou une batterie d'accumulateurs (rechargeables), mais le terme de batterie est souvent associé aux accumulateurs.

## 2.3 Caractéristiques

### 2.3.1 Décharge

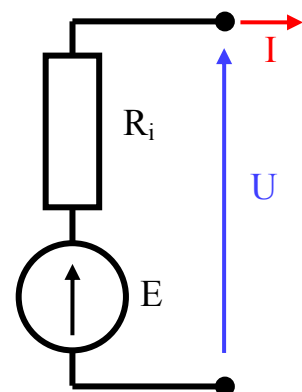
Lorsqu'une pile (ou un accumulateur) alimente une charge, la tension à ses bornes évolue en fonction du temps. Elle diminue lentement jusqu'à la décharge où elle diminue brusquement. La décharge est caractérisée par une tension finale  $E_f$ .



### 2.3.2 Résistance interne

Le circuit électrique équivalent d'une pile (ou accumulateur) peut être représenté par une fem en série avec une résistance.

Nous avons vu que la fem dépend du type de pile et du taux de décharge. De même, la résistance interne dépend également du type de la pile et un peu du taux de décharge, mais également de l'âge et de la température.



Elle est relativement faible (30 mΩ pour une pile zinc-charbon) et pour des courants normaux, la chute de tension interne est de l'ordre de 10% de la tension à vide.

### **2.3.3 Capacité**

La capacité d'une pile (ou accumulateur) est la quantité d'électricité qu'elle peut débiter avant que la tension à ses bornes atteigne  $E_F$  (tension finale).

Cette capacité s'exprime généralement en A.h (ampères-heures), bien que l'on puisse la donner en coulombs (unité légale).

$$1 \text{ A.h} = 3600 \text{ C}$$

Elle est donnée pour un temps de décharge normalisé.

La valeur normalisée était de 20 h, mais cette durée n'est pas en rapport avec les utilisations modernes des accumulateurs en particulier pour les applications de traction. Les constructeurs ont donc définis des temps de décharge normalisés différents et dans ce cas la capacité est indiquée par C5, C10 ou C20 qui sont les capacités pour des décharges en 5h, 10h ou 20h. Il est même récemment apparu des notations de capacité C3 (décharge en 3h) plus adaptée à la traction. Des décharges encore plus courtes sont envisageables.

Une pile (ou un accumulateur) de C10 = 30A.h peut débiter :

- 3 A pendant 10h,
- 0,3 A pendant 100h

Mais pas 10A pendant 3h, en effet le produit  $10A \cdot 3h = 30 \text{ A.h}$ , mais la capacité est donnée pour un temps de décharge spécifié (ici 10h).

Si le temps de décharge est plus court, la capacité pratique est inférieure à la capacité nominale de la pile. De même, si le temps est plus long, la capacité pratique augmente.

Attention, certains accumulateurs sont conçus pour des applications dites « stationnaires » qui supposent que l'on ne décharge jamais complètement l'accumulateur. Ces accumulateurs possèdent des électrodes réduites et une décharge complète entraîne souvent une destruction partielle de celles-ci.

Exemple : une batterie d'automobile (le terme de stationnaire ne s'applique pas au déplacement de la batterie) fournit de l'énergie électrique pendant des phases critiques mais courtes (démarrage, ...) et est rapidement rechargée par le générateur de bord. Cette batterie est réalisée avec des plaques de plomb minces (ce qui diminue le poids) qui ne supportent pas les décharges importantes sans destruction.

### **2.3.4 Couplage**

L'énergie et la tension limitées des piles nécessitent leur couplage : cela donne une batterie.

Les associations d'éléments peuvent se faire :

- en série pour une tension plus élevée,

- Tous les éléments doivent être de même capacité unitaire,
- la fem totale est égale à la somme des fems unitaires,
- la résistance interne totale est égale à la somme des résistances unitaires
- la capacité totale est égale à la capacité unitaire

- en parallèle pour un courant plus élevé (ou pour une capacité plus élevée),

- la fem totale est égale à la fem unitaire,
- la résistance interne est égale à la résistance unitaire divisée par le nombre d'éléments (si tous les éléments sont identiques)
- la capacité totale est égale à la somme des capacités unitaires.


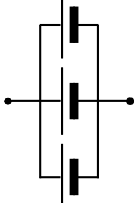
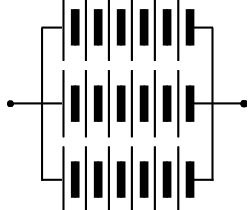
- mixte (série-parallèle) pour U et I plus élevés,

- Tous les éléments en série dans une branche doivent être de même capacité unitaire

Le même nombre d'éléments sont placés en série dans chaque branche

Dans ces associations, tous les éléments doivent être de même type.

Résumé (si toutes les éléments ont même capacité unitaire) :

Contraintes	Association			Schéma
U plus grande	Série	M éléments en série	$E_T = M \cdot E_{\text{unitaire}}$ $C_T = C_{\text{unitaire}}$ $R_{iT} = M \cdot R_i$	
I plus grand	Parallèle	N éléments en parallèle	$E_T = E_{\text{unitaire}}$ $C_T = N \cdot C_{\text{unitaire}}$ $R_{iT} = R_i / N$	
U et I plus grands	Mixte (série-parallèle)	M éléments en série dans N branches en parallèle (soit M . N éléments)	$E_T = M \cdot E_{\text{unitaire}}$ $C_T = N \cdot C_{\text{unitaire}}$ $R_{iT} = M \cdot R_i / N$	

Exemple :

Il faut alimenter sous 6V une lampe de résistance 40 Ω pendant 300 heures. Nous avons à notre disposition pour cela des piles sèches de 1,5 V ayant une capacité de 30A.h. Combien faut-il de piles ? Et comment faut-il les brancher ?

La lampe consomme un courant de :

$$I = U/R = 6/40 = 0,15 \text{ A}$$

La capacité nécessaire est :

$$0,15 \text{ A} \cdot 300 \text{ h} = 45 \text{ A.h}$$

Il faut donc 4 piles en série pour obtenir les 6 V nécessaires, cela donne une batterie de 6V-30A.h et un deuxième groupe identiques pour obtenir une capacité totale de 60A.h.

Donc 8 piles placées en 2 groupes de 4 piles en série, ces 2 groupes eux-mêmes placés en parallèle. Ceci nous permettra de fonctionner pendant 400h.

4 piles (en série) ne nous auraient permis de fonctionner que 200h.

### 2.3.5 Recharge

Dans le cas des accumulateurs, il est nécessaire de prévoir une recharge.

Cette recharge s'effectue avec un rendement de 80 à 90 % en capacité, c'est-à-dire que la batterie reçoit 100 A.h et fournit 80 à 90 A.h lors de la décharge. Ceci donne un rendement énergétique global encore plus faible (50 à 70 %) car la tension de charge est supérieure à la tension de décharge.

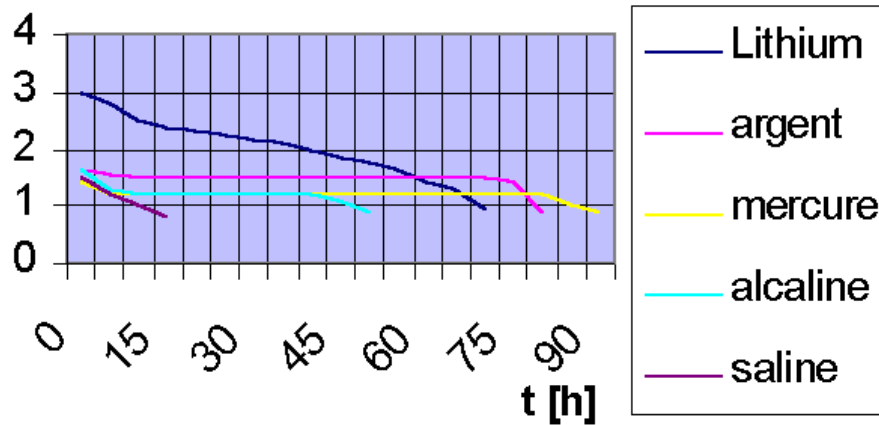
La recharge demande certaines précautions, en particulier, lors d'une charge prolongée au-delà de la charge normale, il y a un risque de production d'hydrogène par électrolyse. Ce gaz est très dangereux, il y a un risque important d'explosion, il faut donc assurer la charge dans un local correctement ventilé.

Certains types d'accumulateurs (NiCad) supportent mal les décharges partielles. Dans ce cas, certaines parties de l'électrolyte ne fonctionnant pas « s'endorment » et la capacité utile diminue fortement. Pour éviter cela, il faut prévoir régulièrement une décharge complète suivie d'une recharge totale.

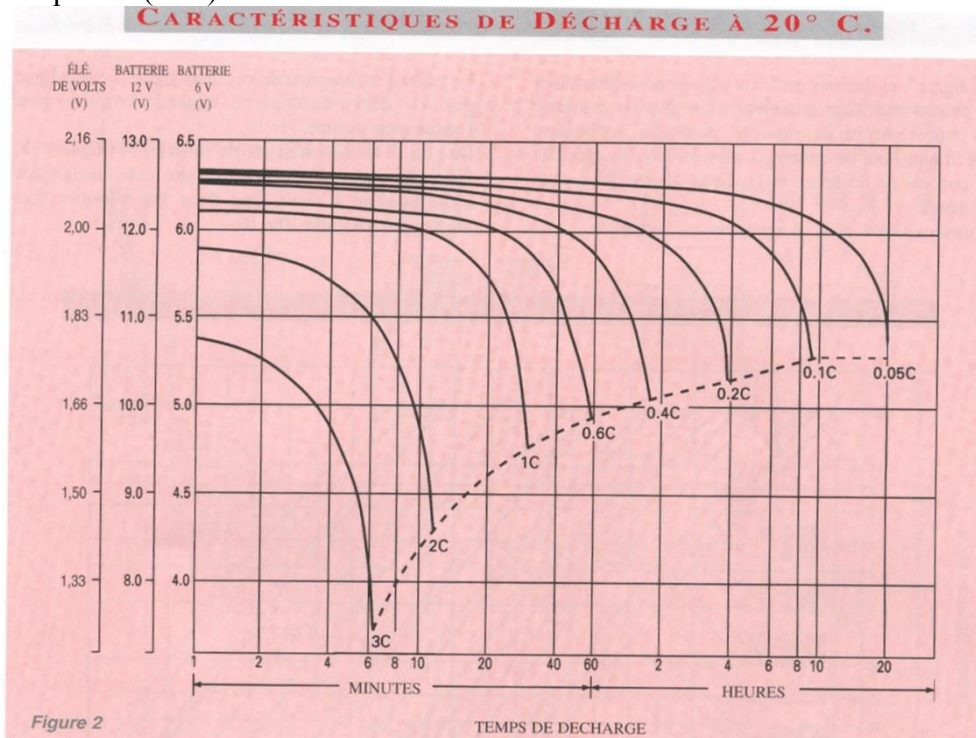
## 2.4 Courbes

Tension de décharge

### UM Décharges des piles



Batteries au plomb (C20)

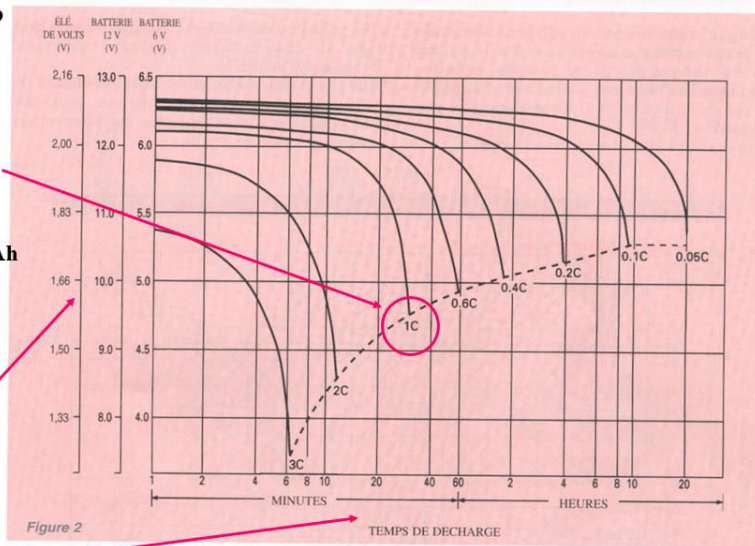


Utilisation de ces courbes



**Batteries au Plomb (C20)**

Courant de décharge exprimé en capacité !  
Exemple :  
Batterie de capacité 10Ah  
 $I = 1 C \Rightarrow I = 10 A$



