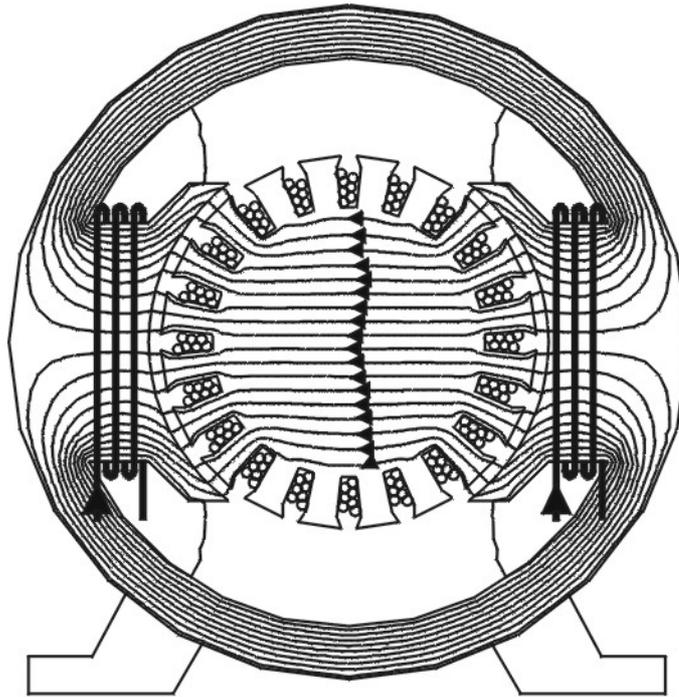


LA MACHINE A COURANT CONTINU

MotorElecPro – Chapitre 1



Michel Piou

Edition 20/10/2015

Table des matières

| | | |
|-------------------|--|-----------|
| 1 | POURQUOI ET COMMENT ? | 1 |
| 2 | LA MACHINE A COURANT CONTINU | 2 |
| 2.1 | Les principes de la machine à courant continu. | 2 |
| 2.1.1 | Les principes généraux:..... | 2 |
| 2.1.2 | Les relations dans la machine à courant continu..... | 6 |
| 2.2 | Excitation séparée, série ou à aimants..... | 10 |
| 2.3 | Fonctionnement en moteur..... | 11 |
| 2.4 | Puissance et rendement en régime permanent..... | 11 |
| 2.4.1 | Puissances. | 11 |
| 2.4.2 | Rendement de la machine à courant continu..... | 14 |
| 2.4.3 | Mesure des pertes et du rendement. | 14 |
| 2.5 | Point de fonctionnement à l'équilibre..... | 16 |
| 2.6 | Quelques éléments de technologie. | 18 |
| 2.6.1 | Matériaux. | 18 |
| 2.6.2 | Moteur universel | 19 |
| 2.6.3 | Conclusion..... | 19 |
| 3 | CE QUE J'AI RETENU DU CHAPITRE « MACHINE A COURANT CONTINU » | 20 |
| 4 | PROBLEMES SUR LA MACHINE A COURANT CONTINU | 23 |
| mcc. Exercice 1 : | Localisation des pertes d'une machine à courant continu. | 23 |
| mcc. Exercice 2 : | Moteur à aimants permanents..... | 24 |
| mcc. Exercice 3 : | Machine accouplée à un treuil de levage..... | 25 |
| mcc. Exercice 4 : | Moteur à aimant permanent..... | 27 |
| mcc. Exercice 5 : | Problèmes thermiques d'une machine à courant continu en régime variable..... | 28 |
| mcc. Exercice 6 : | Essai de machines à courant continu par la méthode d'opposition..... | 30 |
| mcc. Exercice 7 : | Ponts redresseurs monophasés associés à un moteur à courant continu. | 31 |
| 5 | REPONSES AUX QUESTIONS DU COURS | 35 |

Proposé sur le [site Internet](http://site.Internet.iutenligne.net) 

Copyright : droits et obligations des utilisateurs

L'auteur ne renonce pas à sa qualité d'auteur et aux droits moraux qui s'y rapportent du fait de la publication de son document.

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.

Pour tout extrait de ce document, l'utilisateur doit maintenir de façon lisible le nom de l'auteur *Michel Piou* et la référence au site Internet *IUT en ligne*. La diffusion de toute ou partie de cette ressource sur un site internet autre que le site IUT en ligne est interdite.

Du même auteur : BasElecPro, MagnElecPro, PowerElecPro. Une version de Baselecpro est disponible sous forme d'un livre aux éditions *Ellipses* dans la collection *Technosup* sous le titre **ÉLECTRICITÉ GÉNÉRALE – Les lois de l'électricité**

1 Pourquoi et comment ?

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

Prérequis :

Les notions de « flux », « f.e.m. » et de « force de Laplace » sont supposées connues ainsi que les notions de puissance mécanique, moment d'un couple et moment d'inertie.

On peut se référer à la ressource [MagnElecPro](#) (ressource N°898) sur le site [IUT En Ligne](#) « [expe_6.avi](#) »

Objectifs :

Acquisition de vocabulaire. Il convient de lire ce cours avec un surligneur pour repérer et mettre en évidence le vocabulaire nouveau.

Apprentissage de quelques principes de la conversion électromécanique de l'énergie. On retrouvera ultérieurement ces principes dans les machines à courant alternatif, mais avec des mises en œuvre un peu plus complexes.

Mise en œuvre de machines à courant continu dans un contexte simple. (*L'objectif n'est pas d'étudier la conception des machines*)

A la fin du chapitre, la rubrique « Ce que j'ai retenu du chapitre » est destinée à faire le point à ce thème.

Méthode de travail :

La description du comportement de la machine à courant continu repose sur peu de « formules ». Elle fait principalement appel au principe de la conservation de l'énergie.

Il conviendra de ne pas négliger les informations à caractère technologique.

Avec ce document, l'usage du surligneur est conseillé ainsi que la rédaction de fiches résumées.

Travail en autonomie :

Pour permettre une étude du cours de façon autonome, les réponses aux questions du cours sont données en fin de document.

Lors d'une étude en autonomie, le temps de travail sur ce cours et ces exercices est estimé à 20h

2 La machine à courant continu

2.1 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.

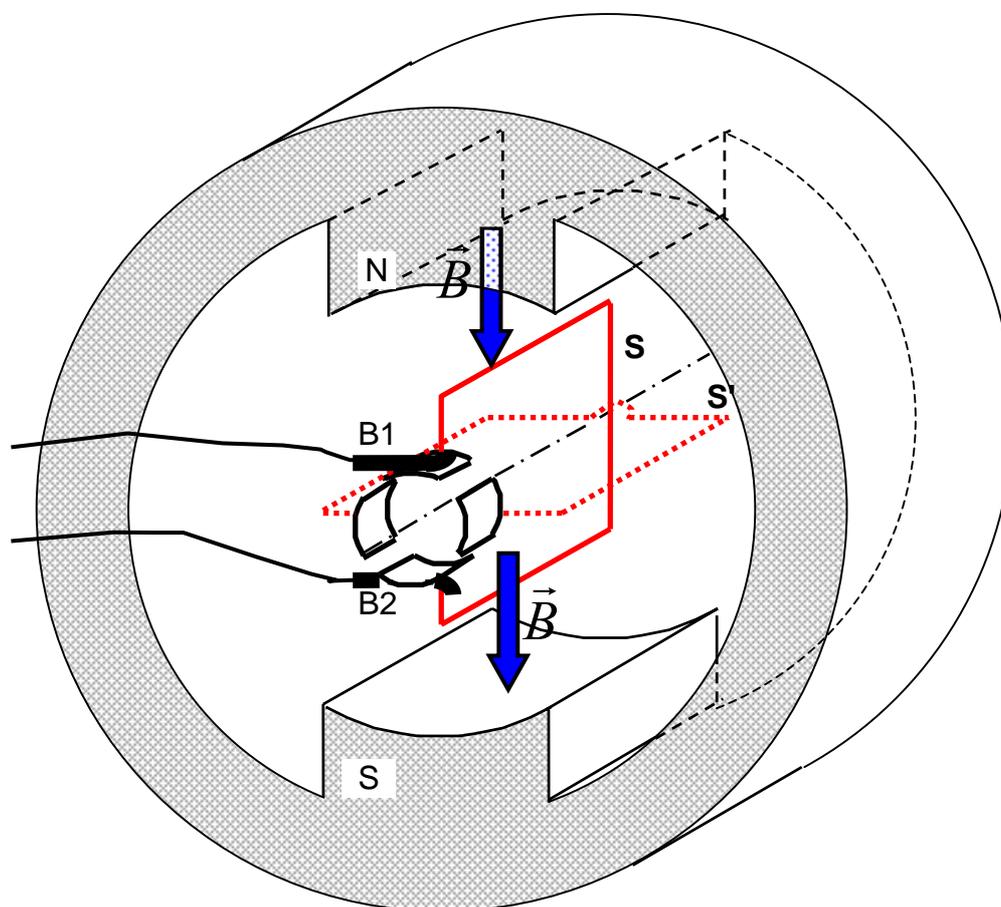
Dans le premier cas, on dit qu'elle fonctionne en **moteur**; et dans le second cas en **génératrice**: c'est une **machine réversible**.

▪ Voir le diaporama dans [IUTenligne.net/ressource N°1604/MotorElecPro/Chapitre1/1.1 Force Electromotrice : principe](http://iutenligne.net/ressource/N°1604/MotorElecPro/Chapitre1/1.1_Force_Electromotrice_principe)

▪ Voir l'animation : http://catice.ac-besancon.fr/Sciences_Physiques/tice/mcc1/PwtMCC/sld017.htm

2.1.1 Les principes généraux:

La machine à courant continu est constituée de trois parties:



➤ 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**).

➤ Un **rotor** (partie tournante) qui subit l'induction, (c'est pourquoi on l'appelle l'**induit**).

Dans sa version très simplifiée ci-contre, cette partie tournante est constituée de deux spires S et S'.

➤ 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**.

Dans sa version simplifiée ci-contre, le collecteur possède quatre lames. Il y a deux "balais fixes (B1 et B2) qui frottent sur ces lames et sont reliés à l'extérieur de la machine.

En présence du champ d'induction produit par l'inducteur, les conducteurs de l'induit sont soumis à des **forces** lorsqu'ils sont parcourus par des **courants** et il s'y crée une **f.e.m** lorsqu'ils sont en **mouvement**

Exercice:

Les deux modes de fonctionnement de la machine à courant continu: moteur et génératrice:

Cet exercice reprend le schéma de principe précédent.

On négligera l'influence du courant dans la partie tournante (l'induit) sur l'induction \vec{B} .

a) On relie le balai B1 à la borne + d'un générateur, et le balai B2 à la borne -. Il circule donc un courant I de B1 vers B2 dans les conducteurs de l'induit. (figure 1)

La partie tournante étant libre en rotation, indiquer sur la figure 1 ci-dessous le sens de déplacement de la spire « S », ainsi que le sens des f.e.m. engendrés dans les conducteurs qui constituent cette spire?

b) On relie maintenant les balais B1 et B2 aux bornes d'une résistance, et on impose par un moyen mécanique extérieur une rotation de la partie tournante dans le sens indiqué sur la figure 2.

Indiquer sur cette figure 2 le sens du courant, et le sens des forces sur ces conducteurs qui constituent la spire « S ».

c) Quel est le rôle de l'ensemble balais collecteur ?

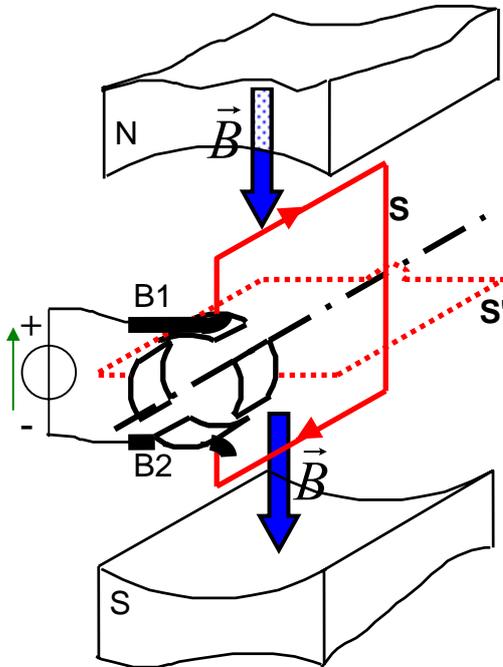


Figure 1

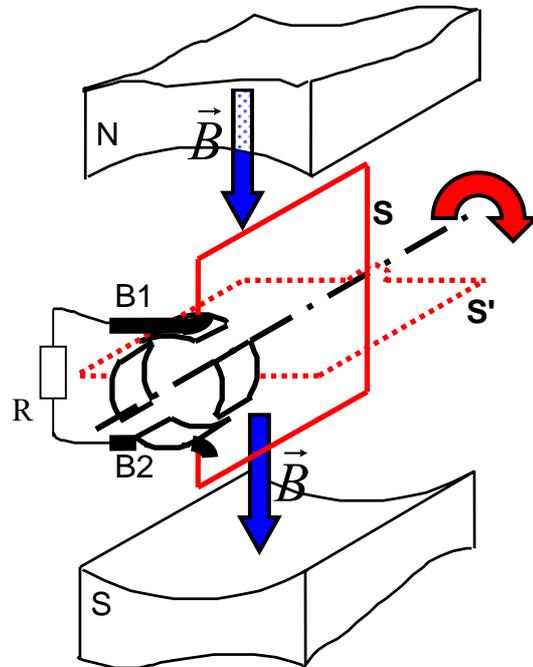


Figure 2

(Réponse 1:)

