

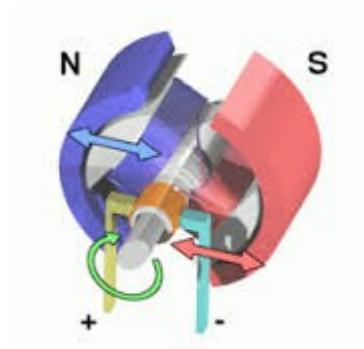
LA MACHINE À COURANT CONTINU

Table des matières

1. Présentation.....	2
1.1. Généralités.....	2
1.2. Description.....	3
1.2.1. Vue d'ensemble.....	3
1.2.2. L'inducteur.....	3
1.2.3. L'induit.....	3
1.2.4. Collecteur et balais.....	4
2. Principe de fonctionnement.....	4
3. Fonctionnement en génératrice.....	6
3.1. Fonctionnement à vide.....	6
3.2. Fonctionnement sur charge résistive.....	7
3.3. Point de fonctionnement sur charge résistive.....	9
3.4. Bilan des puissances.....	9
4. Fonctionnement en moteur.....	12
4.1. Fonctionnement en charge.....	12
4.2. Loi d'Ohm.....	13
4.3. Plaque signalétique du moteur.....	13
4.4. Bilan des puissances.....	14
4.5. Essai à vide.....	17
4.6. Essai en charge.....	17
4.7. Point de fonctionnement.....	18
4.8. Le risque d'emballement du moteur.....	18

Une machine à courant continu est une machine électrique. Il s'agit d'un convertisseur électromécanique permettant la conversion bidirectionnelle d'énergie entre une installation électrique parcourue par un courant continu et un dispositif mécanique ; selon la source d'énergie.

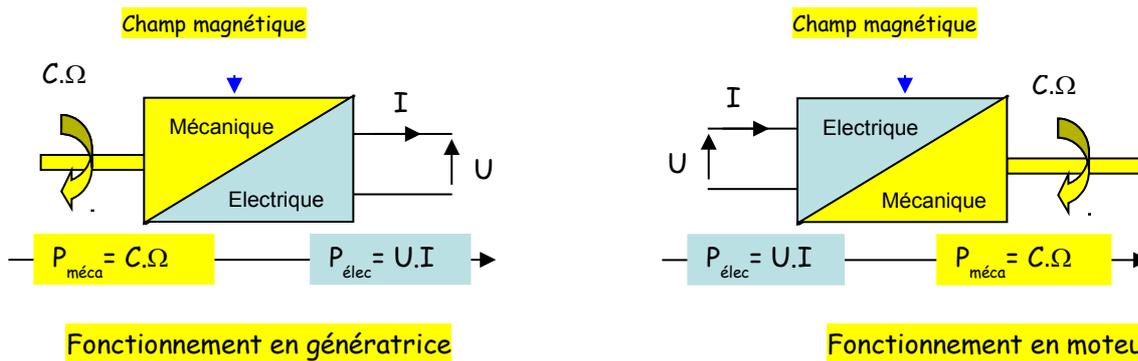
- En fonctionnement moteur, l'énergie électrique est transformée en énergie mécanique.
- En fonctionnement générateur, l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique (elle peut se comporter comme un frein). Dans ce cas elle est aussi appelée dynamo.



1. Présentation

1.1. Généralités

La machine à courant continu est un convertisseur d'énergie, totalement réversible, elle peut fonctionner soit en moteur, convertissant de l'énergie électrique en énergie mécanique, soit en génératrice, convertissant de l'énergie mécanique en énergie électrique. Dans les deux cas un champ magnétique est nécessaire aux différentes conversions. Cette machine est donc un convertisseur électromécanique.



Les MCC sont essentiellement utilisées en moteur. Cependant, lors des phases de freinage, il arrive qu'une MCC fonctionne en génératrice.

- L'énergie mécanique se caractérise par un couple de moment C associé à une vitesse angulaire Ω , le produit de ces deux grandeurs définit la puissance mécanique :

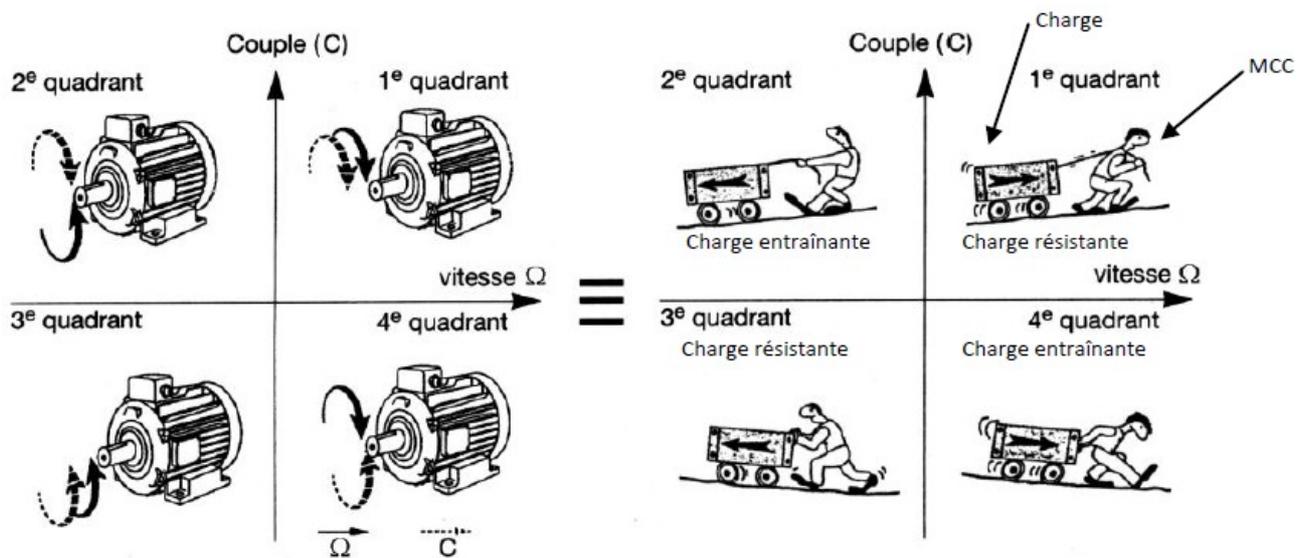
$P_{méca} = C.\Omega$	$P_{méca}$	Puissance mécanique en watts [W]
	C	Moment du couple mécanique en newton-mètres [Nm]
	Ω	La vitesse angulaire en radians par seconde [rad.s ⁻¹]

- L'énergie électrique est évaluée par un courant continu I et une tension continue U , la puissance électrique sera le produit de ces deux grandeurs :

$P_{élec} = U.I$	$P_{élec}$	Puissance électrique en watts [W]
	U	La tension en volts [V]
	I	L'intensité du courant en ampères [A]

Énergie absorbée	Fonctionnement	Énergie fournie
Électrique	Moteur	Mécanique
Mécanique	Génératrice	Électrique

On peut représenter les différents modes de fonctionnement de la machine dans le plan Couple (Vitesse), qui délimite donc maintenant 4 quadrants :



- Les quadrants Q1 et Q3 correspondent à un fonctionnement moteur : la puissance utile $P_u = C \cdot \Omega$ est positive, le moteur fournit de l'énergie mécanique à la charge.
- Les quadrants Q2 et Q4 correspondent à un fonctionnement en génératrice : la puissance utile $P_u = C \cdot \Omega$ est négative, le moteur reçoit de l'énergie mécanique de la charge.

