

# PRINCIPE DES MACHINES À COURANT CONTINU

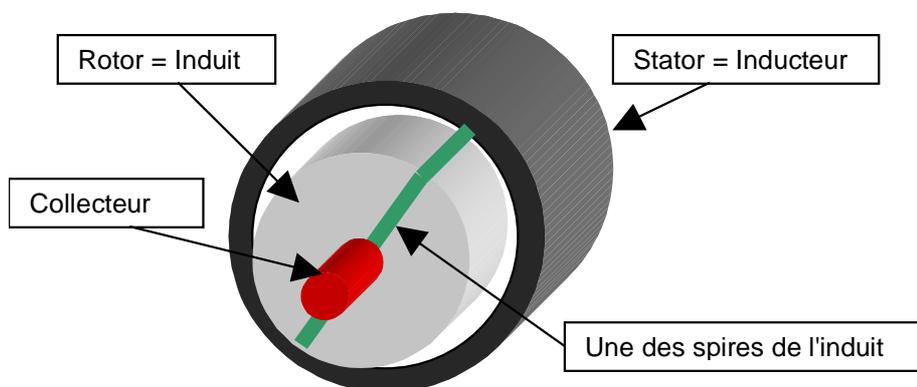
## 1. Les deux types possibles de machine

La machine à courant continu est réversible c'est à dire qu'elle peut être utilisée soit en moteur soit en génératrice.

Le moteur est un convertisseur d'énergie électrique en énergie mécanique, la génératrice est le convertisseur inverse.

Même en cours de fonctionnement, la machine peut changer de type, un moteur peut devenir, pendant un court instant, une génératrice et renvoyer de l'énergie vers son alimentation.

## 2. Constitution d'une machine à courant continu



Comme tout dispositif fonctionnant grâce au champ magnétique, la machine à courant continu comporte un circuit magnétique, réalisé dans un acier traité spécialement, et des enroulements de cuivre. Ces derniers étant traversés par un courant, produisent un champ magnétique que le circuit magnétique se charge de canaliser.

Il y a deux enroulements, un sur le stator (qui ne figure pas sur le dessin) et un autre sur le rotor dont je n'ai représenté qu'une spire.

Le collecteur joue un rôle primordial que je détaillerai ci-dessous.

## 3. Les deux phénomènes concomitants

Dans une machine à courant continu, qu'elle soit utilisée en moteur ou en générateur, coexistent deux phénomènes :

La création d'un couple dû à l'action d'un champ magnétique sur un courant

La création d'une f.e.m. due à la variation d'un champ magnétique dans une spire.

### 3.1. Création d'un couple

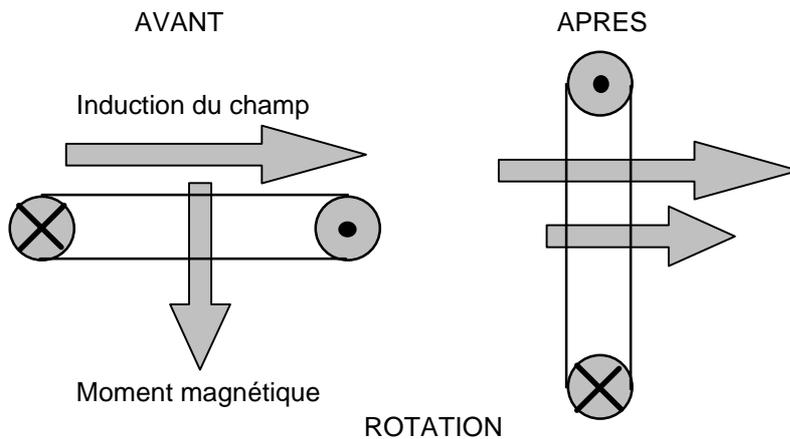
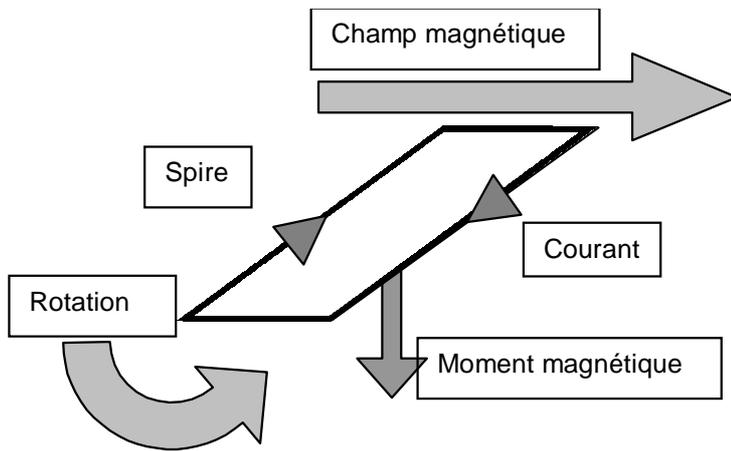
Considérons une spire plongée dans un champ magnétique, cette spire préfigure le rotor de la machine à courant continu, elle est représentée sur la figure de la page suivante. Elle est libre en rotation.