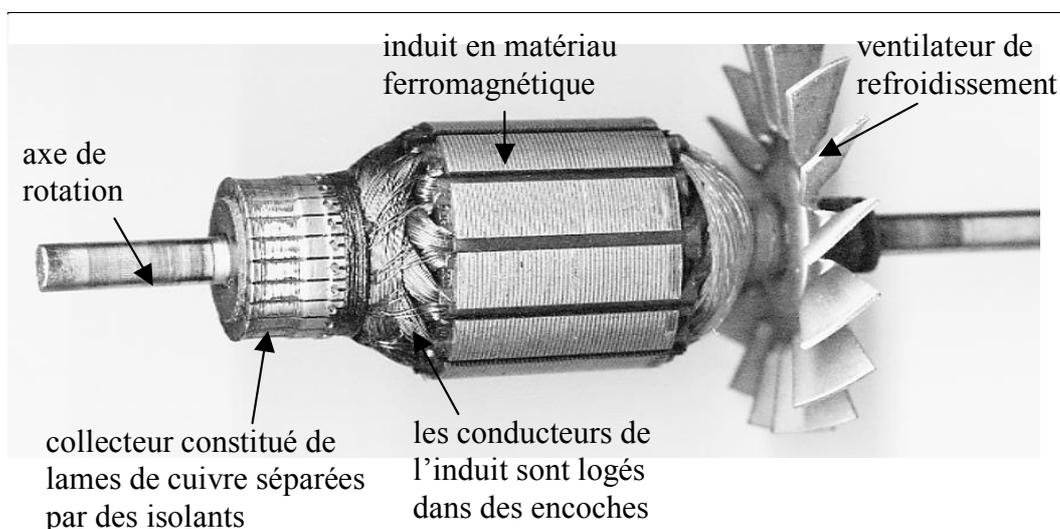
Conclusion de l'exercice:

| moteur (fig 1) | génératrice (fig 2) |
|---|---|
| Le couple des forces électromagnétiques est moteur, (il s'exerce dans le sens de la rotation). La f.e.m. induite est une force contre électromotrice | Le couple des forces électromagnétiques est résistant, (il s'exerce dans le sens opposé à la rotation). La f.e.m. induite est une force électromotrice |
| L'induit de la machine produit de l'énergie mécanique et consomme de l'énergie électrique (c'est un récepteur électrique) | L'induit de la machine consomme de l'énergie mécanique et produit de l'énergie électrique (c'est un générateur électrique) |

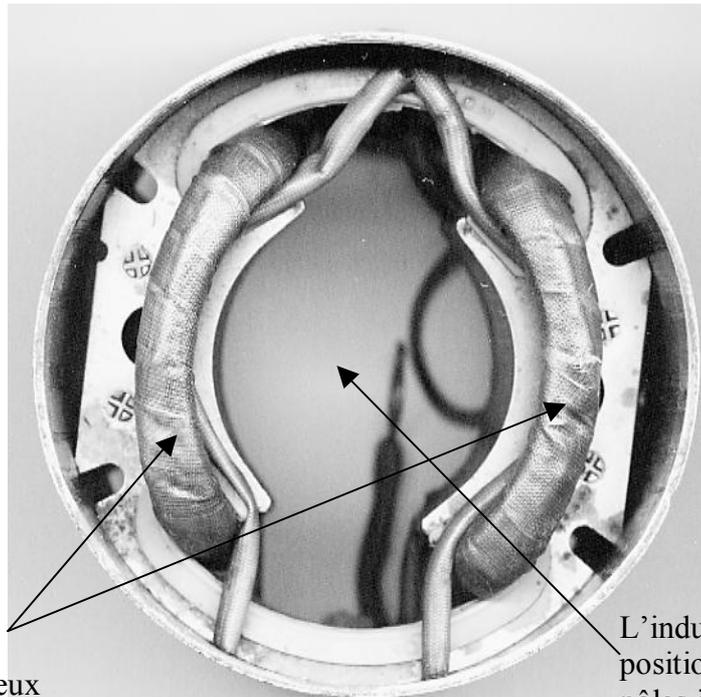
Le schéma de principe développé précédemment présente quelques inconvénients:

- lors de la rotation de l'induit, la spire conductrice (+ ou - inductive) est ouverte brutalement. Cela engendre une surtension aux contacts balais collecteur source d'étincelles et donc d'usure.
- le couple est très variable lors de la rotation ce qui engendre des vibrations dangereuses pour la mécanique en rotation.
- L'induit est constitué d'un bobinage dans l'air, l'induction est donc faible.

C'est pourquoi les machines à courant continu adoptent un bobinage de l'induit plus compliqué bobiné dans les encoches d'un cylindre en matériau ferromagnétique feuilleté.



Rotor (ou induit) d'une petite machine à courant continu

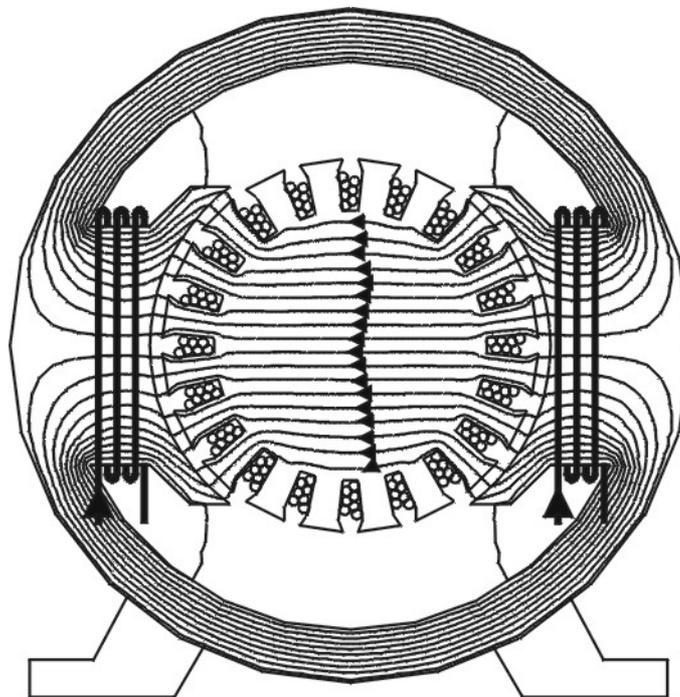


Les bobinages inducteurs sont bobinés sur les deux pôles inducteurs

L'induit sera positionné entre les pôles inducteurs

Stator (ou inducteur) d'une petite machine à courant continu

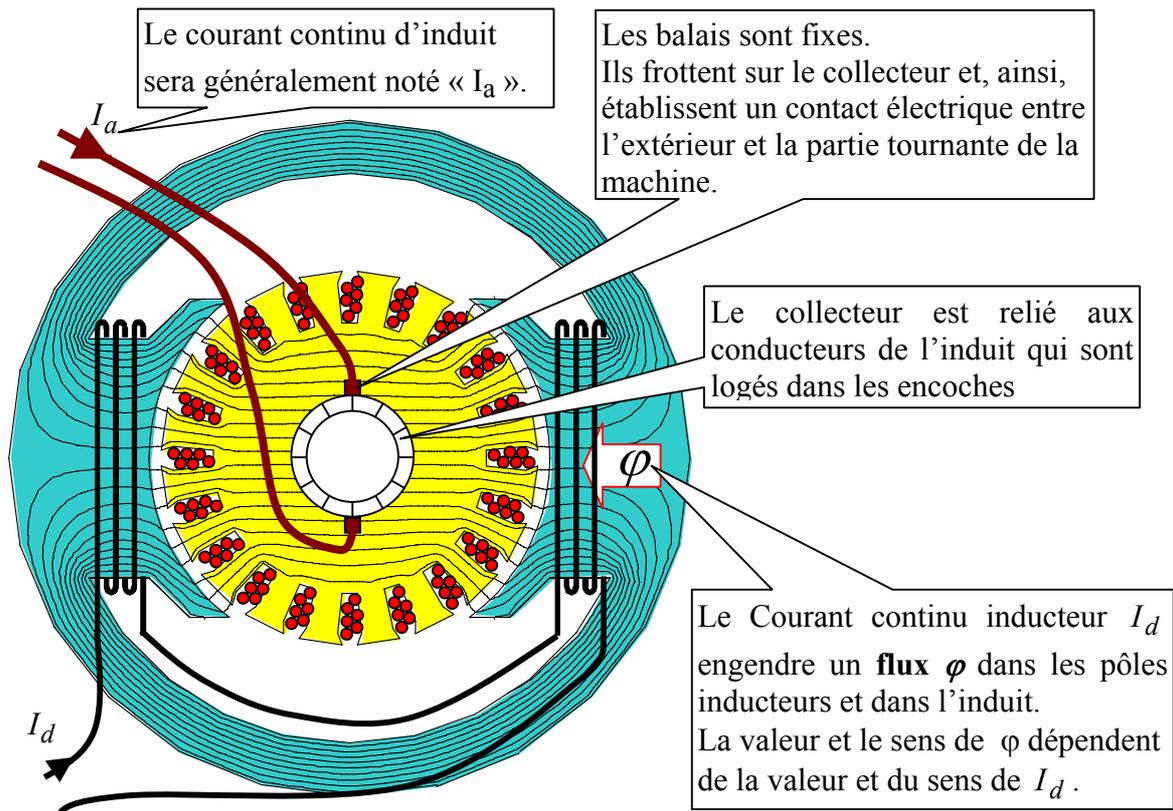
Lorsqu'un courant parcourt les bobinages inducteurs, il engendre dans la machine un champ d'induction magnétique qui traverse aussi l'induit :



Vue en coupe.

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

2.1.2 Les relations dans la machine à courant continu.



Liaisons électriques entre les bobinages de la machine à courant continu et l'extérieur.

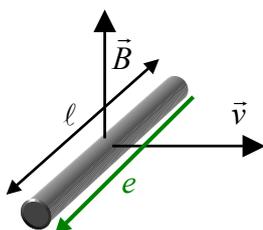
(Dans certaines machines, le **bobinage inducteur** est remplacé par des **aimants permanents**. Dans ce cas, la valeur et le sens de φ sont constants).

▪ Voir le diaporama dans [iutenligne.net/ressource N°1604/MotorElecPro/Chapitre1/1.2](http://iutenligne.net/ressource/N°1604/MotorElecPro/Chapitre1/1.2) Force Electromotrice : réalisation

2.1.2.1 f.e.m.

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 \vec{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 $E = k \cdot \varphi \cdot \Omega$.

Cette loi est la traduction de la f.e.m. induite dans chaque conducteur à l'échelle de l'ensemble de l'induit



$$e = B \cdot \ell \cdot v$$

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

avec :

- E : f.e.m. entre les balais (en Volt) (C'est une f.e.m. continue)
- k : coefficient de proportionnalité. Sa valeur dépend de la constitution de la machine.
- Ω : vitesse angulaire en rad/s. ($\Omega = 2\pi n$ avec n : vitesse de rotation en tours/seconde).
- φ : flux sous un pôle. (en Wb).

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.

2.1.2.2 Puissance électromagnétique; 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 électrique échangée dans l'induit est $E.I_a$ (en Watt).

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 .

Le moment de ce couple est appelé "**couple électromagnétique**". On le notera C_{em} ⁽¹⁾. (On rencontre parfois l'expression "couple électromécanique"). (L'usage est d'employer le terme "couple" même lorsqu'il signifie "moment du couple").

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

$$P_{em} = E.I_a = C_{em}.\Omega$$

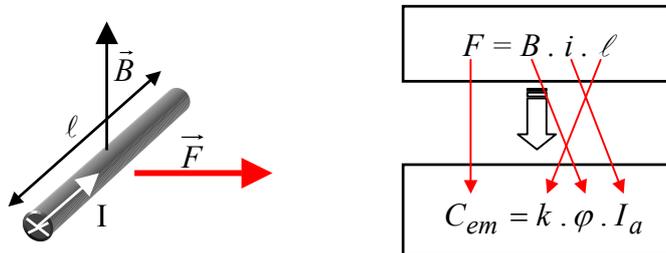
Il en résulte que le Couple électromagnétique s'exprime par:

$$C_{em} = \frac{E.I_a}{\Omega} = \frac{k.\varphi.\Omega.I_a}{\Omega} = k.\varphi.I_a$$

avec:

- E en Volt
- I_a en Ampères
- C_{em} en Nm
- Ω en rad/s

Cette loi est la traduction de la force engendrée dans un conducteur à l'échelle de l'ensemble de l'induit



avec:

- k : coefficient de proportionnalité. Sa valeur dépend de la constitution de la machine.
- φ : flux sous un pôle. (en Wb)
- I_a : courant dans l'induit.

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).

⁽¹⁾ On rencontre également T_{em} ; le "T" signifie torque (traduction de couple en anglais).

Les forces appliquées à l'induit s'exercent principalement là où s'applique l'induction c'est à dire sur les dents de l'induit, et non pas sur les conducteurs de l'induit eux-mêmes.

2.1.2.3 Remarques:

Si le flux φ est constant (moteurs à aimants permanent):

* La f.e.m. E est proportionnelle à la vitesse de rotation.

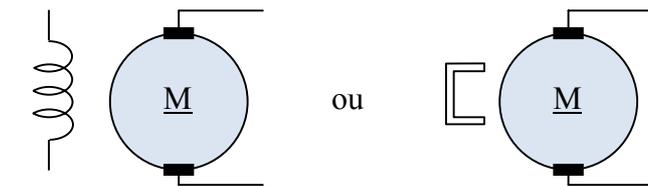
Le sens de cette f.e.m. dépend du sens de rotation

* Le couple électromagnétique C_{em} est proportionnel au courant dans l'induit I_a .

Le sens du couple dépend du sens du courant dans l'induit

▪ Voir le diaporama dans [IUTenligne.net/ressource N°1604/MotorElecPro/Chapitre1/1.3](http://IUTenligne.net/ressource/N°1604/MotorElecPro/Chapitre1/1.3) Force Electromotrice et couple: les formules

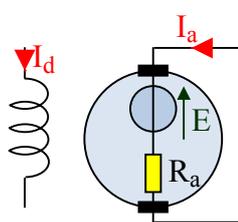
2.1.2.4 Modèle électrique et symbole.



Inducteur bobiné
induit

Inducteur à aimants
induit

Symbole d'une machine à courant continu.



Représentation usuelle:

I_a : courant dans l'induit.

R_a : résistance de l'induit (équivalente à la résistance des conducteurs de l'induit. C'est une résistance de faible valeur)

E : f.e.m. induite dans l'induit.

I_d : courant inducteur (si ce n'est pas un inducteur à aimant permanent).

R_d : résistance des bobinages inducteur.

Compléments hors cours

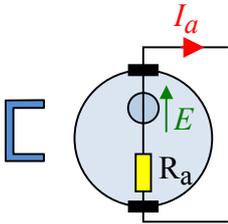
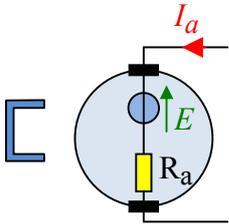
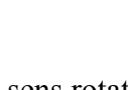
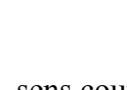
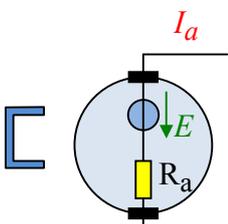
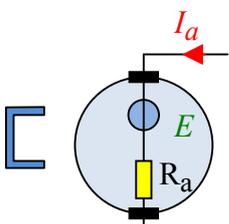
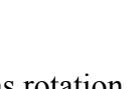
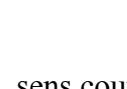
Le bobinage de l'induit présente une inductance dont l'influence est nulle en régime continu, mais dont il convient de tenir compte en régime transitoire. Si l'inducteur est bobiné, il présente lui aussi une inductance

2.1.2.5 Exercice sur les modes de fonctionnement d'une machine à courant continu à aimants.

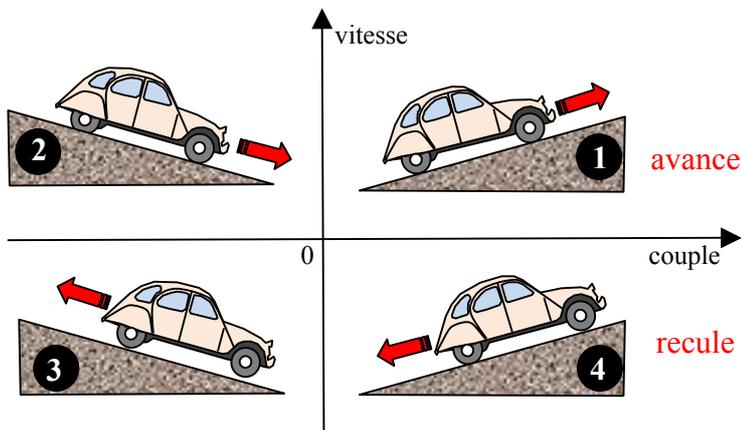
Dans l'exercice suivant, les orientations des flèches indiquent le sens réel des différentes grandeurs: courant d'induit I_a , f.e.m. E , sens de rotation et sens du couple électromagnétique.

