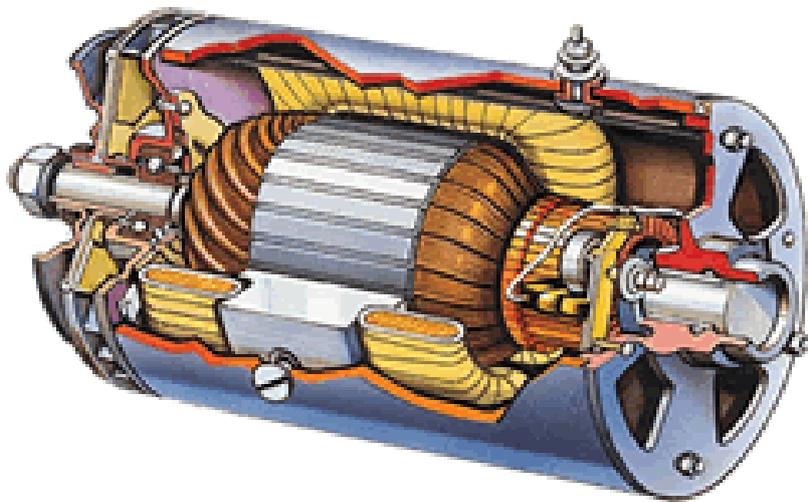


MACHINES A COURANT CONTINU
MOTEUR ET GENERATRICES
THEORIE ET CALCUL

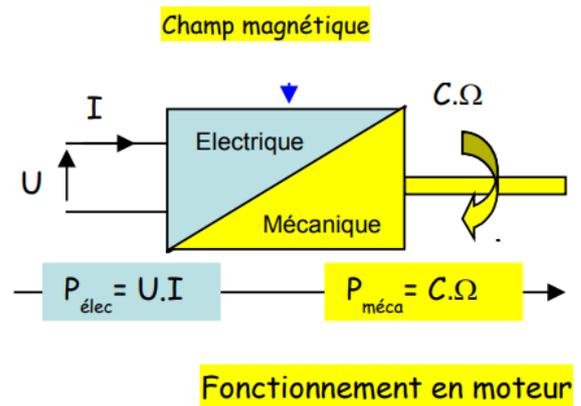
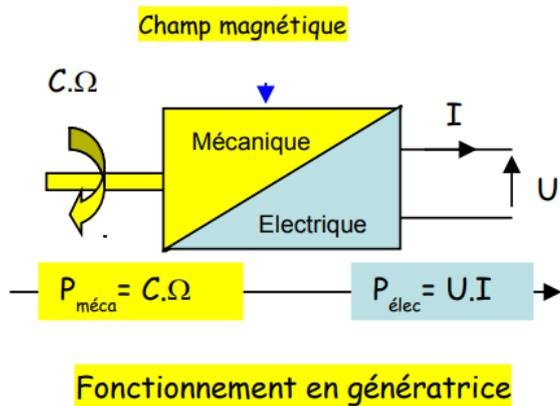


EL KACEM EL MOSTAFA

Constitution d'une machine à CC

Introduction :

La machine à CC est une machine réversible : c'est à dire elle peut fonctionner comme moteur ou génératrice.



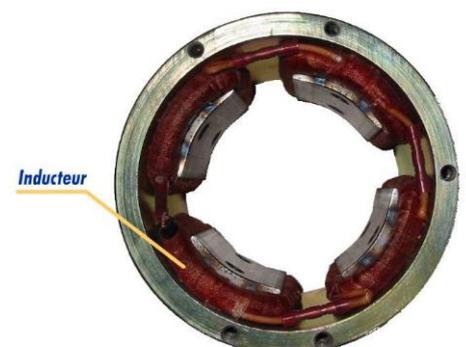
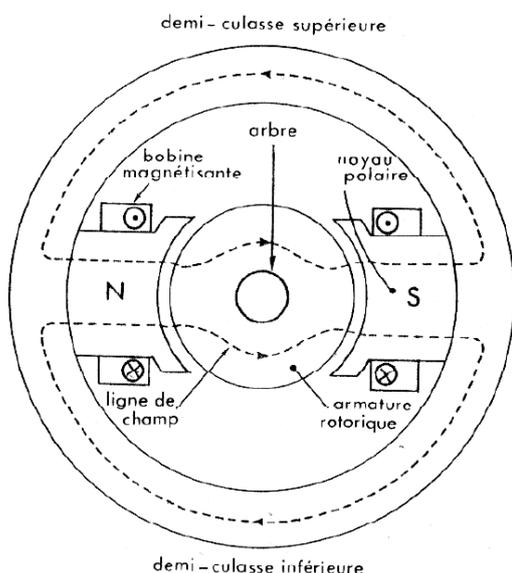
Les composants électriques d'une machine à CC

Une machine à courant continu comporte trois parties principales : l'inducteur, l'induit et le collecteur avec les balais.

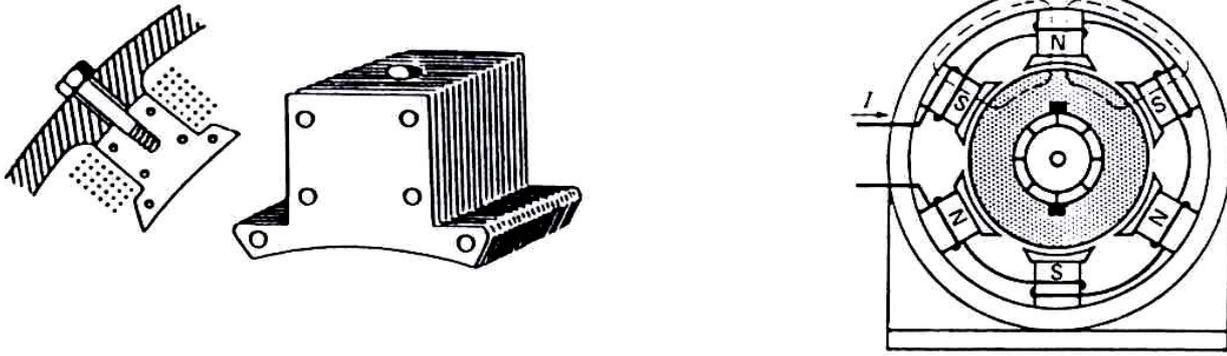
a) Inducteur

L'inducteur produit le flux magnétique dans la machine. Il est constitué d'un électroaimant qui engendre un champ magnétique.

Dans les machines bipolaires (à deux pôles) les bobines magnétisantes sont portées par deux noyaux polaires, montés à l'intérieur d'une culasse. Les bobines magnétisantes sont alimentées en courant continu et le courant qui les traverse porte le nom de courant d'excitation.



Le nombre de pôles que porte l'inducteur dépend surtout de la grosseur de la machine. Plus une machine est puissante et plus sa vitesse est basse, plus elle aura de pôles.



Les lignes du champ magnétique produit par l'inducteur traversent deux fois l'entrefer qui sépare le rotor et le stator et se renferment par l'une des deux demi-culasses.

b) L'induit

L'induit constitue l'ensemble des conducteurs qui coupent le flux magnétique. Ces conducteurs sont enroulés sur un noyau cylindrique formé d'un assemblage de tôles en fer doux.

Les conducteurs de l'induit sont parcourus par le courant débité par la machine si elle est utilisée en génératrice et parcourus par un courant absorbé si elle est utilisée en moteur.



c) Collecteur et balais :

Le collecteur est un ensemble cylindrique de lames de cuivre isolées les unes des autres par des feuilles de mica. Le collecteur est monté sur l'arbre de la machine, mais isolé de celui-ci.

Les conducteurs de l'induit sont reliés aux lames du collecteur. Dans une machine à cc bipolaire, deux balais fixes et diamétralement opposés appuient sur le collecteur et assurent le contact électrique entre l'induit et le circuit extérieur.

Les machines multipolaires ont autant de balais que de pôles. Par exemple, une génératrice ayant 6 pôles possède 6 balais, dont 3 positifs (+) et 3 négatifs (-).

