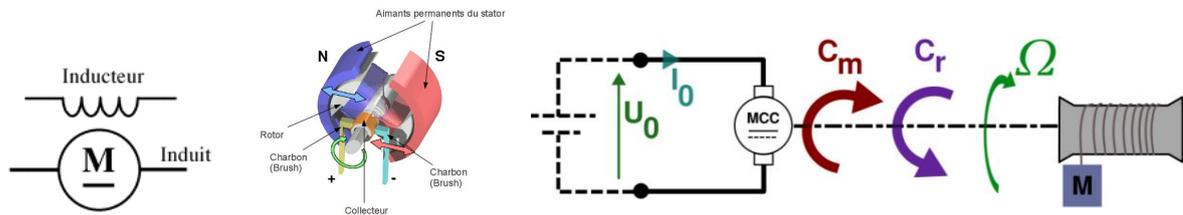


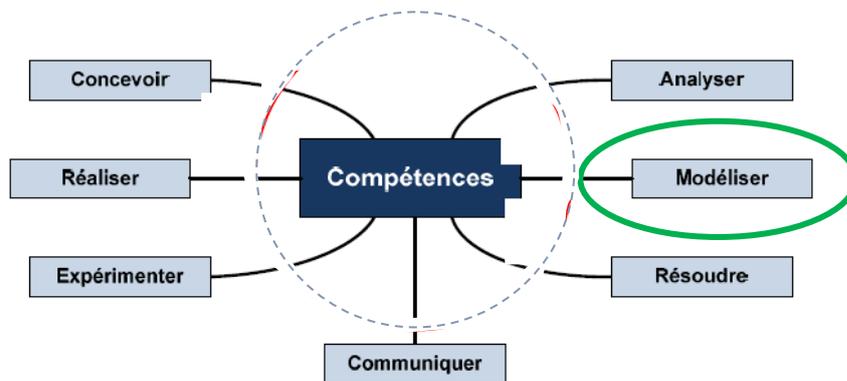
Cycle 9: Etude de la chaîne de conversion électromécanique

Chapitre 1 : Modélisation du moteur à courant continu



Compétences:

- Modéliser les sources et circuits
- Modéliser une chaîne de conversion électromécanique
- Modéliser le moteur à courant continu (connaissance et comportement)





Etude de la chaîne de conversion électromécanique: moteur à courant continu

1. Les machines à courant continu aujourd’hui

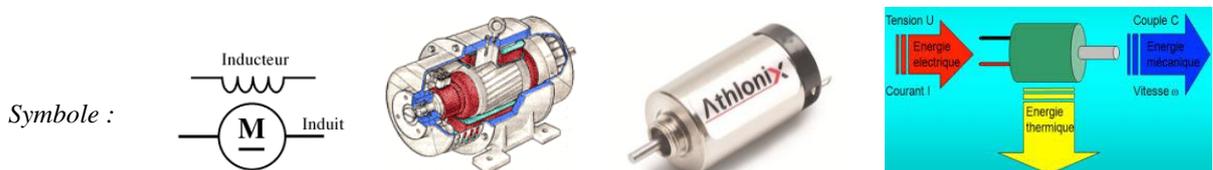
Les développements actuels en **robotique** et en **variation de vitesse** (TGV, voiture électrique...) nécessitent la réalisation d’ensembles **alimentation – commande – machine**, qui optimisent les **performances statiques et dynamiques des machines électriques** utilisées en actionneur, à savoir : le **moteur CC et la génératrice CC**.



La conception de ces ensembles repose sur une **approche pluridisciplinaire** qui intègre les bases variées du génie électrique, automatique, mécanique et de l’informatique industrielle.

2. Présentation et symbole

Le moteur à courant continu (comme la génératrice), de par ses caractéristiques électromécaniques, est fréquemment employé sur des systèmes où la maîtrise de la vitesse et du couple est importante.



Le moteur CC est très largement utilisé dans tous les domaines de l’industrie. Ils peuvent **être énormes comme minuscules**. Leur **rendement est proche de 80%** (dû aux pertes Joules essentiellement). Ils peuvent être **alimenté en courant continu ou alternatif** et tourner à vitesse constante ou avec variation de vitesse.