1.2. Description

1.2.1. Vue d'ensemble

La machine à courant continu comporte les parties principales suivantes :

- Une partie fixe appelée STATOR qui aura le rôle d'inducteur.
- Une partie mobile appelée ROTOR qui aura le rôle d'induit.
- Une liaison rotor - éléments extérieurs à la machine appelée COLLECTEUR.

1.2.2. L'inducteur

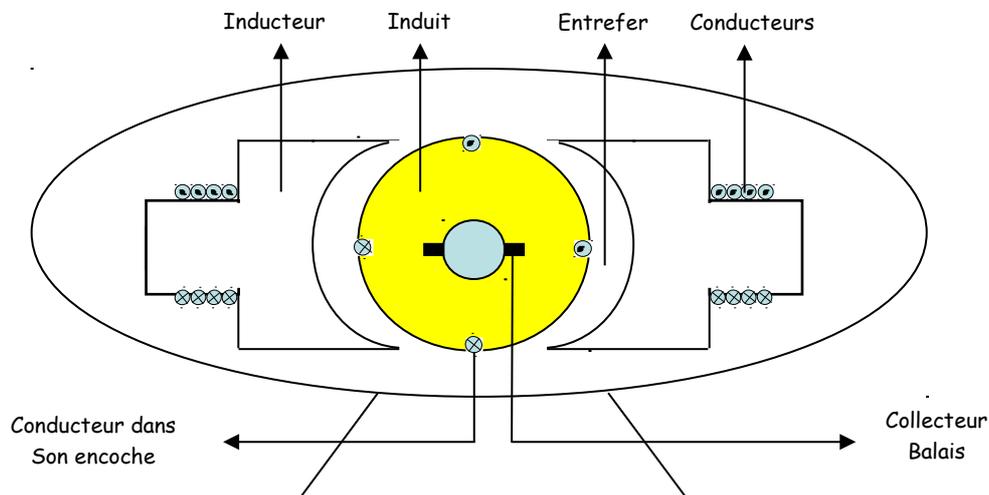
Il est formé soit d'aimants permanents en ferrite soit de bobines placées autour des noyaux polaires. Lorsque les bobines sont parcourues par un courant continu, elles créent un champ magnétique dans le circuit magnétique de la machine notamment dans l'entrefer, espace séparant la partie fixe et la partie mobile, où se situent les conducteurs. Ce flux et ce champ sont orientés du pôle Nord vers le pôle Sud.

1.2.3. L'induit

Le noyau d'induit est en fer pour canaliser les lignes de champ, les conducteurs sont logés dans des encoches sur le rotor, deux conducteurs forment une spire.

1.2.4. Collecteur et balais

Le collecteur est un ensemble de lames de cuivre isolées, disposées sur l'extrémité du rotor, les balais portés par le stator frottent sur le collecteur.



Vue du Moteur à courant continu



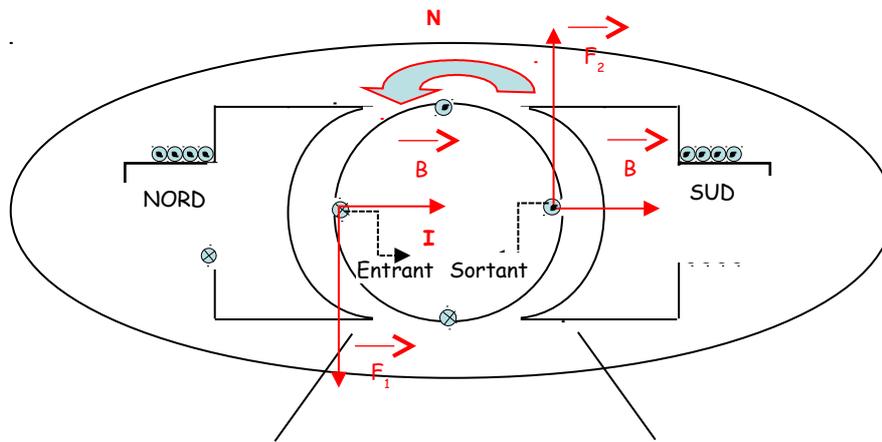
2. Principe de fonctionnement

Une machine à courant continu possède un nombre n de conducteurs actifs au niveau de l'induit. Le flux utile sous un pôle créé par l'inducteur est Φ exprimé en webers, et N représente la fréquence de rotation de l'arbre du rotor, en tours par seconde.

Deux cas peuvent se présenter :

- Soit un conducteur est à la fois traversé par un courant électrique et plongé à l'intérieur d'un champ magnétique, il est alors soumis à une force électromagnétique.
- Soit un conducteur est à la fois en mouvement de rotation et plongé à l'intérieur d'un champ magnétique, il est alors le siège d'une force électromotrice

Ces deux cas peuvent être décrits par le schéma suivant :



Courant + Champ magnétique



Force Électromagnétique

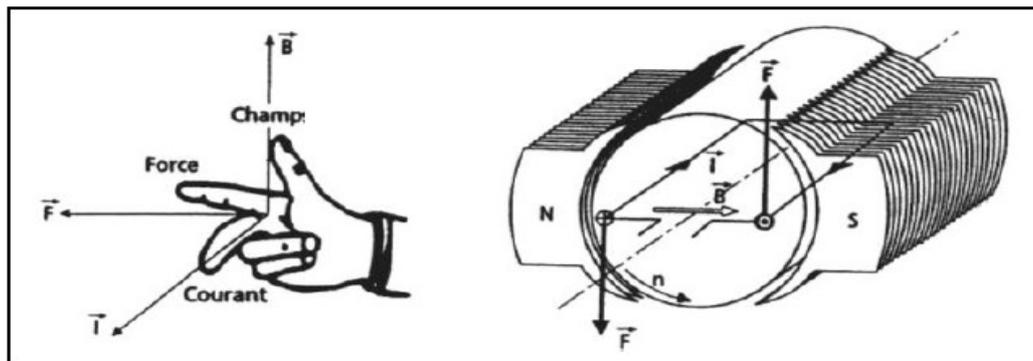
Force + Champ magnétique



Force Électromotrice

La Loi de Laplace affirme que l'action d'un champ magnétique B sur un courant I dans un conducteur de longueur L , produit une force F : $\vec{F} = I \cdot \vec{L} \wedge \vec{B}$

La résultante de toutes les forces appliquées se traduit par un couple, qui fait tourner le moteur.