Collecteur :



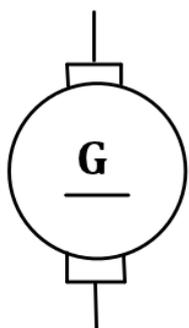
Balais



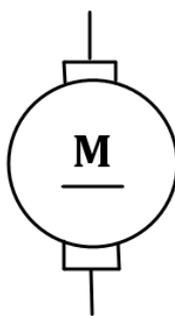
Porte balais



Symbole des composants d'une machine à CC



Induit d'une génératrice



Induit d'un moteur



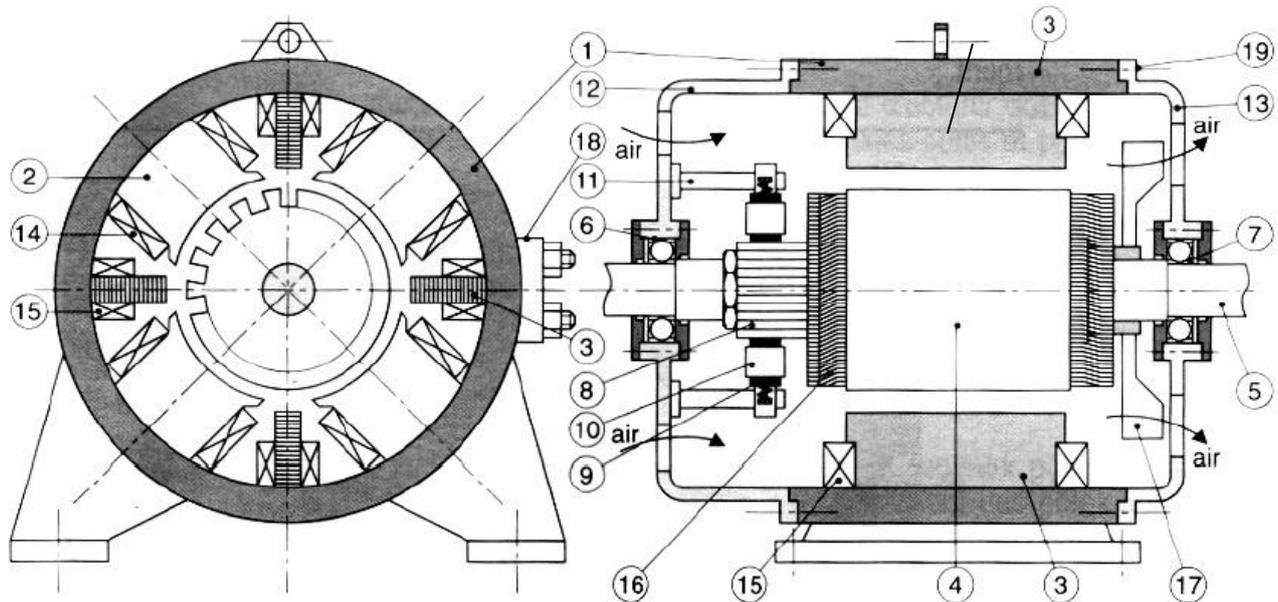
Inducteur shunt



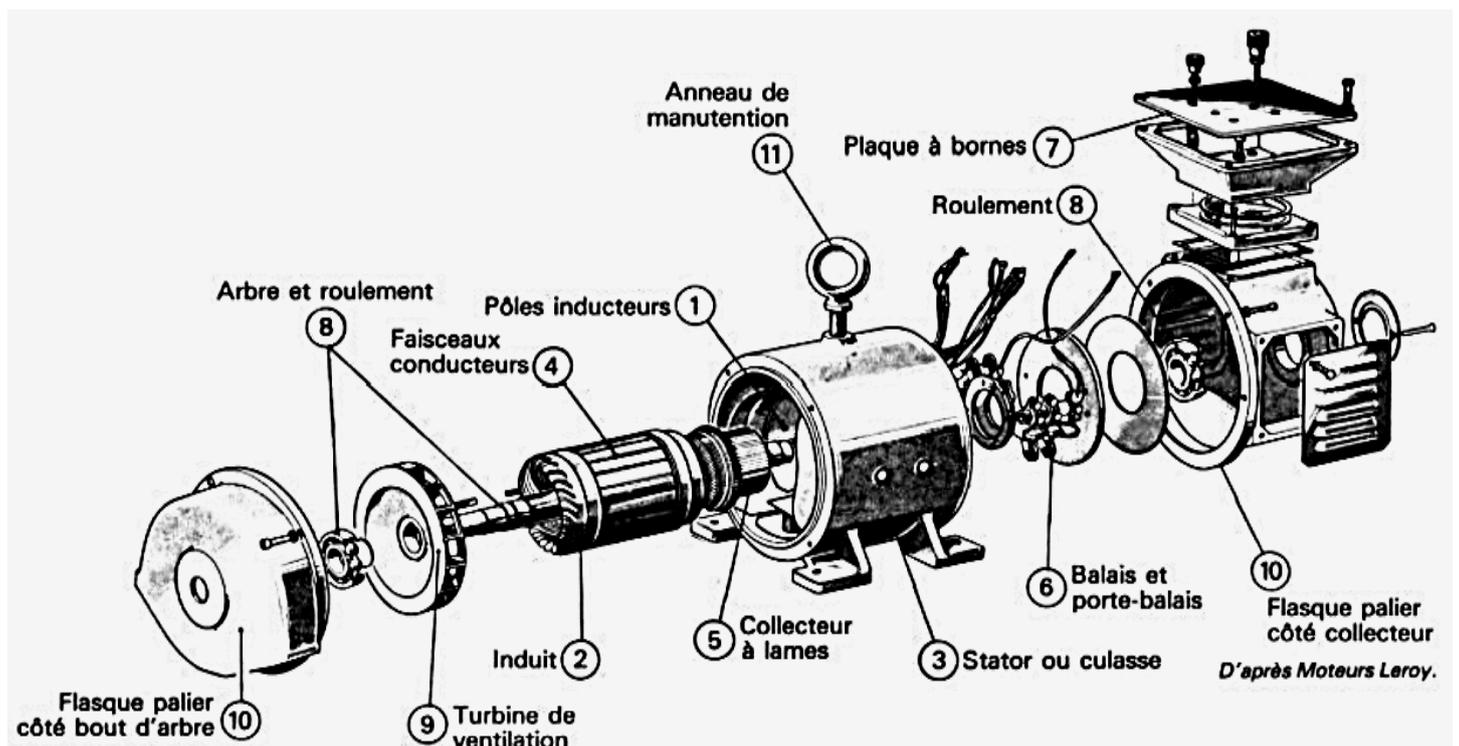
Inducteur série

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 **balais-collecteur**.



- 1.** Culasse **2.** Noyaux des pôles principaux **3.** Noyaux des pôles auxiliaires **4.** Induit **5.** Arbre
6,7. Paliers **8.** Collecteur **9.** Balais **10.** Porte-balais **11.** Tiges de porte-balais **12, 13.** Flasques
14. Bobines inductrices **15.** Bobines des pôles auxiliaires **16.** Bobinage de l'induit
17. Ventilateur **18.** Plaques à bornes **19.** Fixation des flasques

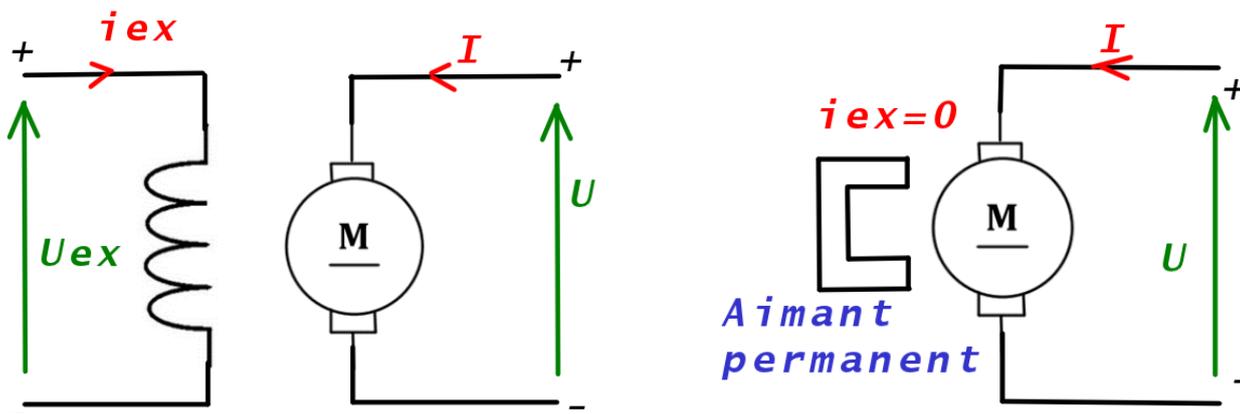


Excitation d'une machine à CC

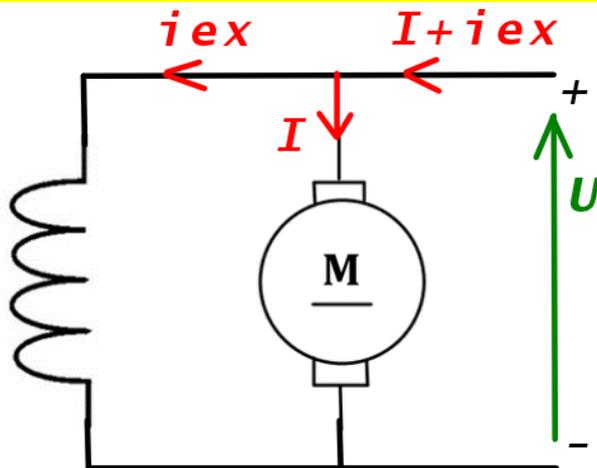
La façon dont l'induit et l'inducteur sont branchés s'appelle l'excitation, on distingue quatre types d'excitations.