En prenant la première case (en haut à gauche) comme référence, compléter les cases suivantes par comparaison avec cette première case: (Réponse 2:)

(voir § 2.1.2.3)

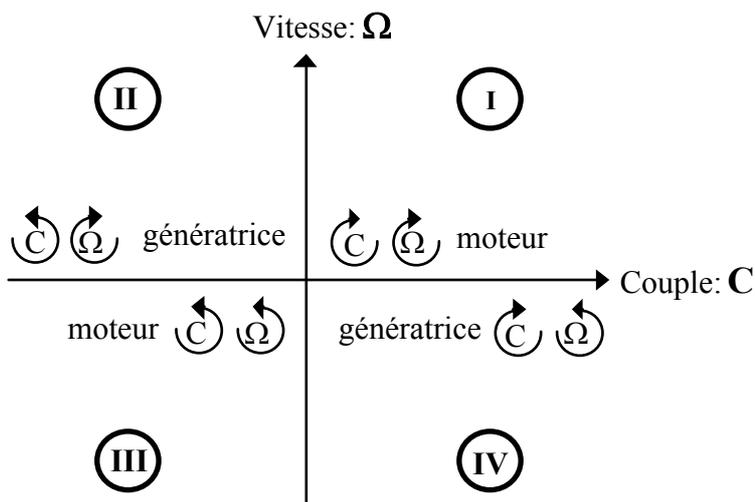
| | | |
|---|--|---|
|  |  | |
| Génératrice |  sens rotation  sens couple |  sens rotation  sens couple |
|  |  | |
| Moteur |  sens rotation  sens couple |  sens rotation  sens couple |

2.1.2.6 Les quatre quadrants de fonctionnement.



Du point de vue mécanique les différentes situations envisagées dans l'exercice précédent peuvent se ramener à quatre cas: fonctionnement en moteur ou en génératrice avec deux sens de rotation possibles.

Les représentations ci-contre en donne une illustration.



On peut en donner la représentation symbolique ci-contre:

Les quadrants sont numérotés de I à IV.

A chacun d'eux correspond un sens de rotation et un sens du couple.

Préciser les quadrants de fonctionnement dans les quatre cases de l'exercice précédent. (Réponse 2:)

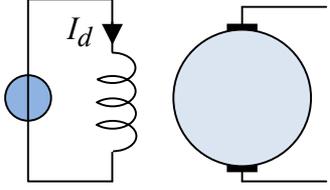
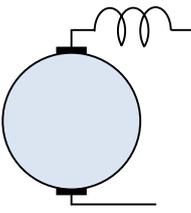
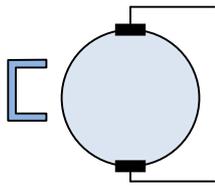
En électronique de puissance, lorsqu'on associe un variateur de vitesse à une machine, il est nécessaire de préciser les quadrants de fonctionnement souhaités.

Par exemple en levage la machine travaille dans les quadrants I (montée) et IV (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 I (moteur) et II (freinage); ou seulement I (s'il n'y a pas de freinage électrique).

2.2 Excitation séparée, série ou à aimants.

L'induction dans la machine à courant continu peut être obtenue de différentes façons:

| Excitation séparée | Excitation série | Excitation à aimants permanents |
|---|---|---|
|  |  |  |
| <p>L'inducteur est alimenté par une source indépendante. (On l'appelle souvent « inducteur shunt »)</p> | <p>Le courant dans l'inducteur est le même que dans l'induit.</p> | <p>Pas de bobinage inducteur, donc pas de courant inducteur</p> |

 L'inducteur d'une machine à excitation séparée est généralement constitué de nombreuses spires de fil fin, destiné au passage d'un courant faible. La résistance du bobinage est relativement élevée.

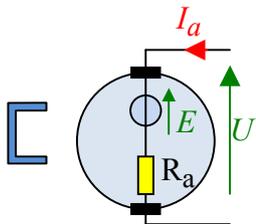
 L'inducteur d'une machine à excitation série comporte peu de spires de gros fil, destiné au passage d'un courant élevé. La résistance du bobinage est relativement faible.

La machine à excitation série ne sera pas étudiée dans ce cours.

2.3 Fonctionnement en moteur.

La machine à courant continu est principalement utilisée en moteur. (Le fonctionnement en génératrice correspond généralement à une séquence de freinage de la machine).

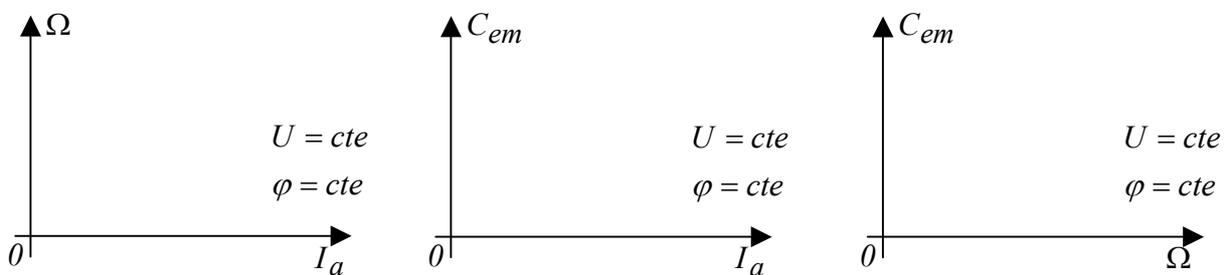
Nous allons évaluer l'allure des caractéristiques $\Omega(I_a)$, $C_{em}(I_a)$ et $C_{em}(\Omega)$ pour la machine à excitation par aimants ou à excitation séparée avec un courant inducteur constant (et donc un flux φ constant).



La tension U aux bornes de l'induit est supposée constante.

a) Exprimer $\Omega(I_a)$, $C_{em}(I_a)$ et $C_{em}(\Omega)$ en utilisant uniquement les paramètres U , R_a et $k\varphi$. (cf. figure ci-contre) (Réponse 3:)

b) représenter, ci-dessous, les caractéristiques $\Omega(I_a)$, $C_{em}(I_a)$ et $C_{em}(\Omega)$ sachant que la valeur $(R_a \cdot I_a)$ est faible devant U . (Réponse 4:)



2.4 Puissance et rendement en régime permanent.

2.4.1 Puissances.

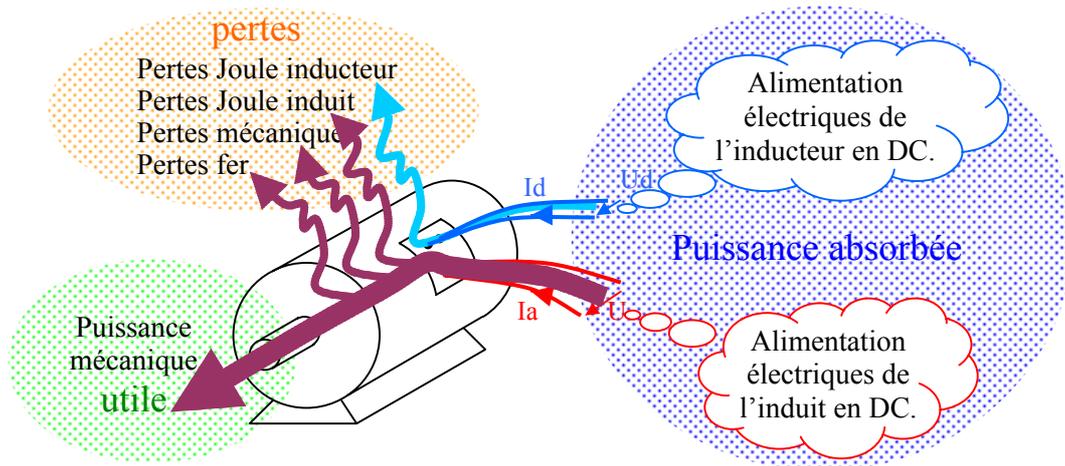
▪ Voir le diaporama dans [iutenligne.net/ressource N°1604/MotorElecPro/Chapitre1/1.4 Bilan des puissances](http://iutenligne.net/ressource%20N%25C2%26C2%201604/MotorElecPro/Chapitre1/1.4%20Bilan%20des%20puissances).

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.

Si on s'intéresse plus particulièrement à la puissance échangée dans l'induit: on distingue des **pertes Joule** (dans les résistances des bobinages); des **pertes fer** (dans les matériaux ferromagnétiques soumis à un champ variable); et des **pertes mécaniques** (dues aux frottements des pièces mécaniques en mouvement).

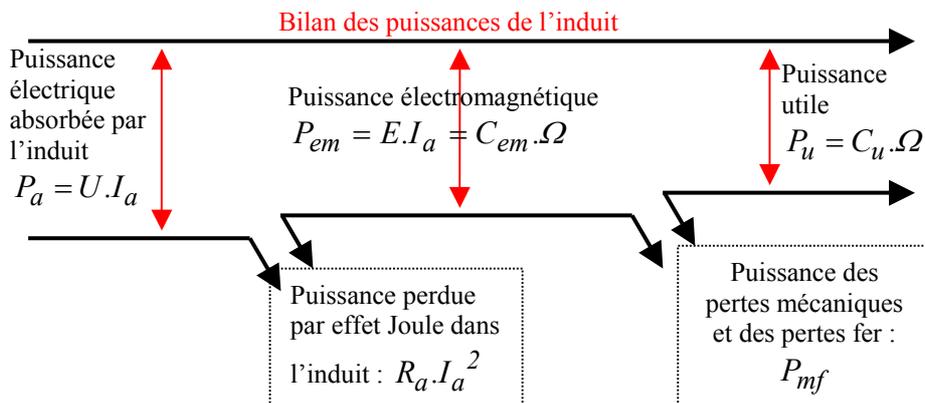
Le bilan des puissances ci-après (qui se lit de gauche à droite) représente la répartition de la puissance absorbée par l'induit. Une partie de celle-ci est transformée en chaleur sous forme de pertes Joule, fer et mécanique; le reste constitue la puissance utile restituée en sortie (à droite).

➤ En **fonctionnement moteur**, le bilan des puissances s'établit comme suit:

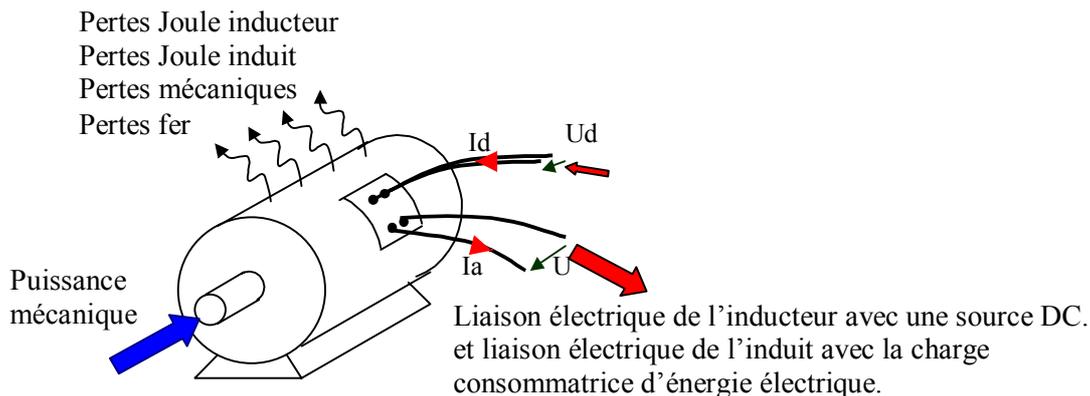


La puissance électrique $U_d \cdot I_d$ fournie au circuit inducteur (si celui-ci n'est pas à aimants permanents) est intégralement transformée en chaleur sous forme de pertes joule inducteur.

La puissance électrique $U \cdot I_a$ fournie au circuit induit se répartie comme suit :

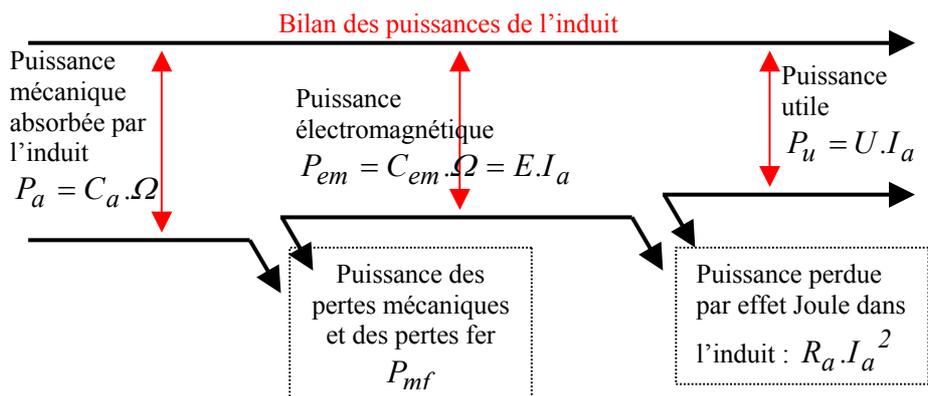


➤ En **fonctionnement génératrice**, le bilan des puissances s'établit comme suit:



La puissance électrique $U_d I_d$ fournie au circuit inducteur (si celui-ci n'est pas à aimants permanents) est intégralement transformée en chaleur sous forme de pertes joule inducteur.

La puissance mécanique $C_a \cdot \Omega$ absorbée par l'induit (rotor) se répartie comme suit :



La puissance perdue par les pertes mécaniques est fonction de la vitesse de rotation.

La puissance perdue par les pertes fer est fonction de la vitesse de rotation et de l'état magnétique de la machine.