22 Tension en fonction du temps pour différentes valeurs du courant de décharge

**Batteries au Plomb (C20)**

Exemple :  
 $C_{20} = 10 Ah$

$I = 0,05 C = 0,5 A$

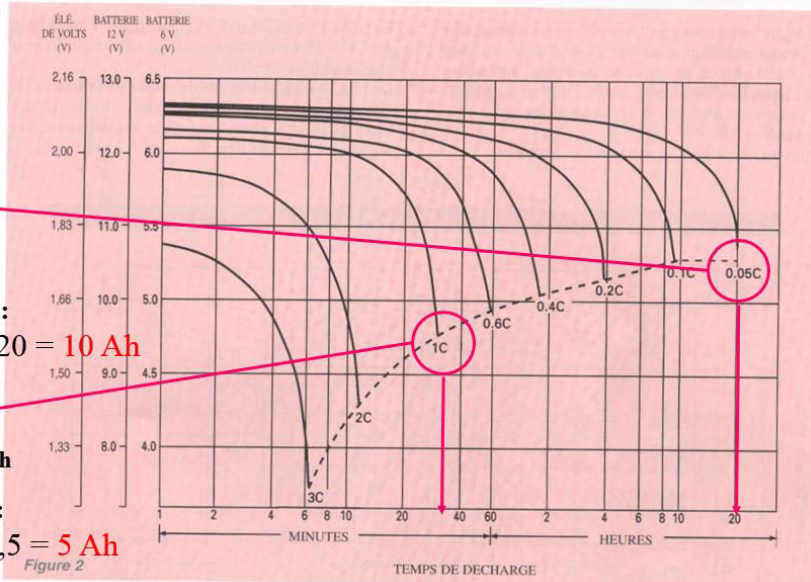
Temps = 20 h

Capacité pratique :  
 $C = I \cdot T = 0,5 \cdot 20 = 10 Ah$

$I = 1 C = 10 A$

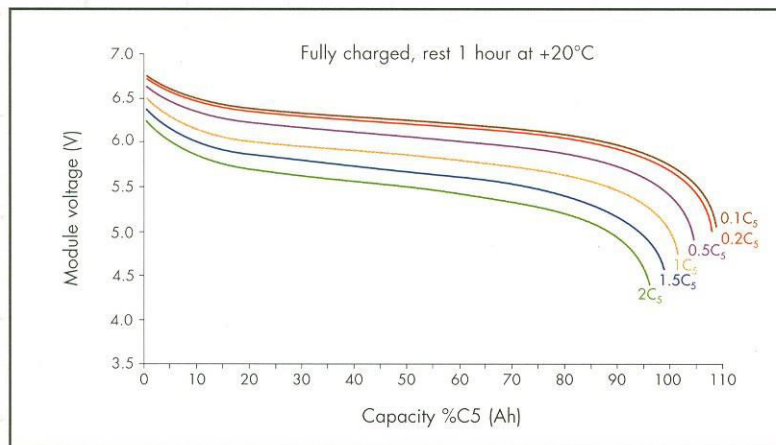
Temps = 30mn = 1/2 h

Capacité pratique :  
 $C = I \cdot T = 10 \cdot 0,5 = 5 Ah$



3 Batteries Nickel-Cadmium ( $C_5 = 100 Ah$ )

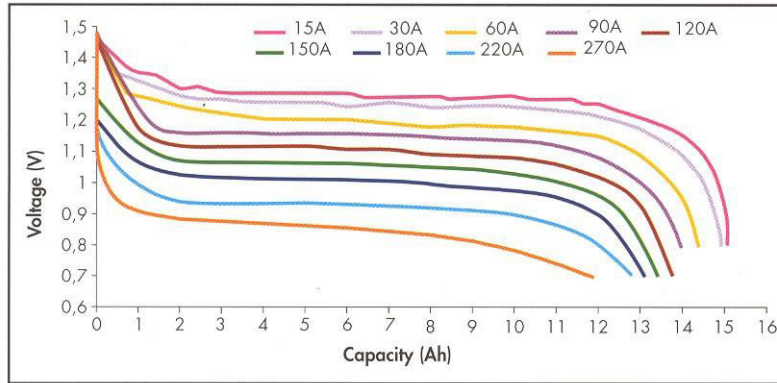
Typical discharge at +20°C



Batteries Nickel-Métal hydrure ( $C_1 = 14 Ah$ )

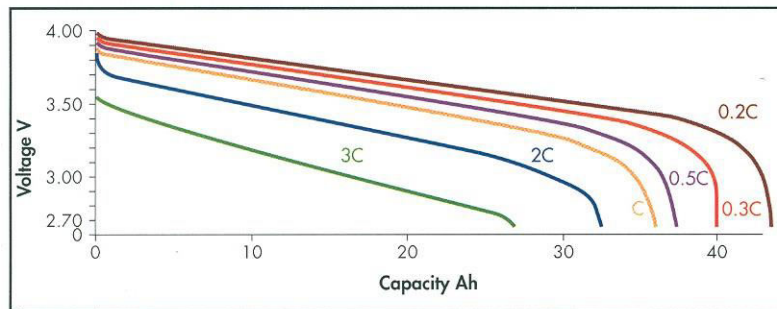


**VH4/5SF cell performances**  
(Constant current discharges tests)

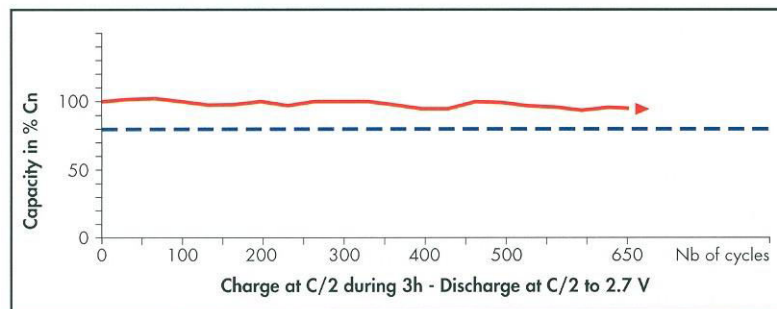


Batteries Lithium-Ion (C3 = 43 Ah)

**Available capacity versus discharge rate**



**Capacity evolution versus number of cycles**



### **3 RESEAU ET GROUPE ELECTROGENE**

#### **3.1 Distribution de l'énergie électrique**

L'énergie électrique est produite à des tensions de 15 à 25 kV. Elle est ensuite transportée sur de longues distances entre 220 et 700 kV, la tension est ensuite progressivement abaissée pour assurer une distribution régionale (65 kV), une distribution locale (15 kV) et enfin son utilisation se fait à 230/400V.

Selon la puissance nécessaire, l'énergie électrique est proposée selon différentes « formes ».

Puissance	Alimentation
≤ 18 kVA	Monophasé Basse Tension
≤ 36 kVA	Triphasé Basse Tension
≤ 250 kVA	Triphasé Basse Tension
> 250 kVA	Triphasé 20kV Triphasé 63 kV

### 3.2 Mise en œuvre

Afin de pouvoir intervenir sur les éléments constitutifs du système alimenté par le réseau, il faut prévoir un appareillage permettant de l'isoler de la source d'énergie électrique.

Cet élément est un sectionneur, il assure seulement cette fonction d'isolement. Il ne peut être manœuvré en charge, il faut lui adjoindre un interrupteur pour assurer la fonction de mise sous tension (et hors tension).

Cette fonction d'isolation (ainsi que les suivantes de protection) est à assurer aussi pour les autres types de sources (piles, accumulateurs, cellules photo-voltaïques, pile à combustible).

### 3.3 Protection



Il est aussi nécessaire de prévoir un système de protection :

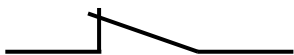

Contre les surintensités (surcharge ou court-circuit)	Disjoncteur	rapide réutilisable après déclenchement cher
	Fusible	Efficace 1 seule utilisation Peu coûteux
Contre les contacts pour la protection des personnes	Différentiel	Efficace

### 3.4 Représentation

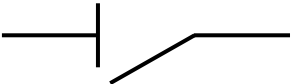

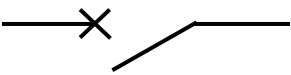

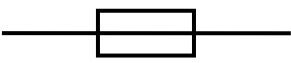
Toutes ces fonctions (isolement, protection) sont assurées par des éléments qui établissent ou interrompent les circuits électriques. Ces éléments appartiennent à ce que l'on appelle l'appareillage électrique.

Sur les schémas électriques, les systèmes de connexion (et d'interruption) des circuits sont représentés par des contacts. Sur les schémas, ces contacts sont toujours représentés au repos, donc les contacts à fermeture sont représentés ouverts et les contacts à ouverture sont représentés fermés. Lors de leur passage de l'état de repos à l'état de travail, les contacts se déplacent du bas vers le haut ou de la gauche vers la droite selon leur situation horizontale ou verticale.

Contact	Horizontal	Vertical
Contact à fermeture		

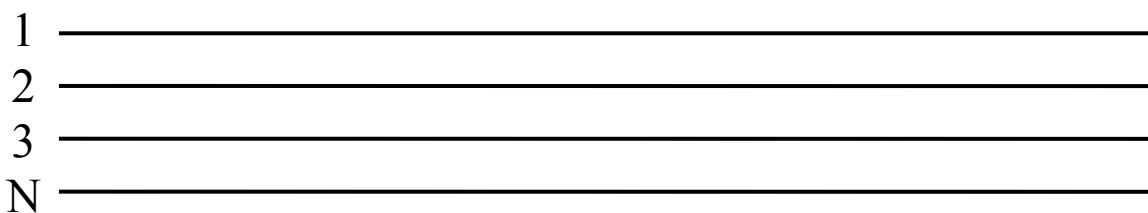
Contact à ouverture		
---------------------	---	---

Les fonctions particulières associées aux contacts sont représentées par une forme particulière des contacts (dans ce cas, nous aurons des contacts à fermeture).

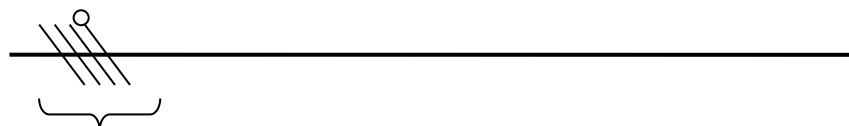
Nom	Fonction	Représentation
Sectionneur	Isolement	
Interrupteur	Mise sous ou hors tension	
Disjoncteur	Protection	
Contacteur	Mise sous et hors tension Protection	
Fusible	Protection	

Un sectionneur coupe l'alimentation sur tous les contacts (2, 3 ou 4).

La représentation peut reproduire les fils ou le câble. Dans ce dernier cas, le nombre de conducteurs sera marqué grâce à des traits obliques sur le câble.



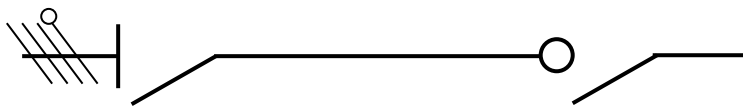
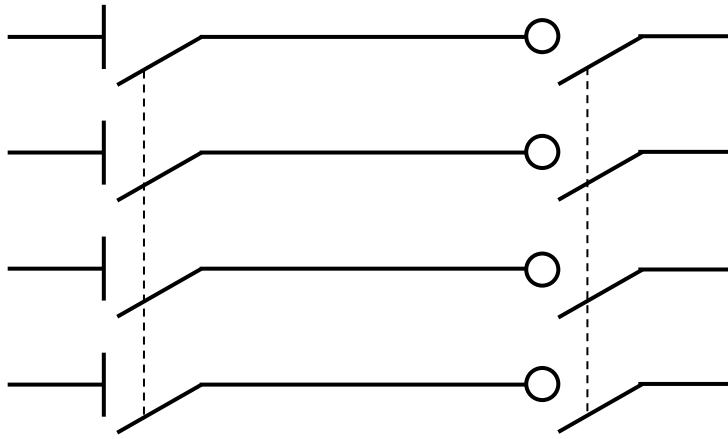
Représentation multifilaire



1 câble de 4 fils dont 1

Représentation unifilaire

Exemple :



Tous les contacts du sectionneur coupent l'alimentation, de même, tous les contacts de l'interrupteur sont actionnés ensemble.

Les caractéristiques de choix de l'appareillage reposent sur les valeurs nominales de tension et de courant qui représentent les valeurs normales de fonctionnement.

Les fonctions d'isolement et de protection doivent aussi être impérativement réalisées pour toute alimentation électrique quelle soit faite par des accumulateurs, des cellules photo-voltaïques ou une pile à combustible. L'adaptation sera faite en fonction du danger potentiel lié au niveau de tension et au niveau de puissance mis en jeu.

