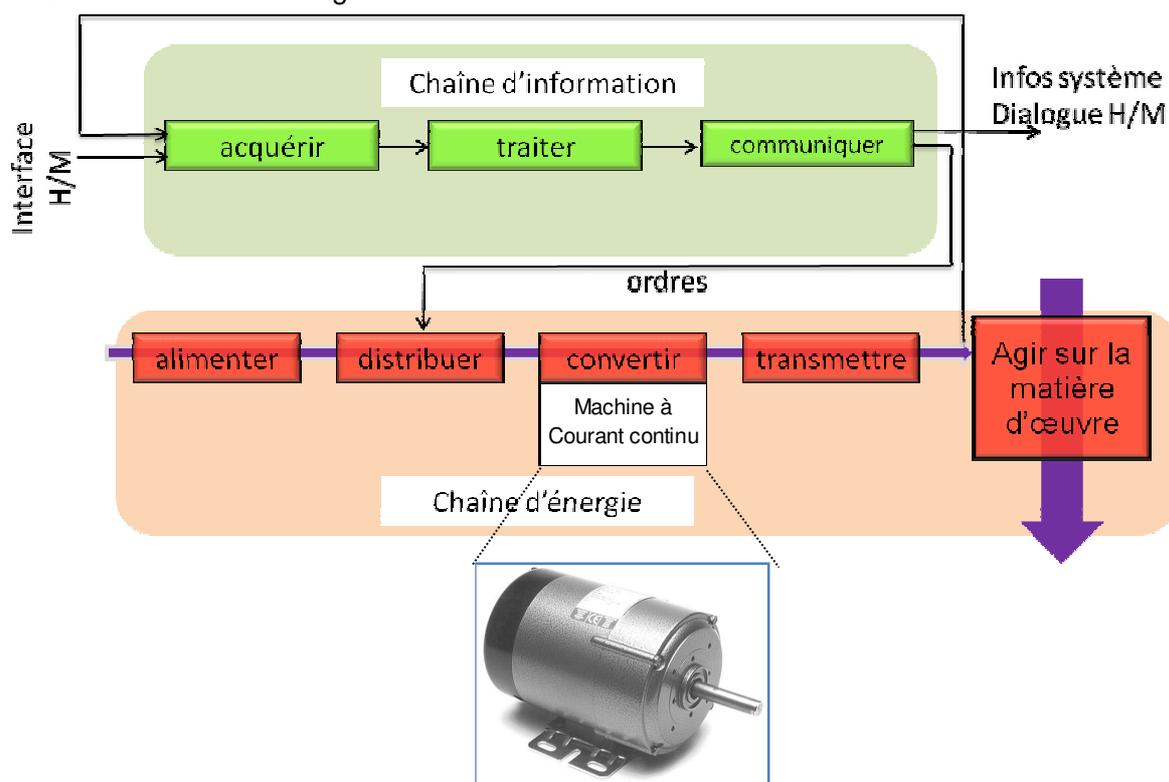


Cours	Cours C 1	TS11 (Période 2)
	Conversion d'énergie : machine à courant continu	1h
	Cycle 6 : Convertir	2 semaines

MODELISER Modéliser un convertisseur électromécanique en régime permanent.
CONCEVOIR Choisir la technologie des composants de la chaîne de puissance.

1 Introduction

Dans l'architecture fonctionnelle générique d'un système pluri technologique, les convertisseurs électromécaniques (ici la machine à courant continu d'acronyme Mcc) assurent la fonction technique **CONVERTIR** de la chaîne d'énergie.



Les moteurs à courant continu sont des convertisseurs électromécaniques réversibles en puissance :

fonctionnement moteur

fonctionnement générateur.