Différents modes d'excitation d'un moteur à CC

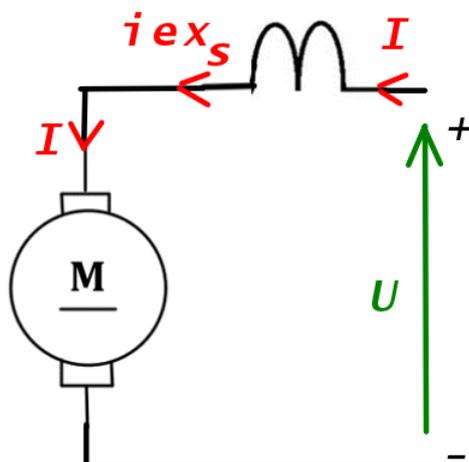
⊕ Moteur à excitation *séparée* ou *indépendante*



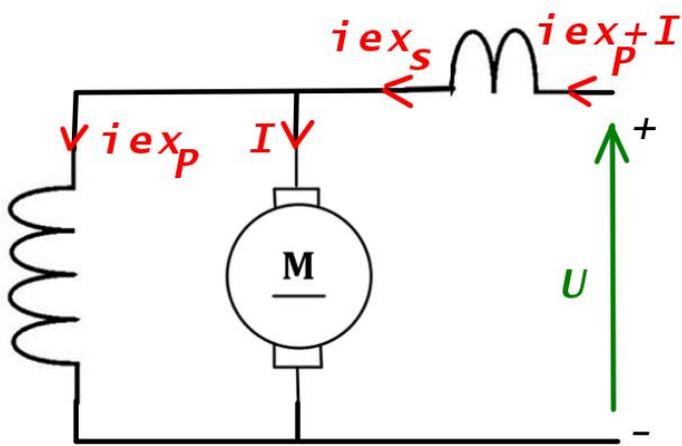
⊕ Moteur à excitation *shunt* ou *parallèle* ou en *dérivation*



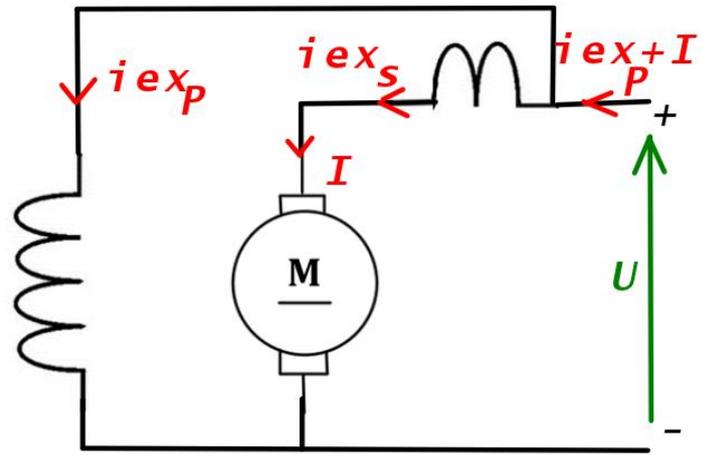
⊕ Moteur à excitation *série*.



+ Moteur à excitation composée ou compound.



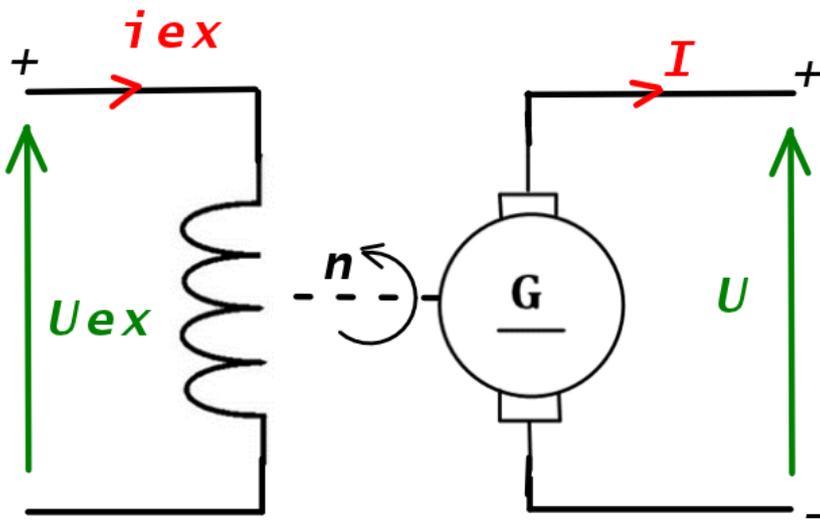
Montage courte dérivation



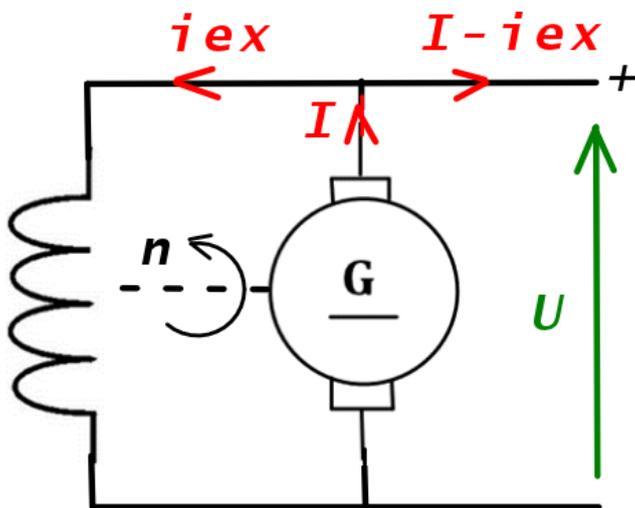
Montage longue dérivation

Différents modes d'excitation d'une génératrice à CC

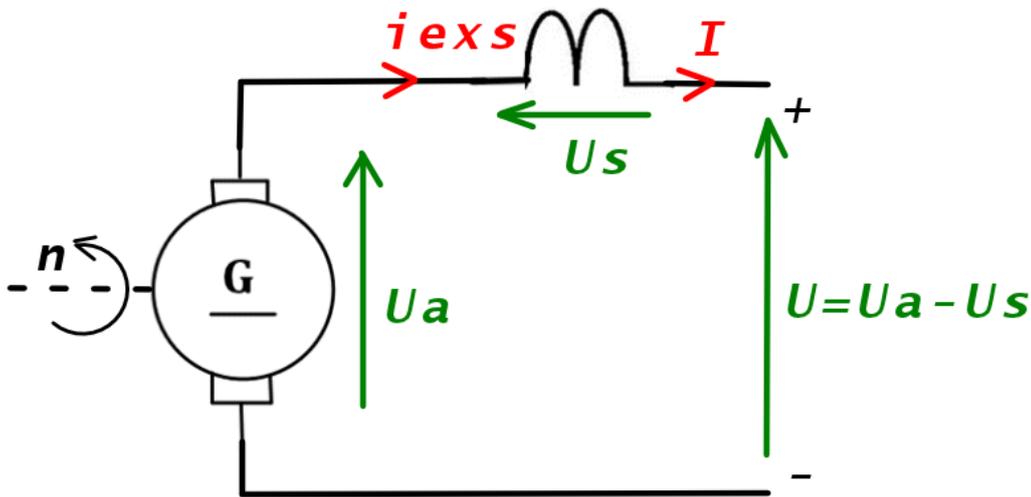
+ Génératrice à excitation séparée ou indépendante



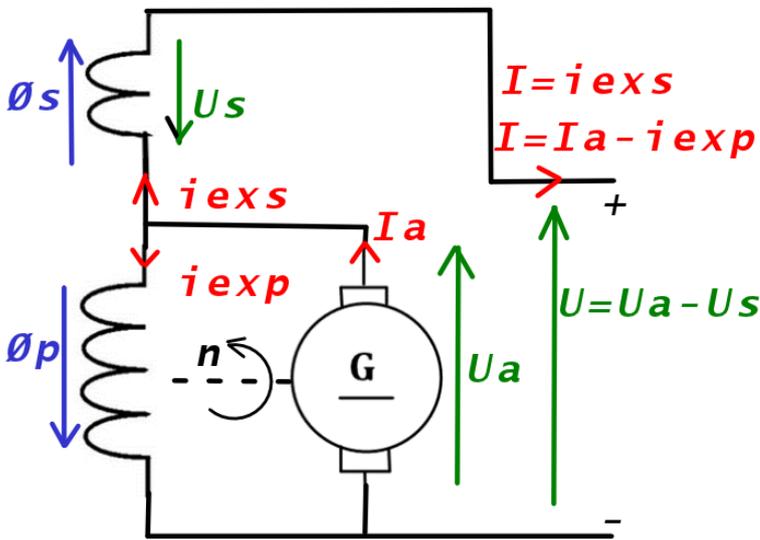
+ Génératrice à excitation shunt ou parallèle ou en dérivation



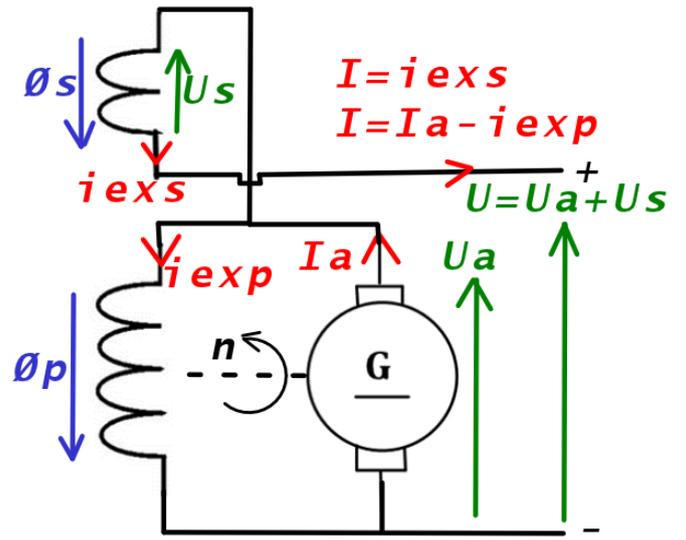
⊕ Génératrice à excitation **série**.



