

La machine à courant continu est un "convertisseur électromécanique" encore très utilisé.

Malgré le développement spectaculaire des machines à courant alternatif, lié aux progrès de l'électronique de puissance, la machine à courant continu garde des domaines d'application où elle demeure la solution la plus économique :

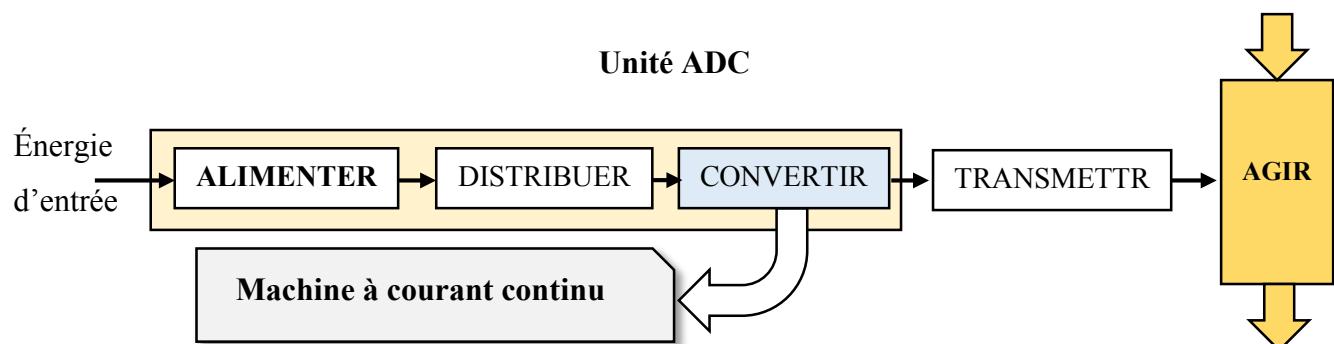
On la rencontre dans des applications très diverses, par exemple :

- Moteur de jouet (très faible puissance, alimentation par pile),
- Moteurs d'équipement automobile (démarreur, essuie-glace, ventilateur...),
- Moteur d'entraînement à vitesse variable.

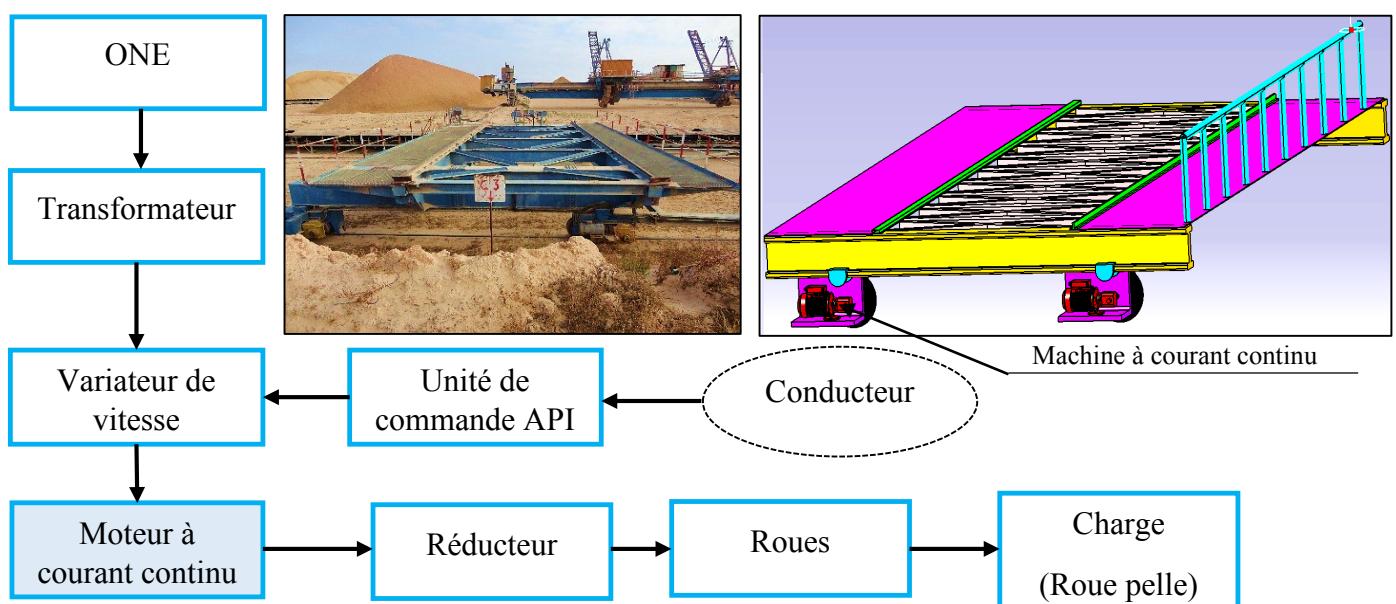
Le « moteur universel », favori des équipements électroménagers et du petit outillage est également dérivé d'une machine à courant continu

Dans l'architecture fonctionnelle générique d'un système pluritechnologique, **la machine à courant continu** assure la fonction « **CONVERTIR** » de la chaîne d'énergie.

Chaîne d'énergie



Exemple : transbordeur pour déplacer la machine de déstockage à l'OCP Bengerir



I. Les principes de la machine à courant continu

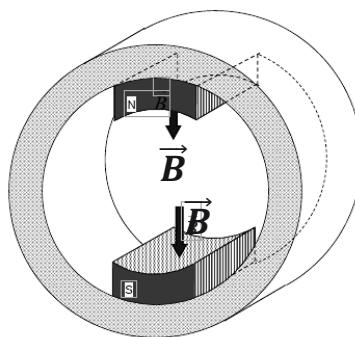
La machine à courant continu a pour rôle de **convertir de l'énergie électrique en énergie mécanique** (mouvement de rotation) ou, inversement de l'énergie mécanique en énergie électrique.

Dans le premier cas, on dit qu'elle fonctionne en **moteur** ; et dans le second cas en **générateur** : c'est une machine réversible.

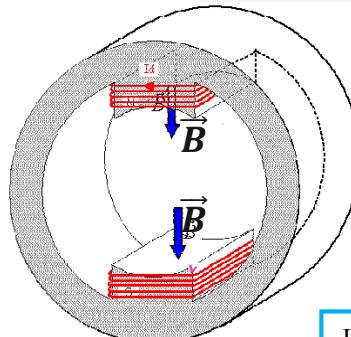
II. Constitutions de la machine à courant continu

La machine à courant continu est constituée de trois parties :

1. **Un stator** (partie fixe avec des aimants ou des électroaimants) qui possède un pôle Nord et un pôle Sud, et qui engendre donc un "champ" **d'induction** \vec{B} entre eux. (Pour cette raison, on l'appelle **l'inducteur**).