La somme des pertes mécanique et fer (P_{mf}) est fonction de la vitesse de rotation et de l'état magnétique de la machine; ou encore de la vitesse et de la f.e.m. E ($E = k \cdot \varphi \cdot \Omega$).

Le rapport $\frac{P_{mf}}{\Omega}$ est appelé "**couple de pertes**" : C_p .

2.4.2 Rendement de la machine à courant continu.

Le rendement η d'une machine s'exprime de manière générale par l'expression:

$$\eta = \frac{\text{Puissance utile en sortie}}{\text{Puissance absorbée en entrée}} < 1$$

Si on désigne par " Σ pertes" la somme de toutes les puissances perdues dans la machine: **pertes Joule dans l'induit, pertes Joule dans l'inducteur (2), pertes mécanique et pertes fer**, on peut alors écrire les relations suivantes:

$$\text{Puissance absorbée par la machine} = \text{Puissance utile en sortie de la machine} + \Sigma \text{pertes}$$

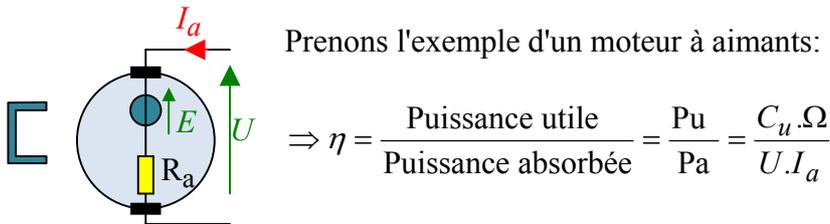
$$\Rightarrow \eta = \frac{\text{Puissance utile}}{\text{Puissance utile} + \Sigma \text{pertes}} = \frac{\text{Puissance absorbée} - \Sigma \text{pertes}}{\text{Puissance absorbée}}$$

On peut donner un ordre de grandeur (3) du rendement des machines à courant continu en fonction de leur puissance (dans les conditions nominales de fonctionnement):

| | | | | | | |
|--------|------|------|-------|-------|--------|---------|
| P | 1 kW | 3 kW | 10 kW | 30 kW | 100 kW | 1000 kW |
| η | 75% | 80% | 84% | 87% | 90% | 93% |

2.4.3 Mesure des pertes et du rendement.

2.4.3.1 Mesure du rendement par la méthode directe.



avec C_u : couple mécanique ("utile") sur l'arbre (en Nm)

Ω : vitesse angulaire de rotation (en rad.s⁻¹)

La relation entre les incertitudes relatives est alors la suivante:

$$\frac{\Delta \eta}{\eta} = \frac{\Delta C_u}{C_u} + \frac{\Delta \Omega}{\Omega} + \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I_a}{I_a}. \text{ Par exemple : } \frac{\Delta \eta}{\eta} \approx 3\% + 2\% + 3\% + 2\% = 10\%$$

(Ces valeurs, données à titre d'exemple montrent que cette méthode est peu précise). (le rendement est mesuré ici à $\pm 10\%$)

(2): L'inducteur fait partie de la machine, il ne faut donc pas oublier de prendre en compte la puissance perdue dans l'inducteur. Ces pertes sont dues à la résistance du bobinage inducteur.

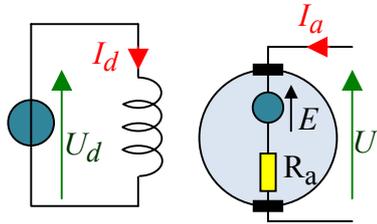
Si l'inducteur est à aimant permanent, il n'y a pas de pertes dans l'inducteur.

(3) Il faut retenir l'ordre de grandeur: $\eta \approx 80\%$ à 90% . Le rendement s'améliore quand la puissance augmente.

De plus la méthode directe nécessite une source capable de fournir la puissance absorbée, et une charge capable de consommer la puissance utile; ce qui est difficile pour les grosses unités.

2.4.3.2 Mesure du rendement par la méthode des pertes séparées.

Comme son nom l'indique, cette méthode consiste à mesurer successivement les différentes pertes de la machine.



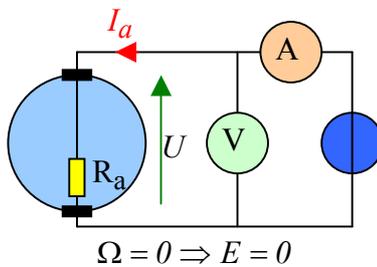
Prenons l'exemple d'un moteur à excitation séparée dont on veut déterminer le rendement en fonctionnement nominal (4):

U_n : tension U nominale
 I_{a_n} : courant I_a nominal

Ω_n : vitesse de rotation nominale (5)

U_{d_n} et I_{d_n} : tension et courant inducteur nominaux.

a) Mesure des pertes Joule dans l'induit



La résistance interne de l'induit R_a est mesurée en courant continu par la méthode voltampèremétrique lorsque la machine est à l'arrêt.

Une mesure avec un simple ohmmètre serait très imprécise en raison des résistances de contact (6).

La mesure sera une moyenne faite pour plusieurs positions de l'arbre de la machine, car la résistance de l'induit varie en fonction de la qualité du contact balais collecteur.

Les pertes Joule nominales dans l'induit sont exprimées par : $R_a \cdot I_{a_n}^2$.

b) Mesure des pertes Joule dans l'inducteur (à excitation séparée):

La résistance R_d de l'inducteur peut être mesurée par la méthode voltampèremétrique ou avec un ohmmètre

Les pertes Joule nominales dans l'inducteur sont exprimées par : $R_d \cdot I_{d_n}^2$.

(4) Les valeurs nominales sont celles qu'indique la "plaque signalétique" fixée sur la machine. ce sont les valeurs pour lesquelles la machine a été conçue. (Qualité des isolants, résistance mécanique et thermique, rendement optimum etc).

(5) Les constructeurs de machines indiquent la vitesse de rotation "n" en tours/minute ou en tours/seconde plutôt que la vitesse angulaire Ω en radians/seconde.

(6) Au point de contact entre deux conducteurs existe une résistance dite de "contact" qui varie avec l'intensité. (Ce phénomène est d'autant plus marqué que le contact est ponctuel et de mauvaise qualité, ce qui peut être le cas des contacts balais/collecteur).

c) Mesure des pertes mécaniques et fer (P_{mf_n}) dans l'induit pour un point de fonctionnement déterminé. (par exemple pour le point de fonctionnement nominal)

La méthode consiste à faire un essai en **moteur à vide** (7) en excitation séparée dans les conditions de **vitesse et de flux recherchés**, (Dans notre exemple : dans les conditions de vitesse et de f.e.m. nominales)

- Soit $E_n = U_n - R_a \cdot I_{a_n}$ la f.e.m. nominale.

- Soit I_{a_0} le courant absorbé par l'induit lors de cet essai à vide.

La tension U_o aux bornes de l'induit et le courant inducteur I_d sont ajustés de façon que $U_o - R_a \cdot I_{a_0} = E_n$ lorsque la vitesse est Ω_n .

Dans ces conditions: la puissance absorbée par l'induit: $Pa_0 = U_o \cdot I_{a_0} = R_a \cdot I_{a_0}^2 + P_{mf_n}$.

On en déduit les pertes mécaniques et fer nominales: $P_{mf_n} = U_o \cdot I_{a_0} - R_a \cdot I_{a_0}^2$

d) Rendement :

En excitation séparée, la puissance absorbée nominale de l'ensemble induit + inducteur est

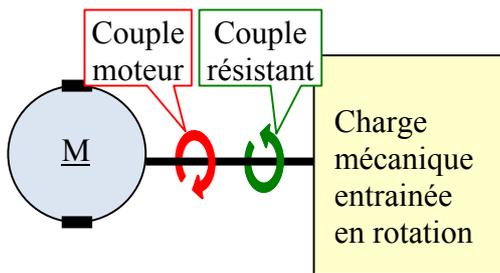
$$Pa_n = U_n \cdot I_{a_n} + R_d \cdot I_{d_n}^2$$

La puissance utile nominale est $Pu_n = Pa_n - R_d \cdot I_{d_n}^2 - R_a \cdot I_{a_n}^2 - P_{mf_n}$

En excitation séparée, le rendement nominal est donc obtenu par la relation:

$$\eta = \frac{U_n \cdot I_{a_n} - R_a \cdot I_{a_n}^2 - P_{mf_n}}{U_n \cdot I_{a_n} + R_d \cdot I_{d_n}^2}$$

2.5 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.

La loi fondamentale de la dynamique ($\sum \vec{F} = m \cdot \vec{\gamma}$) se ramène lors d'un mouvement de rotation autour

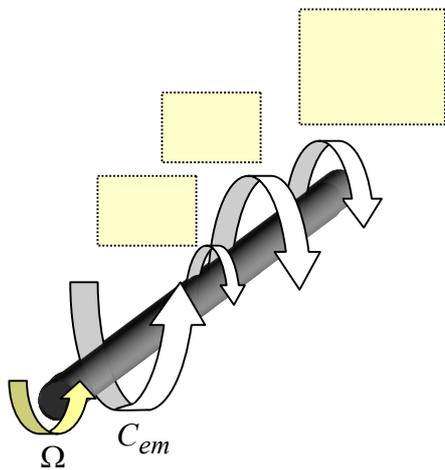
d'un axe fixe à l'expression: $\text{Somme des couples} = J \cdot \frac{d\Omega}{dt}$.

La somme des couples est une somme algébrique. (8)

J désigne le moment d'inertie de l'ensemble tournant (moteur+charge) et Ω la vitesse angulaire ($\Omega = 2 \cdot \pi \cdot n$) en rad/s.

(7) « à vide », C'est-à-dire lorsque le moteur n'entraîne aucune charge mécanique.

(8) L'usage en électrotechnique est de remplacer l'expression "moment du couple" par le terme "couple".



Si donc un moteur présente un couple électromagnétique C_{em} et un couple de pertes C_p et que la charge oppose un couple résistant C_r , la relation précédente devient: $C_{em} - C_p - C_r = J \cdot \frac{d\Omega}{dt}$ (avec les sens de C_{em} , C_p et C_r indiqués ci-contre)

Compléter la figure ci-contre. (Réponse 5:)

L'ensemble $C_{em} - C_p$ est appelé « **couple utile du moteur** ». On le note « C_u »

Si $(C_{em} - C_p = C_u) > C_r$: l'ensemble tournant accélère dans le sens de C_{em} .

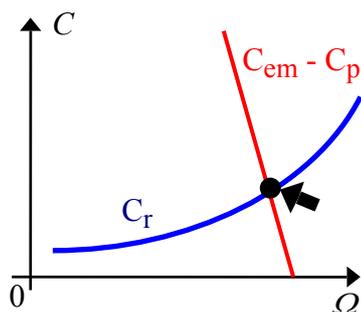
Si $(C_{em} - C_p = C_u) < C_r$: l'ensemble tournant ralentit.

A l'équilibre (c'est à dire si la vitesse de rotation est constante): $\frac{d\Omega}{dt} = 0$.

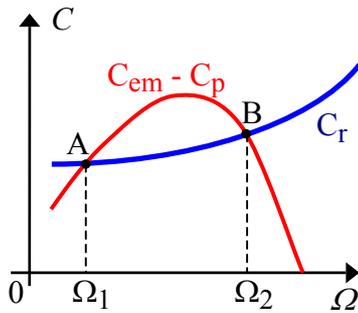
Et donc: $(C_{em} - C_p = C_u) = C_r$

Le **point de fonctionnement à l'équilibre** est donc défini par:

$C_{em} - C_p = C_r$ et vitesse du moteur = vitesse de la charge ainsi donc :



Le point de fonctionnement à l'équilibre est donné par l'**intersection** de la caractéristique couple en fonction de la vitesse du moteur $[(C_{em} - C_p)_{(\Omega)}]$ avec celle de la charge entraînée $[C_r(\Omega)]$.



Le point de fonctionnement à l'équilibre (intersection de $(C_{em} - C_p)_{(\Omega)}$ et de $C_r(\Omega)$) peut être **stable** ou **instable**:

Sur le graphe ci-contre: le point **A est instable** car, au voisinage de ce point:

Si $\Omega > \Omega_1 \Rightarrow C_{em} - C_p > C_r \Rightarrow$ accélération.

Si $\Omega < \Omega_1 \Rightarrow C_{em} - C_p < C_r \Rightarrow$ décélération.

Dans les deux cas le point de fonctionnement s'éloigne de A.

Par contre le point **B est stable** car, au voisinage de ce point:

Si $\Omega > \Omega_2 \Rightarrow C_{em} - C_p < C_r \Rightarrow$ décélération.

Si $\Omega < \Omega_2 \Rightarrow C_{em} - C_p > C_r \Rightarrow$ accélération.

Dans les deux cas le point de fonctionnement revient en B.

Pour faire varier la vitesse d'un moteur à courant continu, il faut déplacer sa caractéristique $(C_{em} - C_p)_{(\Omega)}$. Dans ce but on peut agir sur la tension U d'alimentation de l'induit.

Le domaine de fonctionnement possible du moteur est limité par les limites des paramètres:

- U_{\max} (limite d'isolement des conducteurs).
- $I_{a\max}$ (limite d'échauffement par effet Joule, limite de commutation balais collecteur).
- φ_{\max} (saturation magnétique).
- Ω_{\max} (limite de résistance mécanique lors de la rotation).

2.6 Quelques éléments de technologie.

2.6.1 Matériaux.

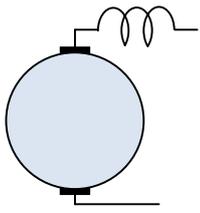
- L'induit de la machine à courant continu est constitué de matériaux ferromagnétiques de façon à diminuer sa réluctance, ce qui permet d'augmenter l'induction dans la machine.

L'induit est en rotation dans un champ d'induction fixe, il est donc le siège de pertes fer. De façon à limiter celles-ci, il est constitué d'un empilement de tôles montées sur un axe massif.

- L'inducteur est le siège d'un champ d'induction fixe. Il peut donc être massif.

- Le collecteur est un empilement de lames de cuivre séparées par des isolants. C'est l'élément fragile de la machine. Pour limiter son usure, les balais qui frottent dessus sont réalisés en matériau plus tendre (à base de carbone). Il est en effet beaucoup moins coûteux de changer un balai que de refaire un collecteur.

2.6.2 Moteur universel



Le moteur « universel » est un moteur excité par un bobinage inducteur placé en série avec l'induit.

Si on inverse le courant dans l'induit d'un moteur série, le courant inducteur s'inverse en même temps, et par conséquent, le sens du couple électromagnétique $C_{em} = k \cdot \varphi \cdot I_a$ ne change pas.

Moyennant quelques aménagements, la machine série peut donc fonctionner avec un courant alternatif.

Pour cela l'inducteur est feuilleté car l'induction est variable dans l'inducteur. La machine est également équipée d'enroulements « compensateurs » pour diminuer le flux engendré par les courants dans l'induit et ainsi diminuer l'inductance de l'induit.