⊕ Génératrice à excitation **composée ou compound**.



Montage avec flux soustractif



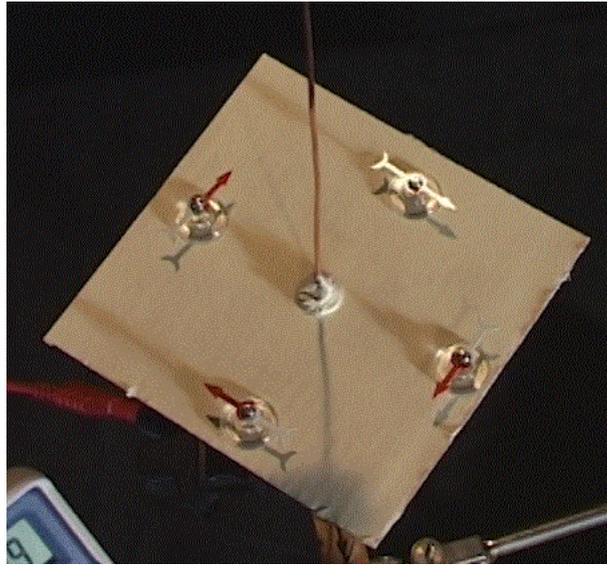
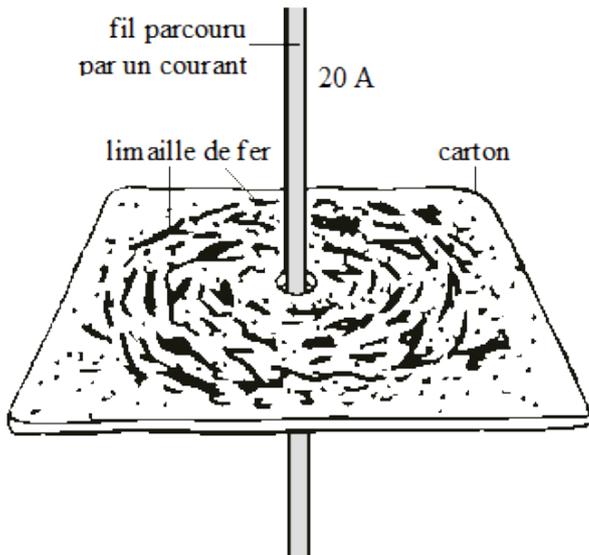
Montage avec flux additif

Principe de fonctionnement des machines à CC

Moteur à CC :

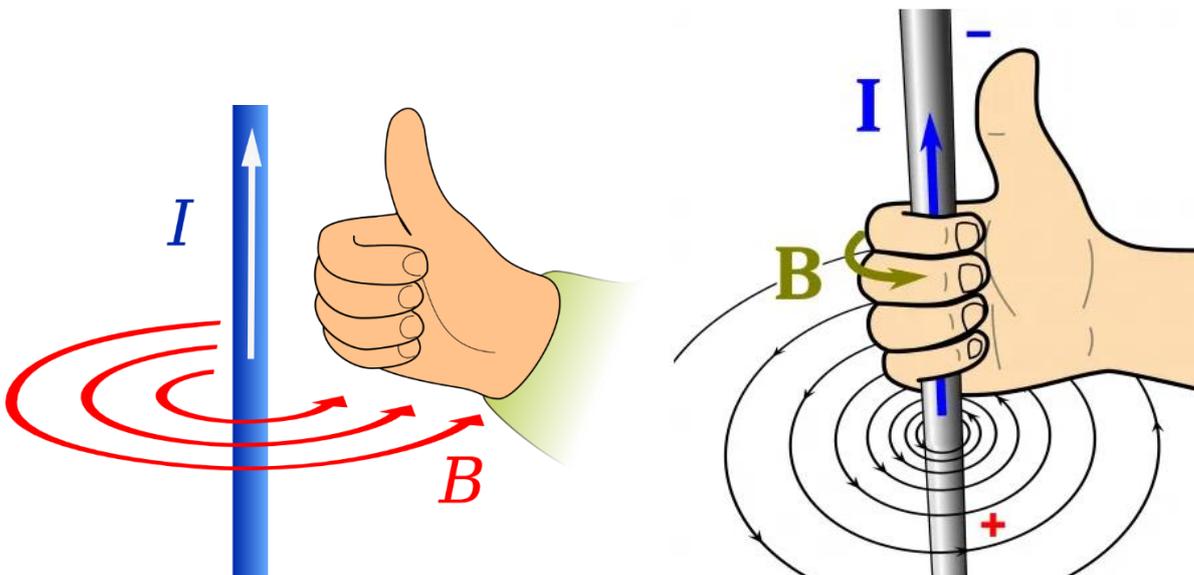
Expérience 1 : Conducteur traversé par un courant continu

On perce un morceau de carton et on y passe un conducteur qu'on va faire traverser par un courant après avoir mis au tour de lui de la limaille de fer et quatre boussoles.



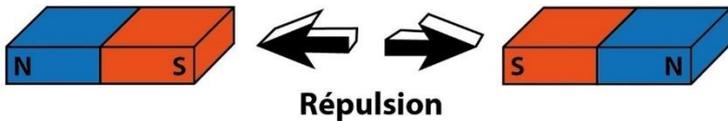
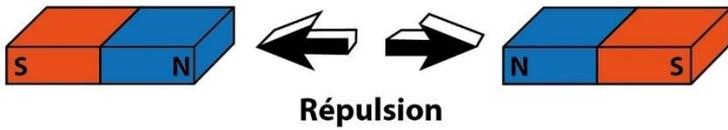
Un conducteur parcouru par un courant crée un champ magnétique dans l'espace qui l'entoure. Les petites boussoles ou la limaille de fer s'orientent dans ce champ magnétique le long des lignes de champ car le fer est ferromagnétique.

Le sens est donné par la règle de la main droite.

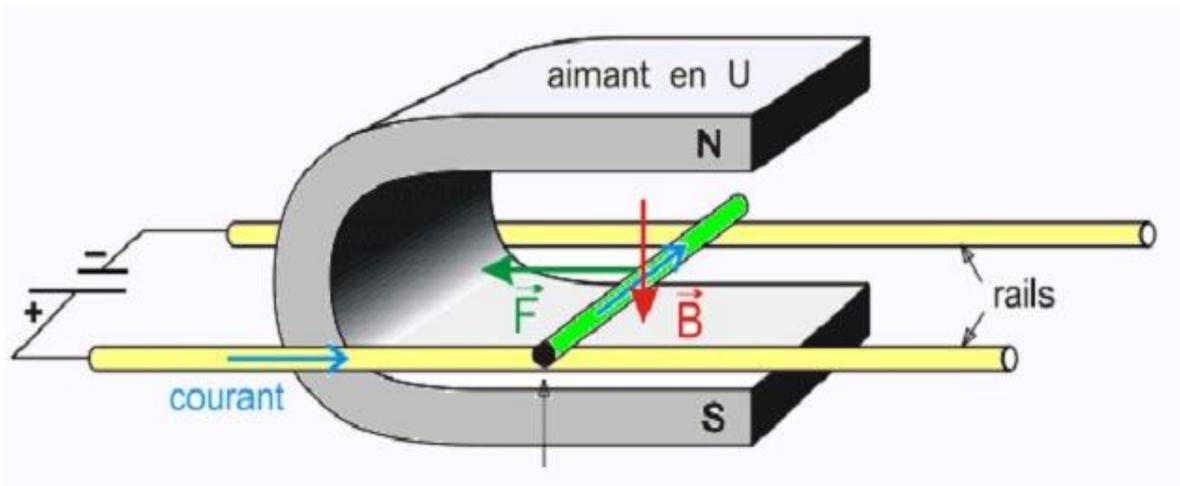


Expérience 2 :

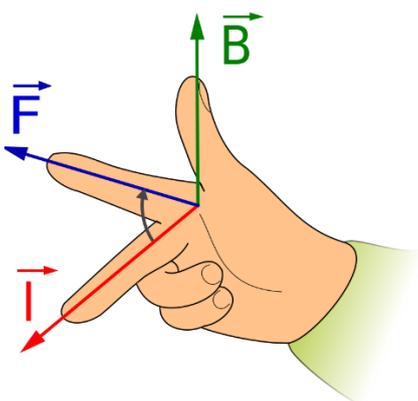
Nous savons tous que deux champs magnétiques côte à côte exercent l'un sur l'autre des forces soit d'attraction ou de répulsion



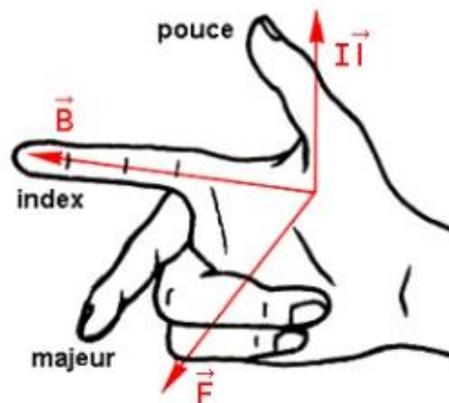
Alors si on met le conducteur traversé par un courant vu dans l'expérience 1 et qui crée au tour de lui un champ magnétique dans un autre champ magnétique crée par un aimant en fer à cheval ou en forme U.