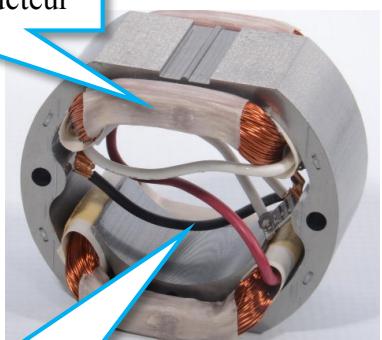


Aimant permanent



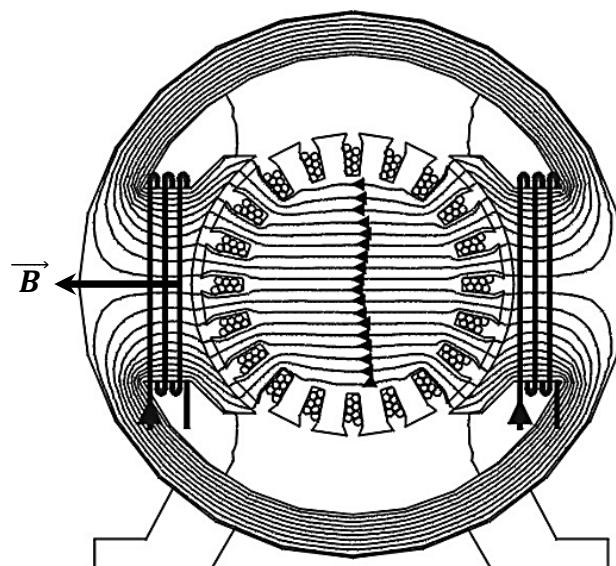
Electro-aimant

Les bobinages de l'inducteur



L'induit sera positionné entre les pôles inducteurs

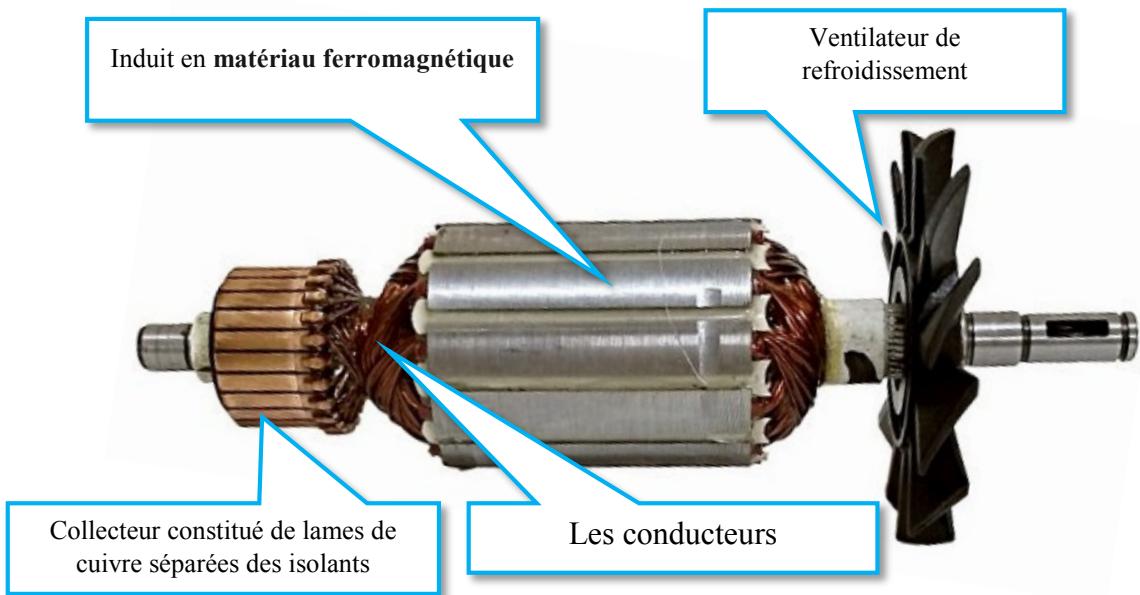
Lorsqu'un **courant parcourt les bobinages inducteurs**, il engendre dans la machine **un champ d'induction magnétique** qui traverse aussi l'induit.



Vue en coupe.

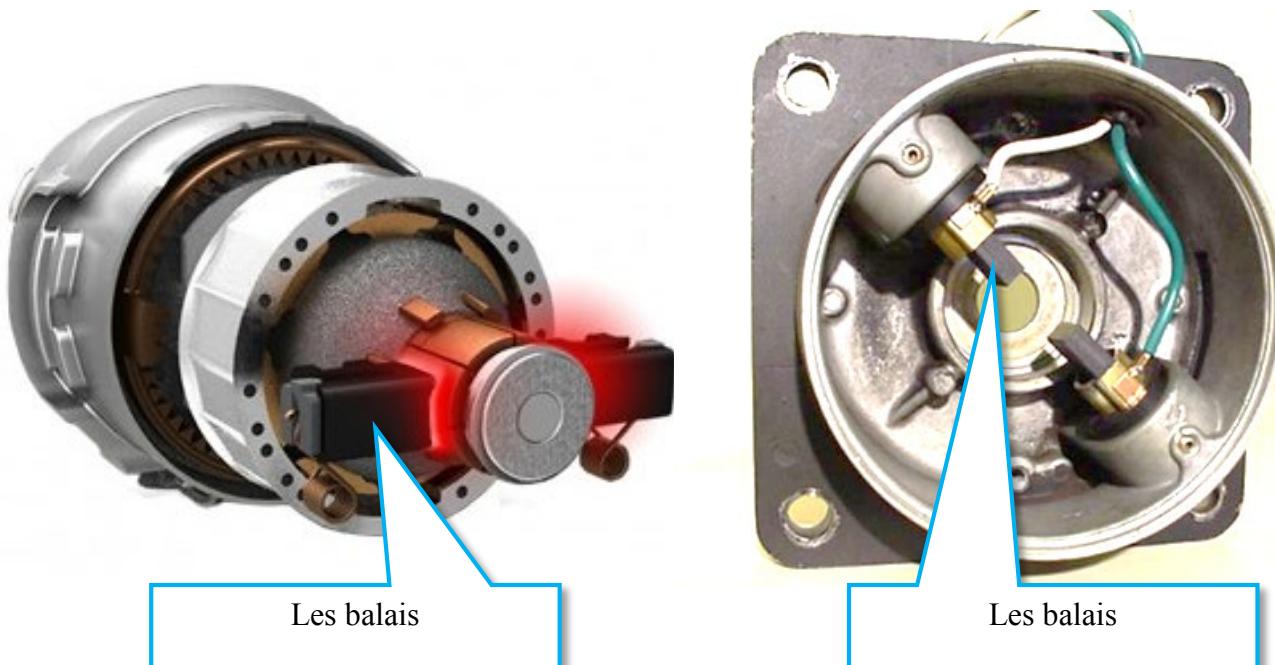
Simulation des lignes de champ d'induction engendrées par un courant dans les bobinages inducteurs.