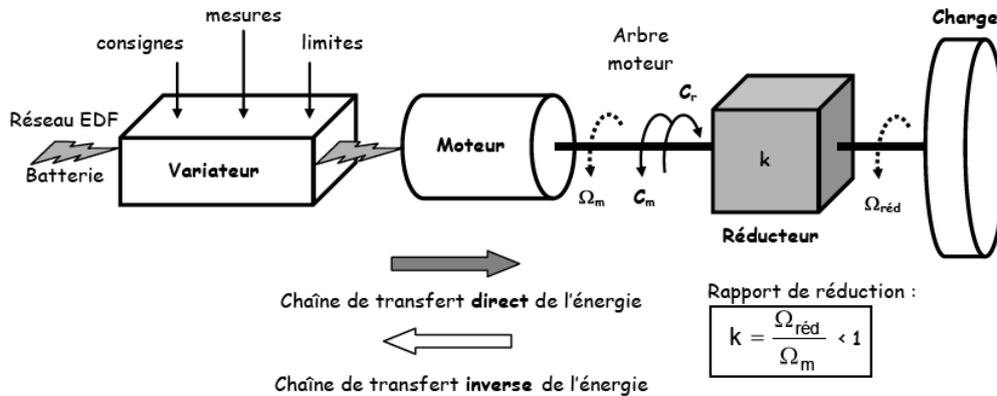


Moteur CC 2500KW



Micro moteur CC 5W

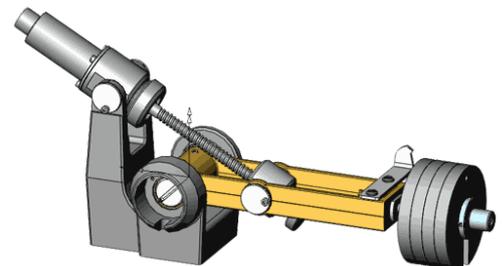
3. Chaîne de transfert d'énergie



L'énergie électrique (**continue ou alternative**) est distribuée jusqu'à un **convertisseur statique de puissance (hacheur...)** dont le rôle est de **moduler l'énergie** électrique fournie au moteur.

Celui-ci **converti cette énergie électrique en énergie mécanique de rotation**, qu'il transmettra à une charge par l'intermédiaire d'un **adaptateur mécanique** (souvent une réducteur).

Exemple : *moteur CC maxpid*



On parle de chaîne de transfert directe lorsque la **charge est résistance** : fonctionnement **en moteur**, et de chaîne de **transfert inverse** lorsque la **charge devient motrice** : fonctionnement en **génératrice**. Cette énergie sera soit *stockée (condensateur)*, soit *dissipée (résistance)* soit *restituée au réseau (via variateur)*.

Exemple : *génératrice éolienne*





4. Constitution

Le moteur CC est composé des éléments suivants :

- Un **inducteur**, appelé **stator** :

Elément fixe sur lequel un **enroulement est bobiné** afin de produire un champ magnétique. Il peut être remplacé par un **aimant permanent**.

- Un **induit**, appelé **rotor** :

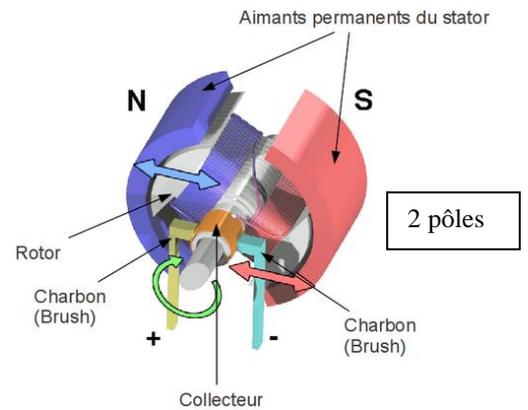
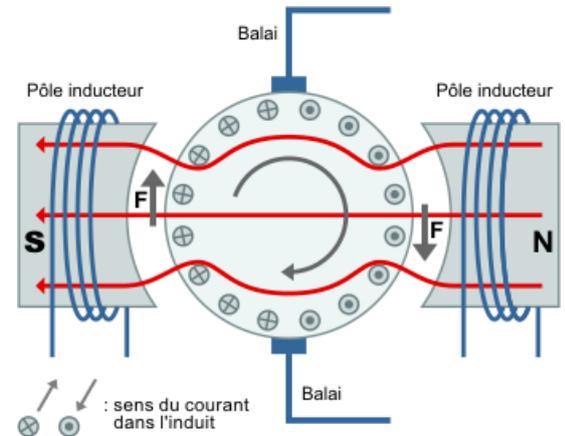
Cylindres de tôles magnétiques isolés entre eux sur lesquels des conducteurs sont répartis. C'est l'élément mobile du moteur.

- Un **collecteur** :

Fixé à l'induit, il est en contact avec les charbons.

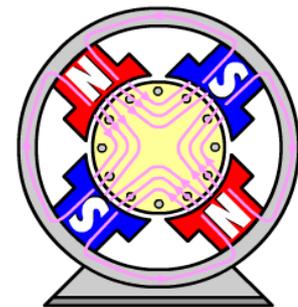
- Les **charbons** :

Appelés aussi **balais**, ils alimentent l'induit par le collecteur sur lequel ils frottent.



STATOR :

Dans un moteur CC, le stator est constitué de plusieurs **paires de pôles** magnétiques. Les pôles peuvent être obtenus par bobinage ou aimants permanents.