Puissance électrique
 $P_a = U * I$



Puissance mécanique
 $P_u = C * \Omega$

Puissance mécanique
 $P_u = C * \Omega$

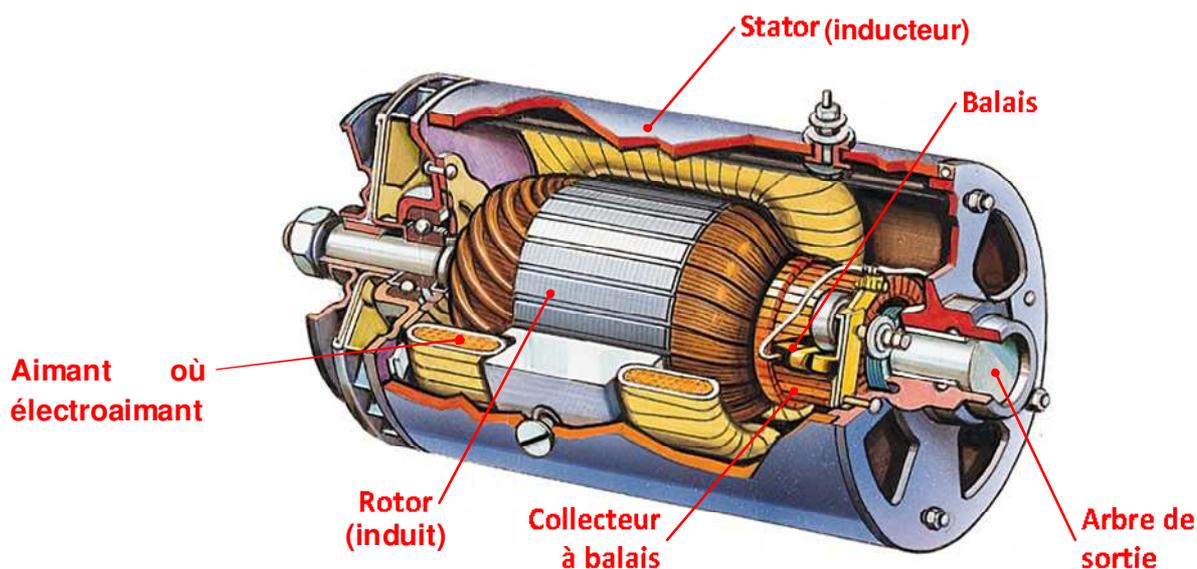


Puissance électrique
 $P_a = U * I$

Critères de choix :

- ☺ **Miniaturisation** très facile (s'impose en faibles puissances)
- ☺ **Variation de vitesse** simple (hacheur à rapport cyclique variable).
- ☺ **Régulation précise du couple**, en fonctionnement moteur ou en générateur (par contrôle du courant).
- ☹ **Moins robustes** que les moteurs à courants alternatifs (entretien des contacts mobiles).
- ☹ **Plus chers** que les moteurs asynchrones.
- ☹ **Rapport puissance/poids** meilleur avec un moteur synchrone "brushless" (qui se généralise)

2 Constitution de la machine à courant continu



2.1 L'inducteur

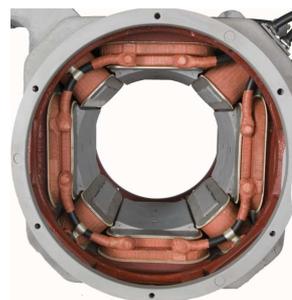
Le **stator** est constitué d'aimants permanents ou d'un circuit magnétique portant l'enroulement d'excitation. Le stator génère un champ magnétique d'excitation B de direction constant. Cet ensemble constitue l'inducteur.



Inducteur à aimants permanents

symbole

Pas d'alimentation électrique (aimant permanent).



Inducteur à enroulements

symbole

2.2 L'induit



Le **rotor** est formé d'un empilage de tôles magnétiques autour desquels sont placés les enroulements actifs.

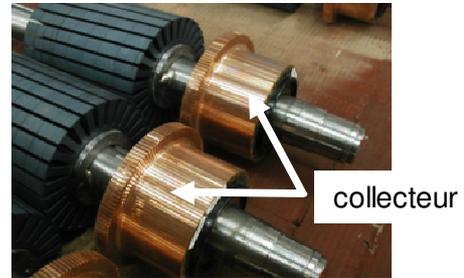
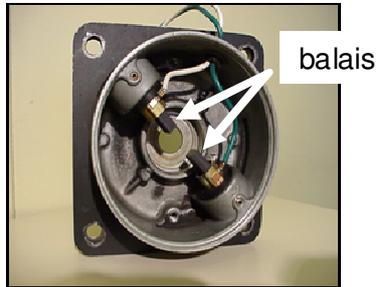
Ces enroulements, plongés dans le flux inducteur, développent un couple moteur, et entraînent en rotation le rotor.