On observe que le conducteur se met à se déplacer sous l'effet de la force de la place, le sens de déplacement dû à cette force est donné par la règle des 3 doigts de la main droite



Ou



NB : on utilisera la première

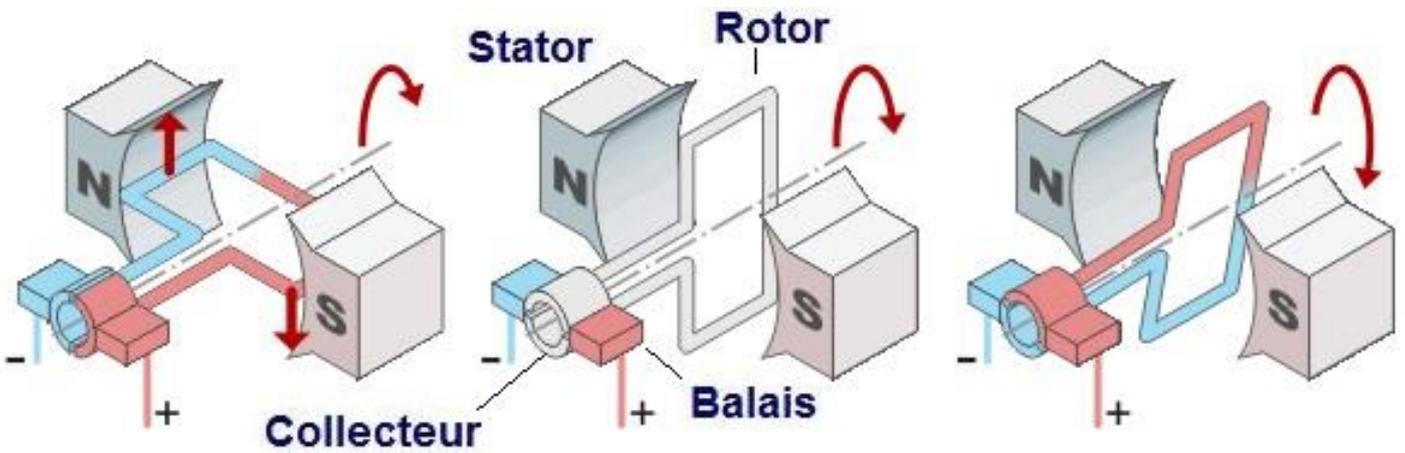
Expérience 3 :

En utilisant les résultats des expériences précédentes est venu l'invention du moteur à CC

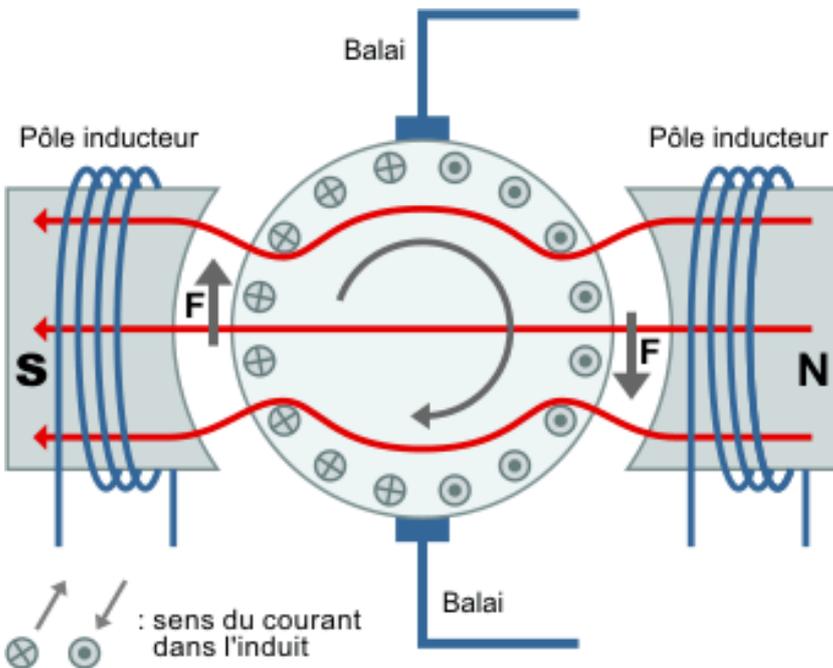
- Le conducteur traversé par le courant c'est une spire qui constitue l'induit alimenté par une tension continue, et c'est le rotor qui va être la partie tournante.
- La source du champ magnétique fixe c'est l'inducteur ou le stator, aimant ou électro-aimant statique.

Le courant circule dans la spire mais dans deux sens opposés de chaque côté de la spire. Ainsi par interaction avec le champ magnétique créée par le stator, il se crée deux forces de Laplace qui tendent toutes deux à faire tourner la spire dans le même sens (création d'un couple).

Pour que la spire puisse effectuer un tour complet, il faut inverser le courant dans la spire à chaque demi-tour grâce au collecteur.



Pour avoir des forces en continu on utilisera un induit constitué de plusieurs spires.



Courant + Champ magnétique



Force Électromagnétique

Génératrice à CC :

La génératrice à courant continu permet de transformer l'énergie mécanique en énergie électrique.

Force + Champ magnétique



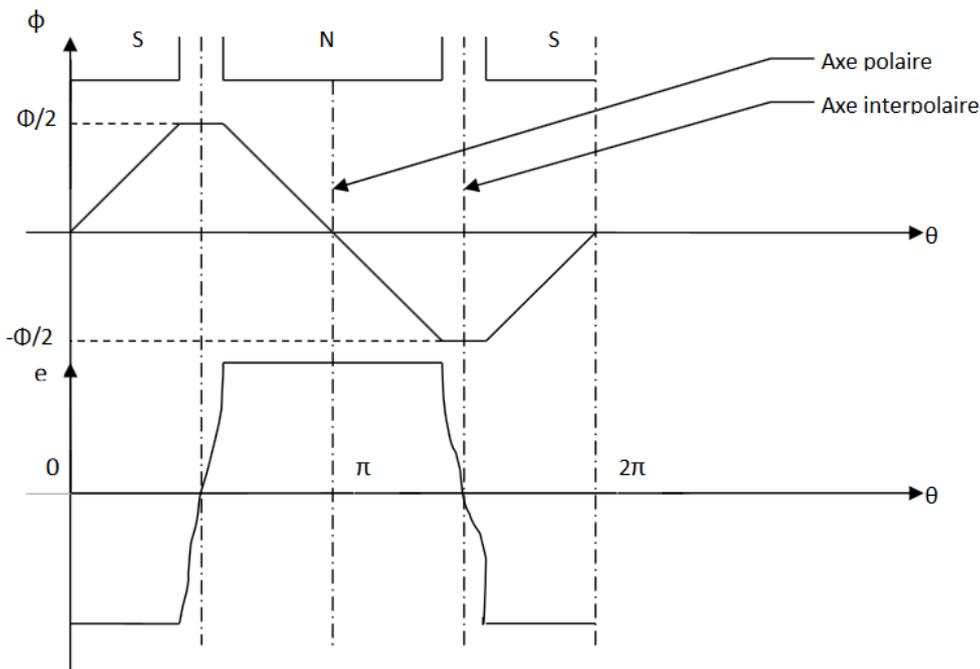
Force Électromotrice

Le principe de fonctionnement est basé sur l'action d'une induction magnétique, produite par l'inducteur fixe, sur les conducteurs d'induit, en mouvement de rotation.