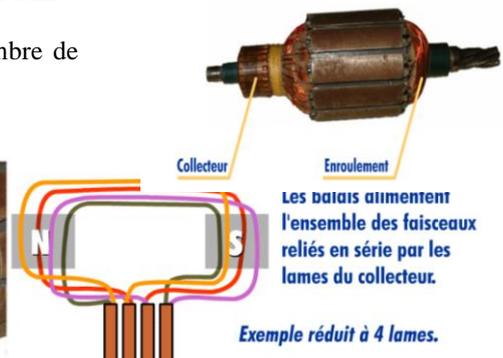
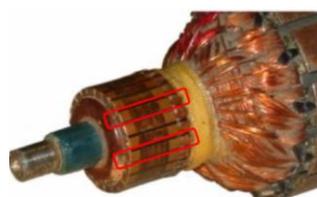
ROTOR :

Le rotor est constitué d'un **enroulement de spires conductrices réunies en faisceaux** disposés de telle manière que lorsqu'un côté est soumis au pôle nord, l'autre est au sud. Les faisceaux sont **reliés en série grâce aux lames du collecteur**.

L'intensité de la force électromotrice d'entraînement dépend du nombre de spires.



Rotor alternateur 8 tonnes !



Les balais alimentent l'ensemble des faisceaux reliés en série par les lames du collecteur.

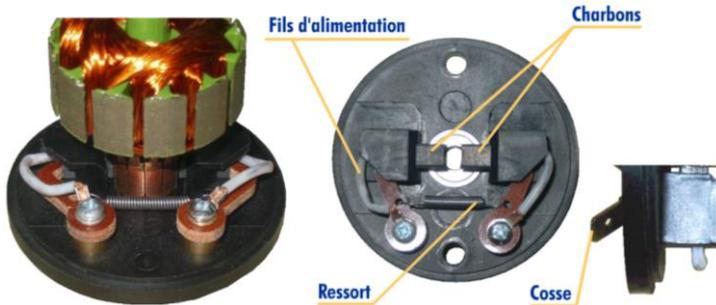
Exemple réduit à 4 lames.



Etude de la chaîne de conversion électromécanique: moteur à courant continu

CHARBONS :

Sur de nombreux moteurs à courant continu, l'alimentation du rotor se fait par l'intermédiaire de charbons qui sont maintenus en contact avec les lames du collecteur.



Les charbons sont **reliés à l'alimentation électrique** du moteur par les fils reliés aux cosses. Ils sont plaqués sur les lames du collecteur par les poussoirs et le ressort.

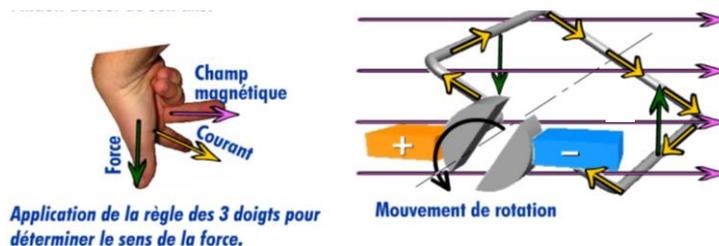
5. Fonctionnement

L'application de la **loi de Laplace** sur le bobinage du moteur montre que l'action d'un champ magnétique \vec{B} (Tesla) sur un conducteur parcouru par un courant I(A) produit une force F(N).

$$\boxed{d\vec{F} = I \cdot d\vec{l} \wedge \vec{B}}$$

L'induit est plongé dans le champ magnétique créé par l'inducteur. Par l'intermédiaire des charbons et du collecteur, un courant électrique circule dans l'induit.

Il se crée alors une **force électromotrice qui provoque la rotation de l'induit** autour de son axe.



Comme il y a **plusieurs paires de pôles**, il y a continuité dans l'effort F et donc dans la rotation du rotor.

6. Avantages - inconvénients et caractéristiquesAvantages :

- Couple moteur maxi à l'arrêt
- Commande électromécanique simple (contacteur)
- Pouvant être très très petits

Inconvénients :

- Conversion alternatif / continu obligatoire si alimentation réseau 50 Hz AC
- Entretien (charbons s'usent)
- Prix/Puissance et Volume/Puissance



Etude de la chaîne de conversion électromécanique: moteur à courant continu

Caractéristiques :

La qualité du moteur (régularité de l'entraînement, couple, vitesse...) est donc directement lié à sa constitution :

- nombre de paires de pôles,
- nombre de faisceaux (et donc de lames du collecteur),
- nombre de spires dans un faisceau,
- choix des matériaux constituant l'ensemble.



Le moteur possède des **caractéristiques électriques et mécaniques** que l'on retrouve sur sa fiche signalétique:

- * **Puissance mécanique développée**
- * **Courant nominal** (régime stabilisé)
- * **Tension nominale** bornes induit
- * **Couple nominal** ($C_n = C_u$)
- * **Vitesse de rotation nominale**

tension d'excitation.