Il est le siège de forces électromotrices (fem) induites. Cet ensemble constitue l'induit.

2.3 Le collecteur et balais

Les conducteurs de l'induit sont alimentés par une source continue au moyen de contacts glissants :

- les balais en graphite sont solidaires du stator et sont plaqués contre le collecteur par des ressorts
- le collecteur, lié au rotor, est fait de lames de cuivre isolées les unes des autres et connectées par paires à un enroulement de l'induit (90° de décalage entre le plan des lames et celui du bobinage pour une configuration à 2 balais).



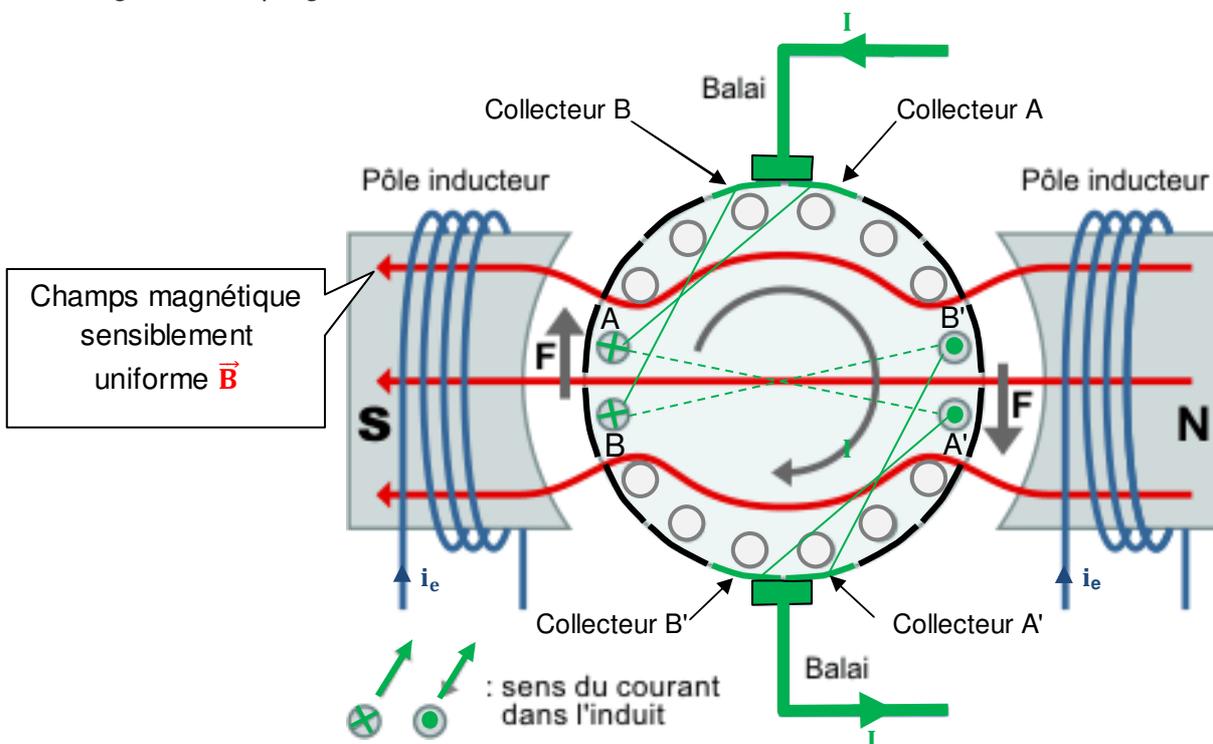
3 Principe de la conversion électromécanique

Dans un moteur à courant continu, une paire de balais fixes alimentent les conducteurs au travers de collecteurs tournants afin de maintenir un couple maximum.