2. Un **rotor** (partie tournante) qui subit l'induction, (c'est pourquoi on l'appelle l'induit.). Les machines à courant continu adoptent un bobinage de l'induit plus compliqué bobiné dans les encoches d'un cylindre en **matériau ferromagnétique** feuilleté.



3. Un **organe de liaison électrique** entre l'induit et l'extérieur de la machine :

Les conducteurs de l'induit sont soudés à des lames conductrices sur lesquelles frottent des éléments conducteurs fixes appelés **balais**. L'ensemble des lames constitue le collecteur.

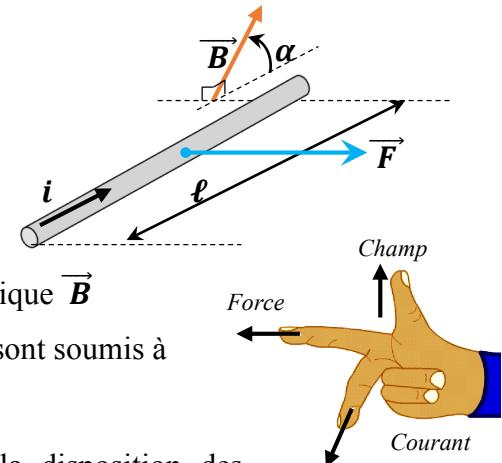


III. Le principe de fonctionnement de la machine à courant continu

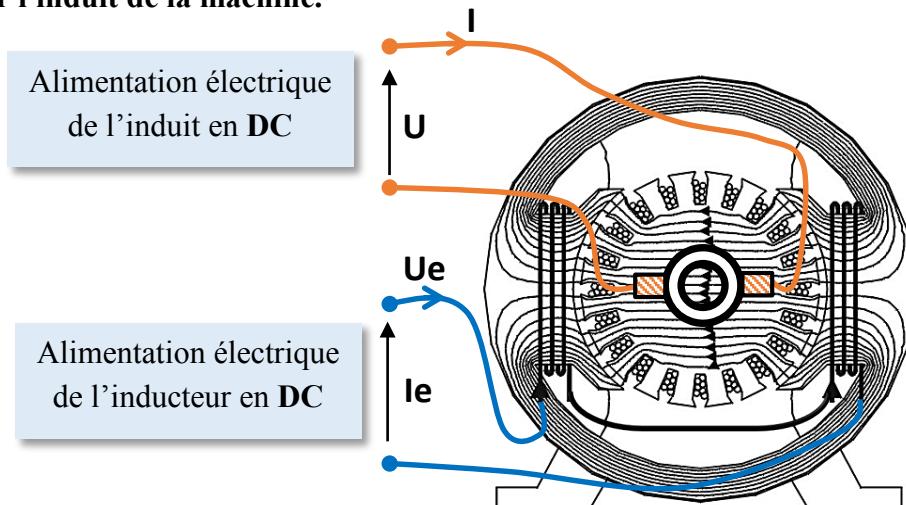
La machine à courant continu est basée sur la loi de Laplace :

Loi de Laplace :

Un conducteur de longueur ℓ , placé dans un champ d'induction uniforme \vec{B} , et parcouru par un courant i est soumis à une force \vec{F} telle que : $\vec{F} = i \cdot (\vec{\ell} \wedge \vec{B})$.

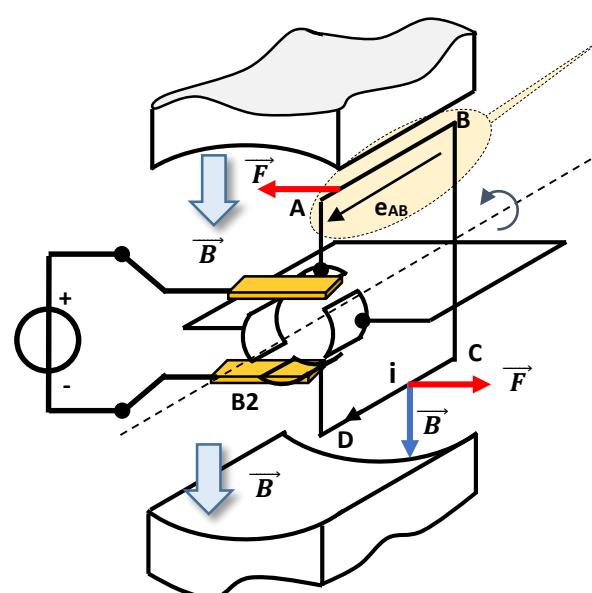


- Lorsque l'inducteur est alimenté, il crée un champ magnétique \vec{B}
- D'après la loi de Laplace, tous les conducteurs de l'induit sont soumis à une force \vec{F} .
- Le **sens du courant** de l'induit **I**. Compte tenu de la disposition des conducteurs, la résultante de toutes les forces appliquées se traduit ainsi par un **couple**, qui fait **tourner l'induit de la machine**.



IV. Etude quantitative de la machine à courant continu

1. Force électromotrice induite



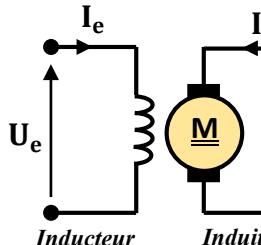
La f.e.m. E entre les balais est la résultante des f.e.m. induites dans tous les conducteurs actifs (logé dans les encoches de l'induit) lors de leur déplacement dans le champ d'induction B . L'ensemble balais collecteur permet d'obtenir une f.e.m. E presque constante (Il reste une légère ondulation résiduelle). Cette f.e.m. induite obéit à la loi :

$$E = k \cdot \varphi \cdot \Omega$$

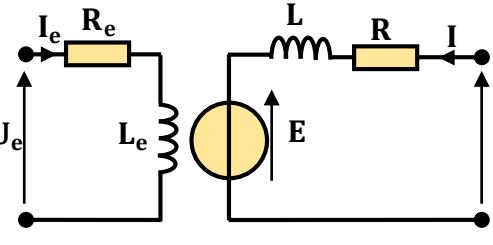
Il en résulte que la f.e.m. E est proportionnelle à la vitesse de déplacement des conducteurs actifs et à la valeur de l'induction dans la machine.