Couple nominal

Puissance mécanique développée

Vitesse de rotation nominale

Tension nominale aux bornes de l'induit

Courant nominal dans l'induit

LR 57008		2 102 451 / A				
IEC 34.1.1990		MADE IN FRANCE				
MOTEUR A COURANT CONTINU DIRECT CURRENT MOTOR						
TYPE: LSK 1604 S 02	N° 700000/10	9/1992	M 249 kg			
Classe / Ins class	H	IM 1001	IP 23 IC 06			
$M_{nom} / \text{Rated torque}$	301 N.m	Altitude	1000 m Temp. 40 °C			
	kW	min ⁻¹	V	A	V	A
Nom./Rat.	36.3	1150	440	95.5	360	3
	3.63	115	44	95.5	360	3
	36.3	1720	440	95.5	240	
T		Système peinture: I		Induit / Arm.		Excit. / Field
○ Service / Duty S1		DE 6312 2RS C3		NDE 6312 2RS C3		○

7. Modélisation et équations du moteur CC à excitation séparée – régime STATIQUE

Le cas étudié est **lorsque l'inducteur et l'induit sont alimentés séparément**. Les modèles étudiés ci après ne **représentent que la partie induit**. Deux modélisations électriques sont possibles pour le moteur à courant continu, dépendant du régime étudié.

Pour faire des analyses et calculs sur le moteur CC, on le remplace par **un modèle équivalent de Thévenin**. Ce modèle simplifié sera très souvent utilisé en SII.

7.1. Modélisation

Le régime statique ou stationnaire d'un moteur CC correspond à un **régime sans variation de vitesse ou de tension**. La variation de flux sur le bobinage de l'induit **créé une force électromotrice (fem) E** tel que:

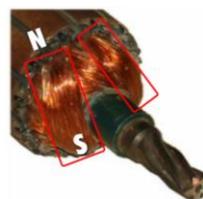
$$e(t) = - \frac{d\Phi(t)}{dt}$$

la tension est proportionnelle à la variation de flux ϕ

Sur un moteur, le rotor (induit) est bobiné, ce qui correspond à **une résistance R** telle que:

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

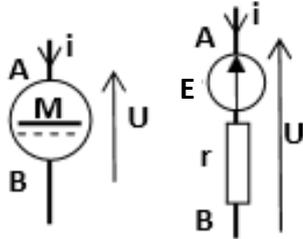
- avec :
- R** : résistance en ohm
 - ρ** : résistivité en ohm.mètre
 - l** : longueur en mètre
 - S** : section en mètre-carré





Etude de la chaîne de conversion électromécanique: moteur à courant continu

Dans le cas du régime statique, le moteur est équivalent à une résistance R (environ $= 1\Omega$), créée par les spires bobinées de l'induit et d'une fêm E .



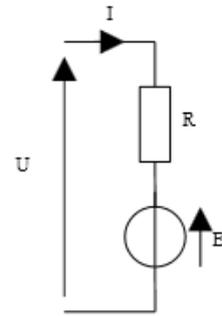
modèle équivalent régime statique

L'induit est donc régi par l'équation : $U = E + R.I$

On obtient la caractéristique suivante :

- A vide ($I=0$), la tension U se confond avec la fêm E induite,
- En charge ($I \neq 0$), il faut augmenter U pour garder la vitesse constante

Le modèle équivalent de l'induit en régime statique est donc :



7.2. La f.è.m

La valeur moyenne E de cette f.è.m est proportionnelle à la vitesse de rotation Ω du rotor, au flux maximal du champ magnétique créé par l'inducteur à travers une spire ($\phi=B.S$) et à une constante K qui dépend des caractéristiques de la conception du moteur :

$$E = (p/a).N.n.\phi$$

- E : fêm induite (V)
- p : nombre paires de pôles
- a : nombre paires de voies enroulement (charbons)
- N : nombre de conducteurs actifs (2/spires)
- n : vitesse de rotation (tr/s)
- ϕ : flux par pôle (wb)

On peut simplifier

$$E = k.\phi.\Omega$$

- E : fêm induite (V)
- Ω : vitesse angulaire (rd/s)
- ϕ : flux par pôle (wb)
- k : constante de construction moteur

Dans le cas du moteur à excitation séparée, le flux ϕ est constant, on peut écrire :

$$E = K_v.\Omega$$

avec K_v : constante électromécanique de vitesse (V.s/rd) notée aussi K_e



Etude de la chaîne de conversion électromécanique: moteur à courant continu

7.3. Puissance et couple

Si l'induit présente une f.è.m E alors qu'il est parcouru par un courant d'intensité I, il reçoit une **puissance électromagnétique = puissance utile**, en **négligeant les pertes fer (courant de Foucault = effets joules) et mécaniques** :

$$P_m = E.I$$

Le rotor tourne à la vitesse angulaire Ω , la puissance s'écrit aussi :

$$P_m = C_m.\Omega$$

C_m : couple en N.m
P : puissance en W

On en conclut : $P_m = C_m.\Omega = E.I = U.I - R.I^2$

Le **couple électromagnétique = couple utile = couple résistant** ($C_m=C_r$), se déduit :

$$C_m = P_m/\Omega = E.I/\Omega = k.\phi.I \quad \text{d'où : } C_m = K_c.I$$

avec $K_c =$ **constante électromécanique de couple, notée aussi K_i (N.m/A)**

Remarque : $K_c = K_v = K$ car $P=UI = C_m\Omega$ d'où $N.m/A = V.s/rd$

- C'est la charge couplée au moteur qui impose le courant d'induit I.
- La vitesse de rotation du moteur est proportionnelle à la tension d'alimentation de l'induit. Le réglage de la vitesse est indépendant de la charge.