Le balai du haut transmet le courant I à la lame du collecteur A. Le courant circule vers l'arrière de la machine dans le conducteur en A. Ce courant revient ensuite par le conducteur en A' avant de ressortir par la lame du collecteur bas.

Un couple est généré par les forces de Laplace $\vec{F} = I \cdot \vec{L} \wedge \vec{B}$ (où \vec{L} est le fil orienté dans lequel circule le courant I et soumis à un champ magnétique \vec{B}).

Sous l'effet du couple, le rotor tourne et le courant est transféré du conducteur A-A' au conducteur B-B' par le glissement progressif des balais sur les lames du collecteur.

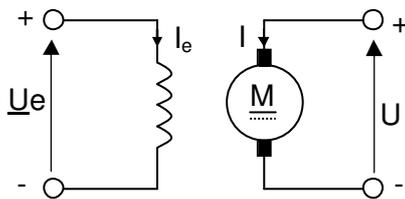


Ce système balais-collecteur permet donc d'alimenter les bobines (conducteurs) de plans sensiblement perpendiculaires au champ magnétique \vec{B} , ce qui génère un couple maximum et constant.

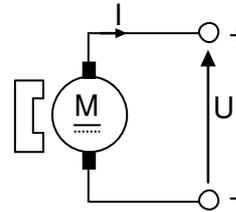
En vidéo : <https://youtu.be/A3b3Km5KVXs>

4 Différents modes d'excitation de la machine à courant continu

Les moteurs à courant continu sont classés selon la manière dont sont raccordés les circuits d'excitation et d'induit. On se limitera par la suite à l'étude des moteurs à courant continu à excitation séparée et à aimants permanents.



Moteur à courant continu
à excitation séparée



Moteur à courant continu
à aimants permanents
(Micro moteur robotique)

5 Modélisation de la machine à courant continu

5.1 Modèle équivalent de la machine à courant continu :

L'induit est un bobinage réalisé en cuivre et possède une résistance R et une inductance L .

Lorsqu'un conducteur se déplace dans un champ magnétique, il apparaît une force contre électromotrice E à ses bornes. Le courant induit dans une spire (courant dû à la fcem induite dans le cas où il peut circuler) s'oppose à la cause qui lui a donné naissance. C'est la loi de Faraday-Lentz :

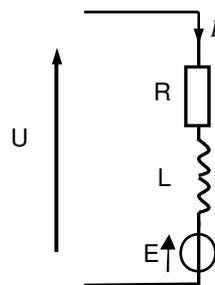
$$E = -N \frac{d\phi}{dt}$$

N : nombre de spires

ϕ : flux magnétique sous une spire en Weber (Wb)

E : force contre électromotrice en V

Schéma équivalent de l'induit moteur (Rotor : modèle RLE)



Convention moteur

(en convention générateur, il faut inverser I)

Loi des mailles à l'induit du moteur donne l'équation électrique suivante :

$$U = E + L \frac{di(t)}{dt} + R \cdot i(t) \quad \text{soit en régime établi } (i(t) = I = \text{constante}) : \quad \boxed{U = E + R \cdot I}$$

Couple électromagnétique :

$$\boxed{C_{em} = K_t \cdot I}$$

avec K_t : constante de couple en $\text{Nm} \cdot \text{A}^{-1}$.

I le courant (constant) dans l'induit

Force contre électromotrice :

$$\boxed{E = K_e \cdot \Omega}$$

avec K_e : constante de fcem en $\text{V} \cdot \text{s}$

Ω : vitesse angulaire de rotation en $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$.

$K_t = K_e$ lorsque les deux coefficients sont exprimés dans les unités SI précédentes.

Cette constante est proportionnelle à la tension U_e éventuelle aux bornes de l'inducteur (stator).

Bilan :

- L'intensité du courant I dépend du couple résistant C de la charge.
- La force contre électromotrice E dépend de la vitesse de rotation du moteur Ω .
- Le couple moteur lié au courant ($C \leftrightarrow I$) est découplé de la vitesse du moteur lié à la f_{cem} ($E \leftrightarrow \Omega$).