Ce "**moteur universel**" est largement utilisé dans l'électroménager ou l'outillage électrique portatif.

2.6.3 Conclusion.

- On rencontre les moteurs à courant continu dans les applications de **faible puissance** lorsque la **source** d'énergie électrique est **continue** (piles ou batteries).

Ces moteurs sont à aimants permanents ou à inducteur série.

Deux exemples: l'automobile et les jouets.

- Pour les puissances plus élevées, la machine à courant continu est utilisée pour la **variation de vitesse** lorsqu'on souhaite une large plage de variation (par exemple de 1 à 100).

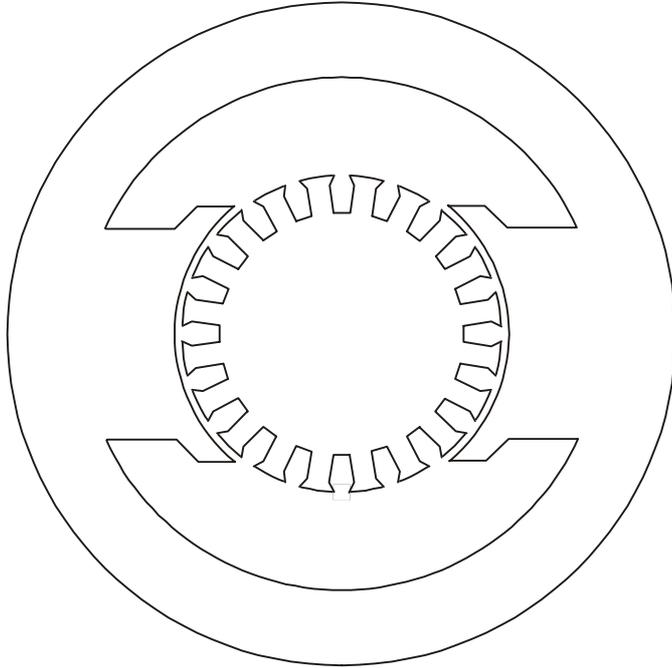
L'électronique de puissance qui lui est alors associée est relativement simple et peu coûteuse. Mais **le coût de la machine est élevé**, et le **collecteur est fragile**.

De plus en plus cette solution est remplacée par l'association machine alternative et convertisseur de fréquence.

3 Ce que j'ai retenu du chapitre « machine à courant continu ».

De façon à pouvoir refaire ce test plusieurs fois, il est conseillé de ne pas écrire directement sur celui-ci. Il est préférable d'utiliser un brouillon.

1) Constitution de la machine à courant continu.



La figure ci-contre représente une vue en coupe d'une machine à courant continu.

Sur celle-ci :

- Repérer le stator, le rotor, l'inducteur et l'induit.
- Représenter les conducteurs de l'induit en rouge ou en vert.
- Représenter les conducteurs de l'inducteur en noir ou en bleu.
- Dans l'expression de la f.e.m. ou du couple d'une machine à courant continu intervient le paramètre « flux sous un pôle ». Sur la figure ci-contre, représenter une surface concernée par ce flux et l'allure du vecteur induction \vec{B} sur cette surface.

2) f.e.m., couple et puissance électromagnétique.

Soit un élément conducteur de longueur « ℓ » soumis à un champ d'induction uniforme \vec{B} qui lui est perpendiculaire.

a) Que se passe-t-il si le conducteur se déplace à la vitesse \vec{v} perpendiculaire au conducteur et à \vec{B} ?

Ecrire dans le premier cadre à droite de la figure 1 la formule qui exprime ce phénomène. Mettre cette formule en relation avec l'expression de la f.e.m. « E » d'une machine à courant continu (second cadre sous la figure 1).

b) Que se passe-t-il si le conducteur est parcouru par un courant I ?

Ecrire dans le premier cadre à droite de la figure 2 la formule qui exprime ce phénomène. Mettre cette formule en relation avec l'expression du couple électromagnétique « C_{em} » d'une machine à courant continu (second cadre sous la figure 2). (Réponse 6:)

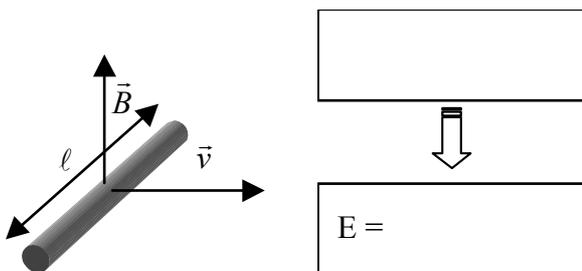


figure 1

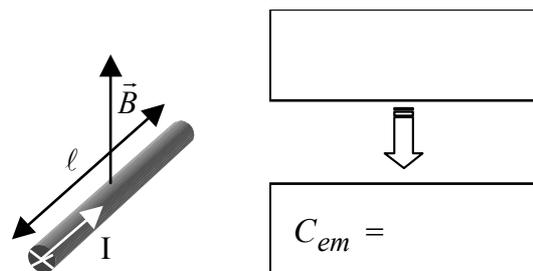


figure 2

c) De quels paramètres dépend le sens de la f.e.m. « E » d'une machine à courant continu ?

d) De quels paramètres dépend le sens du couple électromagnétique « C_{em} » d'une machine à courant continu ?

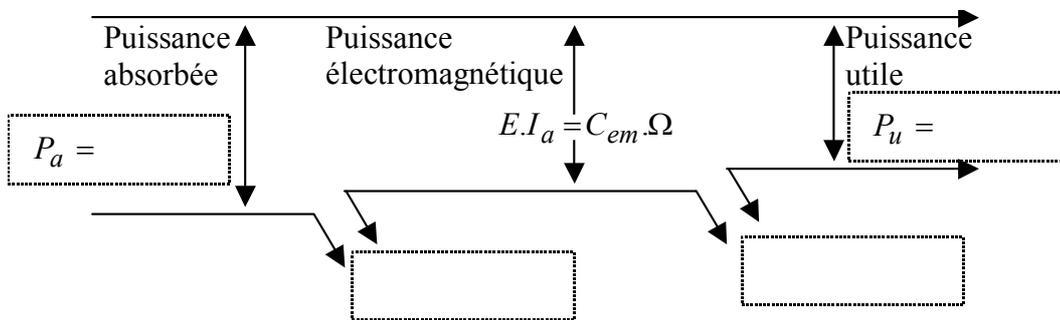
e) La machine à courant continu est un « convertisseur électromécanique » d'énergie. La puissance électromagnétique se situe à la charnière entre le côté « électrique » et le côté « mécanique » de cette conversion.

Exprimer la puissance électromagnétique vue du côté « électrique » et vue du côté « mécanique ».

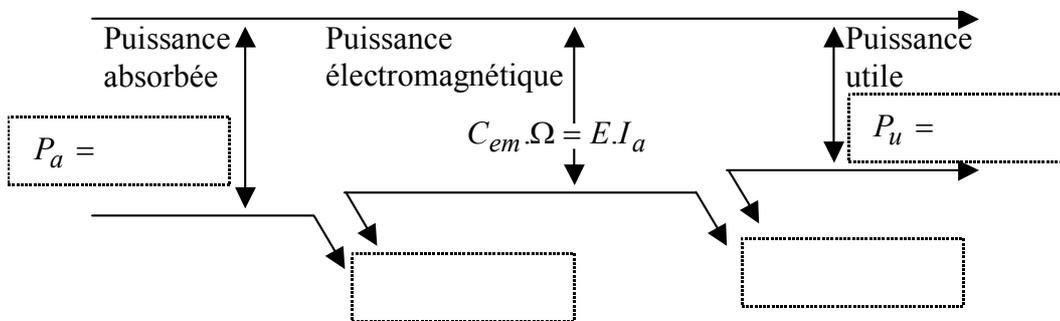
f) En déduire que, dans le système d'unités international, la constante de couple est la même que la constante de f.e.m.

3) bilan des puissances en moteur, en génératrice.

a) Compléter ci-dessous le bilan des puissances échangées dans l'induit d'une machine à courant continu fonctionnant en moteur en régime permanent (Ω constant).

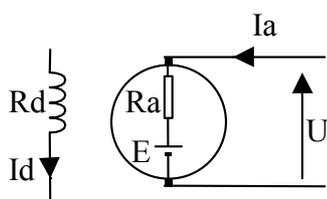


b) Compléter ci-dessous le bilan des puissances échangées dans l'induit d'une machine à courant continu fonctionnant en génératrice en régime permanent (Ω constant).



c) Pour une machine à courant continu donnée, quels paramètres agissent sur ses pertes fer ?

d) Pour une machine à courant continu donnée, quels paramètres agissent sur ses pertes mécaniques ?



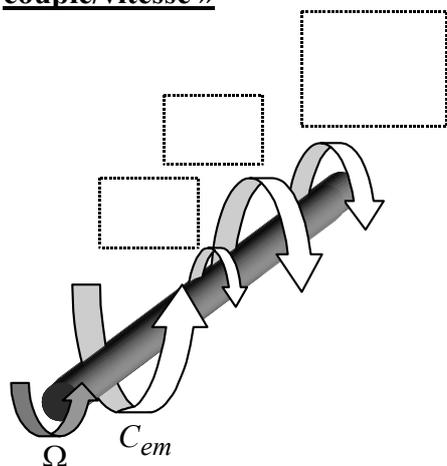
e) Soit le moteur à courant continu à excitation séparée ci-contre.

Il est en régime permanent ; il tourne à la vitesse angulaire Ω avec des pertes mécanique et fer P_{mf} en délivrant un couple utile C_u .

En définissant chacun des termes, exprimer son rendement

- En fonction de la puissance absorbée et de la puissance utile.
- En fonction de la puissance absorbée et des pertes (préciser lesquelles).
- En fonction de la puissance utile et des pertes.

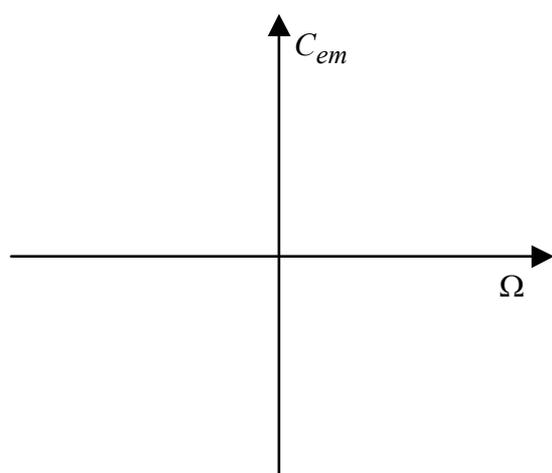
4) Bilan des couples sur l'arbre de la machine. Quadrants de fonctionnement dans le « plan couple/vitesse »



La figure ci-contre représente l'arbre d'un **moteur** tournant à la vitesse angulaire Ω .

- Le couple (⁹) électromagnétique qui s'y applique est C_{em} .
- Le moteur présente un couple de pertes (mécaniques et fer) $C_p = \frac{P_{mf}}{\Omega}$.
- La mécanique entraînée par ce moteur présente un couple résistant C_r .
- L'ensemble des pièces mécaniques en rotation présente un moment d'inertie équivalent ramené à l'arbre du moteur : J .

En appliquant la loi fondamentale de la dynamique pour un mouvement de rotation, compléter la figure ci-dessus.



Avec les orientations de C_{em} et de Ω ci-dessus, préciser dans le « plan couple vitesse » ci-contre, les quadrants « moteur » et les quadrants « génératrice ».

Comment se détermine le « point de fonctionnement » de la machine en régime permanent ?

Qu'est-ce qui distingue un point de fonctionnement « stable » d'un point de fonctionnement « instable » ?

5) Moteur universel.

Quel est le principe d'un « moteur universel » alimenté en régime alternatif ?

On peut consulter les tests Moodle disponibles en accès libre sur le site <http://www.iutenligne.net/> (Voir les N° de ressources 1484, 1542, 1411, 1410, 1543)

(⁹) L'usage est d'employer l'expression « couple » au lieu de « moment du couple ».

4 Problèmes sur la machine à courant continu

mcc. Exercice 1 : Localisation des pertes d'une machine à courant continu.

Voici ci-dessous deux photographies du rotor (induit) d'une machine à courant continu, ainsi que le résultat d'une simulation des lignes de champ sur une vue en coupe de cette machine.

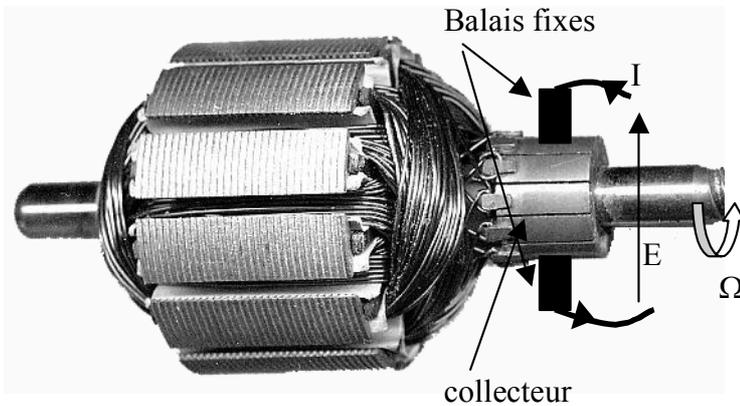


Figure 1

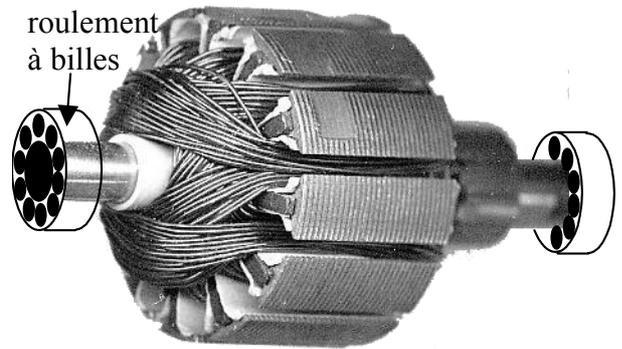


Figure 2

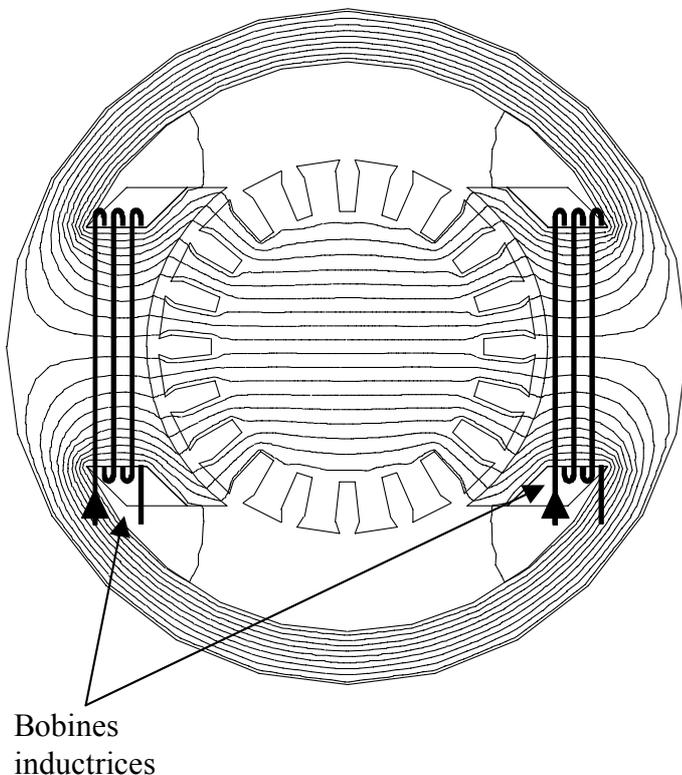


Figure 3

a) Sur la vue en coupe ci-contre, colorier, au surligneur, l'induit avec une couleur et l'inducteur avec une autre couleur (afin de matérialiser la matière et l'air)

b) Toujours sur la vue en coupe ci-contre, représenter les conducteurs de l'induit.

c) Sur l'ensemble des figure 1, figure 2 et figure 3, indiquer la localisation des différentes pertes (Joule, fer et mécanique) rotoriques et statoriques.

mcc. Exercice 2 : Moteur à aimants permanents.