La spire est parcourue par un courant<sup>1</sup>, elle se comporte comme un aimant de moment magnétique  $\mathbf{M}$  dont le sens est déterminé par la règle du tire-bouchon.

Étant plongée dans le champ magnétique d'induction  $\mathbf{B}$ , la spire est le siège d'un couple  $\mathbf{T}$  qui la fait tourner. Les trois grandeurs  $\mathbf{T}$ ,  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{B}$  sont vectorielles et sont liées par :

$$\mathbf{T} = \mathbf{M} \wedge \mathbf{B}$$

<sup>1</sup> Les connexions amenant le courant ne sont pas représentées



La figure ci-contre reprend la précédente, elle montre la façon dont le moment magnétique se comporte dans le champ : il y a déformation du circuit pour que la spire soit traversée par le champ maximum. La seule déformation possible est la rotation à cause de la conformation de la machine. Le point et la croix représentent les flèches courant.

La figure de gauche se place avant l'application du courant et celle de droite après.

La présence du fer du rotor ne change rien à ce principe, elle ne fait que canaliser et qu'amplifier les grandeurs magnétiques. Le rotor, dans son ensemble, se comporte comme un aimant, c'est l'interaction entre les deux grandeurs magnétiques qui provoque la création du couple.

### 3.2. Les forces de Laplace

Certains expliquent la naissance du couple moteur par l'existence des forces de Laplace. Cette explication est trop simplifiée, elle donne une fausse idée du phénomène, en effet elle fait croire que le couple prend naissance uniquement sur le cuivre. Si le cuivre était soumis à ces forces, il s'écraserait contre le fer du rotor et le moteur serait détruit.

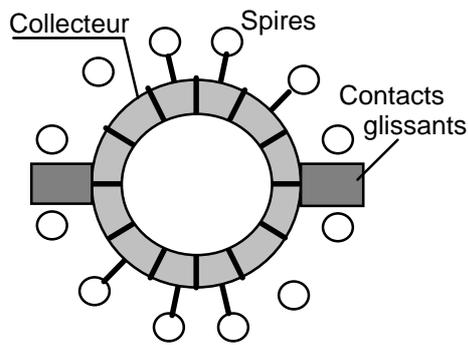
Si on vous pose des questions sur les forces de Laplace répondez que **tout se passe comme si** le couple provenait de ces forces.

### 3.3. La naissance de la rotation continue

Vous pouvez remarquer que la spire subit une rotation lors de l'application du courant. Une fois que cette rotation a amené les deux vecteurs en coïncidence, elle cesse. Il faut donc se replacer dans les conditions de la figure de gauche, une des solutions est de disposer d'une deuxième spire perpendiculaire à la première. Il faut ajouter un dispositif de commutation de l'alimentation entre les deux spires. Il faut inventer le **collecteur**.

On remarque également que le couple est maximum lorsque les deux vecteurs sont perpendiculaires. Un rotor réel comporte de nombreuses spires pour optimiser le couple.

La figure ci-dessous montre le principe de commutation.



Le collecteur permet à la machine d'avoir toujours une spire en position de créer un couple maximum. Le courant est amené par des contacts glissants. Le collecteur est un organe fragile et difficile à construire. Il est constitué d'un ensemble de lames isolées entre elles et reliées aux spires de l'induit.

C'est le point noir de la machine à courant continu.

L'électronique permet de construire des moteurs à courant continu sans collecteur.

### 3.4. Le moteur à courant continu sans collecteur

Ces moteurs à courant continu sont des traîtres, ils font semblant de se comporter comme un moteur à courant continu alors qu'ils ont tout du moteur à courant alternatif

Le paragraphe 3.3 nous dit que le couple moteur est maximum quand les deux vecteurs magnétiques sont perpendiculaires. Le collecteur maintient le moment magnétique dans la même direction. Si on veut supprimer le collecteur, il faut faire tourner le champ magnétique inducteur à mesure que le rotor se déplace. L'électronique est capable d'alimenter un ensemble de bobine fixes de façon adéquate.

## 4. Création d'une f.e.m.

Une spire, soumise à l'action d'un champ magnétique variable, développe à ses bornes une f.e.m.