Exercice : moteur CC MAXON sur le maxpid

Tension d'alimentation (Ua)	V	24
Vitesse au courant In	tr/mn	3493
Couple au courant In	mNm	113
Courant max permanent (In)	mA	2150
Vitesse à vide à Ua à +/- 10%	tr/mn	4303
Courant à vide à +/- 50%	mA	92.8
Couple de démarrage à Ua	mNm	611
Courant de démarrage à Ua	mA	11600
Constante de couple	mNm/A	52.5
Constante de vitesse	tr/mn/V	182
Pente vitesse/couple	tr/mn/mNm	7.17
Vitesse limite	tr/mn	8200
Puissance utile max. à Ua	W	69
Rendement maximum	%	85.5
Constante de temps électromécanique	ms	5.23
Inertie	gcm ²	69.6
Résistance aux bornes	Ohm	2.07
Inductivité	mH	0.62
Résistance thermique Boîtier/Ambiant	K/W	6.2
Résistance thermique Rotor/Boîtier	K/W	2



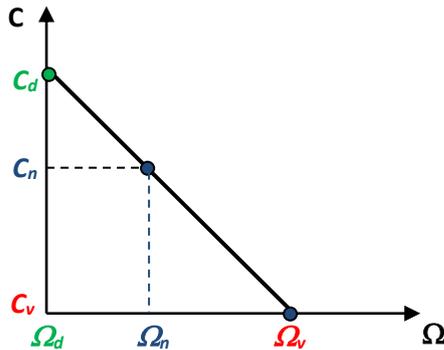
- 1°) Que vaut k_c ? $k_c = 52.5 \text{ N.mm/A}$
- 2°) Vérifiez la valeur de k_c . $k_c = C/I = 113/2.15 = 52.5 \text{ N.mm/A}$
- 3°) Que vaut k_v ? $k_v = 182 \text{ tr/min/V}$
- 4°) Vérifiez la valeur de k_v . On a : $I_n = 2150\text{mA}, U = 24\text{V}, R = 2.07\text{ohm}, N_n = 3493\text{tr/min}$
 $k_v = E/\Omega = (U - RI)/\Omega = (24 - 2.07 \cdot 2.15) / (\pi \cdot 3493 / 30) = 0.053 \text{ V/rd/s} = 181 \text{ tr/min/V}$
- 5°) Montrez que $k_v = k_c$. $N.m/A = W/(rd/s)/A = V.A.s/rd.A = V.s/rd$ et on a bien $k_c = 0.0525 \text{ N.m/A} = 0.052 \text{ V.s/rd}$



7.4. Caractéristique Couple/Vitesse

Pour une excitation donnée ($U = \text{cte}$) on a :

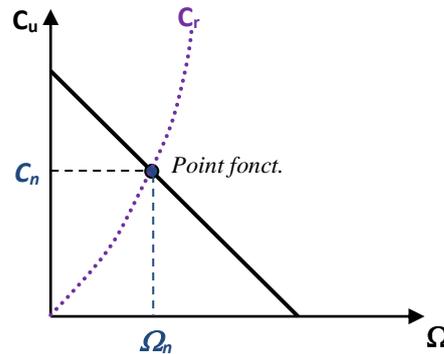
$$U = E + RI = K \cdot \Omega + R \cdot C_m / K \quad \text{donc} \quad \boxed{C_m = (K/R)U - (K^2/R)\Omega} \quad \text{c'est une équation de droite}$$



- A vide, $C_v=0$, $I=0$ (pas de charge), $E=U$, la vitesse est donnée par $\Omega_v = U/K$
- Au démarrage, $\Omega_d=0$, $E=0$, $C_d = \text{maxi}$, I_d imposé par charge est énorme ! (*risque destruction*)
C'est pourquoi on démarre sous tension réduite.
- En charge, régime nominal : $\Omega_n < \Omega_d$, $C_n < C_d$,

On limite donc la caractéristique mécanique du moteur à sa **partie « utile »** qui nous permet de trouver le **point de fonctionnement, en régime permanent**, de l'ensemble {moteur + charge}.