Les conducteurs actifs, de nombre n , coupent les lignes du champ magnétique. D'après la loi de Lenz-

Faraday, chaque conducteur est donc le siège de forces électromotrices induites $e = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = n \cdot N \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$,

la force électromotrice f.e.m résultante de l'ensemble de ces N spires :

$$E = n \cdot N \cdot \Phi$$

- | | |
|---|---|
| E | La f.e.m en volts [V] |
| N | La fréquence de rotation en tours par seconde [tr.s ⁻¹] |
| Φ | Le flux en webers [Wb] |
| n | Le nombre de conducteurs actifs |

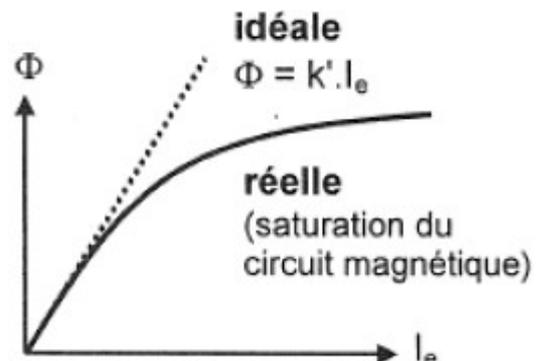
- Cette relation est essentielle pour la machine, car elle est le lien entre le flux Φ une grandeur magnétique, la tension E une grandeur électrique, et la fréquence de rotation N , une grandeur mécanique.
- Sachant que $\Omega = 2\pi \cdot N$, une autre relation, reliant les trois types de grandeurs, est fréquemment utilisée, elle prend en compte la vitesse angulaire Ω exprimée en radians par seconde :

$$E = K \cdot \Phi \cdot \Omega$$

- E La f.e.m en volts [V]
- Ω La vitesse angulaire en radians par seconde [rad.s⁻¹]
- Φ Le flux en webers [Wb]
- K Constante

Remarque : pour une machine à inducteur bobiné tournant à vitesse angulaire constante, la fém est proportionnelle au courant d'excitation I_e si le circuit magnétique n'est PAS SATURÉ :

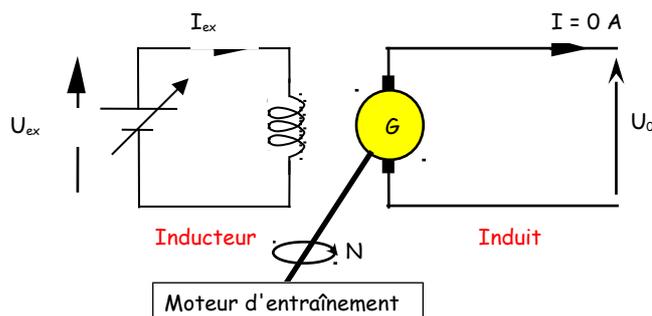
$$E = k \cdot (I_e) \cdot \Omega = k' \cdot I_{e,\Omega}$$



3. Fonctionnement en génératrice

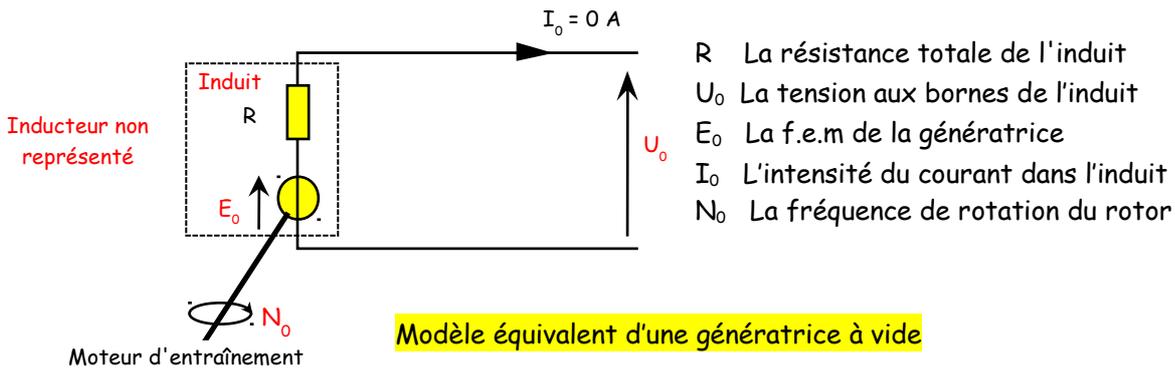
3.1. Fonctionnement à vide

Le rotor de la machine est entraîné par une source extérieure à la fréquence de rotation n . Nous dirons que la génératrice fonctionne à vide lorsqu'elle ne débite aucun courant.

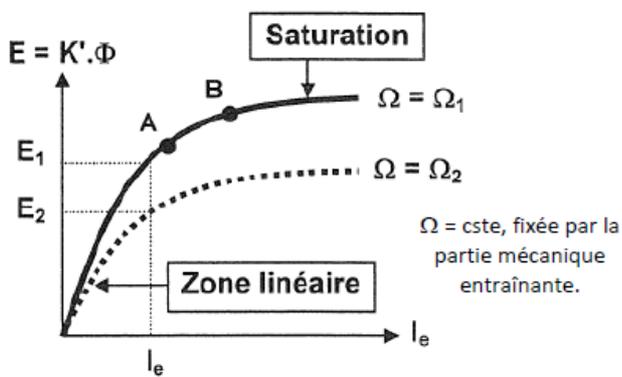


Fonctionnement d'une génératrice à vide

La relation $E = n \cdot N \cdot \phi$ se caractérise donc par deux constantes, le nombre de conducteurs n , et la fréquence de rotation N avec laquelle est entraînée la génératrice. La f.e.m E est dans ce cas proportionnelle au flux ϕ , elle est donc à un coefficient près l'image de la courbe de magnétisation de la machine. L'indice «₀» caractérise le fonctionnement à vide.



La tension U_0 mesurée directement sur l'induit de la génératrice est exactement égale à la f.e.m E_0 de la machine car l'intensité du courant est nulle, il n'y a donc pas de chute de tension due à la résistance de l'induit.



Cette caractéristique est en fait valable aussi bien en moteur qu'en génératrice. Elle montre que la zone utile de fonctionnement d'une machine se situe au voisinage de A.