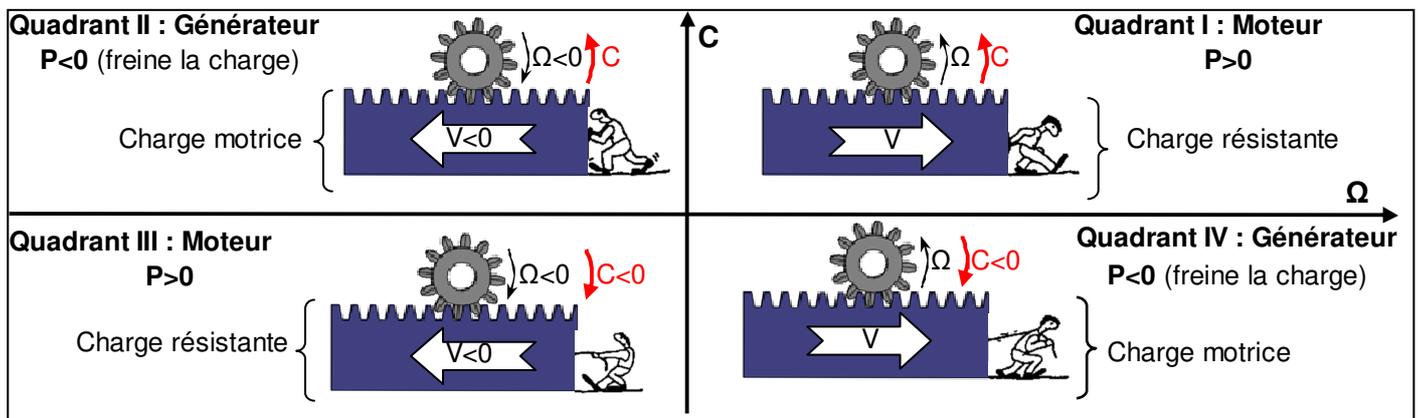
5.2 Caractéristiques mécaniques de la machine à courant continu**Principe fondamental de la dynamique ramené à un axe de rotation :**

$$C_{em} - C_u - C_{sec} - f \cdot \Omega(t) = J \frac{d\Omega(t)}{dt}$$

- Où
- C_{em} est le couple électromagnétique issu des forces de Laplace (N.m)
 - C_u est le couple utile ramené à l'arbre moteur (N.m)
 - C_{sec} est le couple constant de frottement sec, ramené à l'arbre moteur (N.m)
 - f est le coefficient de frottement visqueux en (N.m.s)
 - Ω est la vitesse de rotation du moteur ($rad. s^{-1}$)
 - J est l'inertie du mécanisme ramenée à l'arbre moteur ($kg.m^2$)

La machine à courant continu est réversible :

- Si on fait tourner le rotor tout en alimentant l'inducteur, une fem E induite apparaît à ses bornes et la machine transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.
- Les machines à courant continu sont essentiellement utilisées en fonctionnement moteur, cependant, lors des phases de freinage, elles peuvent être amenées à fonctionner en génératrice.