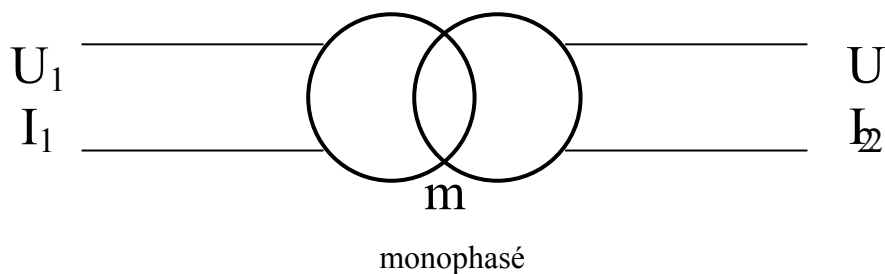
Sectionneur	
Interrupteur	

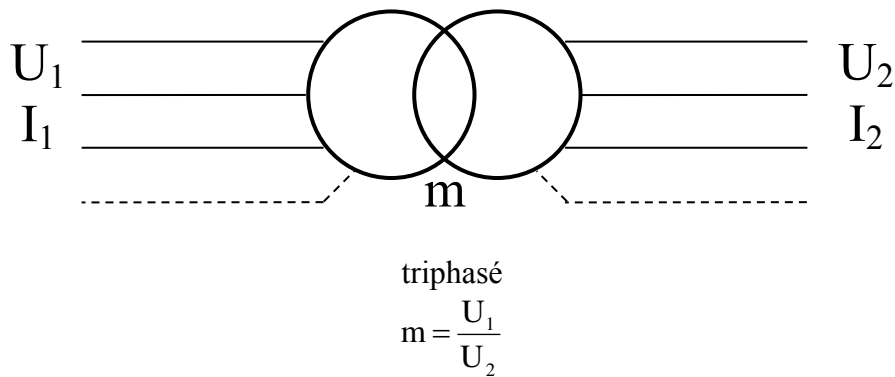
Contacteur	
Fusible	 <p>Détection fusion fusible</p> <p>Fusibles à percuteur</p>
Disjoncteur	

### 3.5 Transformateur

Nous l'avons vu lors de la description de la distribution de l'énergie électrique, il est parfois nécessaire de modifier le niveau de tension de l'alimentation.

Pour cela nous utiliserons un transformateur qui est un système transformant l'énergie électrique alternative sinusoïdale en énergie électrique alternative sinusoïdale, mais à un niveau de tension différent.





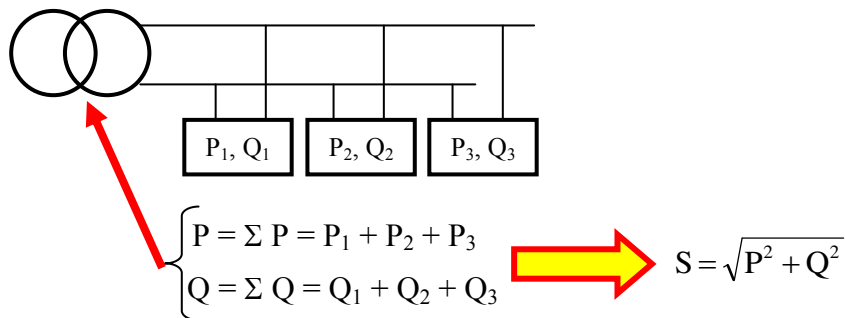
Monophasé	$P_1 = U_1 \cdot I_1$	$P_2 = U_2 \cdot I_2$
Triphasé	$P_1 = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1$	$P_2 = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_2$

Comme le rendement est très bon,  $\eta = 0,95$  à  $0,99$ ,  $P_1 \approx P_2$ , donc  $U_1 \cdot I_1 \approx U_2 \cdot I_2$

Comme  $m = \frac{U_1}{U_2} \Rightarrow m = \frac{I_2}{I_1}$

Le transformateur est choisi par les niveaux de tension primaire et secondaire et par la puissance disponible.

Il faut pour le choisir faire le bilan des puissances consommées par les charges branchées au secondaire.



Cette puissance apparente est une caractéristique essentielle du transformateur.

### 3.6 Groupe électrogène

Le choix d'un groupe se fera comme un transformateur en faisant le bilan des puissances.

Le groupe sera choisi ayant :

- la puissance apparente nécessaire,
- et la tension requise.

Ici encore, il faudra veiller à placer les protections indispensables :

- surintensité,
- protection des personnes (différentiel).

### 3.7 Compatibilité électromagnétique (CEM)

Toute utilisation d'un système électrique entraîne la création de perturbations rayonnées par champ électro-magnétique autour du système ainsi que de perturbations conduites par les liaisons filaires.

Lors de son utilisation, un système électrique ne doit pas perturber les systèmes placés aux alentours ni être sensible à leurs présences.

Cette garantie est assurée par les normes régissant la CEM.

Ces normes imposent aux systèmes électriques de ne pas générer de perturbations au-dessus d'un seuil, et d'être insensibles aux perturbations produites par les autres éléments si elles sont en dessous d'un seuil.

Pour vérifier ces garanties, il faut souvent assurer les connexions et les branchements avec des câbles adéquats et dans des conditions précises définies par les constructeurs. Ces précautions sont décrites dans les modes d'emploi et d'installation qu'il est vivement conseillé de suivre.

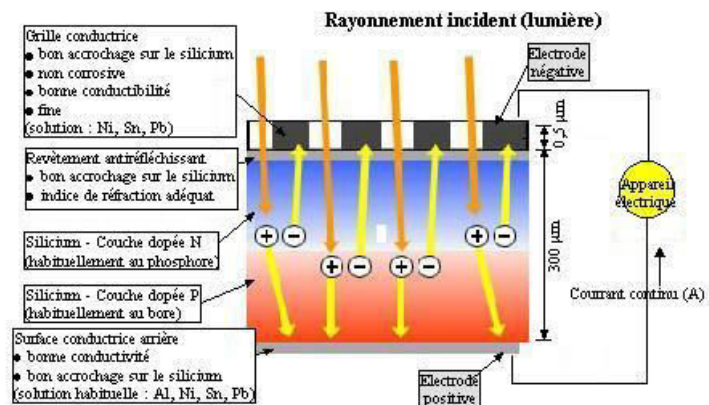
---

## 4. CELLULE PHOTO-VOLTAÏQUE

### 4.1 Principe

Dans une cellule photovoltaïque (ou photopile), l'énergie cinétique des photons est convertie en énergie électrique. La cellule fournit un courant continu sous une tension présente à ses bornes.

Les caractéristiques d'une photopile lui donnent un comportement proche d'un générateur de courant continu.



L'énergie disponible aux bornes d'une cellule photovoltaïque est fonction de l'énergie incidente et des pertes, ce qui se traduit par :

$$E_{\text{électrique}} = E_{\text{lumineuse}} - P_{\text{thermique}}$$

$E_{\text{électrique}}$  = énergie disponible aux bornes de la cellule

$E_{\text{lumineuse}}$  = énergie incidente (flux lumineux).

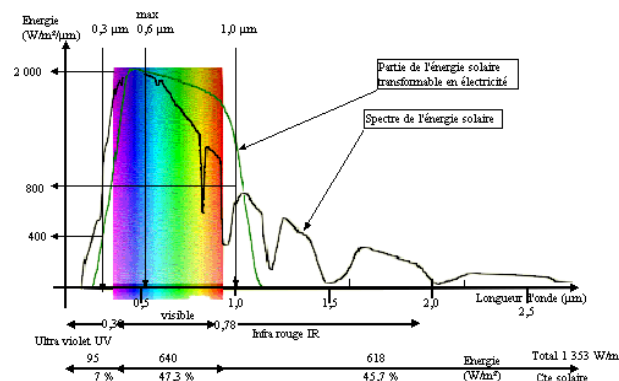
$P_{\text{thermique}}$  = énergie perdue

Son rendement est le rapport entre l'énergie électrique qu'elle fournit et l'énergie incidente du rayonnement (visible ou invisible à l'œil, lumineux ou solaire) :

$$\eta = E_{\text{électrique}} / E_{\text{lumineuse}}$$

L'énergie électrique disponible aux bornes d'une cellule photovoltaïque est fonction de :

- du type de la cellule :
  - technologie,
  - formes,
  - dimensions
- du rayonnement incident :
  - sa répartition spectrale,
  - son angle d'incidence,
  - sa quantité d'énergie,
- des conditions ambiantes de fonctionnement :
  - température de l'environnement,
  - vitesse du vent,
  - état de la surface de la cellule.