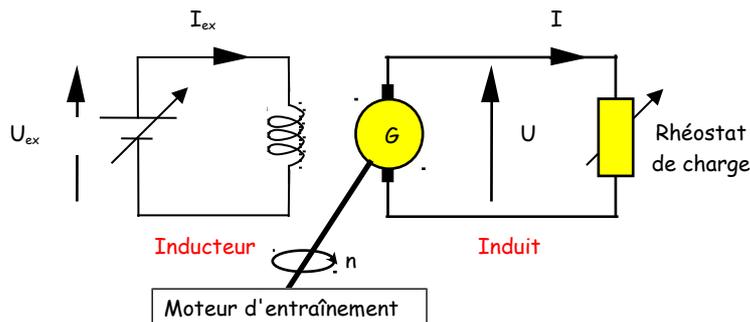
Sous le point A, la machine est sous utilisée et après le point B, les possibilités de la machine n'évoluent plus mais les pertes par effet Joule dans l'inducteur augmentent puisque le augmente.

$$k_e = \frac{E_1}{\Omega_1} = \frac{E_2}{\Omega_2}$$

dans la zone linéaire, si $\Phi = \text{cste}$, donc si $I_e = \text{cste}$.

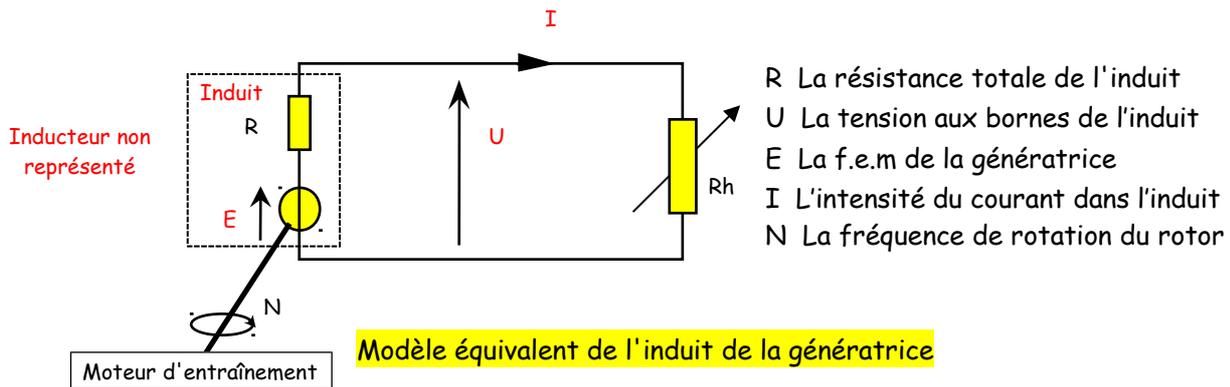
3.2. Fonctionnement sur charge résistive

La génératrice est entraînée par un moteur auxiliaire, elle débite un courant d'intensité I dans un rhéostat de charge



Fonctionnement d'une génératrice en charge

L'induit de la génératrice peut être remplacé par son modèle équivalent :



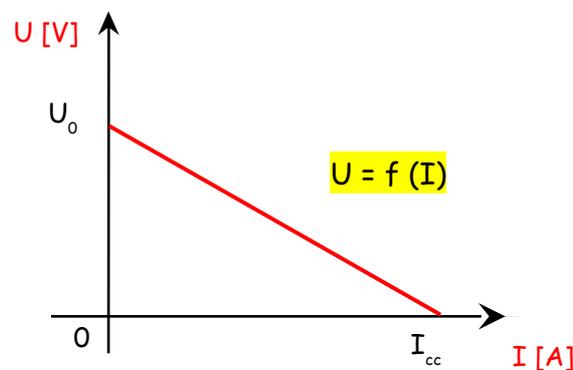
La loi d'Ohm de l'induit se déduit facilement de son modèle équivalent :

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

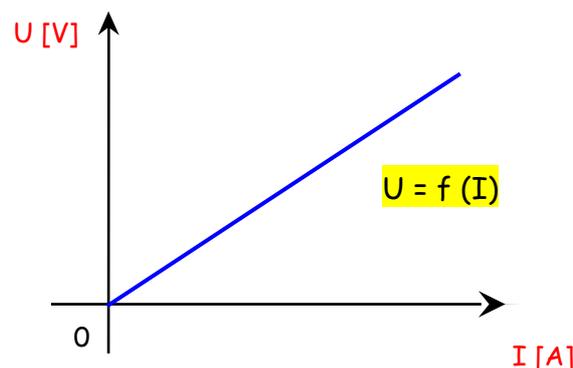
U	La tension aux bornes de l'induit en volts [V]
E	La f.e.m de la génératrice en volts [V]
R	La résistance de l'induit en ohms [Ω]
I	L'intensité du courant dans l'induit en ampères [A]

Suivant les valeurs prises par la charge résistive, le moment du couple (U ; I) de la tension aux bornes de l'induit et de l'intensité du courant dans l'induit ne peut se déplacer que sur la droite déterminée par deux valeurs particulières :

- U_0 valeur maximale de la tension aux bornes de l'induit de la génératrice à vide, $I = 0$ A
- I_{cc} valeur maximale de l'intensité du courant dans l'induit court-circuité, $U = 0$ V

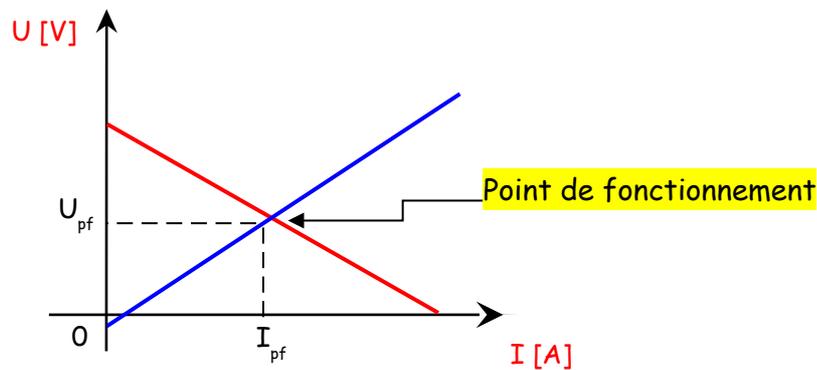


Nous pouvons tracer la caractéristique de la charge ohmique R en utilisant la loi d'Ohm, le moment du couple (U ; I) de la tension aux bornes de la charge et de l'intensité du courant qui la traverse se déplace que sur la droite de coefficient directeur égal à la valeur de R :



3.3. Point de fonctionnement sur charge résistive

Le point de fonctionnement du groupe Induit - Charge résistive peut se déterminer graphiquement. Il correspond au fonctionnement simultané de l'alimentation et du récepteur. Les deux couples (courant ; tension) issus des deux caractéristiques doivent impérativement être égaux puisqu'ils sont associés, ainsi :