La formule de base est :  $e = \frac{d\phi}{dt}$  (je ne parle pas du signe)

Une spire qui tourne dans un champ magnétique fixe voit un champ variable et est le siège de la même f.e.m. que ci-dessus.

### 4.1. La génératrice

La génératrice est la machine à courant continu qui exploite ce phénomène. Lorsque la machine fonctionne, les spires de son rotor sont traversées par un courant. Il y a action d'un courant sur un champ magnétique et donc création d'un couple comme dans un moteur.

### 4.2. Les deux phénomènes concomitants

Dans une génératrice il y a un moteur caché qui contrarie le fonctionnement de la machine, il y a création d'un couple résistant.

Dans le moteur il y a une génératrice cachée qui crée une f.e.m. qui s'oppose au passage du courant.

Ces phénomènes sont rassurants car ils traduisent un équilibre de la nature (de la physique)

## 5. Équilibre

Un système, au sens large, est en équilibre lorsqu'il y a égalité entre une action motrice et un action antagoniste. Pensons à la somme des forces d'un système mécanique en équilibre

On peut retrouver cette notion d'équilibre dans un circuit électrique composé d'un générateur et d'un récepteur. Le premier voit sa tension baisser quand le courant qu'il débite augmente alors que la tension aux bornes du second augmente dans les mêmes conditions. À l'équilibre, la tension aux bornes du générateur est égale à la tension aux bornes du récepteur et le courant traversant les deux dipôles est commun.

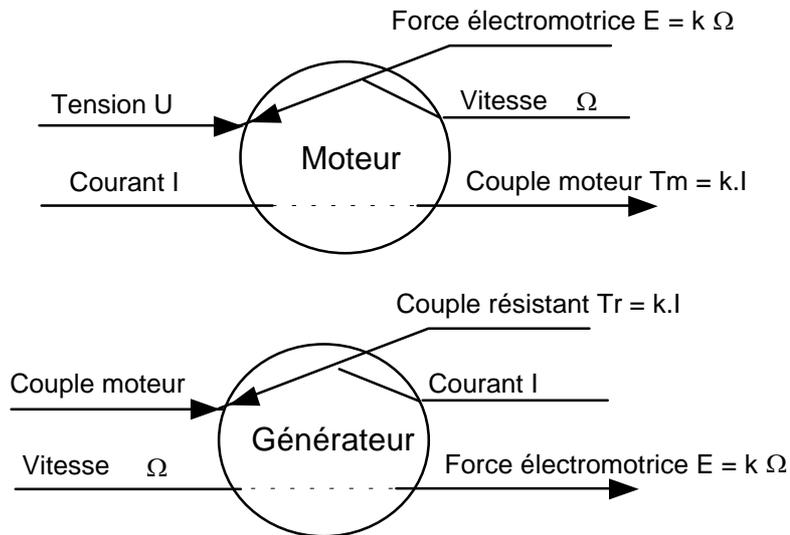
Examinons le cas de la machine à courant continu. Nous allons distinguer deux situations

- La machine est un moteur
- La machine est un générateur

Dans les deux situations nous retrouverons les mêmes phénomènes :

- tension et courant - (les grandeurs électriques)
- couple et vitesse de rotation - (les grandeurs mécaniques)

mais ils seront considérés de manière différente.



les figures ci-dessus essaient de montrer la nature des antagonistes dans chacun des types machines. Et explicitent le § 4.2

Dans les deux cas, le récepteur fixe la relation entre les grandeurs de sorties.

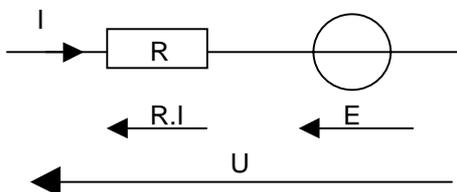
exemple d'interprétation : pour augmenter la vitesse de rotation du moteur on augmente la tension d'alimentation  $U$ , ce faisant, on oblige la force électromotrice à augmenter pour rétablir l'équilibre donc la vitesse doit augmenter.

## 6. Modélisation

Un modèle est une représentation simplifiée de la réalité. Un modèle permet de résoudre de manière simple, des problèmes compliqués en tolérant des écarts par rapport à la réalité .

Du point de vue électrique, le moteur à courant continu, est très complexe. Si on considère un cas particulier de fonctionnement, le modèle est très simple.

Si le moteur est traversé par un courant continu constant, le modèle est le suivant :



$U$  est la tension d'alimentation du moteur  
 $R$  est la résistance de l'induit  
 $E$  est la force électromotrice développée par la rotation de l'induit comme expliqué plus haut.