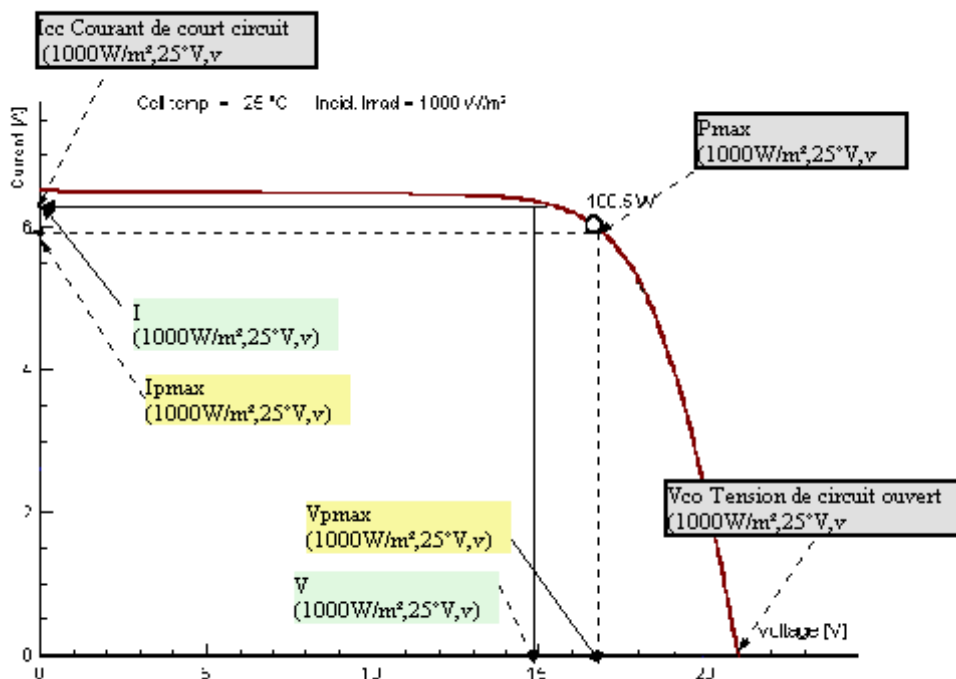


## Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques

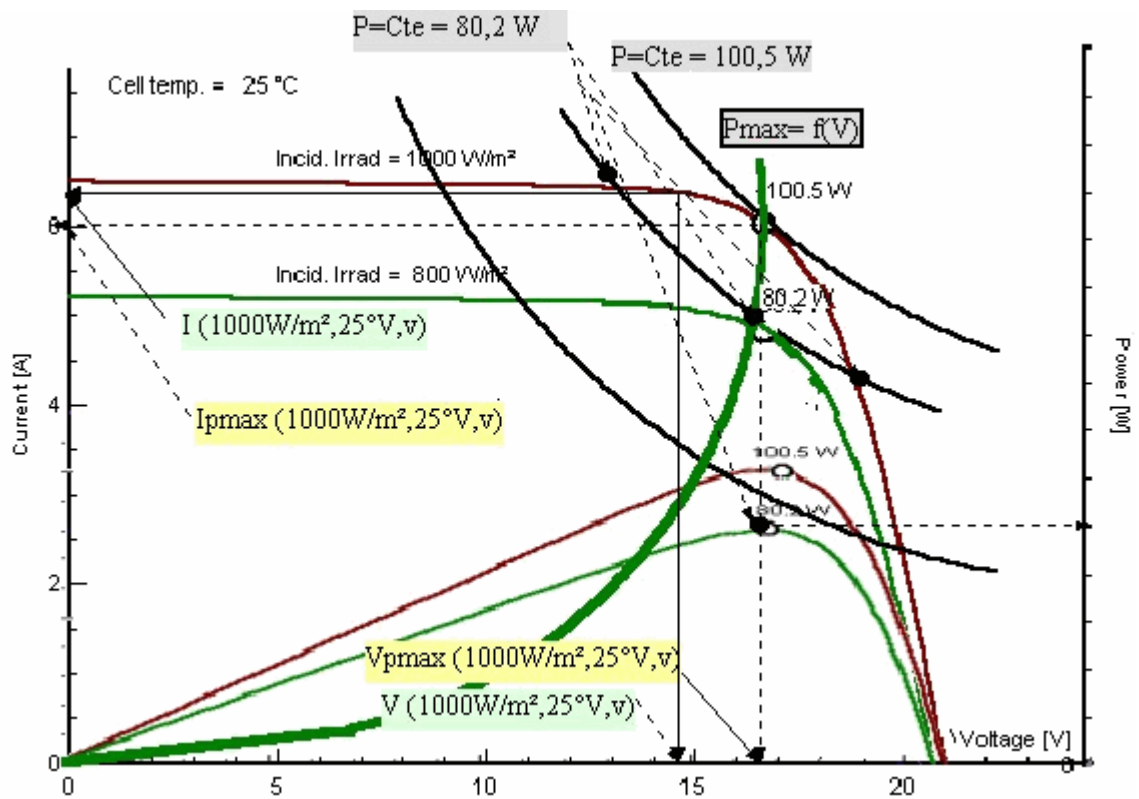
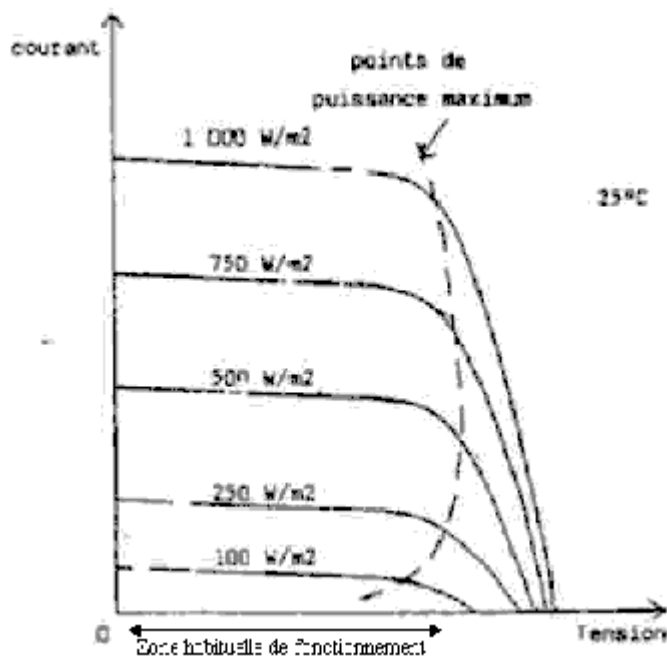
Type de cellule	Rendement des cellules PV			Domaines d'applications
	théorique	en laboratoire	disponibles	
Si mono (silicium monocristallin)	27,0 %	24,7 %	14,0-16,0 %	Modules de grandes dimensions pour toits et façades, appareils de faibles puissances, espace (satellites)
Si poly (silicium polycristallin)	27,0 %	19,8 %	12,0-14,0 %	Modules de grandes dimensions pour toits et façades, générateurs de toutes tailles (reliés réseau ou sites isolés)
Si a (silicium amorphe)	25,0 %	13,0 %	6,0-8,0 %	Appareils de faible puissance production d'énergie embarquée (calculatrice montres...) modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
GaAs	29,0 %	27,5 %	18,0-20,0 %	Systèmes de concentrateur, espace (satellites).
CIGS	27,5 %	18,2 %	10,0-12,0 %	Appareils de faibles puissances, modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
CdTe	28,5 %	16,0 %	8,0 %	Modules de grandes dimensions (intégrations dans le bâtiment)
Si ruban (silicium en ruban)	27,0 %	27,0 %	9,0-11,0 %	Module non spécifique

## 4.2 Caractéristiques

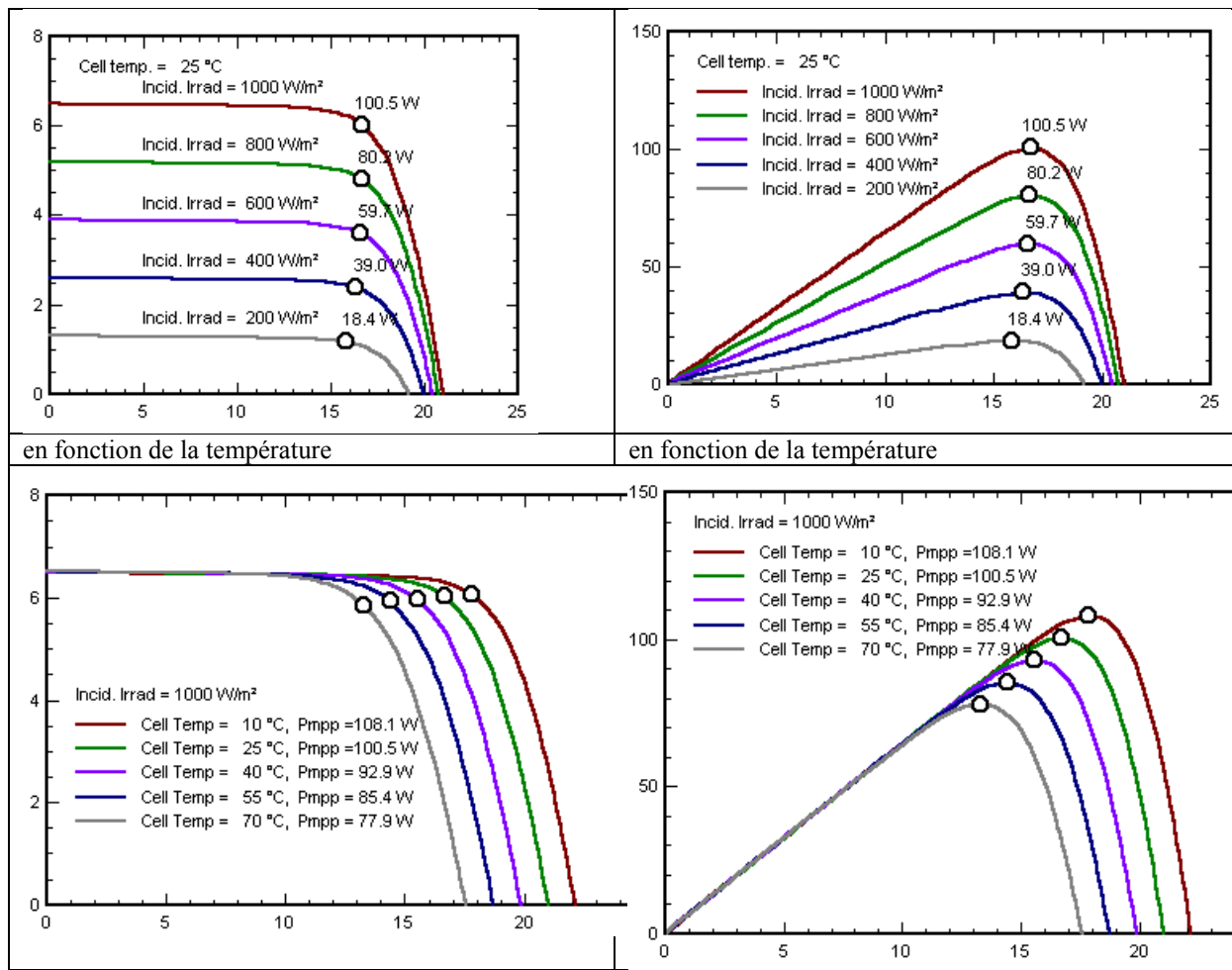
Caractéristique courant-tension d'une cellule :



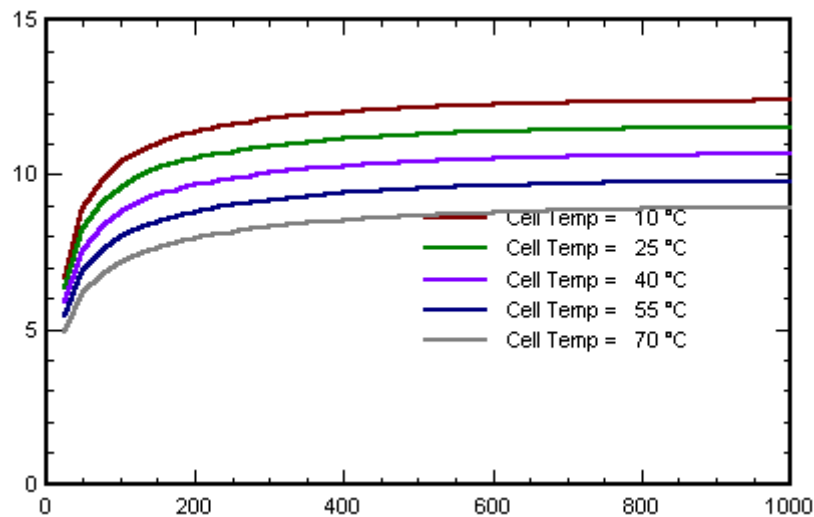
En fonction de l'ensoleillement :



Caractéristique courant-tension en fonction de l'ensoleillement	Caractéristique puissance-tension en fonction de l'ensoleillement
--	--



Rendement en fonction de la température et de l'ensoleillement :

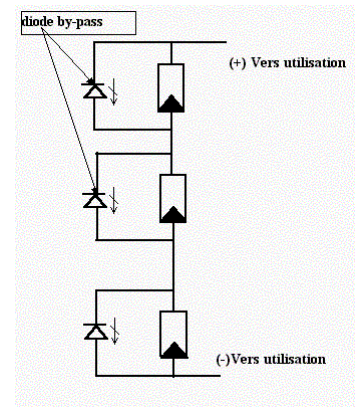


### 4.3 Précautions d'emploi

Une cellule délivre des niveaux de tension et de courant insuffisant pour les utilisations courantes, pour augmenter la tension disponible, il faut placer plusieurs cellules en série et plusieurs groupes de cellules série en parallèle pour augmenter le courant.

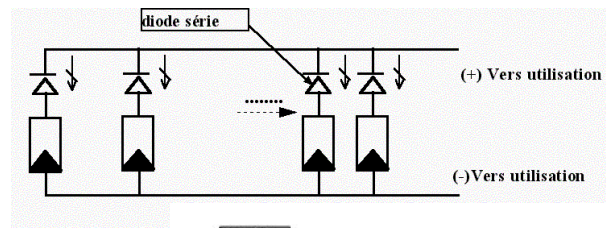
Cette façon de procéder demande quelques précautions d'emploi pour corriger les effets de l'occultation d'une cellule.

En effet, si les cellules sont placées en série, leurs tensions s'ajoutent et le courant est le même pour toutes les cellules. Toutes les cellules sont supposées identiques et éclairées de la même façon. Leurs tensions sont identiques et la tension totale vaut le produit du nombre de cellules par la tension unitaire. Si l'une d'entre elles est occultée, sa caractéristique de fonctionnement change et comme le courant doit rester identique dans toutes les cellules, la cellule occultée devient réceptrice et s'oppose au fonctionnement général de l'ensemble. Pour éviter cela, il faut protéger chaque cellule d'un fonctionnement inverse par une diode placée en by-pass.

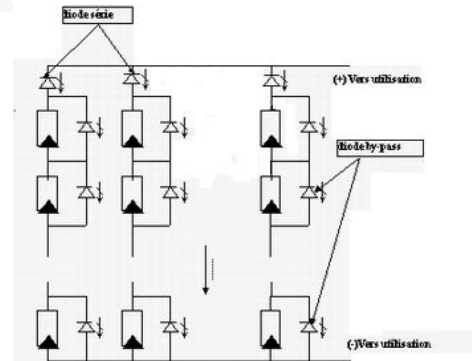


De même, si les cellules sont placées en parallèle, le courant total est la somme des courants de chaque cellule et la tension est identique sur chaque cellule.

Si une cellule est occultée, comme la tension doit rester identique pour toutes les cellules, cette cellule va fonctionner en courant inverse et devenir réceptrice. Nous pouvons remédier à cet inconvénient en plaçant une diode série.