**Hypothèses courantes :**

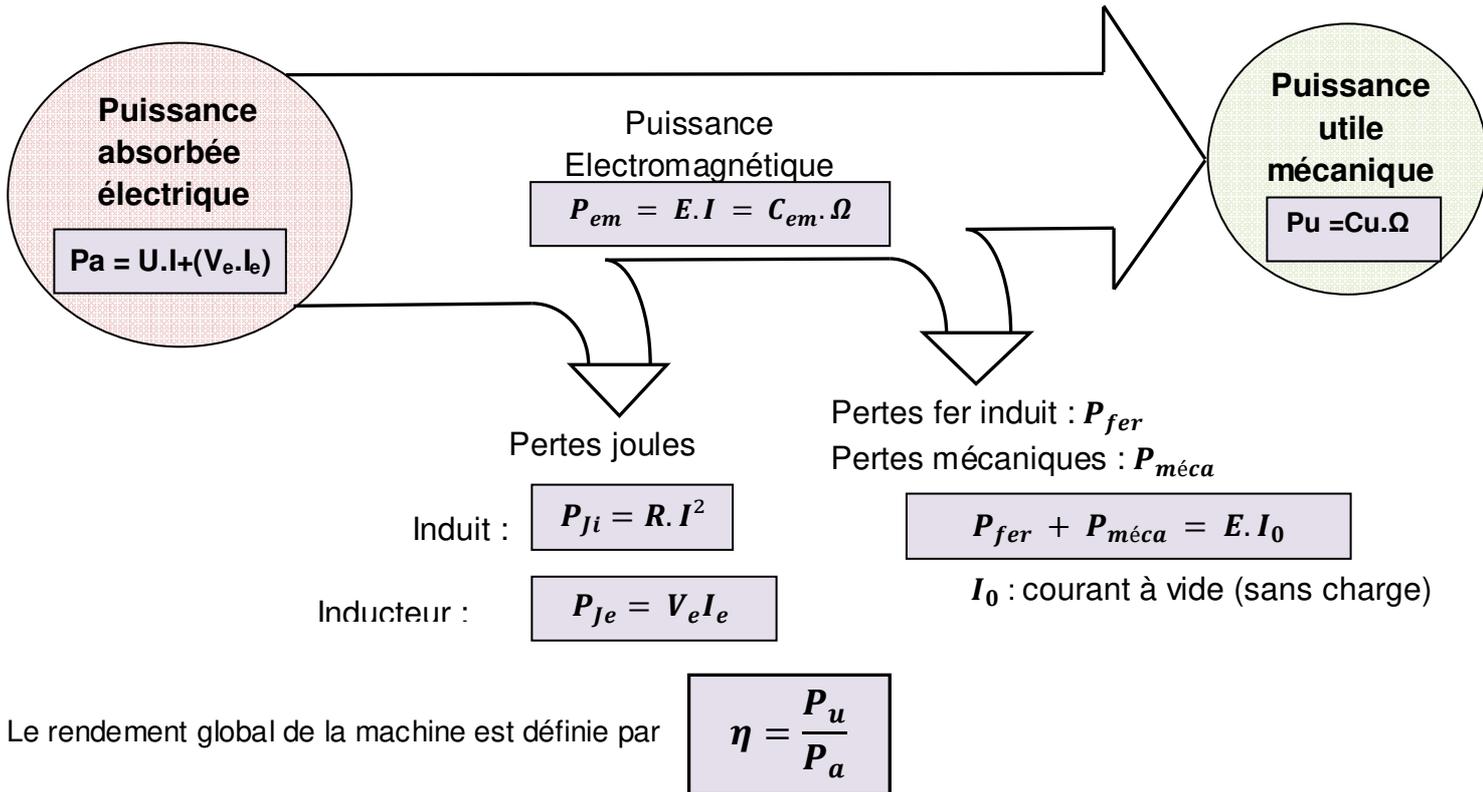
- perte mécanique négligée,
- perte fer négligée,
- régime permanent (vitesse constante).

L'équation du PFD (principe fondamental de la dynamique) devient alors : $C_{em}(t) = C_u(t)$

Les équations du moteur se réduisent alors aux 3 équations du moteur de la partie précédente en remplaçant C_{em} par C_u .

6 Bilan des puissances

En fonctionnement moteur :



En mode génératrice, le bilan de puissance se trace en sens inverse:

- la puissance mécanique devient la puissance absorbée
- la puissance électrique devient la puissance utile.

7 Dimensionnement du moteur

Comparaison des grandeurs mécaniques imposée par la charge (en régime permanent) avec les valeurs nominales du moteur.

- Vitesse du moteur : $\Omega_m \leq \Omega_n$ (vitesse nominale du moteur sous tension nominale)
- Critère thermique :
 - Puissance nominale disponible en sortie : $P_u \leq P_n$ ou /et
 - Couple moteur en régime permanent : $C_u \leq C_n$.

D'autres critères seront vus plus tard concernant le dimensionnement du moteur lors des phases transitoires (démarrage ou arrêt).