En régime permanent, il y a **égalité du couple utile C_u et du couple résistant C_r** imposé par la charge. ($C_m=C_u=C_r$)
Au point, on retrouve C_n et Ω_n



Avec le moteur du Maxpid, on retrouve :

$$C_n = 113N.mm, C_d = 611N.mm, C_v = 0$$

$$\Omega_n = 3493tr/min, \Omega_d = 0, \Omega_v = 4303tr/min$$



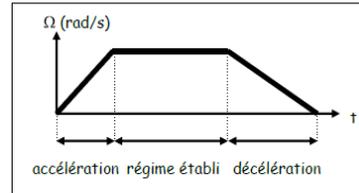
8. Modélisation et équations du moteur CC à excitation séparée – régime DYNAMIQUE

On a toujours un **flux ϕ constant**.

Le régime dynamique (**ou transitoire**) est un régime de fonctionnement d'un système lorsqu'il est soumis à une **excitation variable dans le temps autour d'un point de repos**.

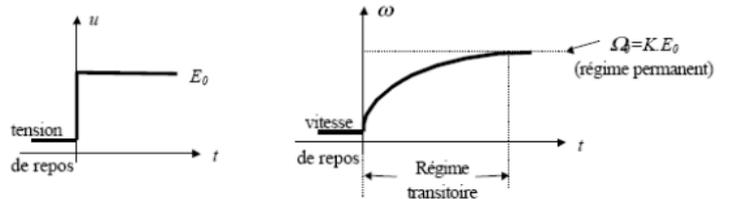
Le régime transitoire pour un moteur se retrouve en phase de:

- * **démarrage,**
- * **d'accélération**
- * **ou du freinage.**



On parle souvent de "*cycle robotique*".

De même, lorsque l'on applique une **variation brutale de la tension d'entrée u** , la vitesse du moteur n'atteint pas instantanément sa valeur en régime permanent statique, car le moteur présente une inertie propre. Le moteur fonctionne alors en régime dynamique. Ce **régime est transitoire** (il dure un certain temps), le temps que le système se stabilise, c'est à dire que le moteur atteigne la vitesse correspondant à la tension appliquée à l'entrée.



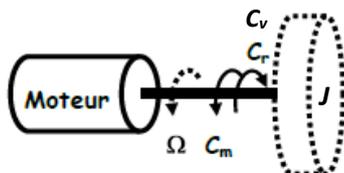
8.1. Caractéristiques mécaniques dynamiques des solides en mouvement

D'un point de vue mécanique, un induit de machine à courant continu ressemble très fort à un **cylindre métallique dont le moment d'inertie est $J = \frac{1}{2} m r^2$** . m est la masse de l'induit, r son rayon.

Comme nous le verrons en 2ème année, pour un **solide en rotation autour d'un axe fixe** (c'est le cas du moteur), nous écrivons une équation différentielle nous permettant de prévoir sa position et sa vitesse:

$$J \frac{d}{dt} \omega(t) = C_m(t) - C_r(t) - C_v(t)$$

- J : moment d'inertie J du solide en $kg.m^2$
- $w(t)$: vitesse angulaire en rad/s
- $C_m(t)$: couple moteur fourni par rotor en $N.m$
- $C_r(t)$: couple résistant appliqué sur l'arbre en rotation en $N.m$
- $C_v(t)$: couple résistant dû aux frottements visqueux en $N.m$
avec $C_v(t) = f.w(t)$ f : coef frottement visqueux



Les différents cas:

- $C_m = C_r + C_v$: la vitesse de rotation de l'arbre est constante (**régime permanent** vu en 8.)
- $C_m > C_r + C_v$: la vitesse de l'arbre augmente
- $C_m < C_r + C_v$: la vitesse de l'arbre diminue
- Si on fixe la valeur du courant $i(t)$ dans l'induit à chaque instant, on fixe C_m , donc l'accélération (*intéressant pour un ascenseur ou un trottoir roulant par exemple*).



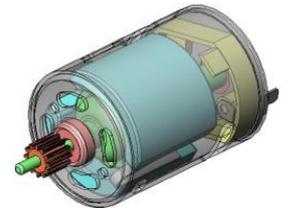
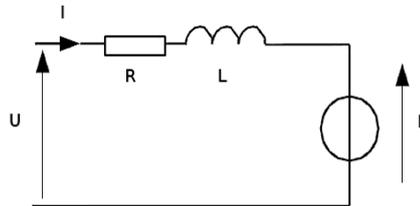
Etude de la chaîne de conversion électromécanique: moteur à courant continu

8.2. Equations électromécaniques du moteur à courant CC en régime dynamique

Dans le cas **du régime dynamique**, le moteur est **équivalent à une résistance R** (environ = 1Ω), créée par les spires bobinées de l'induit, **à une fêm E**, et une **inductance L** issue du bobinage de l'induit montées en série.