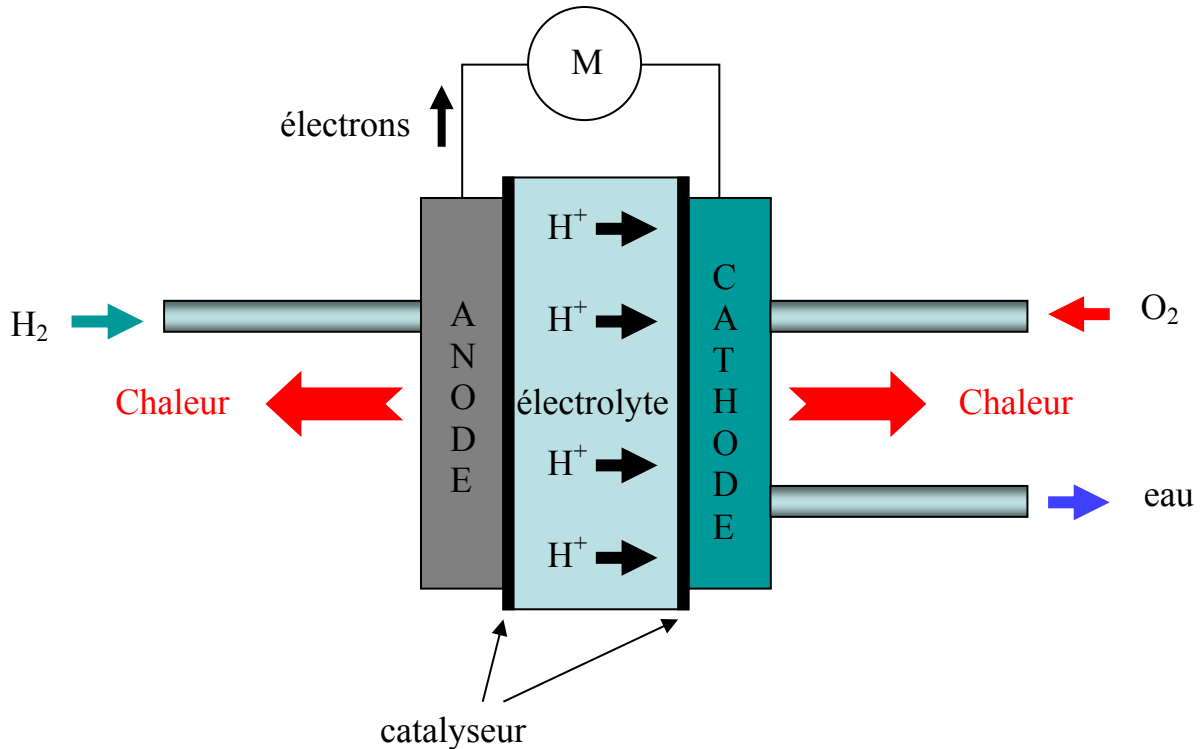
Dans les associations série-parallèle, il faut à la fois prévoir les diodes by-pass et les diodes série. Les panneaux complets sont déjà équipés de ces diodes, la mise en parallèle de panneaux peut nécessiter le montage de diodes série.



## 5 PILES A COMBUSTIBLE

### 5.1 Principe

Le principe de la pile à combustible (PAC) est connu depuis 1839, mais son exploitation pour des utilisations courantes n'est que très récente.



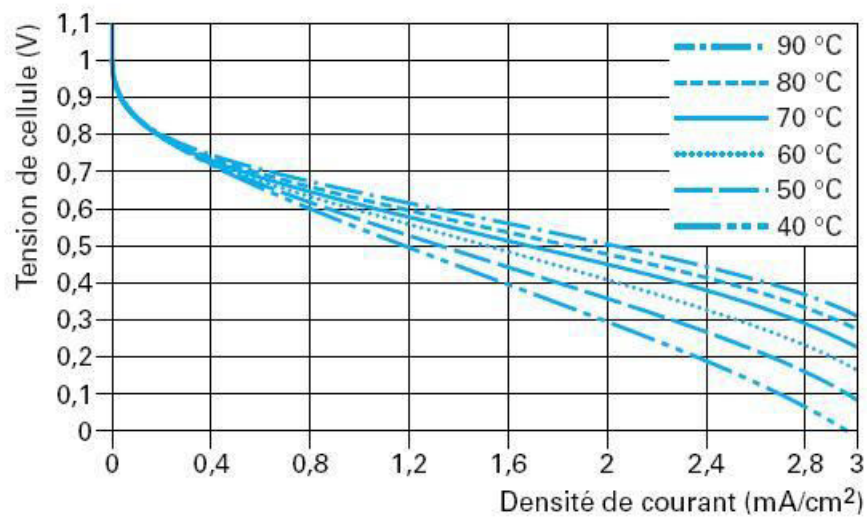
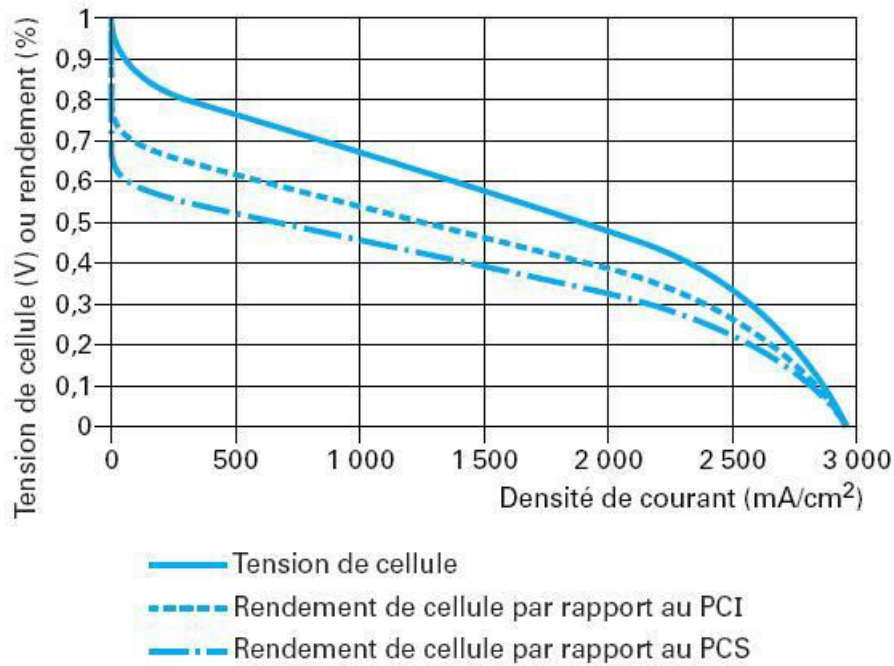
La réaction de l'hydrogène sur l'oxygène à l'aide d'un catalyseur produit de l'eau et deux types d'énergie : de l'électricité et de la chaleur.

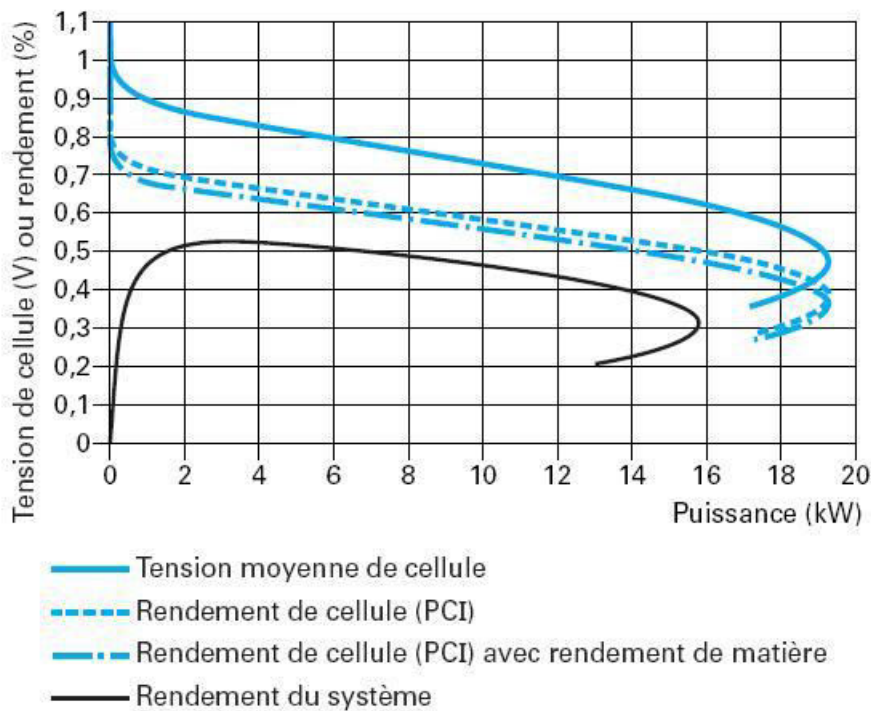
Selon les éléments utilisés (électrolytes et catalyseur), différents combustibles peuvent être employés. Ces choix conduisent à différentes technologies de PAC pour diverses applications.

Type de pile	Électrolyte	Température (°C)	Combustible	Gamme de puissance
Alcaline (AFC : Alkaline Fuel Cell)	Potasse (liquide)	80	$H_2$	1 – 100 kW
Acide polymère (PEMFC : Proton Exchange Membrane Fuel Cell)	Polymère (solide)	60 – 120	$H_2$	1W – 10 MW
(DMFC : Direct Methanol Fuel Cell)	Polymère (solide)	60 – 120	Méthanol	100 – 1000 W
Acide phosphorique (PAFC : Phosphoric Acid Fuel Cell)	Acide phosphorique (liquide)	200	$H_2$	200 kW – 10 MW
Carbonate fondu (MCFC : Molten Carbonate Fuel Cell)	Sels fondus (liquide)	650	$H_2$ Produit hydrocarbure	500 kW – 10 MW
Oxyde solide (SOFC : Solid Oxide Fuel Cell)	Céramique (solide)	700 – 1000	$H_2$ et CO Produit hydrocarbure	100 kW – 10 MW

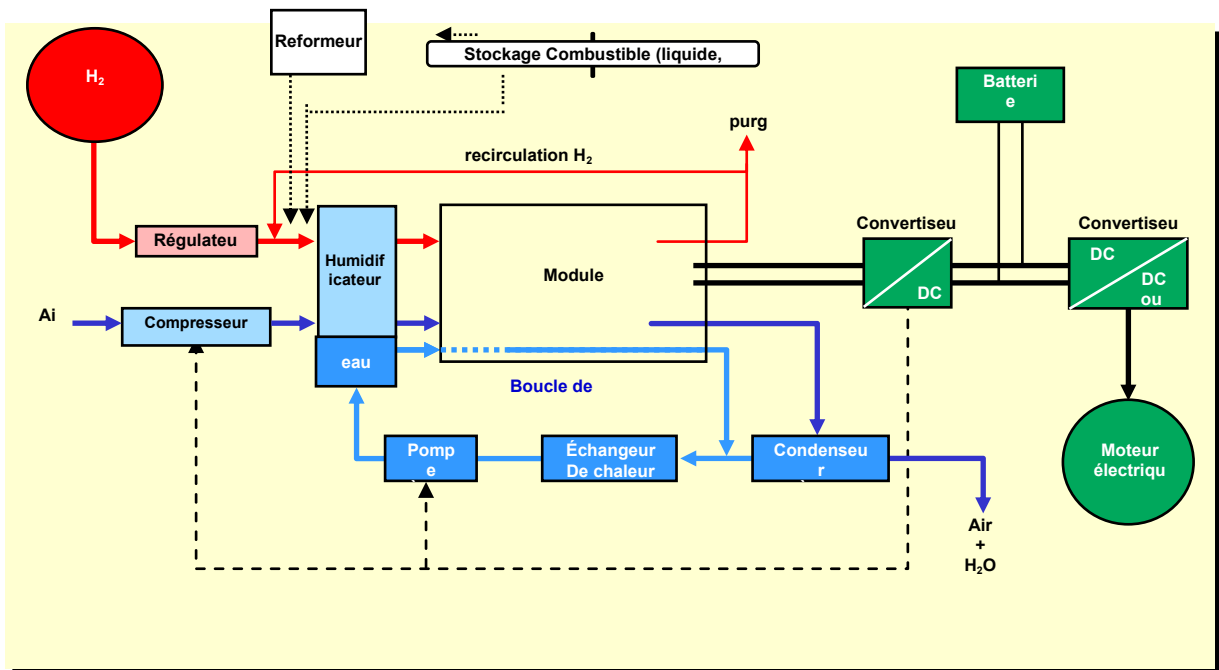
## 5.2 Caractéristiques

La tension délivrée par cellule unitaire est faible et nécessite la mise en série de plusieurs cellules pour obtenir les niveaux de tension demandés par les systèmes d'entraînements électriques.





Les différents auxiliaires nécessaires au fonctionnement et à la sécurité de la PAC modifient son encombrement, son rendement. Chaque application est un compromis pour obtenir l'optimisation énergétique du système.