Ces conducteurs d'induits sont donc soumis à une variation de flux d'où ils sont le siège d'une FEM induite selon la loi de LENZ

$$E = - \frac{d\Phi}{dt}$$

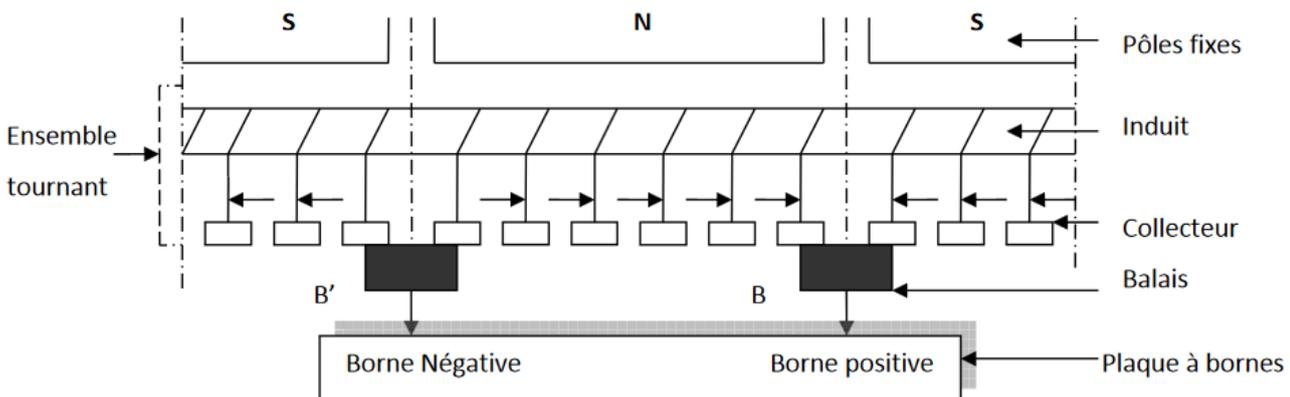
Allure de la Force électromotrice :



On remarque que la f.é.m. induite dans une spire est alternative ; elle est positive quand la spire est sous le pôle nord, elle est négative quand elle est sous le pôle sud

Le redressement par le collecteur :

Toutes les spires situées sous un même pôle étant le siège de f.é.m. de même signe, les balais placés dans l'axe inter polaire (ligne neutre) permettent de les additionner.



L'ensemble collecteur-balais joue le rôle d'un redresseur mécanique. La f.é.m. totale entre les deux balais, pour une génératrice bipolaire, est la somme des f.é.m. élémentaires.

Force contre-électromotrice E'

Pour un moteur à CC on la note **FCEM** (E' : force contre électromotrice)

$$E' = \frac{P}{a} N n \Phi$$

Pour une génératrice à CC on la note **FEM** (E : force électromotrice)

$$E = \frac{P}{a} N n \Phi$$

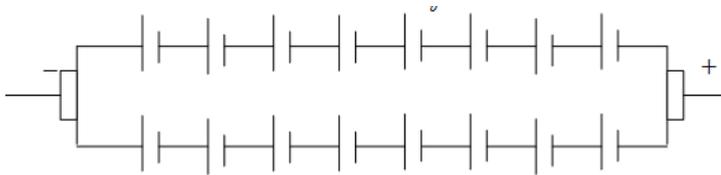
p : le nombre de paires de pôles de la machine.

a : le nombre de paires de voies d'enroulement (une voie d'enroulement étant la partie de bobinage de l'induit comprise entre deux balais).

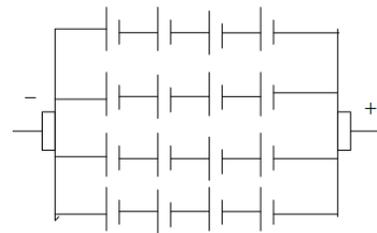
N : nombre de conducteurs actifs de l'induit.

n : la fréquence de rotation (tr/s).

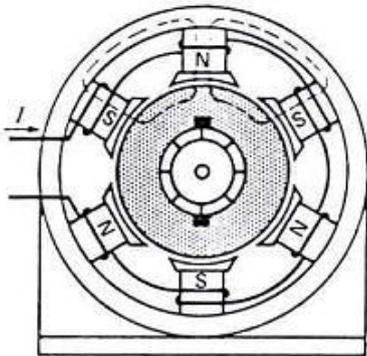
Φ : le flux produit sous un pôle inducteur.



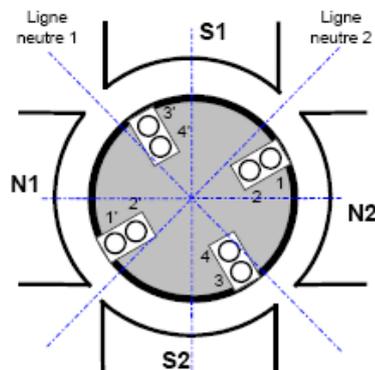
2 voies d'enroulements ($a=1$)



4 voies d'enroulements ($a=2$)



6 pôles inducteur ($P=3$)



machine à 2 paires de pôles.

($P=2$)

Avec $\frac{P}{a} N = cst = k$ donc $E' = k.n.\Phi$ et $E = k.n.\Phi$

Phénomènes pratiques liés au fonctionnement :

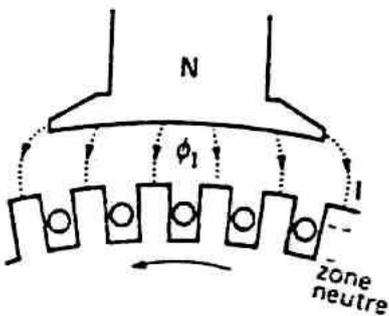
Réaction magnétique d'induit (RMI) :

On rappelle que l'induit est le siège de :

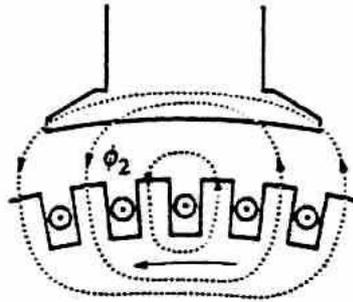
- E : f.é.m. : dans le cas d'une génératrice
- E : f.c.é.m. : dans le cas d'un moteur

Dans les deux cas chaque conducteur actif de l'induit sera traversé par un courant, ces courants créent un flux magnétique d'induit dit de réaction magnétique de l'induit (R.M.I) qui d'après (LENZ) s'oppose au flux à vide de l'inducteur.

$\Phi_{ch} < \Phi_v \Rightarrow E_{ch} < E_v$ Bien qu'on maintient l'excitation constante

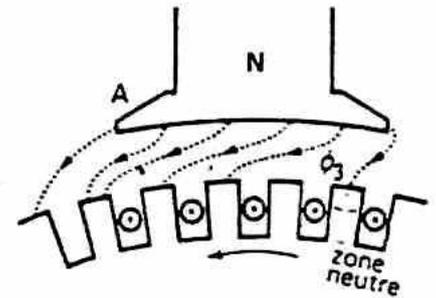


Champ dû à l'inducteur



Champ dû au courant

Circulant dans l'induit

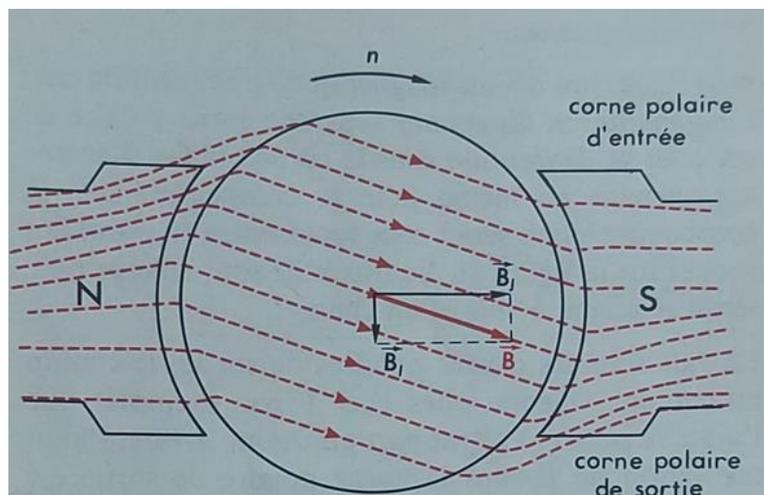
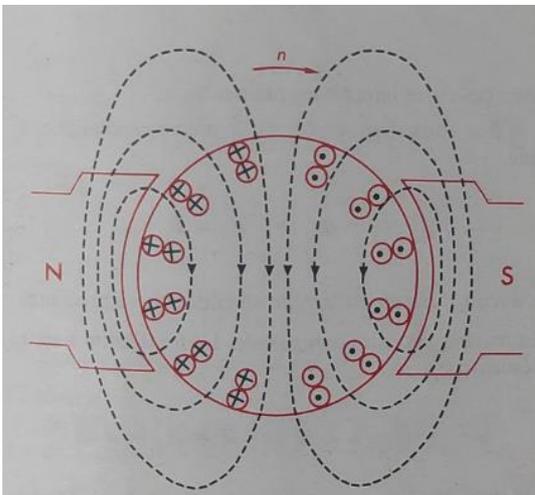


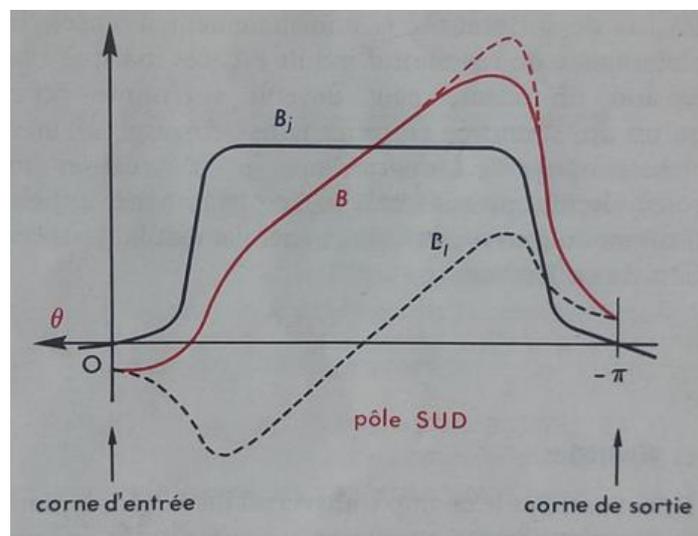
Champ résultant dû à

la réaction d'induit

La réaction magnétique de l'induit déforme les lignes de champ de telle sorte que la ligne neutre magnétique sera décalée :

- Dans le sens de rotation pour une génératrice
- Dans le sens contraire pour un moteur





Forme du champ déformé sous un pôle.