2. Modèle électrique de la machine à courant continu

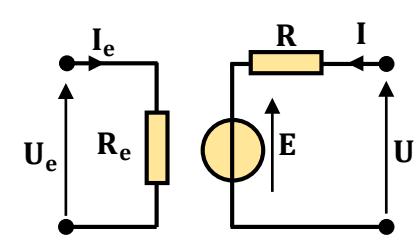
L'induit étant un bobinage réalisé en cuivre, il possède une résistance R et une inductance L :



Symbole d'une MCC



Modèle dynamique d'une MCC



Modèle permanent d'une MCC

Les grandeurs sont variables, ce modèle convient pour l'étude d'une MCC en régime transitoire

En régime établi le courant $I = Cte$ et $L \frac{di}{dt} = 0$

U_e : la tension appliquée aux bornes de l'inducteur

R_e : la résistance du bobinage de l'inducteur

U : la tension appliquée aux bornes de l'induit

R : la résistance du bobinage de l'induit

I_e : le courant absorbé par l'inducteur

L : l'inductance du bobinage de l'induit

I : le courant absorbé par l'induit

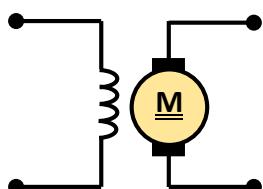
Le : l'inductance du bobinage de l'inducteur

E : la force électromotrice induite

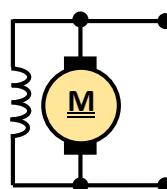
Dans ce cours, on se limite au **régime permanent** de la machine à courant continu.

3. Modes d'excitation de la machine à courant continu

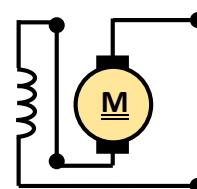
C'est la manière de coupler l'induit et l'inducteur de la machine à courant continu. Il existe quatre excitations suivantes :



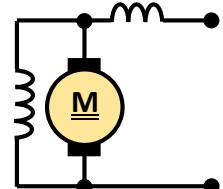
Excitation séparée



Excitation shunt



Excitation série

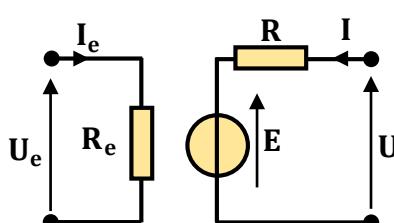


Excitation composée

Dans ce cours, l'étude sera autour de la MCC avec l'**excitation séparée** (ou **indépendante**).

4. Moteur à courant continu en excitation séparée

La figure suivante montre le schéma équivalent de la machine à courant continu fonctionne en moteur :



○ D'après la loi des mailles, la **tension absorbée** par l'induit U :

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

○ La **puissance absorbée** par l'inducteur : $P_{inducteur} = U_e \cdot I_e$

Cette puissance représente les **pertes joule inducteur**

$$P_{inducteur} = R_e \cdot I_e^2$$

○ Les pertes par effet Joule dans l'induit P_{ji} sont :

$$P_{ji} = R \cdot I^2$$

○ La puissances **électromagnétique** P_{em} transmise à l'induit :

$$P_{em} = E \cdot I$$

C'est la puissance électrique échangée dans l'induit

5. Le couple électromagnétique

Dans l'induit se produit une **transformation d'énergie** de la forme **électrique** à la forme **mécanique** (fonctionnement en moteur) ou de la forme mécanique à la forme électrique (fonctionnement en génératrice).

La puissance mécanique échangée dans l'induit lorsqu'il est en rotation s'exprime par le produit du moment d'un couple par la vitesse angulaire Ω :

$$P_{em} = C_{em} \cdot \Omega$$

D'après la loi de **conservation de l'énergie**, ces deux puissances sont égales. On les nomme "**puissance électromagnétique**" (ou **puissance électromécanique**) :

$$P_{em} = E \cdot I = C_{em} \cdot \Omega$$

D'où : $C_{em} = \frac{E \cdot I}{\Omega} = \frac{k \cdot \varphi \cdot \Omega \cdot I}{\Omega} \rightarrow C_{em} = k \cdot \varphi \cdot I$

Avec :

Le moment du couple appliqué sur l'induit est proportionnel au **courant dans les conducteurs actifs** et à la valeur de **l'induction** dans la machine (représenté de manière globale par le flux φ sous un pôle).

- **K** : coefficient de proportionnalité. Sa valeur dépend de la constitution de la machine.
- **φ** : Flux sous un pôle (en Wb)
- **I** : Courant dans l'induit.

6. Le couple utile Cu

En réalité, le couple utile Cu (ou couple moteur Cm) dont on dispose sur l'arbre du moteur est très légèrement inférieur au couple électromagnétique Cem :

$$C_u = C_{em} - C_p$$

Cp représente le **couple des pertes** est dû :

- Aux pertes **ferromagnétiques** (hystérésis et courant de Foucault).
- Aux pertes **mécaniques** : frottement aux contacts balais-collecteur, ventilation

Le couple de pertes est estimé à l'essai à vide dont : $C_p = k \cdot \varphi \cdot I_0$ Avec I_0 est le courant absorbé à vide (la machine n'entraîne pas aucune charge).

N.B :

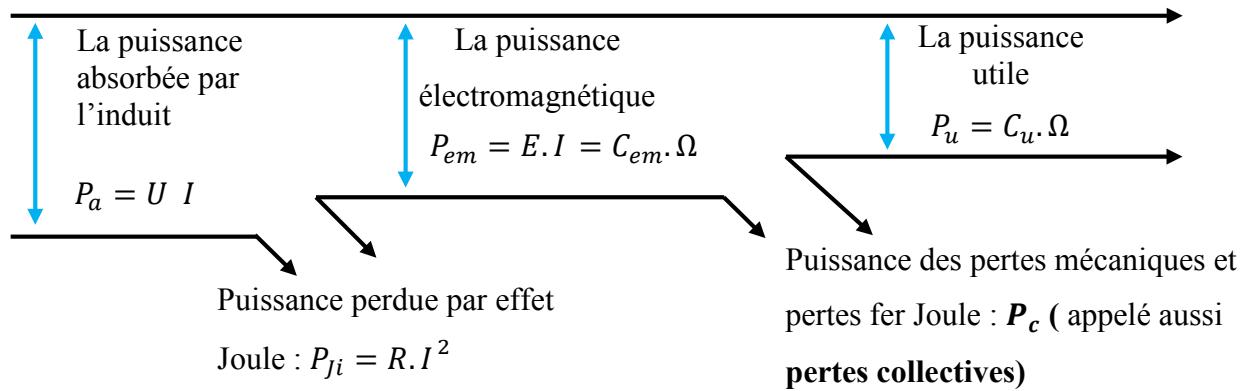
Pour un **flux φ constant**, le **courant** appelé par le moteur est **proportionnel au couple mécanique** demandé par la charge tel que : $C_u = K \cdot I$.