Avantages :	Inconvénients :
Rendements énergétiques élevés même à charge partielle	Coût
Faibles émissions sonores	Poids et volume
Pas (ou peu) d'émissions polluantes	Durée de vie
Construction modulaire	Energie thermique produite
Diverses températures de fonctionnement	Carburant
Pas de parties en mouvement	

# **Chapitre 11. CONTRÔLE DES MACHINES**

## **ELECTRIQUES**

### 1/ Introduction et applications

- Exemples d'applications
- Régulation et asservissement
- Principales caractéristiques (cahier des charges) :

### 2/ Principes de commande

#### 2.1/ Chaîne de conversion électromécanique

#### 2.2/ Principes de commande

- Commande directe sans chaîne de retour ("en boucle ouverte")
- Commande en boucle fermée (système asservi)

#### 2.3/ Correction PID

#### 2.4/ Commande analogique ou numérique

- Commande analogique
- Commande numérique
- Comparaison des technologies analogique et numérique

### 3/ Capteurs

#### 3.1/ Mesure directe ou indirecte

#### 3.2/ Mesure de position

- Mesures analogiques
- Mesures numériques : codeurs et règles optiques
- Comparaison des performances

#### 3.3/ Mesure de vitesse

Mesure analogique : génératrice tachymétrique

Mesure numérique

### 4/ Variateurs de vitesse

#### 4.1/ Machine à courant continu

- Commande sans capteur
- Commande avec capteur (boucle fermée)
- Comparaison des performances

#### 4.2/ Machine synchrone

Caractéristiques

- Commande :

#### 4.3/ Machine asynchrone

- Commande sans capteur
- Commande avec capteur
- Comparaison des performances

#### 4.4/ Petite chronologie de la variation de vitesse

### 5/ Commande d'axe : positionnement et génération de trajectoire

#### 5.1/ Commande mono-axe

- Structure
- Trajectoire

#### 5.2/ Commande multi-axes

- Structure
- Mode point à point (positionnement):
- Interpolation linéaire (suivi de trajectoire):



# 1/ Introduction et applications

## • Exemples d'applications

La grandeur contrôlée est, généralement, une grandeur mécanique :

- Contrôle de force ou couple: enroulement à tension constante (papier, tissus, métal...)
- Contrôle de vitesse (vitesse constante) : usinage (tournage, fraisage), lecteur de disque (33 tr/mn, CD) ou de bande, mesure de temps (horloge), convoyeurs, pompes...
- Contrôle de vitesse (vitesse variable) : usinage, traction...
- Positionnement : perçage, placement de composants, soudure par points...
- Contrôle de trajectoire dans l'espace : robotique, machine outil, soudure arc...

## • Régulation et asservissement

### a/ Problème de régulation

**objectif:** maintenir une grandeur (la sortie) à une valeur constante fixée (**consigne**), malgré l'influence des perturbations (entrées non-commandées du processus piloté).

Exemple : maintenir la vitesse de la voiture à 130 km/h  $\pm$  5% quelque soit la pente et le vent (en conditions normales).

### b/ Problème d'asservissement:

**Objectif:** contrôle dynamique de la sortie: consigne variable.

**Difficulté:** tendance naturelle des processus physiques à "l'inertie".

Mouvement rapide => dépense d'énergie élevée.

Exemple: une voiture qui suit une autre voiture.

Un système lent (2CV) aura du mal à suivre une consigne rapide (F1).

Les **deux problèmes** peuvent exister **simultanément** : suivi d'une consigne variable en présence de perturbations.

## • Principales caractéristiques (cahier des charges) :

- Précision: écart entre la valeur obtenue et la valeur désirée (consigne).

Régulation : Précision statique (consigne constante)

Asservissement : Précision dynamique (consigne variable)

- Rapidité de réponse, dynamique

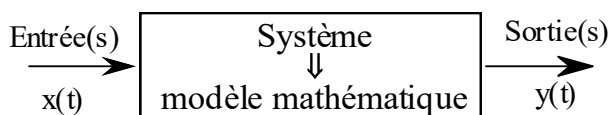
Régulation : vitesse de rejet de perturbation

Asservissement : temps de réponse (à un échelon) , bande passante (entrée sinus)

- Robustesse : tolérance aux variations des caractéristiques du système (tolérances de fabrication, échauffement, vieillissement...)

# 2/ Principes de commande

Représentation par schéma bloc :



- Système statique :  $y(t) = f(x(t))$

Exemples :  $y(t) = 5 x(t)$ ,  $y(t) = \sin(x(t))$

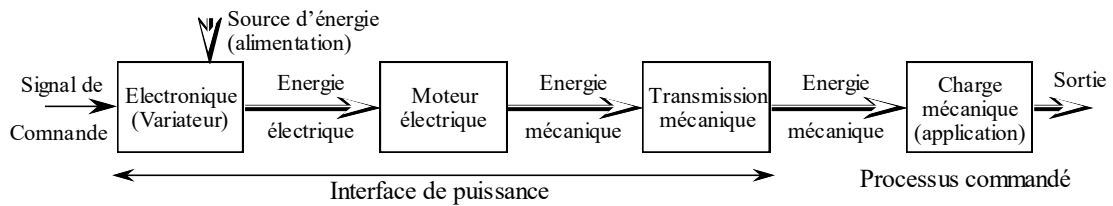
- Système dynamique : équation différentielle dont la solution  $y(t)$  dépend de la variable  $x(t)$

=> Causalité :  $x(t) \rightarrow y(t)$

Exemple du premier ordre :  $dy(t)/dt + y(t) = x(t)$

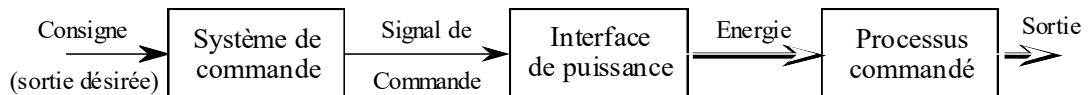
## 2.1/ Chaîne de conversion électromécanique

Actionneur = interface : contrôle de l'énergie mécanique au travers de l'énergie électrique



## 2.2/ Principes de commande

### • Commande directe sans chaîne de retour ("en boucle ouverte" ou "sans capteur")



Pb : le système de commande doit parfaitement connaître le comportement du processus commandé et l'influence des perturbations.

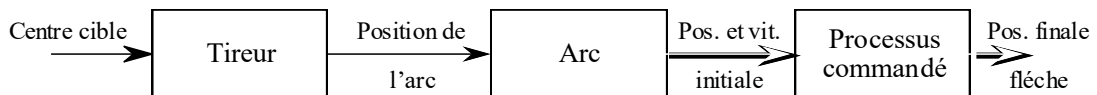
Principe de commande : inversion du modèle du processus commandé

- Avantages : simplicité, coût réduit
- Inconvénients : peu robuste, sensible aux perturbations et réponse lente si le modèle utilisé est un modèle simplifié de régime permanent (voir MCC).

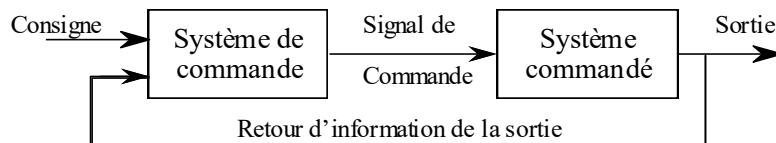
Exemple: tir à l'arc => réglage de la position de l'arc en fonction de la distance, du vent ...

2 solutions pour déterminer la bonne commande :

- Apprentissage par expérience => mémorisation
- Lois physiques => modèle mathématique => calcul de trajectoire



### • Commande en boucle fermée ("système asservi" ou "système "bouclé")



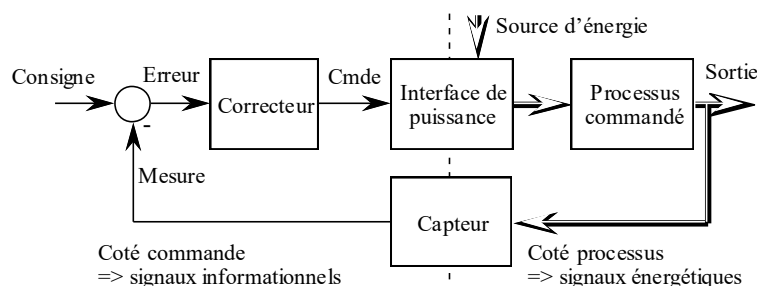
Vérification de la sortie par mesure => action sur la commande si sortie  $\neq$  consigne

Exemple chauffage : commande = utilisateur

Trop froid => marche

Trop chaud => arrêt

Structure de base d'un système asservi :

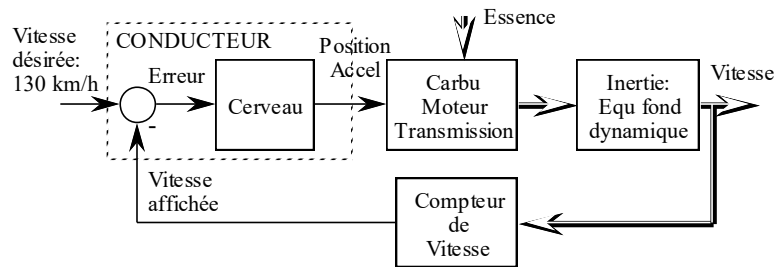


Deux types de signaux :

- Signaux informationnels (->) : signaux électriques ou numériques traités par la commande (analogique ou numérique)
- Signaux énergétiques (=>): signaux physiques liés au processus commandé

- **Capteur**: convertit la grandeur de sortie en un signal informationnel admissible par la commande.
- **Comparateur** = soustracteur:  $Erreur = Consigne - Mesure$
- **Correcteur**: agit sur la commande pour tenter d'**annuler l'Erreur**

Exemple: contrôle de la vitesse d'une voiture



**Remarques importantes:**

- Le correcteur ne connaît pas le processus, il se base uniquement sur l'erreur
- On asservit en réalité la mesure et non la sortie => précision et fiabilité du capteur
- Un système bouclé mal conçu ou mal réglé peut être **instable** : il peut se mettre à osciller ("pomper") ou à diverger.

	Commande directe	Boucle fermée
Avantages	Economique (pas de capteur)	Meilleure précision, Bonne compensation des perturbations
Inconvénients	Nécessite un modèle précis Réponse lente pour certains systèmes (tels que les moteurs électriques)	Nécessite un capteur et l'étude de la boucle

**2.3/ Correction PID**

$$Cde(t) = \underbrace{K_P}_{\text{Proportionnel}} Err(t) + \underbrace{K_I \int_0^t}_{\text{Intégral}} Err(\tau) d\tau + \underbrace{K_D \frac{d}{dt}}_{\text{Dérivé}} Err(t)$$

- **Action P**. Action de base qui tend à réduire l'erreur mais ne l'annule pas toujours.
  - **Action I**. Objectif : obtenir une erreur nulle lorsque la consigne est constante (effet de mémoire).
  - **Action D**. Objectif : tenir compte de l'évolution de l'erreur dans la commande (effet prédictif).
- Réglage du correcteur : détermination des coefficients  $K_P$ ,  $K_I$  et  $K_D$ , en fonction des performances (rapidité, précision et robustesse) voulues.

La quasi-totalité des systèmes de commande des moteurs électriques utilisent des correcteurs PID. On commence à voir apparaître d'autres principes : retour d'état, modes glissants, logique floue et réseaux de neurones.

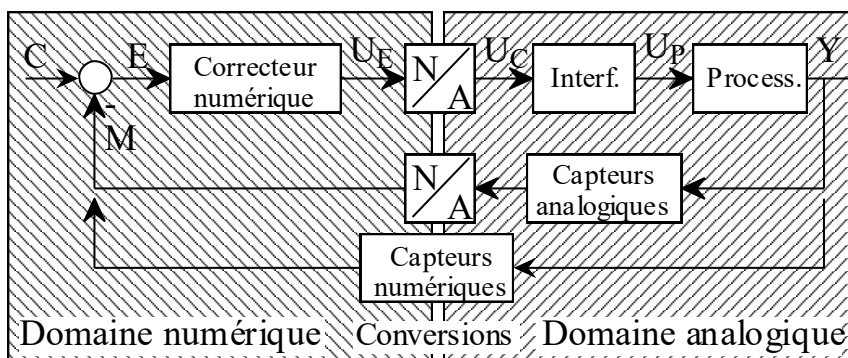
## 2.4/ Commande analogique ou numérique

### • Commande analogique

Correcteur = système électronique linéaire (amplis-op + résistances + condensateurs).  
Signaux informationnels = signaux électriques (tensions, courants).

### • Commande numérique

Correcteur : calculateur numérique muni d'interfaces.  
Variables informationnelles : variables numériques.



Structure d'une commande numérique

Programme de commande = suite d'opérations répétées périodiquement :

- Attendre le signal de début (horloge périodique).
- Lire les consignes numériques.
- Convertir les mesures analogiques ou lire les mesures numériques.
- Calculer les erreurs. Exécuter les programmes de correction (équivalent PID).
- Convertir les commandes en signaux analogiques.

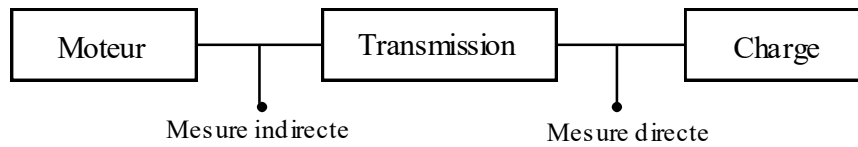
=> le calculateur manipule des signaux en temps discret (échantillonnés).