Une machine à courant continu, à aimants permanents, travaille dans les conditions suivantes:

- Fonctionnement en moteur à couple utile constant (indépendant de la vitesse).
- Pertes mécaniques et fer négligeables.
- Résistance de l'induit: $R_a = 0,4 \Omega$.

a) Le moteur fonctionne avec une tension U aux bornes de l'induit de 400 V et un courant I_a dans l'induit de 50 A. Il tourne à 1200 tr/min. ⁽¹⁰⁾

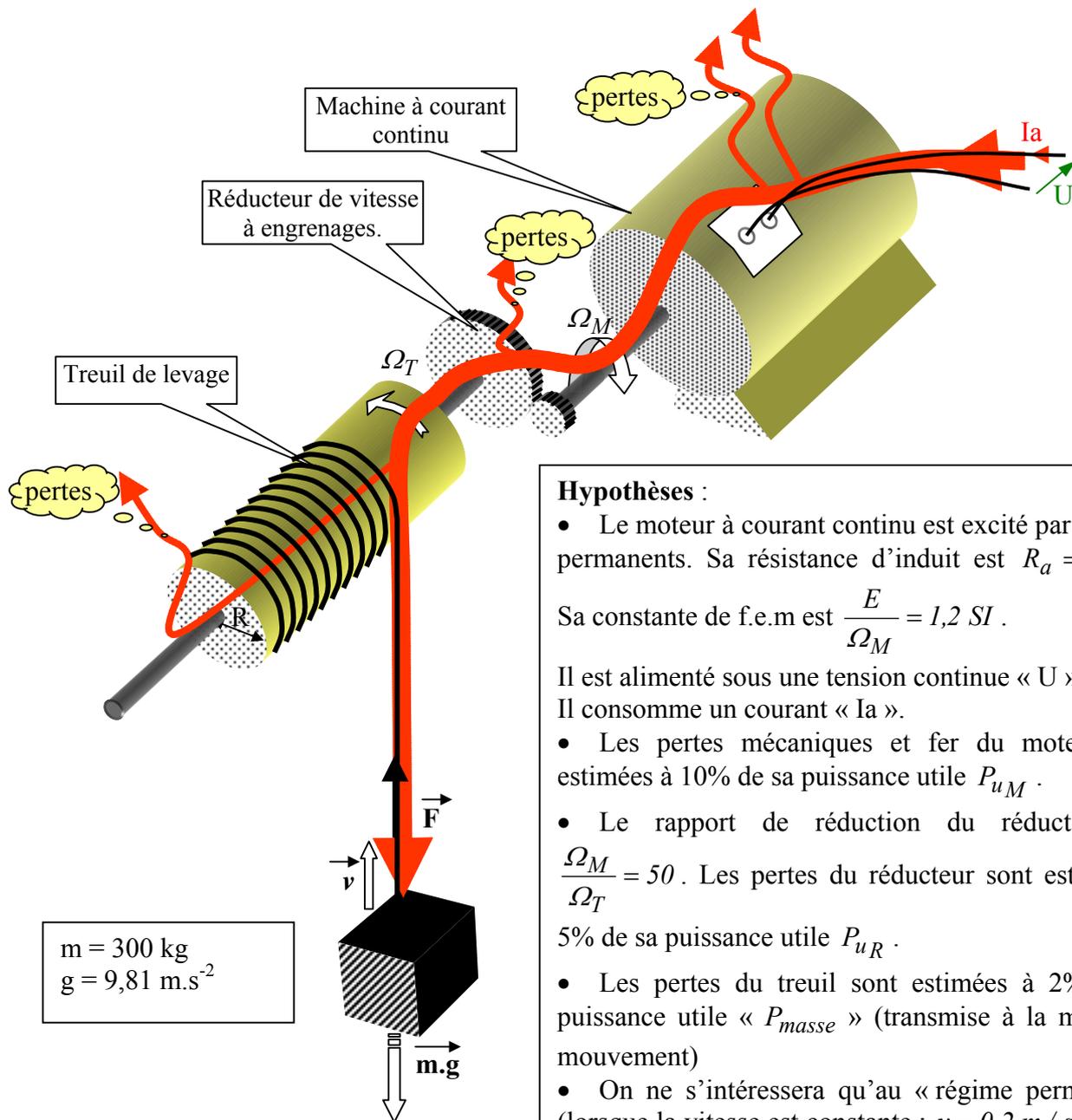
Calculer la valeur du couple utile.

b) Le couple utile étant constant, la tension d'induit U est maintenant de 200V. Quelle est la valeur du courant d'induit I_a et la valeur de la vitesse ?

⁽¹⁰⁾ Lire : tours par minute.

mcc. Exercice 3 : Machine accouplée à un treuil de levage

La machine à courant continu ci-dessous entraîne en rotation le tambour d'un treuil de levage via un réducteur de vitesse. Le câble qui s'enroule sur le treuil soulève une masse « m ».



Hypothèses :

- Le moteur à courant continu est excité par aimants permanents. Sa résistance d'induit est $R_a = 2,2 \Omega$.

Sa constante de f.e.m est $\frac{E}{\Omega_M} = 1,2 \text{ SI}$.

Il est alimenté sous une tension continue « U ».

Il consomme un courant « Ia ».

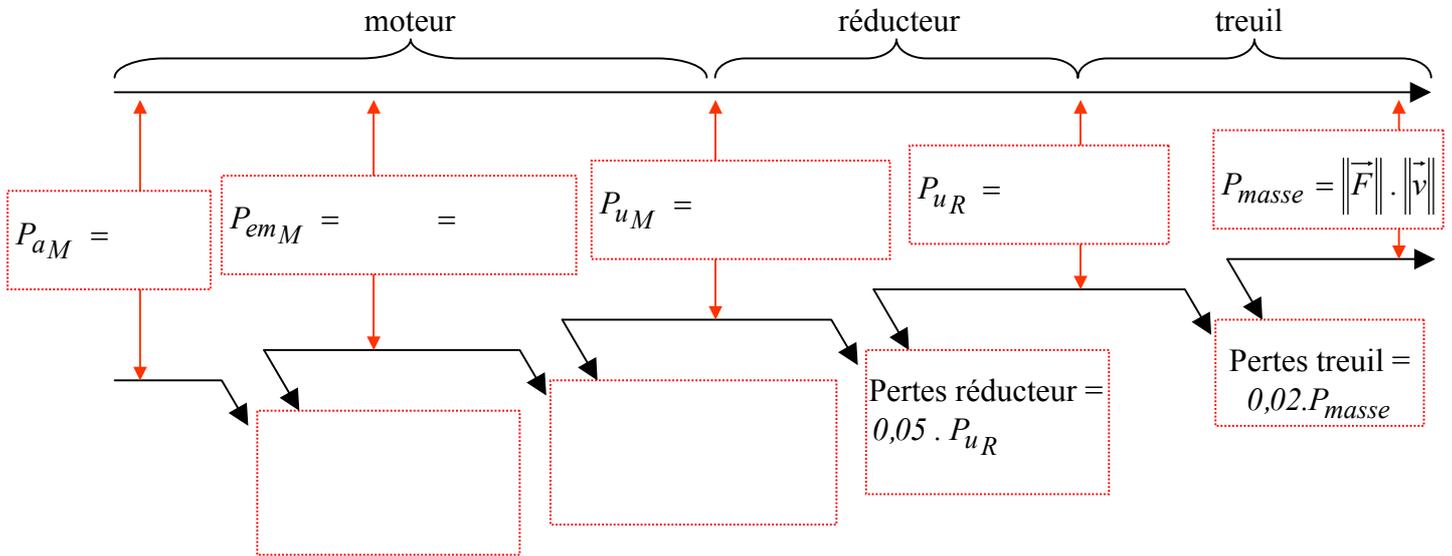
- Les pertes mécaniques et fer du moteur sont estimées à 10% de sa puissance utile P_{uM} .

- Le rapport de réduction du réducteur est $\frac{\Omega_M}{\Omega_T} = 50$. Les pertes du réducteur sont estimées à 5% de sa puissance utile P_{uR} .

- Les pertes du treuil sont estimées à 2% de sa puissance utile « P_{masse} » (transmise à la masse en mouvement)

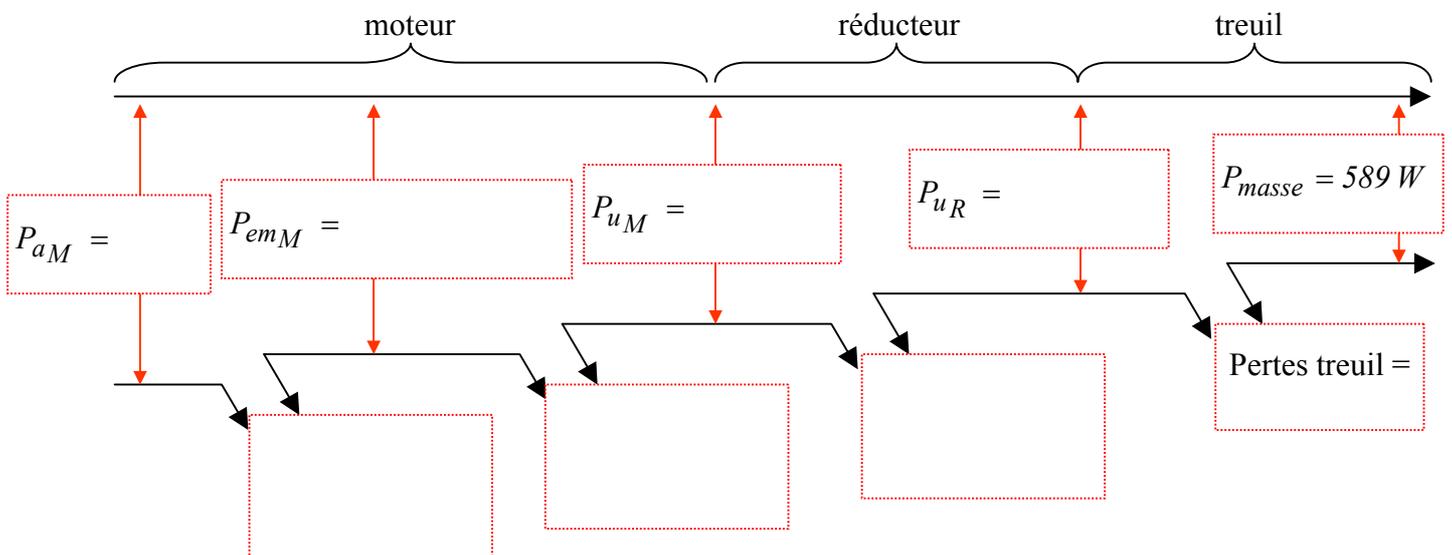
- On ne s'intéressera qu'au « régime permanent » (lorsque la vitesse est constante : $v = 0,2 \text{ m/s}$ dans le sens de la montée)

a) Pour la situation décrite dans les hypothèses précédentes, compléter, (par des **expressions littérales**), les cases en pointillé du bilan des puissances de l'ensemble du système (ci-dessous). (P_{uM} et P_{uR} seront exprimés en fonction de P_{masse}). (Pour les 5 cases qui concernent le moteur, on utilisera les notations du cours)



b) Le tambour du treuil a un rayon $R = 10 \text{ cm}$. Sa vitesse angulaire est : $\Omega_T = \frac{v}{R}$. Calculer la valeur numérique de la vitesse angulaire de l'induit du moteur à courant continu. En déduire la valeur numérique de la f.e.m. du moteur

c) Pour la situation décrite dans les hypothèses précédentes, compléter, (par des **valeurs numériques**), les cases en pointillé du bilan des puissances de l'ensemble du système. Préciser les valeurs de « U » et de « Ia ».



mcc. Exercice 4 : Moteur à aimant permanent.

Le constructeur d'un moteur à courant continu à **aimant permanent** fournit les caractéristiques nominales suivantes:

Tension d'induit: $U_n = 140 \text{ V}$ Vitesse: $n_n = 3000 \text{ tr/min}$ ⁽¹¹⁾

f.e.m.: $44 \text{ V} / 1000 \text{ tr/min}$ ⁽¹²⁾ Résistance de l'induit: $R_a = 0,32\Omega$

Ce type de moteur ne présente pas de réaction magnétique d'induit ⁽¹³⁾ ni de pertes fer.

a) Calculer le courant nominal I_{a_n} (quand le moteur est alimenté sous tension nominale U_n et qu'il tourne à la vitesse nominale n_n).

Calculer le couple électromagnétique nominal C_{em_n} .

b) Le constructeur indique un courant impulsionnel ⁽¹⁴⁾ à ne pas dépasser $I_{imp} = 200 \text{ A}$. En déduire la tension U_d maximum admissible au démarrage et le couple C_{em_d} maximum admissible au démarrage.

c) Ce moteur entraîne une charge à couple résistant constant $C_r = 10,5 \text{ Nm}$.

Sachant que, pour simplifier les calculs, on ne tient pas compte des pertes mécaniques, déterminer :

c.1) La valeur du courant dans l'induit à l'équilibre ?

c.1) La vitesse à l'équilibre pour $U = 140 \text{ V}$, 105 V , 70 V et 35 V ?

d) En réalité, les pertes mécaniques ne sont pas négligeables. Pour les mesurer, le moteur est essayé à vide (sans charge), à vitesse constante, sous une tension $U_o = 133 \text{ V}$. Il absorbe dans ce cas un courant $I_o = 2,15 \text{ A}$.