Évaluation graphique du point de fonctionnement

Le point de fonctionnement peut également se calculer à partir des deux équations :

$$\begin{cases} U = E - R.I \\ U = R_h.I \end{cases}$$

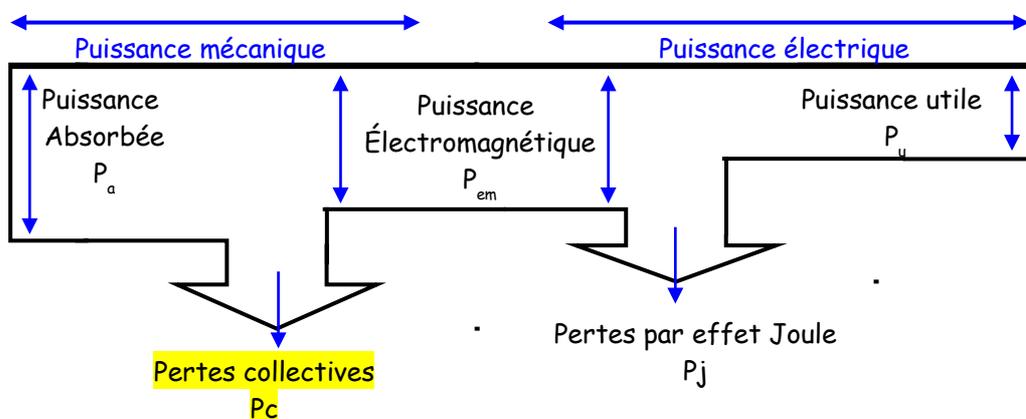
Le point d'intersection (U_{pf} ; I_{pf}) de ces deux droites donne les grandeurs communes aux deux dipôles.

3.4. Bilan des puissances

Le bilan des puissances décline toutes les puissances, depuis la puissance absorbée d'origine mécanique jusqu'à la puissance utile de nature électrique.

Entre ces deux termes, l'étude se portera sur toutes les pertes aussi bien mécaniques qu'électriques, et enfin une puissance sera étudiée tout particulièrement, elle correspond au passage de la puissance mécanique à la puissance électrique.

Le bilan, peut être résumé à l'aide schéma suivant :



Bilan des puissances d'une génératrice

La génératrice reçoit une puissance P_a , produit du moment du couple mécanique T provenant d'un système auxiliaire et de la vitesse angulaire Ω .

Toutes les puissances mises en jeu dans ce bilan peuvent être calculées à partir des relations qui suivent.

$P_a = C \cdot \Omega$ <p>Mécanique</p>	P_a La puissance absorbée en watts [W] C Le moment du couple mécanique en newton-mètres [N.m] Ω La vitesse angulaire en en radians par seconde [rad.s ⁻¹]
$P_c = C_p \cdot \Omega$ <p>Mécanique</p>	P_c Les pertes collectives en watts [W] C_p Le moment du couple de pertes en newton-mètres [N.m] Ω La vitesse angulaire en en radians par seconde [rad.s ⁻¹]
$P_{em} = C_{em} \cdot \Omega$ <p>Mécanique</p> <p style="font-size: 2em; color: blue;">↕</p> $P_{em} = E \cdot I$ <p>Electrique</p>	P_{em} La puissance électromagnétique en watts [W] C_{em} Le moment du couple électromagnétique en newton-mètres [N.m] Ω La vitesse angulaire en en radians par seconde [rad.s ⁻¹] P_{em} La puissance électromagnétique en watts [W] E La fem de la génératrice en volts [V] I L'intensité du courant dans l'induit en ampères [A]
$P_j = R \cdot I^2$ <p>Electrique</p>	P_j Les pertes par effet Joule en watts [W] R La résistance de l'induit en ohms [Ω] I^2 L'intensité du courant dans l'induit en ampères ² [A ²]
$P_u = U \cdot I$ <p>Electrique</p>	P_u La puissance utile en watts [W] U La tension délivrée par l'induit de la génératrice en volts [V] I L'intensité du courant dans l'induit en ampères [A]

Le bilan met en évidence le fait que la puissance absorbée est obligatoirement la puissance la plus importante, elle ne cesse de diminuer en progressant vers la puissance utile qui est évidemment la plus faible, ainsi :

Et

$P_{em} = P_a - P_c$ <p>Mécanique</p>	P_{em} La puissance électromagnétique en watts [W] P_a La puissance absorbée en watts [W] P_c Les pertes collectives en watts [W]
---------------------------------------	---

Donc

$P_u = P_{em} - P_j$ <p>Electrique</p>	P_u La puissance utile en watts [W] P_{em} La puissance électromagnétique en watts [W] P_j Les pertes par effet Joule en watts [W]
--	--

$P_u = P_a - P_c - P_j$ <p> { Mécanique } Electrique </p>	P_u La puissance utile en watts [W] P_a La puissance absorbée en watts [W] P_c Les pertes collectives en watts [W] P_j Les pertes par effet Joule en watts [W]
--	---

- P_c représente la somme des pertes mécaniques et des pertes magnétiques dans la génératrice. T_p est le moment du couple de pertes correspondant à cette puissance perdue.

- Les pertes magnétiques dues à l'hystérésis et aux courants de Foucault se produisent dans les tôles du rotor.
- Les pertes mécaniques dues aux frottements se situent au niveau des paliers.

Le rendement est le rapport entre la puissance électrique utile et la puissance mécanique absorbée par l'induit, d'où :

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

η	Rendement de l'induit de la génératrice [sans unités]
P_u	La puissance utile en watts [W]
P_a	La puissance absorbée en watts [W]

Le rendement de la génératrice complète tient compte de la puissance absorbée par l'inducteur, P_{ex} , dans la mesure où celui-ci est alimenté électriquement. Cette puissance sert uniquement à magnétiser la machine, toute la puissance active absorbée par le circuit d'excitation est entièrement consommée par effet Joule donc :

$$P_{ex} = U_{ex} \cdot I_{ex}$$

P_{ex}	La puissance absorbée par l'inducteur en watts [W]
U_{ex}	La tension d'alimentation de l'inducteur en volts [V]
I_{ex}	L'intensité du courant dans l'inducteur en ampères [A]

$$P_{ex} = r \cdot I_{ex}^2$$

P_{ex}	La puissance absorbée par l'inducteur en watts [W]
r	La résistance de l'inducteur en ohms [Ω]
I_{ex}^2	L'intensité du courant dans l'inducteur en ampères ² [A^2]

$$P_{ex} = \frac{U_{ex}^2}{r}$$

P_{ex}	La puissance absorbée par l'inducteur en watts [W]
U_{ex}^2	La tension d'alimentation de l'inducteur en volts ² [V^2]
r	La résistance de l'inducteur en ohms [Ω]