7. Bilan des puissances

La machine à courant continu est un lieu d'échange d'énergie entre une forme électrique et une forme mécanique. Lors de cette transformation, une partie de cette énergie est perdue en raison des imperfections de la machine.

Donc :

Bilan des puissances de l'induit



- Le rendement est défini par : $\eta = \frac{\text{la puissance utile}}{\text{la puissance absorbée}} \rightarrow \eta = \frac{P_u}{P_a + U_e I_e}$
 - La puissance d'excitation est nulle, lorsque l'inducteur est en aimant permanent

Exercice 1

Un moteur à courant continu à excitation indépendante et constante est alimenté sous 240 V. La résistance d'induit est égale à $0,5 \Omega$, le circuit inducteur absorbe 250 W et les pertes collectives s'élèvent à 625 W.

Au fonctionnement nominal, le moteur consomme 42 A et la vitesse de rotation est de 1200 tr/min.

- Énoncer la loi de Laplace et le principe de la machine à courant continu
- Donner le schéma équivalent d'une Mcc en régime permanent.
- Calculer :
 - La f.e.m.
 - La puissance absorbée, la puissance électromagnétique et la puissance utile
 - Le couple utile et le rendement
- Quelle est la vitesse de rotation du moteur quand le courant d'induit est de 30 A ?
- Que devient le couple utile à cette nouvelle vitesse (on suppose que les pertes collectives sont toujours égales à 625 W) ?
- Calculer le rendement.

V. Caractéristiques électromécaniques et mécanique

Nous allons évaluer l'allure des caractéristiques $\Omega(I)$, $C_{em}(I)$ et $C_u(\Omega)$ pour la machine à excitation par aimants ou à excitation séparée avec un courant inducteur constant (et donc un flux φ constant). \rightarrow

$$C_{em} = Kc \cdot I \quad \text{et} \quad E = Ke \cdot \Omega$$

1. Caractéristique de la vitesse en fonction du courant appelé : $\Omega(I)$,

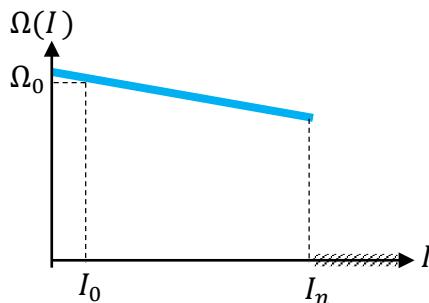
On a :
$$\begin{cases} U = E + R \cdot I \\ E = Ke \cdot \Omega \end{cases} \quad (1)$$

A vide le courant appelé par la machine est faible, donc la chute de tension au borne de la résistance d'induit est négligeable devant E. $\rightarrow U = E = Ke \cdot \Omega_0 \rightarrow \Omega_0 = \frac{U}{Ke}$ (2)

De 1 et 2, on déduit : $\Omega = \frac{U - R \cdot I}{Ke} \rightarrow \Omega = \Omega_0 - \frac{R \cdot I}{Ke} \quad (3)$

La vitesse angulaire à vide (en rad/s)

La caractéristique $\Omega(I)$ est la suivante :



- Il ne faut pas dépasser le courant nominal à cause de la destruction du bobinage de l'induit.
 - Il ne faut surtout pas couper le flux inducteur lorsque l'induit est alimenté car la machine peut s'emballer
- $\varphi \rightarrow 0 \Rightarrow Ke \rightarrow 0 \Rightarrow \Omega \rightarrow \infty$

N.B : à partir de cette caractéristique, la vitesse de rotation Ω est **diminuée** lorsque le courant d'appel I est **important** (le courant est devenu important lorsque **la machine est chargée**).

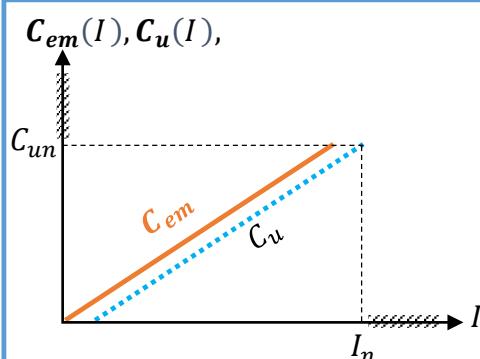
2. Caractéristiques électromagnétiques : $C_{em}(I)$ et $C_u(I)$

On a vu dans les paragraphes précédents que :

- Le couple électromagnétique :

$$C_{em} = Kc \cdot I$$

- Le couple utile : $C_u = C_{em} - C_P = Kc \cdot I - Kc \cdot I_0 \rightarrow C_u = Kc \cdot (I - I_0)$



Le courant d'appel **I est devenu important** lorsque la machine **entrainera une charge importante** (le couple C_{em} important), alors un contrôle de courant d'appel I est indispensable, afin de **protéger le bobinage induit contre les surintensités** (destruction de bobinage).

Il faut toujours : $I \leq I_n$

3. Caractéristique mécanique : $C_u(\Omega)$

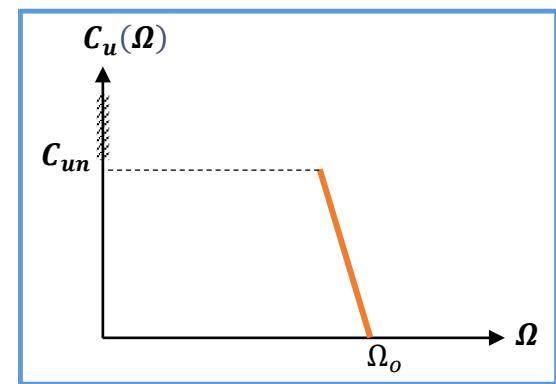
C'est la principale caractéristique de fonctionnement d'un moteur à courant continu.