### • Comparaison des technologies analogique et numérique

	Analogique	Numérique
Précision	Moyenne : tolérance sur les composants du correcteur, prix des capteurs précis.	Calculs aussi précis qu'on le désire . Capteurs numériques précis.
Dérive dans le temps	Moyenne : dérive thermique et vieillissement des composants	Nulle
Rapidité	Grande ou très grande	Moyenne (en progrès rapide)
Sensibilité aux bruits	Moyenne ou forte	Très faible
Liaisons longues	Difficiles (perturbations électromagnétique)	Fiable (signaux logiques avec codes d'erreur)
Evolutivité	Mauvaise : évolution matérielle	Bonne : évolution logicielle.
Bilan	Economique en faible précision Indispensable pour les grandes bandes passantes	Indispensable en haute précision et pour les systèmes complexes à commander.

### 3/ Capteurs

#### 3.1/ Mesure directe ou indirecte



	Mesure indirecte	Mesure directe
Avantages	Solution économique et fiable : capteur rotatif monté sur le moteur Résolution multipliée par le réducteur	Précision optimale : défauts de la transmission masqués.
Inconvénients	Erreurs supplémentaires dues à la transmission => trans. précise et rigide.	Capteur et montage plus cher Risque de problèmes de stabilité.

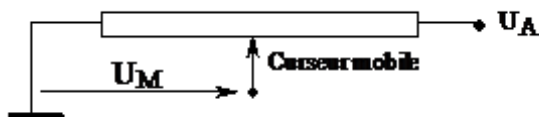
#### 3.2/ Mesure de position

- Mesures analogiques

- Potentiomètre

Un curseur mobile se déplace sur une piste résistive (plastifiée ou bobinée).

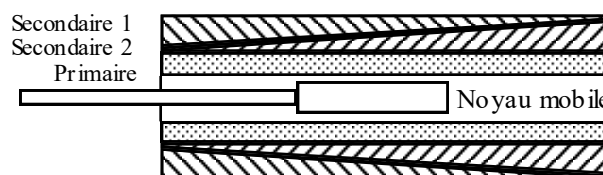
Inconvénients : frottement et usure du curseur et de la piste (durée de vie limitée).



- Transformateur différentiel

Transformateur composé d'un primaire, de deux secondaires et d'un noyau ferromagnétique mobile.

Mouvement du noyau => variations opposées du couplage entre chaque secondaire et le primaire.



- Resolver

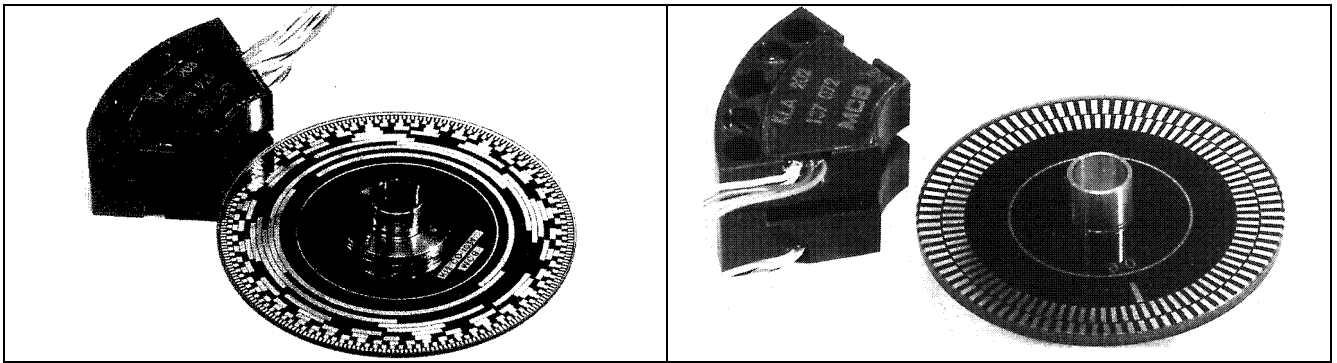
Machine synchrone diphasée.

Nécessite un circuit de démodulation coûteux, mais qui délivre également la vitesse.

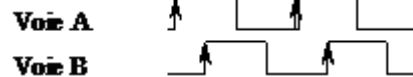
Capteur très utilisé avec les machines synchrones auto-pilotées (voir plus loin).

- Mesures numériques : codeurs et règles optiques

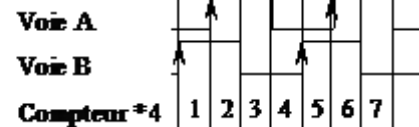
<b>Codeur absolu</b> : comporte N pistes gravées suivant un code binaire. Lecture optique.	<b>Codeur incrémental</b> : comporte 3 pistes (2 pistes décalées 1/4 de pas et une piste index).
--	--



**Rotation positive: ↑A avant ↑B**



**Rotation négative: ↑B avant ↑A**



Détection du sens de rotation et multiplication de résolution par 4 d'un codeur incrémental

Il existe aussi des capteurs linéaires : **règles incrémentales et absolues**

Des systèmes électroniques permettent d'améliorer la résolution (jusque par 100) d'un codeur ou d'une règle (prévu à cet effet) par interpolation.

	Codeur ou règle absolu	Codeur ou règle incrémental
Avantages	Localisation au démarrage (à un tour près pour le codeur)	3 pistes => 6 fils seulement Economique (2000 pts en standard)
Inconvénients	Plus cher N pistes => 2N fils ou codage série ( $2^{11} = 2048 \Rightarrow N=11$ )	Nécessité d'une initialisation (recherche d'index).

### • Comparaison des performances

	Potentiomètre	Transformateur différentiel	Règle optique incrémentale
Etendue de mesure	0.25 m std 3 m max.	$\pm 0.2$ mm min. $\pm 0.5$ m max.	1 m std 30 m max (ruban)
Caractère mesure	Absolu	Absolu	Relatif
Résolution	- 10 $\mu$ m (bobiné) - infinie (hybride)	Infinie	4 $\mu$ m std 0.12 $\mu$ m min. 1 nm min. interp.
Précision : écart de linéarité	$\pm 0.05$ % EM std $\pm 0.2$ % EM (hybr.)	0.002 à 0.05 % EM	1 $\mu$ m/m std
Vitesse maxi	1 m/s std	$f_{BP}$ : 100 Hz std	0.5 m/s

**Tab. 1 :** Principales caractéristiques des capteurs linéaires.

	Potentiomètre piste plastique	Resolver	Codeur absolu	Codeur incrémental
Etendue de mesure	$355 \pm 2^\circ$ ou $360^\circ$	$360^\circ$	$360^\circ$	$360^\circ$
Caractère mesure	Semi-absolu: 1 tr	Semi-absolu: 1 pas	Semi-absolu: 1 tr	Relatif
Résolution	0.01 à $0.007^\circ$	$40''$	1024 (10 bits) std 20 bits max. ( $1.2''$ )	5000 traits/tr std. 36000 traits/tr max $\Rightarrow 0.04''$ min. interpolé x 100
Précision : écart de linéarité	$\pm 0.1$ % EM std.	Unipolaire $\pm 1'$ Multipolaire $\pm 10''$	$\pm 1/2$ bit std	$\pm 1/8$ pas std
Vitesse maxi	1500 tr/mn cont. 10000 tr/mn crête	3000 tr/mn std $f_{BP}$ : 100 Hz std	6000 tr/mn	6000 à 10000tr/mn std

**Tab. 2:** Principales caractéristiques des capteurs angulaires.

### 3.3/ Mesure de vitesse

#### Mesure analogique : génératrice tachymétrique

Petite machine à courant continu utilisée en génératrice :  $E = k \Omega$

Inconvénient : comporte un collecteur => entretien.

Utilisée surtout pour les commandes analogiques de moteur à courant continu (option standard)

Précision : erreur de linéarité de l'ordre de 0.1 % à 0.5%.

Plage de vitesse :  $E_{Max} = 10 \text{ V}$ ,  $E_{Min} = 1 \text{ mV}$  =>  $\Omega_{Max}/\Omega_{Min} = E_{Max}/E_{Min} = 10000$

#### Mesure numérique

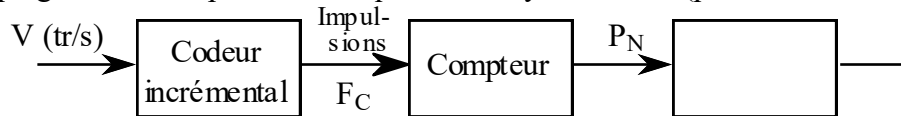
Principe :

- Codeur incrémental (MCC ou MAS) ou codeur absolu ou resolver (MS) + démodulation numérique.

- Comptage d'impulsions + mesure de temps :  $V_N = \Delta P_N / \Delta t$

Avantage : extrêmement précis à haute vitesse (erreur moyenne nulle)

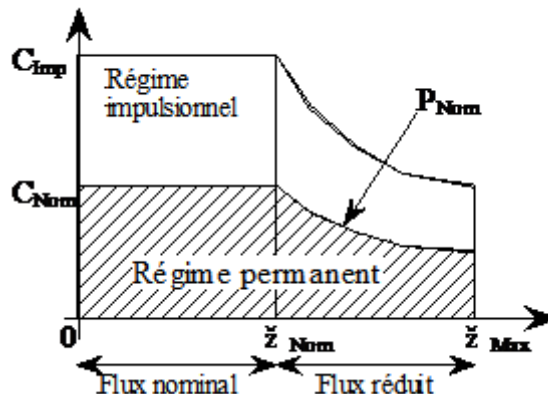
Inconvénient : plage de vitesse plus réduite qu'avec tachy : 1 à 1000 (pb en très basse vitesse).



## 4/ Variateurs de vitesse

Fonctions principales d'un variateur de vitesse:

- Contrôler la vitesse ou parfois le couple d'une machine électrique, à partir de l'énergie électrique qui lui est fournie => fonction régulation ou asservissement.
- Protéger la machine (surintensité, échauffement) et la mécanique.
- Gérer le démarrage et l'arrêt du moteur (rampes d'accélération et de freinage programmables)
- Communiquer : recevoir la consigne, envoyer des signaux de diagnostic et d'alarme => réseaux.
- Gestion du courant d'excitation pour une machine à excitation séparée (MCC et MS) :  
=> réduire le courant d'excitation si  $\Omega > \Omega_{Nom}$



Variateur industriel : alimentation par réseau triphasé => redresseur triphasé (event. transformateur)

Problème de l'évacuation de l'énergie de freinage :

- faible et moyenne puissance : redresseur non réversible (à diode) + hacheur de freinage (dissipation par résistance)
- forte puissance ou grande énergie de freinage : redresseur commandé réversible (à thyristors).

Problème du capteur mécanique : élément coûteux (achat, installation, câblage) et fragile

=> à éviter si possible : commande sans boucle de retour ou estimation de sortie par modèle.

## 4.1/ Machine à courant continu

Avantage : machine facile à commander (commande analogique possible)

=> Variateurs les plus anciens (années 50). Il existe encore beaucoup de variateurs en service.

Inconvénients : prix d'achat, coût d'entretien (collecteur et balais) et performances moyennes.

=> Peu employé pour une nouvelle solution en puissance moyenne.

Machine interdite en milieu déflagrant (pétrochimie, peinture...)

Applications : très faibles ou très fortes puissances, véhicules autonomes de faible puissance.

Exemple de variateur : voir TD 11.

### • Commande sans capteur (sans chaîne de retour)

Tension d'induit :  $U = E + RI$  avec  $E = K_E \Omega_M$

Vitesse à vide  $\Omega_0 = U/K_E$

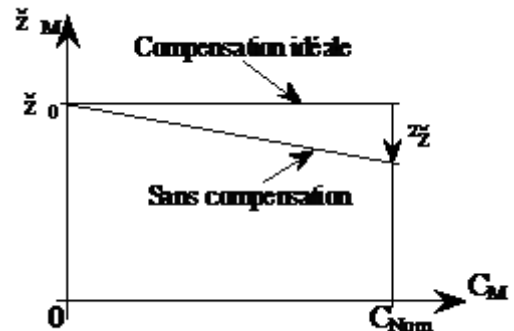
Vitesse en charge :  $\Omega_M = (U - RI)/K_E = \Omega_0 - RC_M/K_T$

Compensation de RI :

Maintenir  $\Omega = C^{te} \Rightarrow$  maintenir  $E = U - RI = C^{te}$

=> faire varier  $U_M$  en fonction de la vitesse de consigne

$\Omega_C$  et du courant  $I$  :  $U_M = K_E \Omega_C + R'I$  ( $R' \approx R$ )



### • Commande avec capteur (boucle fermée)

Principe : commande en boucle fermée (par mesure de vitesse) avec une boucle interne de courant

- Variateur analogique : capteur = génératrice tachymétrique

- Variateur numérique : capteur = codeur incrémental

La génératrice tachymétrique et le codeur incrémental sont des options standard d'une MCC.