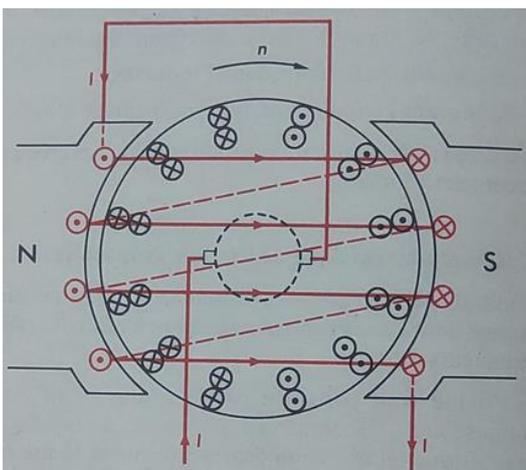
Compensation de la réaction magnétique de l'induit :

Pour remédier aux problèmes causés par la R.M.I qui :

- En génératrice, la diminution du flux provoque une chute de fém. par suite la tension
- En moteur, la diminution du flux peut entraîner l'emballement du moteur (vitesse) ↗

On peut :

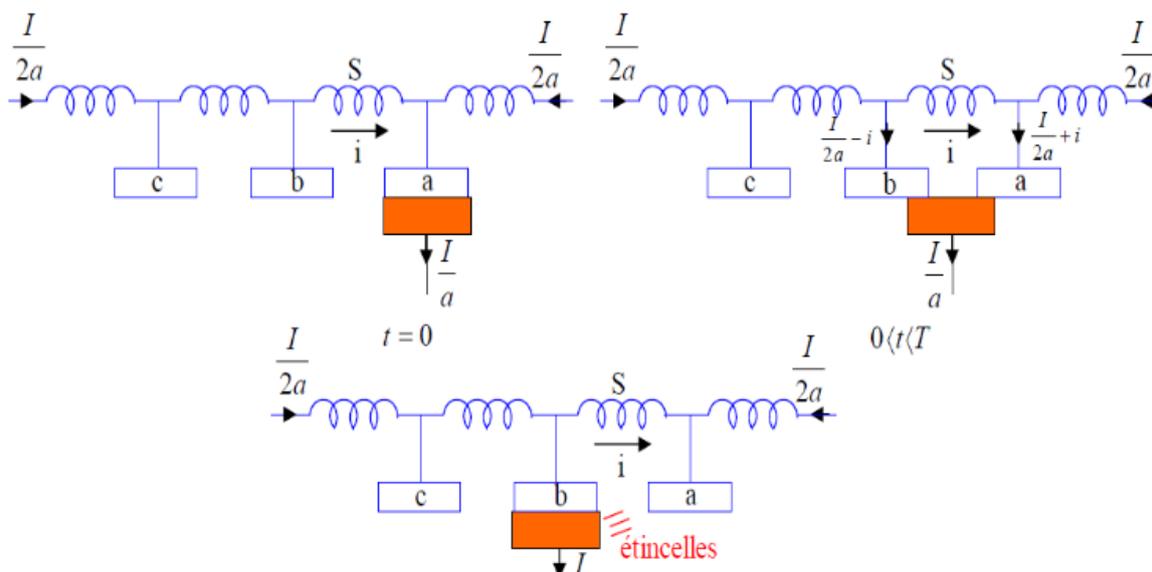
- Soit décaler les balais et augmenter l'entrefer à la corne de la sortie, cette solution est valable pour les machines de faible puissance et ayant un seul sens de rotation.
- Soit utiliser un enroulement de compensation, placés dans des encoches logés dans les pièces polaires d'inducteur, qui traversé par le courant induit produira un champ qui s'oppose à la réaction magnétique de l'induit et qui va l'annuler.



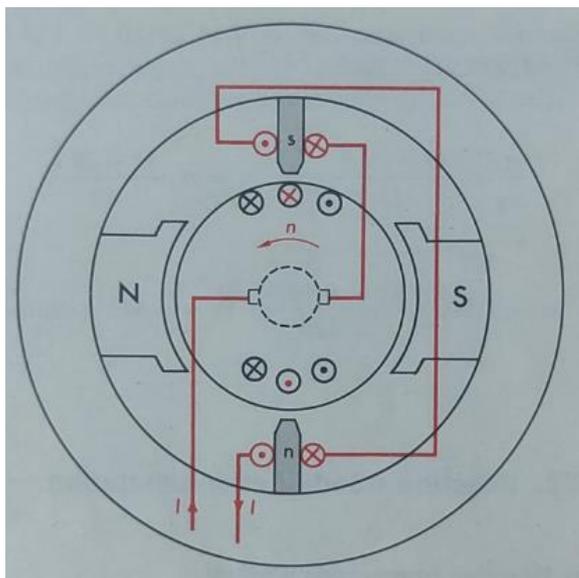
Problème de commutation :

On rappelle qu'entre deux lames consécutives, il y'a toujours une section. la commutation est l'inversion du courant dans une section. Lorsque la génératrice tourne, les lames se déplacent

sous les balais. Cette inversion entraîne des petits arcs, qui peuvent détériorer les lames et les balais à cause des f.é.m. d'auto-induction transitoires.



Pour remédier contre cet inconvénient, on utilise des pôles auxiliaires de commutation (P.C), placés sur les lignes neutres théoriques (axes inter polaires). Ces pôles engendrent dans la section en commutation une f.é.m. de renversement croissante avec la charge et qui s'oppose à la f.é.m. d'auto-induction et aide le courant à s'inverser sans arcs.

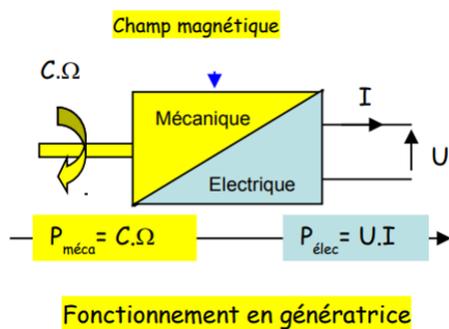


Essais des génératrices

1- Introduction :

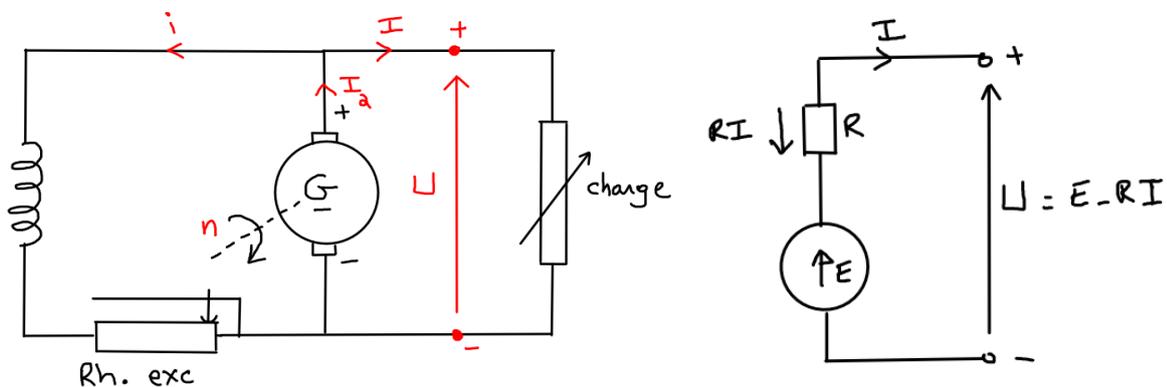
- L'inducteur, alimenté par tension continue, produit un champ magnétique constant ;
- L'induit, entraîné en rotation par un moteur est le siège de variations de flux à travers des spires qui le constituent.