De (3), on tire : $I = \frac{Ke}{R}(\Omega_o - \Omega)$ avec $Ke = Kc$

En supposant que : $C_u = Kc \cdot (I - I_0) \cong Kc \cdot I_a$

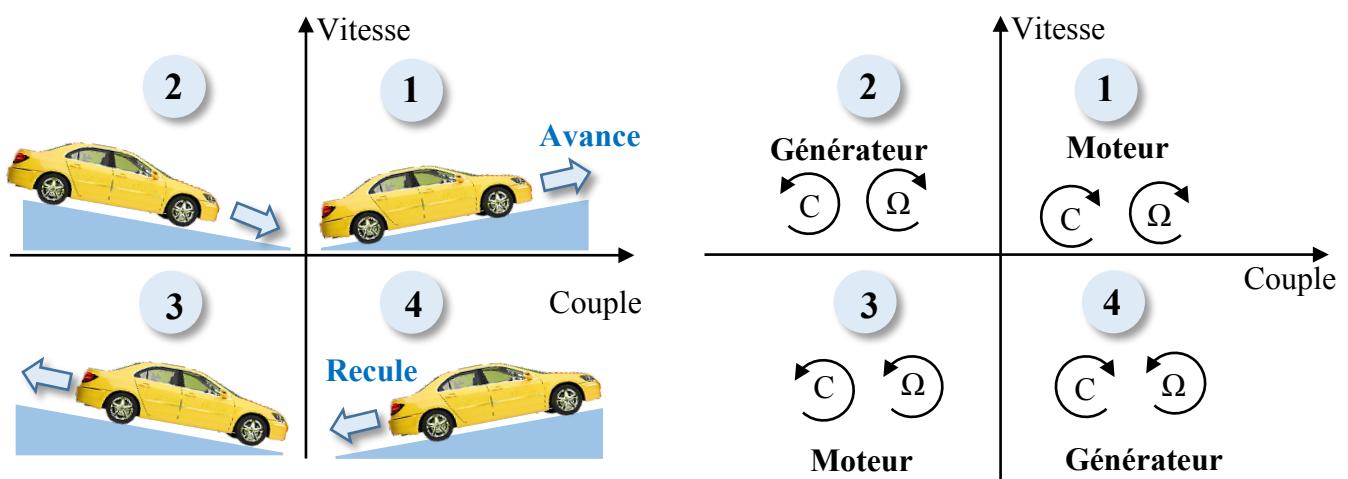
Il vient :

$$C_u = \frac{Kc \cdot Ke}{R}(\Omega_o - \Omega)$$



4. Les quatre quadrants de fonctionnement

En électronique de puissance, lorsqu'on associe un variateur de vitesse à une machine, il est nécessaire de préciser les quadrants de fonctionnement souhaités.

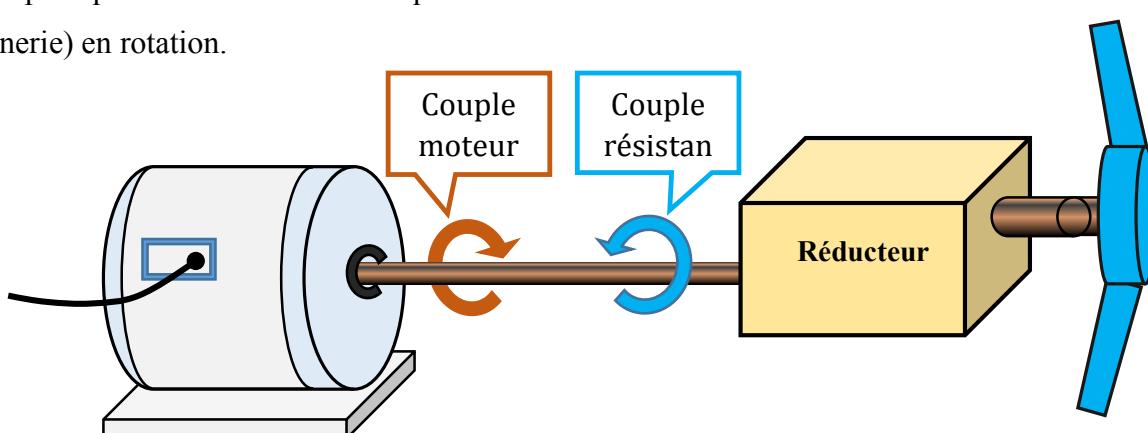


Exemple :

- En **levages** la machine travaille dans les **quadrants 1 (montée)** et **4 (descente)**. (Le sens de rotation s'inverse mais pas le sens du couple)
- **Un tapis transporteur** à un seul sens de déplacement travaille dans les **quadrants 1 (moteur)** et **2 (freinage)** ; ou seulement **1** (**s'il n'y a pas de freinage électrique**).

VI. Point de fonctionnement à l'équilibre

Dans la pratique une machine électrique fonctionnant en moteur est destinée à entraîner une charge (machinerie) en rotation.



L'arbre du moteur exerce un **couple moteur destiné à entraîner la charge**. La charge présente un **couple résistant C_r** qui généralement s'oppose au couple moteur.

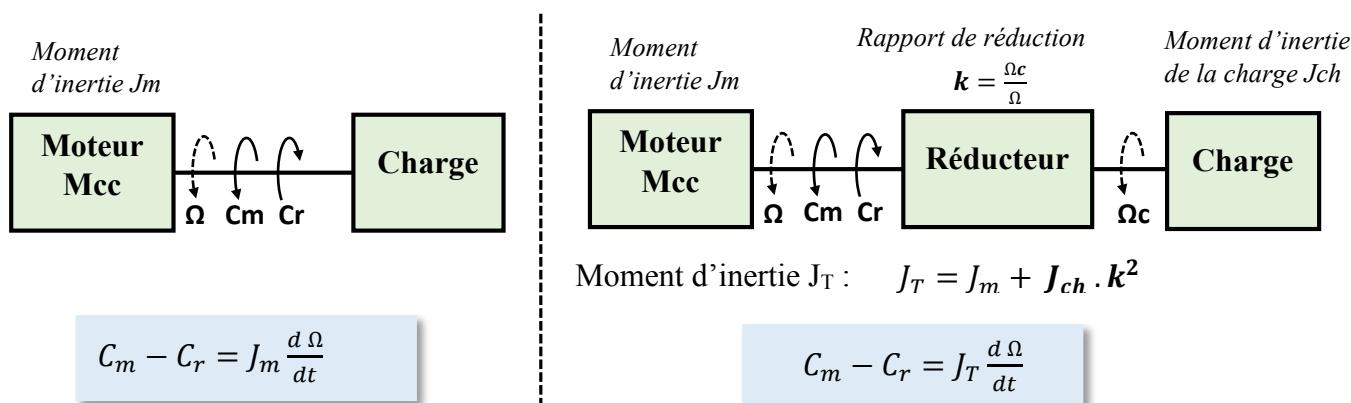
1. Principe Fondamental de la Dynamique (PFD)