Le rendement est donc

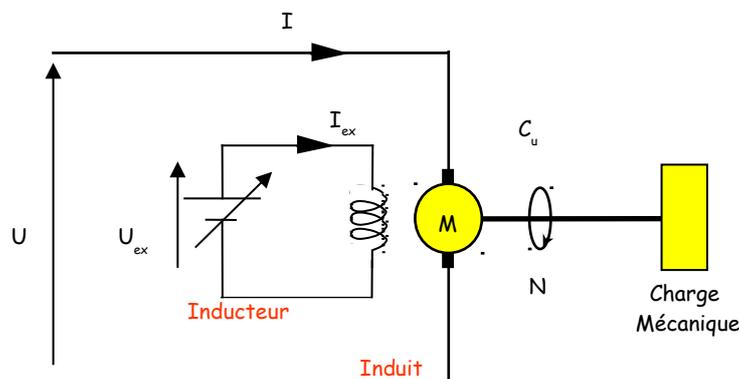
$$\eta = \frac{P_u}{P_a + P_{ex}}$$

η	Rendement de la machine complète [sans unités]
P_u	La puissance utile en watts [W]
P_a	La puissance absorbée en watts [W]

4. Fonctionnement en moteur

4.1. Fonctionnement en charge

L'induit du moteur est alimenté par une seconde source de tension continue, il entraîne une charge mécanique à la fréquence de rotation N .



Fonctionnement d'un moteur en charge

La puissance électromagnétique P_{em} donne naissance au couple électromagnétique C_{em} . C'est cette puissance qui, aux pertes près, est transformée en puissance utile sur l'arbre.

On a : $P_{em} = E \cdot I = C_{em} \cdot \Omega$, soit $C_{em} = k_e \cdot \Phi \cdot I$

Le couple électromagnétique est proportionnel, à flux constant, au courant d'induit absorbé par la machine.

- Compte-tenu des pertes, le couple utile C_u (ou couple moteur C_m) dont on dispose sur l'arbre du moteur est en réalité légèrement inférieur au couple électromagnétique C_{em} : $C_u = C_{em} - C_p$
- Le couple de pertes $C_p = C_{em} - C_u$ est dû :
 - aux pertes ferromagnétiques dans le rotor (hystérésis et courants de Foucault) ;
 - aux pertes mécaniques : frottements aux paliers et aux contacts balais-collecteur, ventilation.

Il se déduit d'un essai à vide pour lequel le courant d'induit est égal à I_0 : $C_p = k_e \cdot \Phi \cdot I_0$, ce qui conduit à :

$$C_u = k_e \cdot \Phi \cdot (I - I_0)$$

A flux constant et au couple de pertes près, le courant d'induit absorbé par la machine est proportionnel au couple mécanique demandé par la charge à entraîner (on fait l'approximation $I_0 = 0$, soit $C_p = 0$, dans ce cas).

On exprime la vitesse de rotation du moteur par :

$$U = E + R \cdot I \quad \longrightarrow \quad \Omega = \frac{U - R \cdot I}{k_e} = \frac{U}{k_e} - \frac{R \cdot I}{k_e} = \Omega_0 - \frac{R \cdot I}{k_e}$$

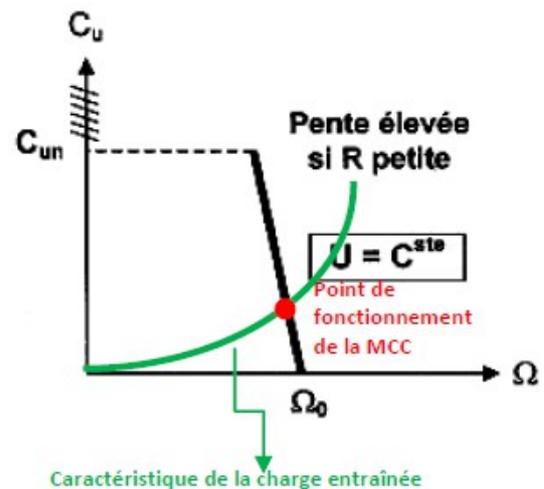
$$E = k_e \cdot \Phi$$

$$\Omega_0 = \frac{U}{K_e} \quad \text{est la vitesse du moteur à vide si } I_0 = 0.$$

dans ce cas :

$$I = \frac{k_e}{R} \cdot (\Omega_0 - \Omega)$$

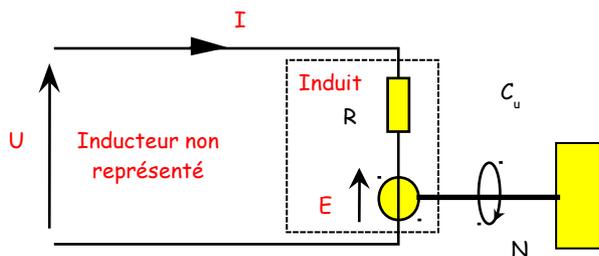
$$C_u = k_c \cdot I \Rightarrow C_u = \frac{k_e \cdot k_c}{R} \cdot (\Omega_0 - \Omega)$$



Remarque : c'est la principale caractéristique d'un MCC. Il faut l'associer à la caractéristique couple-vitesse de la charge entraînée pour situer le point de fonctionnement.

4.2. Loi d'Ohm

L'induit du moteur peut être remplacé par son modèle équivalent :



- R La résistance totale de l'induit
- U La tension aux bornes de l'induit
- E La fem du moteur
- I L'intensité du courant dans l'induit
- N La fréquence de rotation du rotor

Modèle équivalent de l'induit du moteur

La loi d'Ohm de l'induit se déduit facilement de son modèle équivalent :

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

- U La tension aux bornes de l'induit en volts [V]
- E La f.e.m du moteur en volts [V]
- R La résistance de l'induit en ohms [Ω]
- I L'intensité du courant dans l'induit en ampères [A]

4.3. Plaque signalétique du moteur

La plaque signalétique d'un moteur donne de précieux renseignements, ils concernent le fonctionnement le mieux approprié, c'est-à-dire celui qui permet un très bon rendement, pas forcément le plus élevé, mais qui assure une très bonne longévité de la machine. Les valeurs mentionnées pour l'induit, sont appelées les valeurs nominales, elles ne doivent pas être dépassées de plus de 1,25 fois, elles se décomposent ainsi :

- U Tension nominale à appliquer aux bornes de l'induit.
- I Intensité nominale du courant dans l'induit
- N Fréquence de rotation nominale du rotor
- P_u Puissance utile nominale, d'origine mécanique délivrée par le moteur.

Ci-dessous l'exemple de la plaque signalétique de la machine à courant continu du téléphérique du Pic du Midi.