Vérifier que dans ce cas la vitesse est sensiblement n_n . Calculer les pertes mécaniques nominales P_m .

e) Le constructeur indique un couple utile nominal $C_{un} = 9,6 \text{ Nm}$.

Vérifier cette valeur.

(11) Lire « tours par minute ».

(12) La fem dans la machine est proportionnelle à la vitesse. Pourquoi cela ?

Attention à l'unité employée: elle est en Volt par millier de tours par minute.

Cette relation contient la valeur de $K\phi$; cette dernière ne dépend pas de la vitesse.

(13) Dans certaines machines, le courant dans les bobinages de l'induit modifie légèrement l'état du champ d'induction magnétique dans la machine et donc la valeur du flux ϕ sous les pôles.

Ce phénomène est appelé « réaction magnétique d'induit »

(14) Ce courant impulsionnel doit être assez bref pour ne pas entraîner d'échauffement significatif de l'induit. Il n'est limité que par la valeur maximum acceptable par les contacts balais collecteur.

Ce moteur possède un collecteur avec un grand nombre de lames, ce qui lui permet d'accepter un courant impulsionnel très supérieur à son courant nominal. (Les moteurs usuels admettent un courant impulsionnel de l'ordre de 1,5 à 2,5 fois leur courant nominal).

mcc. Exercice 5 : Problèmes thermiques d'une machine à courant continu en régime variable.

Le constructeur d'un moteur à courant continu à aimant permanent et rotor plat fournit les valeurs nominales suivantes:

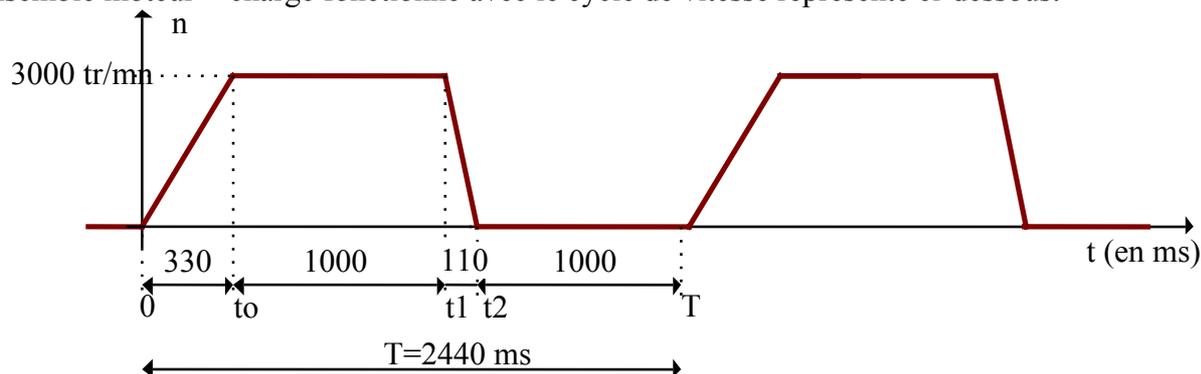
| | | | | | | | |
|--------|---|-------|-------------------|----|---|------|--------|
| Un | = | 150 | Volts | Nn | = | 3000 | tr/min |
| f.e.m. | = | 47,4 | V/1000tr/mn | Pu | = | 5000 | Watts |
| Cu | = | 15,9 | N.m | In | = | 39 | A |
| Iimp | = | 250 | A | Ra | = | 0,2 | Ω |
| J | = | 74000 | g.cm ² | τ | = | 7 | ms |

La puissance perdue par pertes mécaniques et fer est proportionnelle au carré de la vitesse; et donc le couple de pertes est proportionnel à la vitesse:

$$C_p = f \cdot \Omega \text{ avec } f = 5,5 \cdot 10^{-3} \text{ SI.}$$

Ce moteur entraîne une charge dont le couple résistant Cr est constant de valeur 14Nm. L'inertie de la charge est 50000 g.cm².

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



a) Représenter le graphe du courant d'induit de la machine à courant continu $i(t)$. En déduire le graphe de la tension d'alimentation $u(t)$ aux bornes de l'induit (préciser les valeurs en 0^+ , t_0^- , t_0^+ , etc...) (15).

b) La constante de temps thermique de la machine à courant continu (qui détermine la vitesse de variation de sa température interne) est très supérieure à la durée d'un cycle de fonctionnement. (elle est de plusieurs minutes).

La température interne de la machine à courant continu dépend donc de la moyenne de la puissance instantanée qu'elle perd sous forme d'effet Joule et de pertes fer ou mécaniques.

b.1 Exprimer, sous forme d'une intégrale en fonction de f et $\Omega(t)$, l'énergie perdue par les pertes mécaniques et fer durant un cycle de fonctionnement.

...Après résolution de cette intégrale, on a obtenu une énergie perdue sous forme de pertes mécaniques et fer de 622 J en un cycle de fonctionnement de 2,44 s.

(15) Dans ce type de moteur l'inductance de l'induit est très faible ($\approx 100 \mu H$). On négligera donc son influence.

b.2 Calculer l'énergie transformée en chaleur à l'intérieur de la machine par effet Joule en un cycle de fonctionnement.

b.3 La vitesse moyenne de la machine détermine l'efficacité de son ventilateur interne, et donc sa capacité à évacuer la chaleur produite à l'intérieur. ⁽¹⁶⁾

Calculer la vitesse moyenne $\langle \Omega \rangle$ de la machine pendant un cycle.

Pour une vitesse constante égale à $\langle \Omega \rangle$ (inférieure à la vitesse nominale), le constructeur de la machine indique un courant continu permanent admissible de 25A si la machine est ventilée uniquement par son ventilateur interne (fixé sur l'arbre).

Pour cette même vitesse, si la machine est équipée d'une ventilation forcée ⁽¹⁷⁾, le courant continu permanent admissible est de 50A.

Pour une vitesse constante égale à $\langle \Omega \rangle$, calculer la valeur maximale admissible pour l'ensemble des pertes Joule, mécanique et fer si la machine n'est équipée que de son ventilateur interne.

Refaire le calcul si la machine est équipée d'une ventilation forcée.

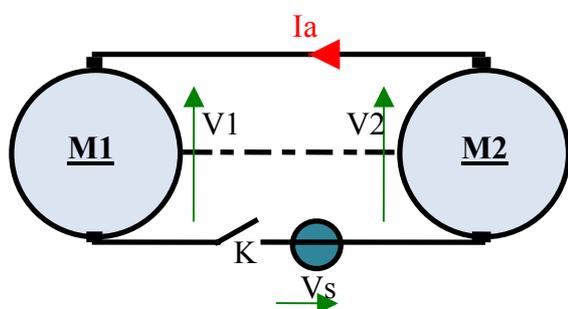
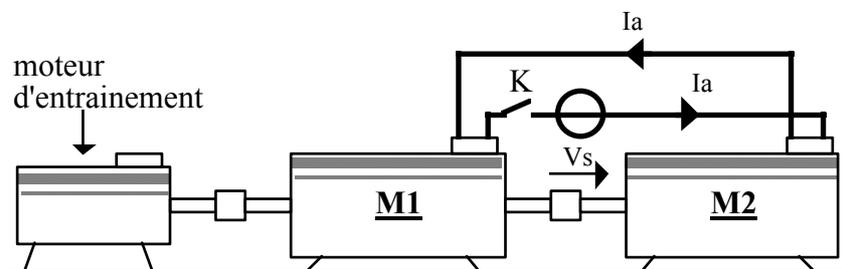
La machine nécessite-t-elle une ventilation forcée ?

¹⁶ On supposera que l'efficacité du refroidissement engendré par l'air pulsé dans la machine ne dépend que de la vitesse moyenne.

¹⁷ ventilateur externe entraîné par son propre moteur, pulsant de l'air dans la machine principale

mcc. Exercice 6 : Essai de machines à courant continu par la méthode d'opposition

Pour faire des essais sur deux machines à courant continu identiques (M1 et M2), on les a accouplées mécaniquement ⁽¹⁸⁾. Elles sont également reliées électriquement par l'intermédiaire d'un générateur de tension continu V_s . Les deux machines sont à excitation par aimants permanents ⁽¹⁹⁾. L'ensemble des deux machines est entraîné à vitesse constante par un moteur d'entraînement.



Les deux machines ont été reliées dans un sens tel que leurs f.e.m. respectives soient en opposition.

a) Le constructeur de ces machines indique une f.e.m. de 50 V pour 1000 tr/min. Pourquoi la f.e.m. est-elle proportionnelle à la vitesse de rotation? Est-ce le cas de toutes les machines à courant continu?

b) Lorsque l'interrupteur K est ouvert, $V_1 = V_2 = +150$ V. Quelle est la vitesse de rotation de l'ensemble tournant?

c) Après avoir fermé l'interrupteur K, on règle V_s à +10 V; le courant I_a vaut alors +8 A (le moteur d'entraînement maintient la vitesse inchangée par rapport à la question précédente).

Quelles sont alors les valeurs de V_1 et V_2 ? Préciser pour chaque machine (M1 et M2) son mode de fonctionnement (génératrice ou moteur). Calculer la valeur de la puissance perdue par effet Joule dans la résistance d'induit de chacune d'elles.

Calculer la puissance électromagnétique et le couple électromagnétique de chaque machine. Ces deux couples sont-ils de même sens?

d) Etablir le bilan des puissances pour l'ensemble des trois machines (On utilisera l'indice « e » pour les paramètres du moteur d'entraînement, l'indice « 1 » pour la machine M1 et l'indice « 2 » pour la machine M2). En déduire l'expression des pertes fer de M1 et M2 en fonction de la puissance mécanique utile du moteur d'entraînement.

Le moteur d'entraînement fournit un couple de 1,3 Nm. En déduire le rendement de M1 et de M2 pour la même vitesse qu'aux questions précédentes.

⁽¹⁸⁾ Les arbres des deux machines sont placés sur un même axe et reliés par l'intermédiaire d'un manchon d'accouplement de façon à les rendre solidaires.

⁽¹⁹⁾ Le flux sous un pôle d'une machine à excitation par aimants permanents peut être considéré constant.

mcc. Exercice 7 : Ponts redresseurs monophasés associés à un moteur à courant continu.

(Aucune connaissance des ponts redresseurs n'est nécessaire).

Seul le régime permanent (périodique) sera étudié.

L'objectif de ce problème est d'étudier l'association pont redresseur commandé et moteur à courant continu en cas de défaillance de l'inductance de lissage

La plaque signalétique du moteur à courant continu porte les indications suivantes:

| | |
|-------------------------------|------------------------------|
| Courant d'induit nominal: | $I_{a_n} = 15 \text{ A}$. |
| Tension d'induit nominale: | $U_n = 220 \text{ V}$. |
| Courant d'inducteur nominal: | $I_{d_n} = 0,72 \text{ A}$; |
| Tension d'inducteur nominale: | $U_{d_n} = 200 \text{ V}$. |
| Vitesse nominale: | 1500 tr/min . |

Le moteur est supposé « parfaitement compensé ».

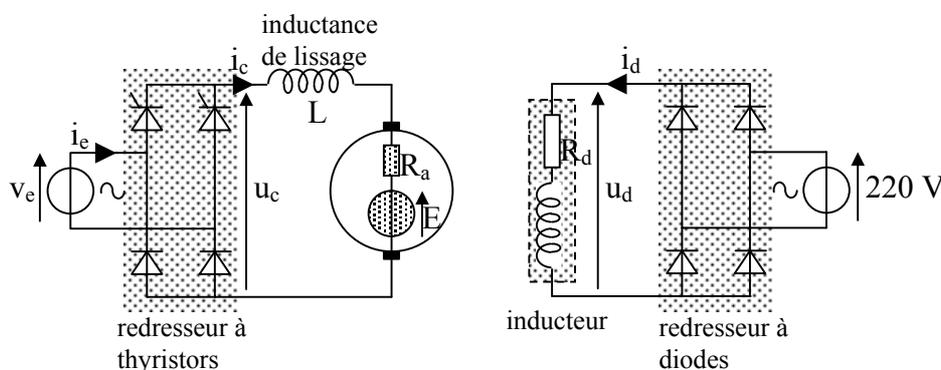
Un **pont redresseur à thyristors** est alimenté sous une tension v_e alternative sinusoïdale 220V/50Hz. Il est uniquement constitué de composants électroniques se comportant comme des interrupteurs parfaits; **il ne consomme donc aucune puissance**.

En sortie du pont, la tension redressée $u_c(t)$ (voir ci-après) alimente l'induit du moteur à courant continu en série avec son inductance de lissage L .

L'inducteur de la machine est un bobinage de résistance interne R_d . Il est alimenté sous une tension redressée $u_d(t)$ (représentée ci-après). L'inducteur étant **très inductif**, le courant qui le traverse est **presque constant** ($i_d(t) \approx \text{cte}$).

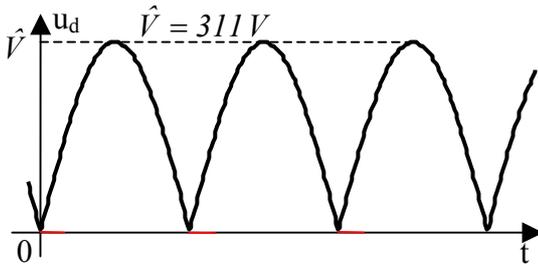
Du point de vue électrique, l'induit du moteur à courant continu se comporte comme une résistance interne R_a de $1,92 \Omega$ en série avec une f.e.m. E .

Dans les conditions de fonctionnement envisagées, les pertes mécaniques et fer du moteur sont constantes: $P_{mf} = 120 \text{ W}$.



La commande du pont à thyristor est établie par une boucle de contre réaction de façon à maintenir la vitesse de rotation de l'ensemble tournant à une valeur constante.

a) Etude du circuit inducteur.



Calculer la résistance R_d de l'inducteur à partir des informations de la plaque signalétique.

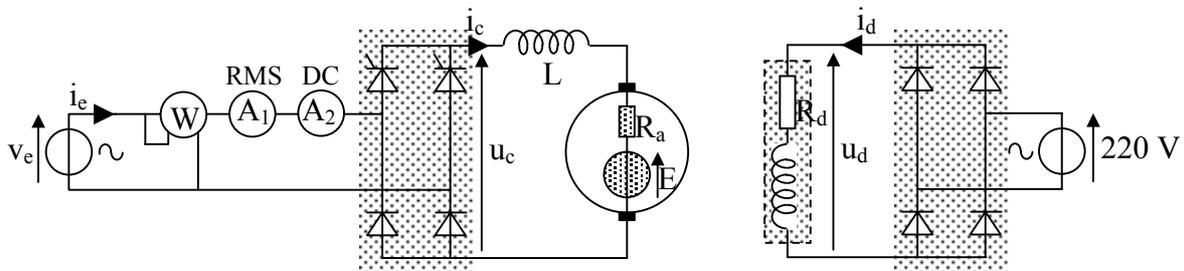
Pour le montage ci-dessus, calculer la tension moyenne aux bornes de l'inducteur.