La loi fondamentale de la dynamique ($\sum \vec{F} = m \cdot \vec{v}$) se ramène lors d'un mouvement de rotation autour d'un axe fixe à l'expression : **Somme des couple = $J \frac{d\Omega}{dt}$**

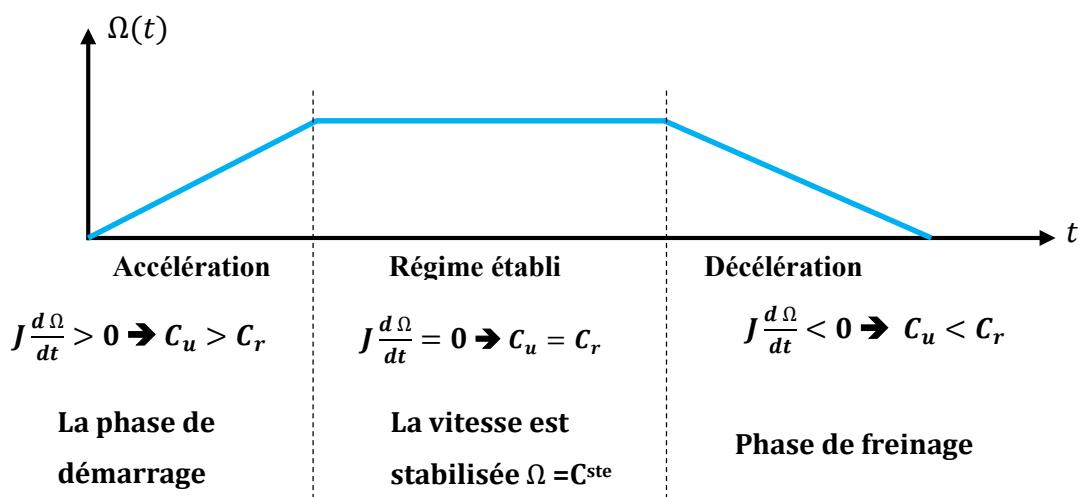
La somme des couples est une somme algébrique.

J désigne le moment d'inertie de l'ensemble tournant (moteur + charge) et Ω la vitesse angulaire

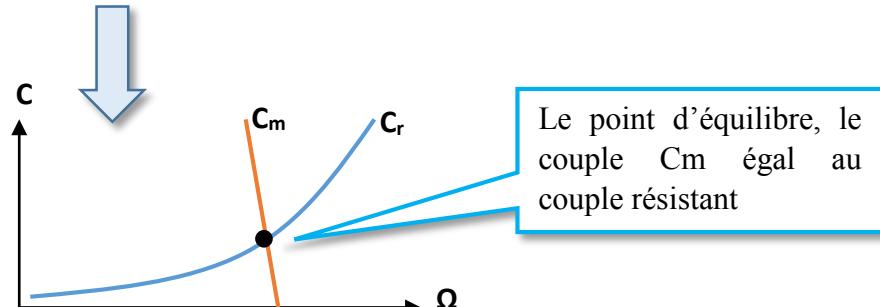
Si donc un moteur présente un couple moteur C_m , et que la charge oppose un couple résistant C_r , la relation précédente devient :



2. Cycle de fonctionnement



En régime établi :



VII. Identification de la plaque signalétique

Il est indispensable de consulter la plaque signalétique de la machine. Elle porte en particulier les caractéristiques du régime nominal de la machine. Il correspond au couple que peut fournir la machine en permanence (service continu) sans échauffement excessif. Il est associé à une vitesse nominale N_n . Cette dernière n'est pas la vitesse maximale possible.

Caractéristiques mécaniques nominales	Caractéristiques électriques nominales						
<ul style="list-style-type: none"> $P_{un}=36.3 \text{ KW}$ $N_n=1150 \text{ tr/min}$ 	<table border="1"> <tr> <td>Inducteur :</td> </tr> <tr> <td>• $U_{en}=360 \text{ V}$</td> </tr> <tr> <td>• $I_e=3 \text{ A}$</td> </tr> </table> <table border="1"> <tr> <td>Induit :</td> </tr> <tr> <td>• $U=440 \text{ V}$</td> </tr> <tr> <td>• $I=95.5 \text{ A}$</td> </tr> </table>	Inducteur :	• $U_{en}=360 \text{ V}$	• $I_e=3 \text{ A}$	Induit :	• $U=440 \text{ V}$	• $I=95.5 \text{ A}$
Inducteur :							
• $U_{en}=360 \text{ V}$							
• $I_e=3 \text{ A}$							
Induit :							
• $U=440 \text{ V}$							
• $I=95.5 \text{ A}$							

VIII. Variation de la vitesse de la machine à courant continu

On posant $E = k \cdot \varphi \cdot \Omega$ et $U = E + R \cdot I$, on démontre que : $\Omega = \frac{U - R \cdot I}{k \cdot \varphi}$

Pour une machine à courant continu, on constate qu'il y a trois paramètres sur lesquels on peut agir :

- **Action sur R (utilisée plus au démarrage).**

- Augmentation des pertes joule
- Diminution du rendement

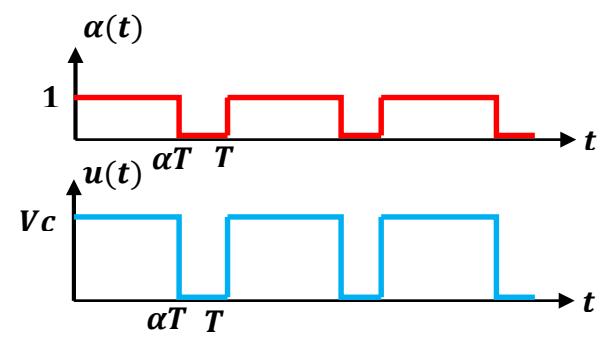
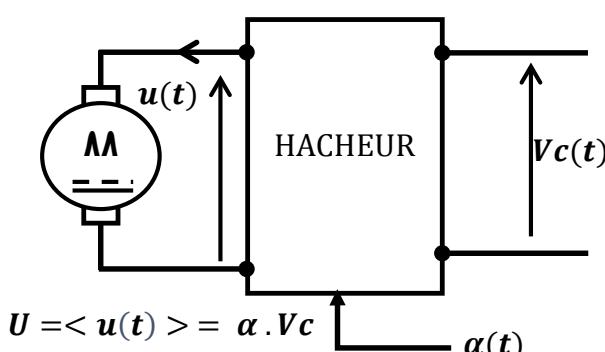
Simple à réaliser, cette méthode est utilisée pour limiter le courant de démarrage ($I_d=U/R$)