Les équations sont:

- $U(t) = E(t) + R.I(t) + L \frac{dI(t)}{dt}$
- $E(t) = K.\Omega(t)$
- $C_m(t) = K.I(t)$
- $C_v(t) = f.\Omega(t)$
- $J \frac{d\Omega(t)}{dt} = C_m(t) - C_r(t) - f.\Omega(t)$



8.3. Modélisation du moteur courant continu (schéma bloc - domaine de Laplace)

A partir des relations précédentes et de leurs transformées de Laplace, on a:

$$\begin{aligned}
 U(p) &= E(p) + RI(p) + LpI(p) \\
 E(p) &= K.\Omega(p) \\
 C_m(p) &= KI(p) \\
 Jp.\Omega(p) &= C_m(p) - C_r(p) - f.\Omega(p)
 \end{aligned}$$

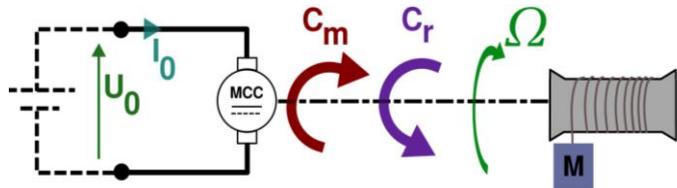
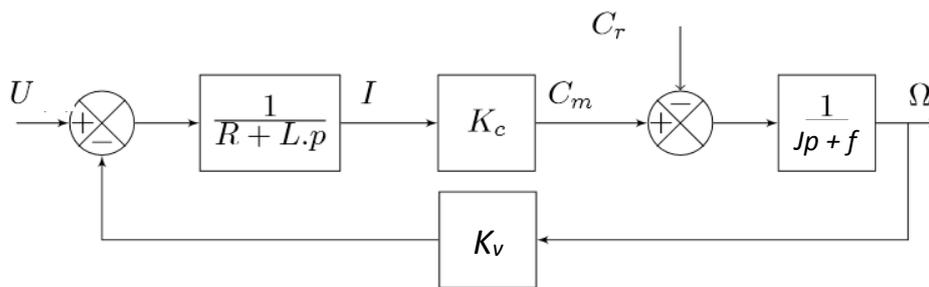
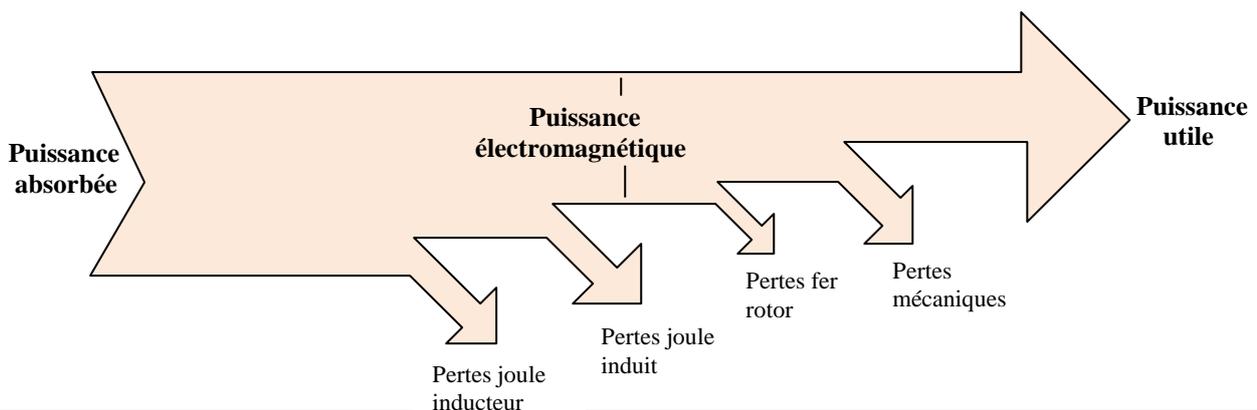


Schéma bloc du moteur CC complet:



9. Bilan des puissances et rendement

Le moteur électrique absorbe une puissance électrique (Pa) qu'il transforme en puissance utile (Pu).





Etude de la chaîne de conversion électromécanique: moteur à courant continu

- **Puissance absorbé (P_a):** somme des puissances absorbées par l'inducteur et induit

$$P_a = U.I + u_{ex}.i_{ex}$$

- **Pertes joules induit et inducteur (P_j) :** puissance transformée en chaleur (courant Foucault)

$$P_j = RI^2 + r_{ex}i_{ex}^2$$

- **Pertes mécaniques et fer :** dépendent de la vitesse de rotation du moteur (indépendantes de la charge), elles sont les pertes frottements visqueux et pertes fer dû phénomènes magnétiques

- **Puissance électromagnétique (P_{em}) :** puissance qui est transformée en énergie mécanique

$$P_{em} = P_a - P_j = E.I$$

- **Puissance utile (P_u) :** puissance fournit de façon mécanique à la charge (indiquée sur plaque signalétique)

$$P_u = P_{em} - (\text{pertes fer} + \text{méca})$$

Le rendement :

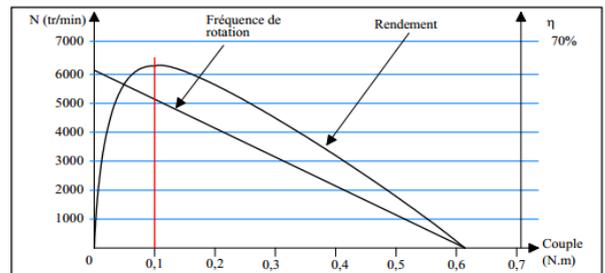
Le rendement d'un moteur est : $\eta = P_u / P_a$

Plus la puissance est élevée, meilleur est le rendement...