ABB		CE		GLEICHSTROMMASCHINE MACHINE À COURANT CONTINU DIRECT CURRENT MACHINE	
No.	HM 2352120	1998-08	Typ. DMA+ 315 S 62 V		
P	400	kW	m _{rot.} 595	kg	m _{tot.} 2010 kg
n	1373	1 / min	J 9.54	kg m ²	IC 06
U	420	V	U _e 260	v	IM 1001
I	1009	A	I _e 11.2	A	IP 23
Duty	S1		El. IEC 34-1		Cl. H / F
2880 M.N.N.		Δp 18.0	mbar	V 0.94	m ³ /s
MOTOR					

On en tire :

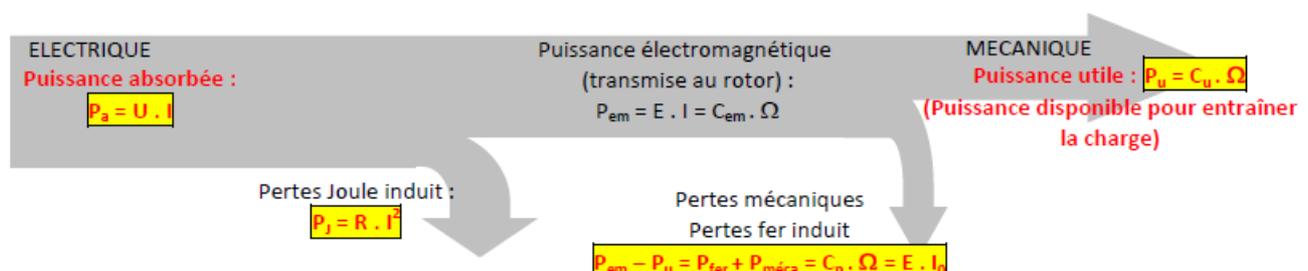
Caractéristiques électriques nominales		Caractéristiques mécaniques nominales
Induit	inducteur	
Un = 420 V In = 1009 A	Uen = 260 V Ien = 11,2 A	Pun = 400 kW N = 1373 tr/min Cun = 2880 N.m

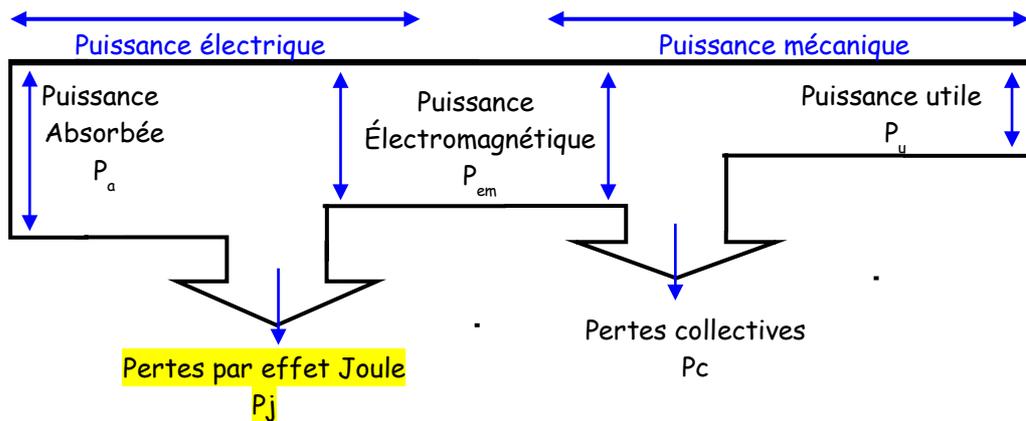
4.4. Bilan des puissances

Le bilan des puissances décline toutes les puissances, depuis la puissance absorbée d'origine électrique jusqu'à la puissance utile de nature mécanique.

Entre ces deux termes, l'étude se portera sur toutes les pertes aussi bien mécaniques qu'électriques, et enfin une puissance sera étudiée tout particulièrement, elle correspond au passage de la puissance électrique à la puissance mécanique.

Le bilan, peut être résumé à l'aide schéma suivant :





Bilan des puissances d'un moteur

Toutes les puissances mises en jeu dans ce bilan peuvent être calculées à partir des relations qui suivent.

Le moteur reçoit une puissance P_a , produit de la tension, appliquée sur les bornes de l'induit et de l'intensité du courant qui le traverse.

$P_a = U \cdot I$ <p style="color: red; text-align: center;">Electrique</p>	P_a La puissance absorbée en watts [W] U La tension aux bornes de l'induit en volts [V] I L'intensité du courant dans l'induit en ampères [A]
$P_j = R \cdot I^2$ <p style="color: red; text-align: center;">Electrique</p>	P_j Les pertes par effet Joule dans l'induit en watts [W] R La résistance de l'induit en ohms [Ω] I^2 L'intensité du courant dans l'induit en ampères ² [A^2]
$P_{em} = E \cdot I$ <p style="color: red; text-align: center;">Electrique</p> <div style="text-align: center; margin: 5px 0;"> \updownarrow </div> $P_{em} = C_{em} \cdot \Omega$ <p style="color: red; text-align: center;">Mécanique</p>	P_{em} La puissance électromagnétique en watts [W] E La f.e.m du moteur en volts [V] I L'intensité du courant dans l'induit en ampères [A] P_{em} La puissance électromagnétique en watts [W] C_{em} Le moment du couple électromagnétique en newton-mètres [N.m] Ω La vitesse angulaire en radians par seconde [$rad.s^{-1}$]
$P_c = C_p \cdot \Omega$ <p style="color: red; text-align: center;">Mécanique</p>	P_c Les pertes collectives en watts [W] C_p Le moment du couple de pertes en newton-mètres [N.m] Ω La vitesse angulaire en radians par seconde [$rad.s^{-1}$]
$P_u = C \cdot \Omega$ <p style="color: red; text-align: center;">Mécanique</p>	P_u La puissance utile en watts [W] C Le moment du couple mécanique en newton-mètres [N.m] Ω La vitesse angulaire en radians par seconde [$rad.s^{-1}$]

Le bilan met en évidence le fait que la puissance absorbée est obligatoirement la puissance la plus importante, elle ne cesse de diminuer en progressant vers la puissance utile qui est évidemment la plus faible, ainsi :

$P_{em} = P_a - P_j$ <p>Electrique</p>	P_a La puissance absorbée en watts [W]
	P_{em} La puissance électromagnétique en watts [W]
	P_j Les pertes par effet Joule en watts [W]

Et

$P_u = P_{em} - P_c$ <p>Mécanique</p>	P_u La puissance utile en watts [W]
	P_{em} La puissance électromagnétique en watts [W]
	P_c Les pertes collectives en watts [W]

Donc

$P_u = P_a - P_j - P_c$ <p>Electrique Mécanique</p>	P_u La puissance utile en watts [W]
	P_a La puissance absorbée en watts [W]
	P_j Les pertes par effet Joule en watts [W]
	P_c Les pertes collectives en watts [W]

- P_c représente la somme des pertes mécaniques et des pertes magnétiques dans le moteur. C_p est le moment du couple de pertes correspondant à cette puissance perdue.
- Les pertes magnétiques dues à l'hystérésis et aux courants de Foucault se produisent dans les tôles du rotor.
- Les pertes mécaniques dues aux frottements se situent au niveau des paliers.