Celui-ci étant modélisé par un circuit série RL, calculer le courant moyen $I_{d_{moy}}$ qui le traverse.

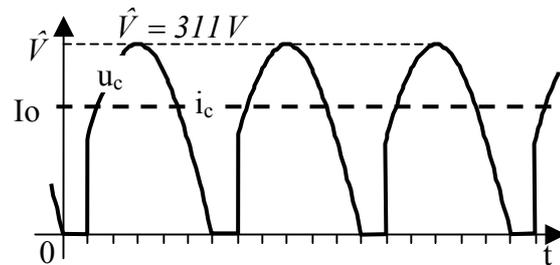
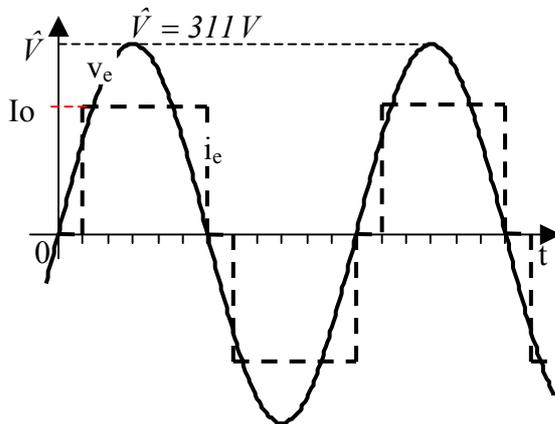
En déduire que la f.e.m. dans l'induit est constante (Par la suite, on considérera $E = 156 V$).

Calculer la puissance active absorbée par le dipôle inducteur et perdue (par effet Joule) dans ce dernier.

b) La valeur de l'inductance de lissage est suffisamment grande pour qu'on puisse considérer le courant $i_c(t)$ dans l'induit quasiment constant [$i_c(t) \approx I_o = constante$].



$v_e(t)$, $i_e(t)$, $u_c(t)$ et $i_c(t)$ sont représentés ci-après.



b.1) Calculer $U_{c_{moy}}$; en déduire que $I_o=15A$.

b.2) Déterminer l'indication du wattmètre W.

b.3) Déterminer l'indication de l'ampèremètre A_1 (RMS).

b.4) Déterminer l'indication de l'ampèremètre A_2 (en position DC).

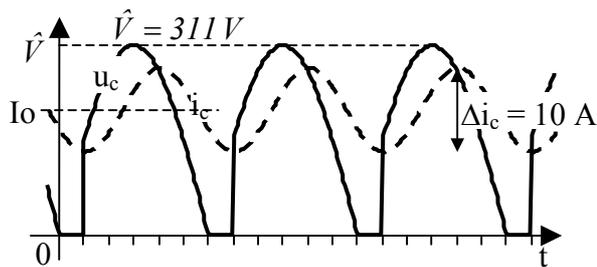
b.5) Déterminer le facteur de puissance de la ligne en entrée du montage (au niveau de v_e et i_e).

b.6) Calculer le rendement du moteur. (On prendra en compte toute la machine, c'est à dire l'inducteur et l'induit).

c) Par suite d'un court-circuit partiel de l'inductance de lissage L , celle ci "lisse" moins bien le courant i_c .

Le courant $i_c(t)$ (représenté ci-après) présente donc une "ondulation" . La composante alternative de $i_c(t)$ est assimilée à une sinusoïde (c'est une hypothèse simplificatrice: approximation au premier harmonique).

(Le courant $i_e(t)$ est également modifié par rapport à la question précédente)..



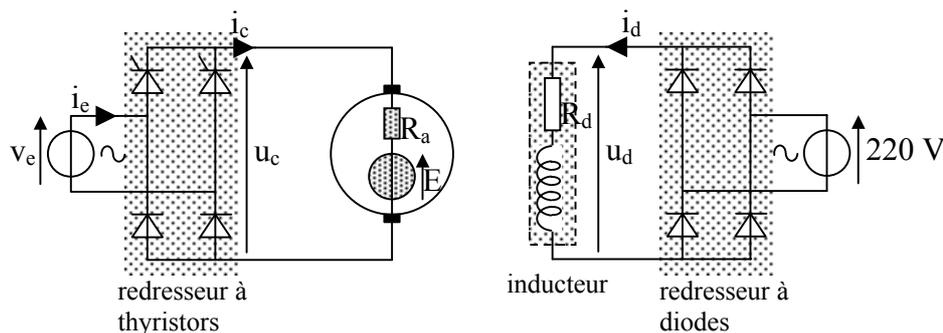
c.1) Sachant que $E = 156 V$, démontrer que $I_{c_{moy}}$ est égal à 15A.

c.2) Montrer que $I_{c_{eff}} = 15,41 A$.

c.3) Calculer la puissance active absorbée par le circuit de l'induit au niveau de $v_e(t)$ et $i_e(t)$ (en utilisant le fait que la puissance est "conservative").

En déduire le rendement de l'ensemble moteur+inductance de lissage. (On prendra en compte toute la machine, c'est à dire l'inducteur et l'induit).

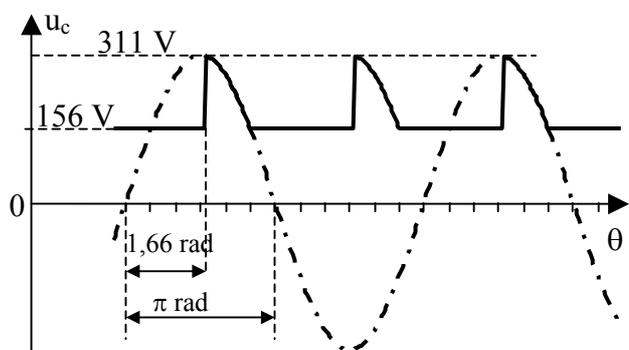
d) Pendant la réparation de l'inductance de lissage, le montage fonctionne sans elle.



La f.e.m. E du moteur reste inchangée (sa valeur est constante: $E = 156 V$).

La tension $u_c(t)$ est modifiée; sa représentation est donnée ci-dessous (en trait fort).

(Le courant $i_e(t)$ est également modifié par rapport à la question précédente).



d.1) Représenter $i_c(t)$, puis calculer I_{cmax} et I_{cmoy} .

(I_{ceff} n'est pas à calculer; sa valeur est: $I_{ceff} = 30,9 A$).

d.2) Calculer la puissance active absorbée par l'induit (en utilisant le fait que la puissance est "conservative").

En déduire le rendement du moteur. (On prendra en compte toute la machine, c'est à dire l'inducteur et l'induit).

e) Conclusion.

Le moteur admet un courant maximal impulsionnel de $2.Ia_n$ (limite acceptable par les contacts balais collecteur), et un courant de surcharge permanent de 25% par rapport à Ia_n (limite d'échauffement). ($Ia_n=15A$).

Conclure sur les trois situations envisagées précédemment.

5 Réponses aux questions du cours

Réponse 1:

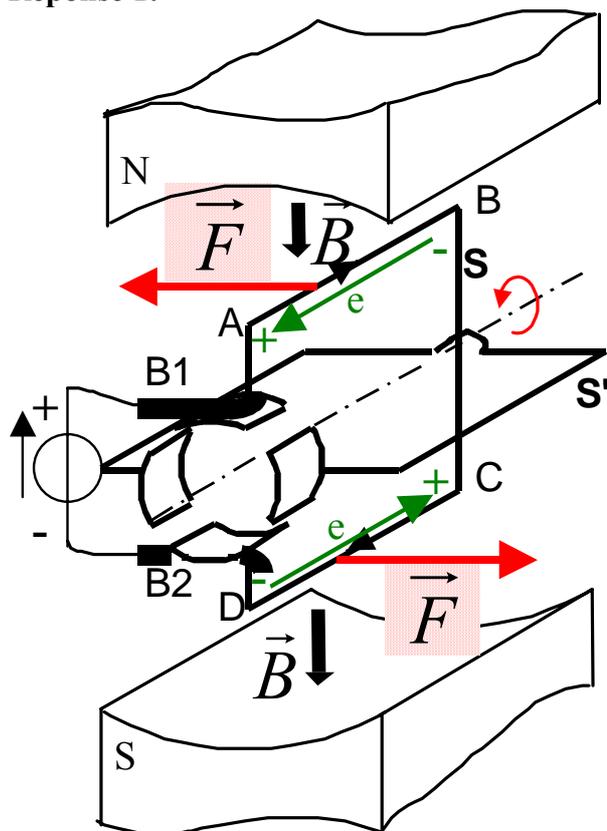


Figure 1

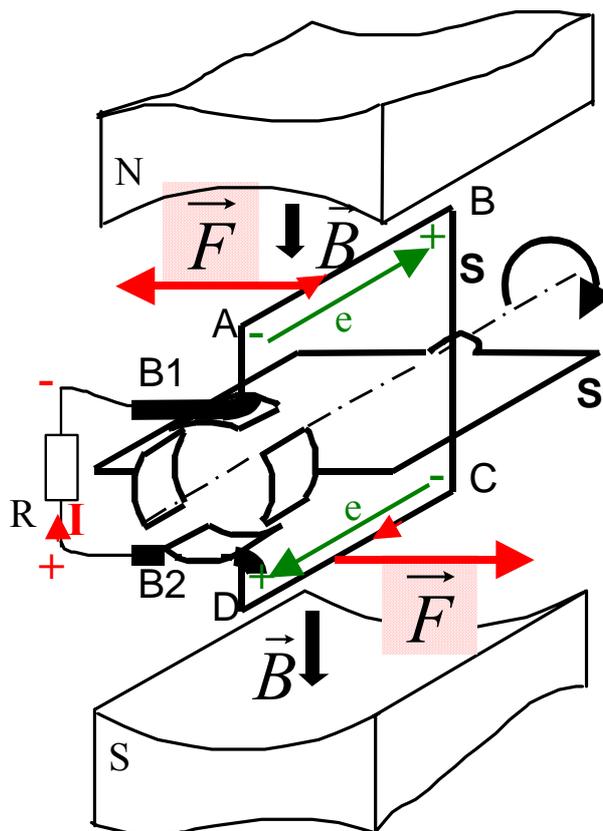


Figure 2

L'ensemble balais collecteur permet d'établir une liaison électrique entre la partie tournante et l'extérieur de la machine.

Lors de la rotation, les lames du collecteur en contact avec les balais changent, ce qui permet de garder un sens constant au couple des forces.

Le sens de la f.e.m. « vue » entre les balais est également de sens constant lors de la rotation du rotor de la machine.

[Retour](#)

Réponse 2:

| | | | |
|--------------|---------------|-------------|---------------|
| quadrant II | | quadrant I | |
| | | | |
| Génératrice | | | |
| | sens rotation | sens couple | sens rotation |
| quadrant III | | quadrant IV | |
| | | | |
| Moteur | | | |
| | sens rotation | sens couple | sens rotation |
| | | | |
| | | | sens couple |

[Retour](#)

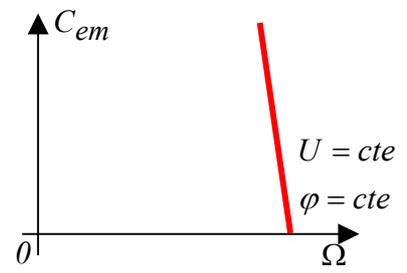
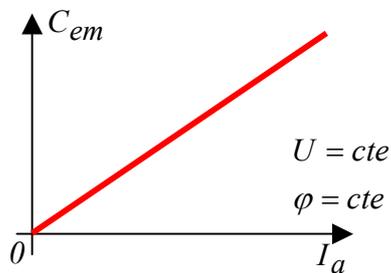
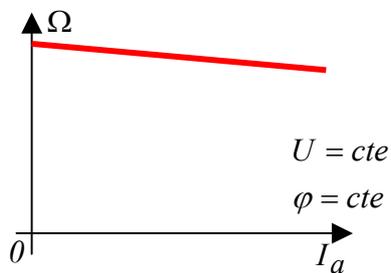
Réponse 3:

$$\Omega = \frac{E}{k \cdot \varphi} = \frac{U - R_a \cdot I_a}{k \cdot \varphi} = \frac{U}{k \cdot \varphi} - \frac{R_a \cdot I_a}{k \cdot \varphi} ; C_{em} = k \cdot \varphi \cdot I_a ;$$

$$C_{em} = k \cdot \varphi \cdot I_a = k \cdot \varphi \cdot \left(\frac{U - E}{R_a} \right) = k \cdot \varphi \cdot \left(\frac{U - k \cdot \varphi \cdot \Omega}{R_a} \right) = \frac{k \cdot \varphi \cdot U}{R_a} - \frac{(k \cdot \varphi)^2 \cdot \Omega}{R_a}$$

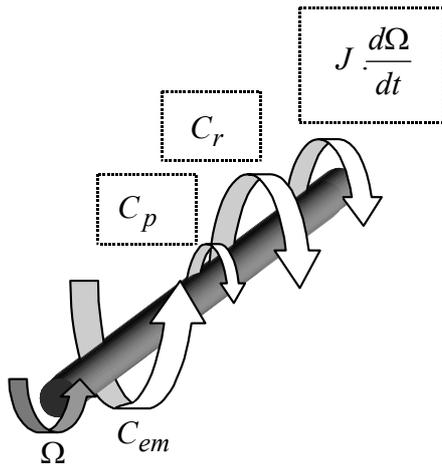
[Retour](#)

Réponse 4:



[Retour](#)

Réponse 5:



[Retour](#)

Réponse 6:

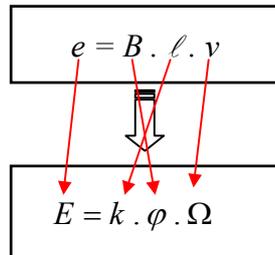
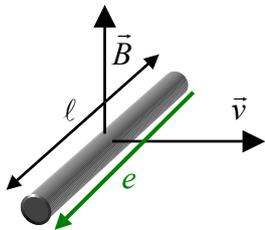


figure 1

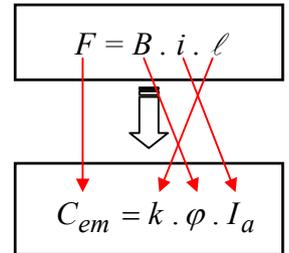
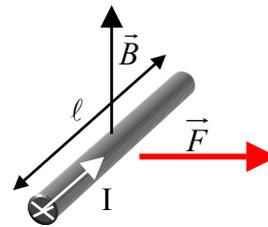


figure 2

[Retour](#)