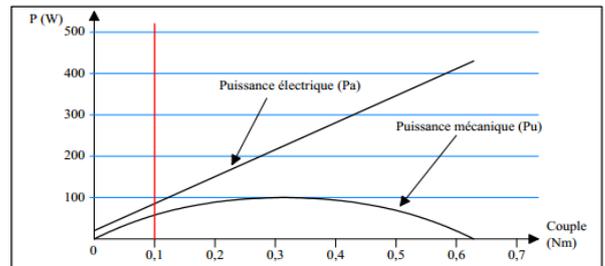
Courbes caractéristiques :

On donne ci-après, les courbes caractéristiques d'un moteur à courant continu (Johnson Electric HC971 utilisé pour une **tondeuse électrique**).

Les grandeurs : fréquence de rotation, rendement, puissance électrique et puissance mécanique sont données en fonction du couple résistant sur l'arbre moteur pour une tension d'alimentation constante.



Le couple fourni par le moteur et sa fréquence de rotation sont dépendants. cette caractéristique est linéaire. Elle permet de connaître la vitesse à vide et le couple de démarrage du moteur.



La Puissance utile se déduit de la courbe vitesse-couple du moteur. La puissance absorbée augmente avec le couple car I est proportionnel à C. Les caractéristiques nominales du moteur sont définies pour η max.

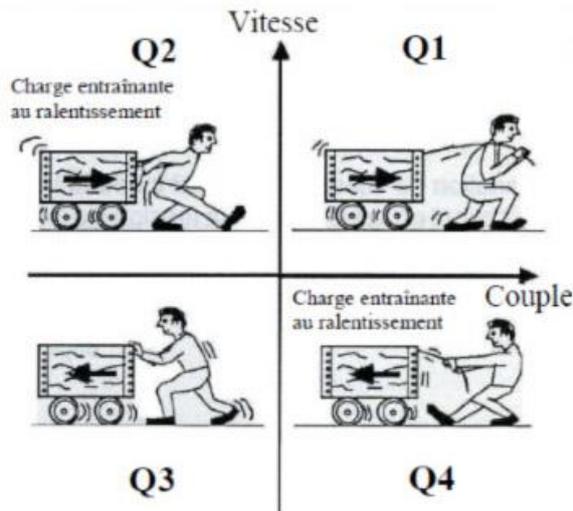


10. Fonctionnement en 4 quadrants

Les moteurs CC convertissent l'énergie électrique absorbée en énergie mécanique et sont capables de fournir une puissance mécanique suffisante pour **démarrer puis entraîner une charge en mouvement**. On dit alors qu'ils ont un **fonctionnement en moteur**.

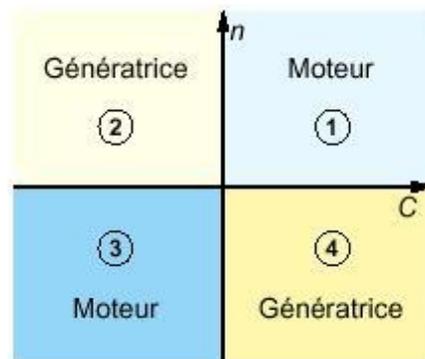
Mais ils peuvent aussi convertir l'énergie mécanique reçue en énergie électrique lorsqu'ils **subissent l'action d'une charge entraînant**. On dit alors qu'ils ont un **fonctionnement en générateur**, capable de se comporter comme un **frein**.

Fonctionnement des machines à courant continu dans les **4 quadrants** : le variateur sait gérer des accélérations et décélérations, ainsi que des freinages dans toutes les situations disponibles



- Les **quadrants Q1 et Q3** traduisent un fonctionnement de la machine en **moteur** dans les deux sens de rotation
- Les **quadrants Q2 et Q4** traduisent un fonctionnement de la machine en **génératrice (frein)** dans les deux sens de rotation.

Le nombre de quadrants de fonctionnement est exclusivement limité par le système de commande pilotant le moteur.



- A condition que la chaîne cinématique le permette, pour passer des quadrants **1->4** ou **2->3** le dispositif d'alimentation devra être **réversible en tension**.
- A condition que la chaîne cinématique le permette, pour passer des quadrants **1->2** ou **4->3** le dispositif d'alimentation devra être **réversible en courant**.