$I$  est le courant continu **stabilisé** traversant l'induit

Le modèle n'est plus valable pendant la période de variation du courant  $I$ .

Ce modèle implique que le champ magnétique inducteur est créé indépendamment par une source séparée, ce champ magnétique est constant.

## 7. Les formules

Un moteur doit être adapté à l'utilisation que l'on souhaite en faire. Les caractéristiques du récepteur sont donc le point de départ du choix du moteur.

La caractéristique la plus importante à prendre en compte est la relation **moment du couple résistant** en fonction de la **vitesse de rotation du rotor**.

Bien sur, les feuilles de caractéristiques du moteur traduisent la même relation c'est à dire le moment du couple moteur en fonction de la vitesse.

La modélisation simplifiée du moteur conduit aux expressions suivantes :

- le moment du couple moteur est proportionnel à l'intensité du courant traversant l'induit.
- la force électromotrice développée par l'induit est proportionnelle à la vitesse de rotation de l'induit.

$$T = k \cdot I \quad \text{et} \quad E = k \cdot \Omega$$

Le coefficient  $k$  est le même dans les deux expressions.

## 8. L'association d'un moteur et d'un récepteur

*voir les feuilles spécialisées*

Nous pouvons résumer en disant :

Comme lors de l'association d'un générateur de tension et d'un récepteur, il s'établit un équilibre entre la tension délivrée par le générateur et le courant absorbé par le récepteur<sup>2</sup>. Les grandeurs traduisant l'équilibre entre les possibilités du moteur et les exigences du récepteur sont le couple et la vitesse de rotation. Le récepteur demande un couple au moteur qui, à son tour demande une intensité au générateur de tension qui l'alimente.

## 9. Au démarrage

Il se produit une pointe de courant au démarrage pour deux raisons. La fréquence de rotation étant nulle, la force électromotrice l'est aussi, le courant n'est limité que par la résistance de l'induit. Le rotor et toute la partie mobile est à l'arrêt il faut un couple important pour les mettre en mouvement.

## 10. Le rendement

Le moteur est un convertisseur d'énergie, cette conversion se fait au prix d'une certaine dépense d'énergie. Le rendement est un nombre qui traduit la qualité de la conversion, plus le rendement est élevé, plus la puissance perdue est faible.

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

$P_u$  est la puissance utile, et  $P_a$  la puissance absorbée.

## 11. La variation de vitesse

*Voir les feuilles spécialisées*

## 12. Exercice

Les caractéristiques nominales d'un moteur à courant continu sont résumées sur la plaque signalétique

- Excitation séparée constante
- tension d'alimentation 220 V
- intensité du courant d'induit 15 A
- rendement 0,85
- vitesse 1500 tr/mn

On réalise un essai à vitesse nulle : tension 4,5V courant 15A

**Questions :**

Quelle est la vitesse de rotation de ce moteur lorsqu'il est alimenté par 190 V et traversé par 12 A ?

Quel est le couple utile dans ce cas ?

La tension d'alimentation variable est obtenue par un hacheur, sachant que le rapport cyclique nominal est de 0,90, quelle vitesse maximale le moteur peut-il atteindre lorsqu'il est alimenté par ce hacheur ? (le courant reste nominal)

Ci-dessous, les caractéristiques d'un moteur Crozet

### Caractéristiques à vide

Vitesse de rotation	tr/min	5000
Puissance absorbée	W	1,2
Courant absorbé	A	0,1

### Caractéristiques nominales

Vitesse de rotation	tr/min	3700
Couple	mN.m	7,7
Puissance utile	W	3
Puissance absorbée	W	6,2

---

<sup>2</sup> cet équilibre porte le nom de point de fonctionnement, il a pour coordonnées,  $I$ , courant circulant dans le circuit et  $U$ , tension aux bornes de l'ensemble.

Courant absorbé	A	0,43
Echauffement boîtier	°C	50
Rendement	%	48

### Caractéristiques générales

Système d'isolation suivant	B (130 °C)	classe (CEI 85)
Degré de protection	IP40	
Puissance utile maximum	W	3,9
Couple de démarrage	mN.m	30
Courant de démarrage	A	1,5
Résistance	Ohm	8
Self	mH	10
Constante de couple	Nm/A	0,0214
Constante de temps électrique	ms	1,3
Constante de temps mécanique	ms	36
Constante de temps thermique	min	8
Inertie	g.cm <sup>2</sup>	19
Masse	g	96
Nombre de lames au collecteur		3
Durée de vie	h	3000
Coussinets en bronze fritté	oui	