- **Action sur le flux**

- Faible plage de la variation de vitesse
- Le défluxage de la machine

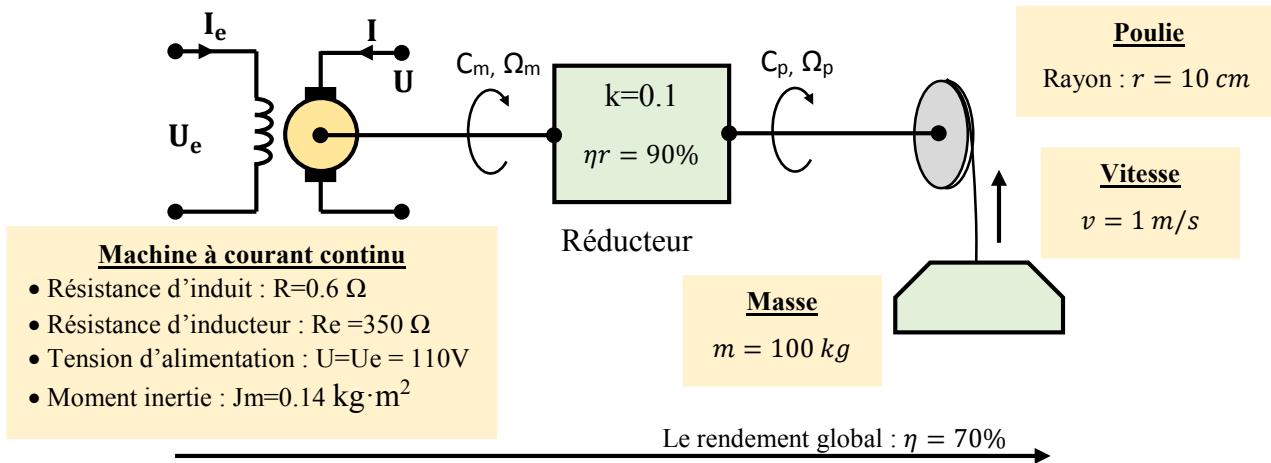
- **Action sur la tension U (plus utilisé industriellement)**

Le développement de l'électronique de puissance a permis la réalisation de sources de tension continue de valeur moyenne réglable (**Hacheur** : le chapitre suivant), permettant de commander les moteurs à courant continu dans une large gamme de vitesse.



Exercice 2

Le système de traction considéré, représenté sur la figure en bas, permet le levage d'une masse de 100 kg à la vitesse de 1 m/s. Dans tout le problème on considère que le flux dans la machine est constant et on néglige le couple de pertes mécaniques.

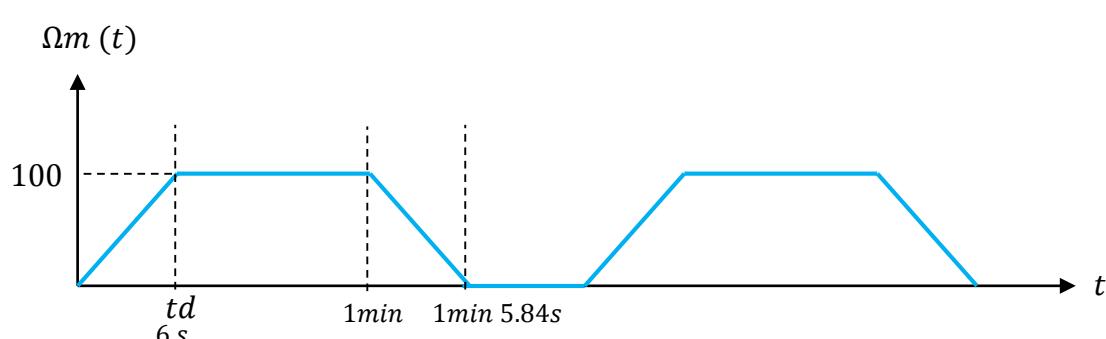
**A. Régime permanent de levage.**

- La vitesse angulaire Ω est considérée comme positive. A partir du schéma équivalent du système, calculer la puissance absorbée P_a par l'induit du moteur.
- Calculer alors le courant I consommé par l'induit et la valeur de la puissance utile fournie par le moteur P_m , sachant que la puissance des pertes collectives représente 3% de sa puissance absorbée.
- En déduire la force électromotrice interne E_{de} de la machine en régime permanent. Représenter le schéma électrique équivalent de la machine et de son alimentation en adoptant des conventions adaptées.
- Calculer la valeur du coefficient K reliant E à Ω_m .
- Calculer le rendement propre à la machine seule : η_m . En déduire le rendement de la poulie : η_p
- Calculer le couple développé par le moteur C_m afin de lever cette charge en régime établi.

B. Régime transitoire de levage

NB : Dans cette partie et la suivante, on notera les grandeurs variables en minuscules, L'ensemble des masses en rotation ramenées sur l'axe de poulie représente un moment d'inertie $J_p = 16 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$

L'ensemble moteur + charge fonctionne avec le cycle de vitesse représenté ci-dessous :



On néglige désormais la résistance R de l'induit.

- B.1. Rappeler le principe fondamental de la dynamique appliqué à la MCC en fonction J_T , Ω_m , Cr et Cm .
- B.2. Déterminer l'expression du courant I à partir de l'expression précédente. Quelle est alors l'expression de la tension U aux bornes du moteur ?
- B.3. Dans la phase de démarrage $t \in [0, 6s]$
- Calculer la valeur de la variation de vitesse $\frac{d\Omega_m}{dt}$ (accélération)
 - Calculer le courant absorbé, sachant que le courant nominal de ce moteur est 18A. est-ce que ce cycle respecte-t-il cette exigence ? pourquoi on s'intéresse à limiter le courant de démarrage ?
 - La tension au borne du moteur
 - La puissance absorbée
- B.4. Tracer les formes d'onde de $i(t)$, $Cm(t)$, $u(t)$ et $Pa(t)$ à partir de la forme de $\Omega(t)$.

Références :

- [1] M. Piou, « MotorElecPro : Ch1- la machine à courant continu » France, 2015.
- [2] C. François, Les grandes fonctions de la chaîne d'énergie - IUT, BTS, CPGE, FRANCE : Ellipses, 2016
- [3] L.Lasne, Exercices et problèmes d'électrotechnique : Dunode, France, 2005
- [4] P.Mayé , Aide-mémoire : Electrotechnique : Dunode , France, 2006.

Les utilisateurs sont autorisés à faire un usage non commercial, personnel ou collectif, de ce document notamment dans les activités d'enseignement, de formation ou de loisirs. Toute ou partie de cette ressource ne doit pas faire l'objet d'une vente - en tout état de cause, une copie ne peut pas être facturée à un montant supérieur à celui de son support.