Le rendement est le rapport entre la puissance mécanique utile et la puissance électrique absorbée par l'induit, d'où :

$\eta = \frac{P_u}{P_a}$	η Rendement de l'induit du moteur [sans unités]
	P_u La puissance utile en watts [W]
	P_a La puissance absorbée en watts [W]

Le rendement du moteur complet tient compte de la puissance absorbée par l'inducteur, P_{ex} , dans la mesure où celui-ci est alimenté électriquement. Cette puissance sert uniquement à magnétiser le moteur, toute la puissance active absorbée par le circuit d'excitation est entièrement consommée par effet Joule donc :

$P_{ex} = U_{ex} \cdot I_{ex}$	P_{ex} La puissance absorbée par l'inducteur en watts [W]
	U_{ex} La tension d'alimentation de l'inducteur en volts [V]
	I_{ex} L'intensité du courant dans l'inducteur en ampères [A]

$P_{ex} = r \cdot I_{ex}^2$	P_{ex} La puissance absorbée par l'inducteur en watts [W]
	r La résistance de l'inducteur en ohms [Ω]
	I_{ex}^2 L'intensité du courant dans l'inducteur en ampères ² [A^2]

$P_{ex} = \frac{U_{ex}^2}{r}$	P_{ex} La puissance absorbée par l'inducteur en watts [W]
	U_{ex}^2 La tension d'alimentation de l'inducteur en volts ² [V^2]
	r La résistance de l'inducteur en ohms [Ω]

Le rendement est donc

$$\eta = \frac{P_u}{P_a + P_{ex}}$$

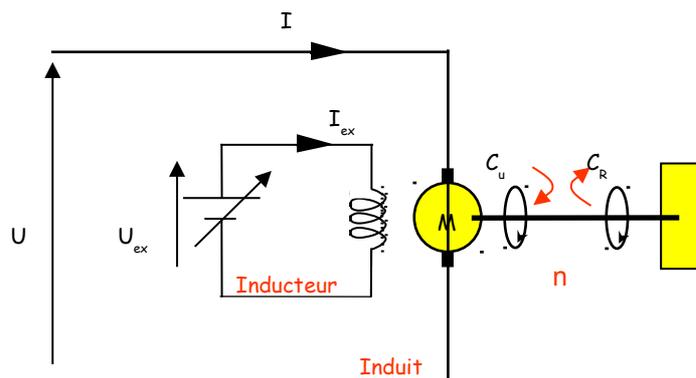
η	Rendement du moteur complet [sans unités]
P_u	La puissance utile en watts [W]
P_a	La puissance absorbée en watts [W]

4.5. Essai à vide

Nous dirons que le moteur fonctionne à vide s'il n'entraîne aucune charge sur son arbre. L'indice «o» caractérise cet essai. Sa fréquence de rotation est notée n_o , elle est légèrement supérieure à sa fréquence de rotation nominale, l'intensité du courant dans l'induit I_o est très faible devant sa valeur nominale et la tension d'alimentation U_o de l'induit est réglée à sa valeur nominale. En faisant varier U_o , la tension aux bornes de l'induit mesurée en volts, nous pouvons relever en ampères l'intensité du courant dans l'induit I_o , et la fréquence de rotation n_o en tours par seconde. Les éléments U_o , I_o et n_o nous permettent de calculer la fem à vide E_o en utilisant la relation :

4.6. Essai en charge

Le moteur est maintenant chargé, c'est-à-dire que l'arbre de ce dernier entraîne une charge résistante qui s'oppose au mouvement du rotor.



En régime établi, le moment du couple utile délivré par le moteur est égal au moment du couple résistant que lui oppose la charge mécanique.

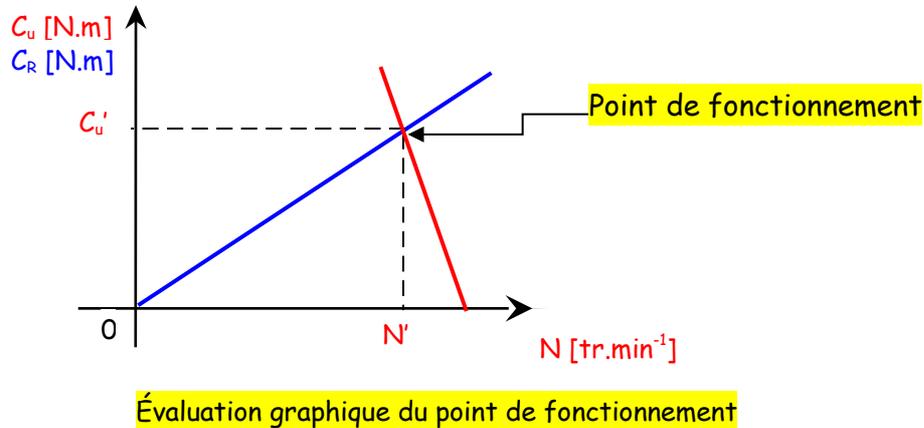
En régime permanent

$$C_u = C_R$$

C_u	Le moment du couple utile en newton-mètres [N.m]
C_R	Le moment du couple résistant en newton-mètres [N.m]

4.7. Point de fonctionnement

Le point de fonctionnement se trouve sur l'intersection de la caractéristique mécanique du moteur et de la courbe qui caractérise le moment du couple résistant de la charge.



Le point de fonctionnement donne graphiquement N' , la fréquence de rotation du moteur ainsi que C_u' le moment du moment du couple utile.

4.8. Le risque d'emballement du moteur

Dans la relation :

$$E = N \cdot n \cdot \Phi \quad \Rightarrow \quad n = \frac{E}{N \cdot \Phi}$$

Si l'intensité du courant dans l'inducteur s'annule, le flux tend alors vers zéro. Suivant la loi d'Ohm la valeur de la fem n'est pas nulle

$$E = U - R \cdot I \quad \Rightarrow \quad n = \frac{U - R \cdot I}{N \cdot \Phi}$$

La fréquence de rotation d'un moteur alimenté tend vers l'infini si le flux s'annule.

➡ Une coupure dans le circuit d'excitation entraîne donc un emballement du moteur.

Pour éviter que le moteur s'emballe, il est indispensable de respecter un ordre pour le câblage ainsi qu'un ordre inverse pour le dé câblage du moteur. L'inducteur doit être alimenté en premier lors du câblage, il sera débranché en dernier au dé câblage du moteur.