### • Comparaison des performances

Commande	Sans capteur	Avec capteur
Précision statique	Quelques % avec compensation	Analog : Précision de la tachy (< 1%) Num : très grande précision
Rapidité de réponse	Faible	Grande
Plage de vitesse	Rapport de 1 à 10 (ou un peu plus)	Rapport : de 1 à 1000 (ou un peu plus)
Applications	Economiques, de faible puissance et de faible précision : jouets, accessoires automobiles, véhicules électriques ...	Régulations de vitesse de faible (robot, HiFi portative ) ou très forte puissance (laminoirs).



## 4.2/ Machine synchrone

### Caractéristiques

Avantages :

- Machine robuste, excellent rendement, grandes performances dynamiques
- Peut fournir son couple nominal, quelque soit la vitesse (pas de commutation).
- Machine à aimant (terre rare) : Forte puissance massique

Inconvénients :

- Plus chère que machine asynchrone (aimants).
- Plus difficile à piloter qu'une MCC (mais moins qu'une MAS)

### • Commande :

Par principe, la MS est synchronisée sur les courants d'alimentation (vitesse proport. à la fréquence)  
PB : la machine "décroche" (elle se désynchronise et s'arrête), si elle ne peut pas suivre la fréquence des courants.

Solution : mesurer la position du rotor avec un capteur et piloter les courants en fonction de la position du rotor.

### • Machine synchrone auto-commutée (brushless) :

- La mesure est obtenue par 6 détecteurs binaires et les courants sont commutés (trapèze)  
=> Simplicité et coût réduit, mais couple moins constant.

Applications : remplacement de la MCC, pour certaines applications économiques de faible puissance, meilleure fiabilité et haute vitesse possible.

### • Machine synchrone auto-pilotée

- La mesure est faite par un resolver et les courants sont sinusoïdaux => couple précis et constant.  
=> Grande précision et très grande plage de vitesse : de 1 à 10 000.

Applications : robotique, axe de machine outil (moteur tournant et linéaire), véhicule électrique récent  
Exemple de variateur : voir TD n° 10.

### 4.3/ Machine asynchrone

Machine standardisée, très robuste, haute vitesse et économique. Puissance de 1 kW à 10 MW (100 MW en rotor bobiné) => Machine extrêmement courante dans l'industrie (2/3 des machines).

Inconvénients :

- Rendement moins bon que machine synchrone.
- Pertes au rotor => Ventilateur motorisé en cas de fonctionnement à basse vitesse.
- Machine difficile à commander (longtemps utilisée à vitesse constante) => variateur numérique.

Avantage du variateur : réglage optimal de la vitesse => économie d'énergie (rentabilité rapide).

#### • Commande sans capteur

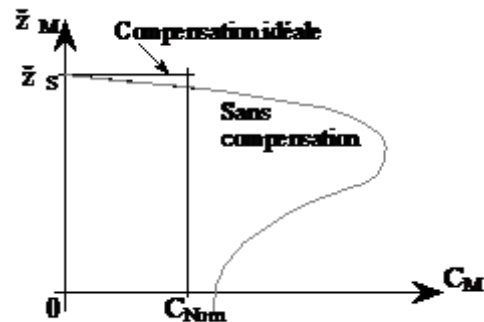
Glissement :  $g = (\Omega_M - \Omega_S) / \Omega_S$  ( $\Omega_S$  pulsation stator)

$C < C_{Nom}$  => faible glissement ( $g < 5\%$ ) :

=> faible erreur de vitesse.

Glissement proportionnel au couple

=> compensation de glissement  $\approx$  compensation RI pour MCC.



#### • Commande avec capteur

Principe : commande en boucle fermée avec mesure de vitesse par codeur incrémental.

Le codeur incrémental est une option standard de MAS.

#### • Comparaison des performances

La MAS étant relativement compliquée à modéliser, il existe deux types de commande :

- Commandes élémentaires (modèle simplifié en régime permanent) : "commandes scalaires"
- Commandes performantes et complexes (modèle dynamique complet) : "commande vectorielle" ou "commande directe de couple".

Commande	Sans capteur	Avec capteur
"Scalaire"	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Solution très économique</li> <li>- Faibles performances dynamiques</li> <li>- Précision en vitesse moyenne : 3 % et 0.5 % avec compensation de glissement.</li> <li>- Plage de vitesse réduite : rapport 3 et 10 avec compensation de glissement =&gt; Vitesse faible ou nulle impossible.</li> </ul> <p>Applications : pompes, convoyeurs, levage, ventilateurs...</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faibles performances dynamiques</li> <li>- Très bonne précision en vitesse : meilleure que 0.1%</li> <li>- Vitesse très faible ou nulle mal maîtrisée.</li> </ul> <p>Applications : pompes (dosage), convoyeurs synchronisés, ponts roulants</p>
"Vectorielle" ou "Directe de couple"	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Solution économique</li> <li>- Bonnes performances dynamiques</li> <li>- Plage de vitesse : rapport 1 à 100</li> <li>- Vitesse faible, mais non nulle.</li> </ul> <p>Applications : broches d'usinage, haute vitesse, traction</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Solution très performante</li> <li>- Très bonne précision en vitesse : meilleure que 0.1% (0.001 % possible)</li> <li>- Grande plage de vitesse : 1 à 1000 (voir 10 000)</li> <li>- Vitesse très faible ou nulle contrôlée.</li> </ul> <p>Applications : mandrin de tour, traction, enrouleuse (papier, tissus, câble), laminoirs</p>

## 4.4/ Petite chronologie de la variation de vitesse

### • Dates clés des machines électriques et de leur commande

Date	Objet	
1871	Dynamo (MCC)	Inventée par Gramme
1882	Machine asynchrone	Inventée par N. Tesla
1896	Groupe Ward-Leonard	Première technique de variation de vitesse (1 MS + 2 MCC)
1899	Record des 100 km/h	Par une voiture électrique : la "Jamais Contente",
1900	Métro parisien	
1948	Transistor bipolaire	Inventé par les laboratoires Bell
1960	Variateur électronique	Redresseur commandé à thyristors pour MCC
1962	Transistor MOS	Invention
1967	Thyristor	Invention
1972	Microprocesseur	Microprocesseur Intel 4004 (4 bits)
1973	Robot électrique	Par ASEA
1975	Transistor de puissance	
1980	Commande vectorielle	Prototype de commande vectorielle de MAS

### • Evolution des TGV

1981	TGV Sud-Est	12 MCC de 500 kW
1989	TGV Atlantique	8 MS auto-pilotées de 1.1 MW
1993	Eurostar	12 MAS de 1 MW (onduleur GTO)

## 5/ Commande d'axe : positionnement et génération de trajectoire

Objectifs :

- positionnement précis d'un axe + suivi d'une trajectoire (accélération, vitesse) dans le temps : machine outil (perceuse, tour, fraiseuse...), dépose (colle, soudure par point)
- suivi d'une trajectoire dans l'espace (synchronisation de plusieurs axes) : machine outils, découpe (laser, jet d'eau), dépose (colle, soudure à l'arc)

### 5.1/ Commande mono-axe

#### • Structure

Carte de commande numérique (génération de trajectoire + asservissement de position) + variateur de vitesse

Exemple de solution avec machine à courant continu et un variateur analogique (avec un variateur numérique, on pourrait se passer de la tachy et utiliser le codeur pour mesurer la vitesse).

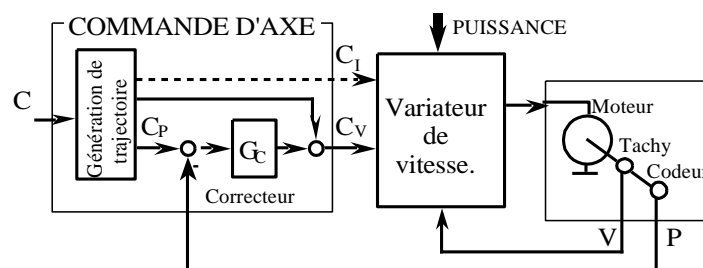


Fig. : Commande d'axe, variateur et machine.

• **Trajectoire**

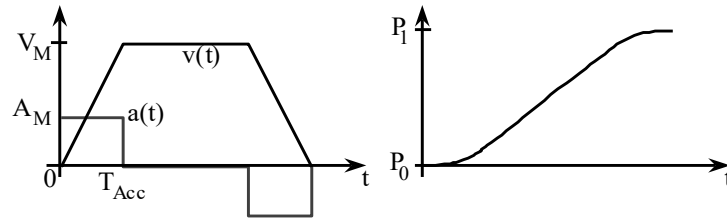


Fig. : Trajectoire de vitesse et de position à accélération maximale.

**5.2/ Commande multi-axes**

• **Structure**

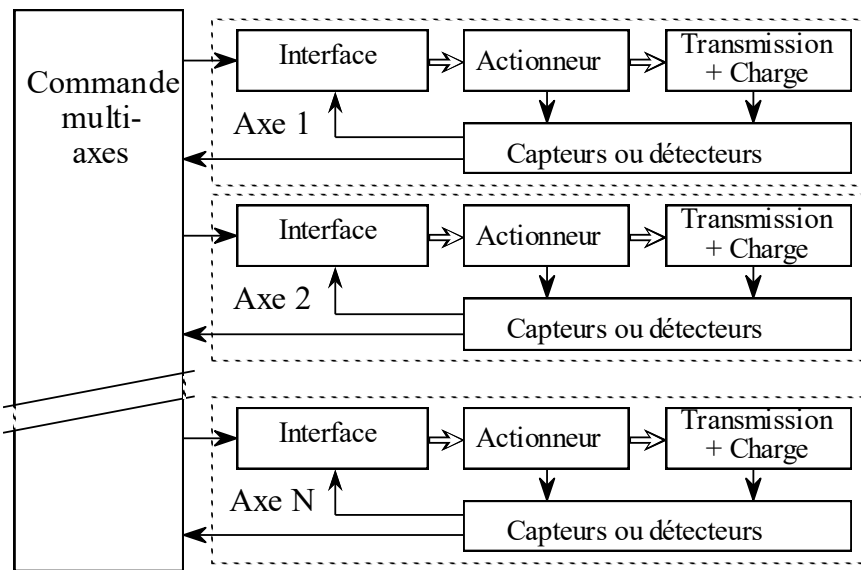


Fig. : Commande multi-axes.

• **Mode point à point (positionnement):**

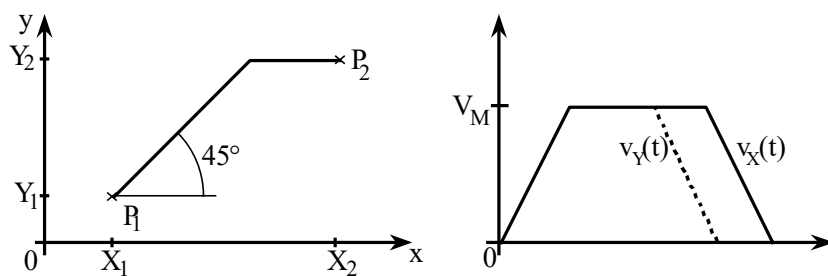


Fig. : Mode point à point.

• **Interpolation linéaire (suivi de trajectoire):**

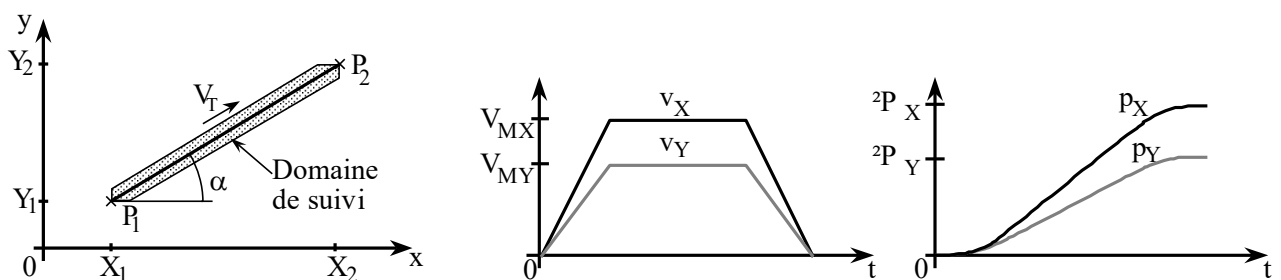


Fig. Interpolation linéaire      Fig. : Proportionnalité des positions et des vitesses