Il en résulte la création d'une f.é.m. alternative qui est recueillie, redressée et transmise au circuit extérieur par l'ensemble collecteur - balais.



$E = \frac{p}{a} N n \Phi$	avec:
	<ul style="list-style-type: none"> p : Le nombre de paires de pôles
	<ul style="list-style-type: none"> a : Le nombre de paires de voies d'enroulement : Ce paramètre dépend de l'exécution du bobinage de l'induit.
	<ul style="list-style-type: none"> N : Le nombre de conducteurs (ou de brins - deux par spires)
	<ul style="list-style-type: none"> Φ : flux maximum à travers les spires en Wb n : vitesse de rotation (en tr/s)

2- Montage avec génératrice shunt :



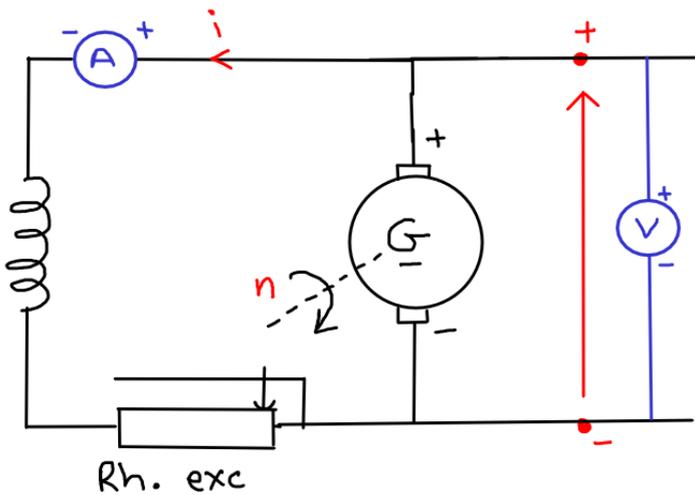
2.1- Essai à vide ou caractéristique à vide :

Conditions d'amorçage :

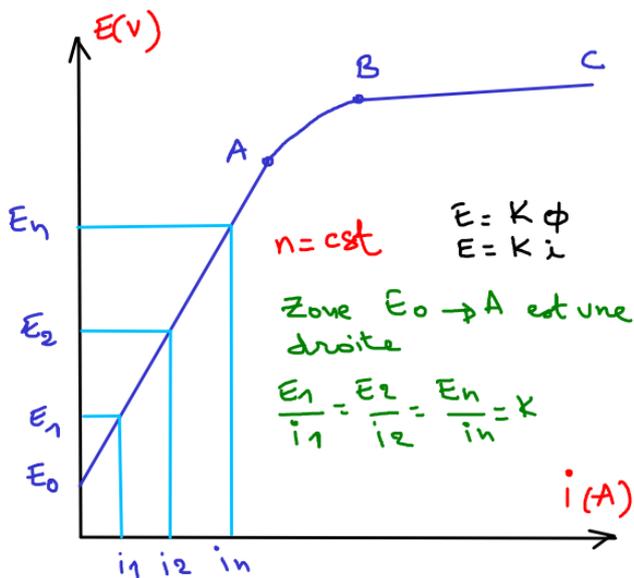
L'autoamorçage d'une génératrice à excitation parallèle est dû à la présence d'un champ magnétique rémanent au niveau des pôles de la machine. Il faut que la machine soit utilisée au moins une fois en excitation séparée pour que ce champ rémanent existe. Au démarrage et sans excitation, la FEM de la machine n'est donc pas totalement nulle ($E_0=11V$ environ). Cela suffit à faire circuler un petit courant dans l'inducteur, ce qui augmente la FEM, ce qui augmente le courant inducteur, etc.

- Faire tourner la génératrice à sa vitesse nominale
- Identifier la polarisation de l'induit + et - et mesurer E_0
- Avec Rhéostat d'excitation au maximum, brancher le circuit inducteur et remarquer si E_0 à augmenter c'est le bon sens, si E_0 a diminué alors inverser le circuit inducteur

- Commencer à diminuer le rhéostat d'excitation progressivement en notant respectivement la valeur du courant i et les valeurs de la f.é.m. E
- Tracer la courbe $E=f(i)$



FEM (E) en volt	Courant d'excitation i en mA	FEM (E) en volt	Courant d'excitation i en mA



Effet de la vitesse de rotation :

Lorsqu'on augmente la vitesse de rotation sans faire varier le courant d'excitation, le nombre de lignes coupées par seconde augmente en proportion, ce qui augmente la tension induite. La tension E est proportionnelle à la vitesse de rotation de l'induit.

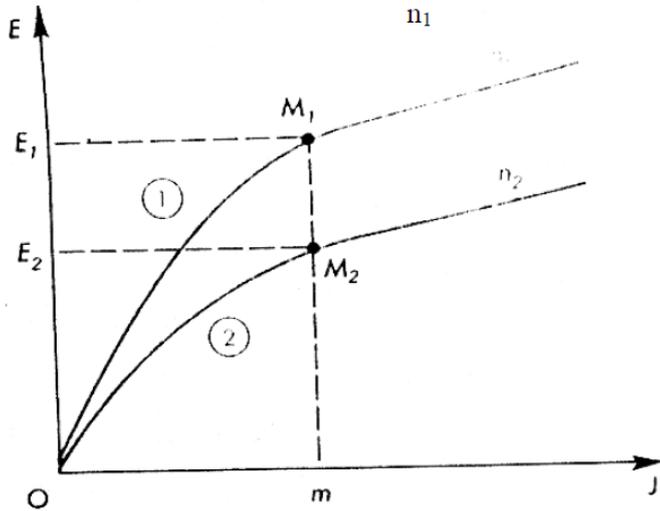
$$E_1 = (p/a) N \Phi n_1$$

$$\} \Rightarrow E_1 / E_2 = n_1 / n_2$$

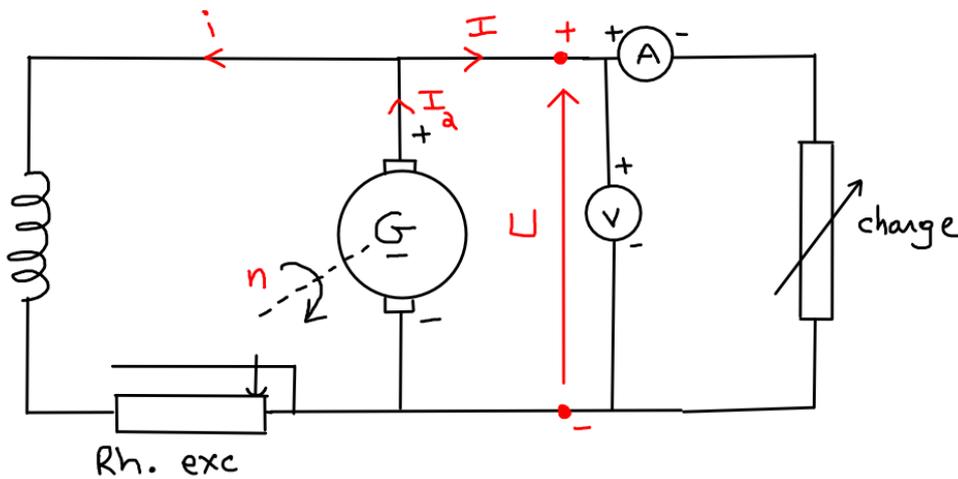
$$E_2 = (p/a) N \Phi n_2$$

Quand on change le sens de rotation ou la polarité de la tension d'excitation, la polarité de la tension induite change aussi.

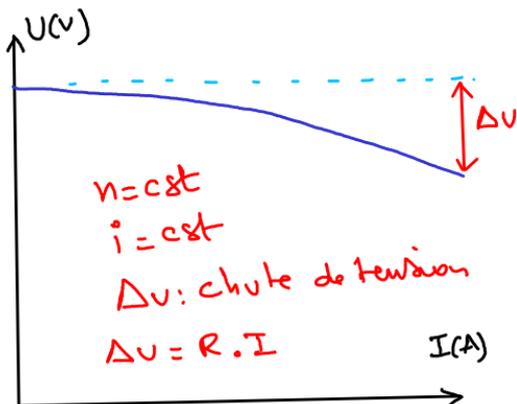
Si on change à la fois la polarité de la tension d'excitation et le sens de rotation, la polarité de la tension induite ne change pas.



2.2- Essai en charge ou caractéristique en charge avec : $n=cst$ et $i=cst$



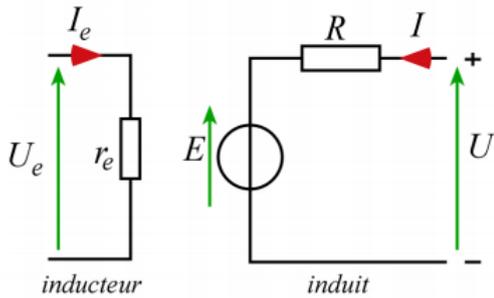
Courbe en charge $U=f(I)$



$$U = E - \underbrace{RI}_{\Delta U}$$

Problème de démarrage du moteur à courant continu

Modèle équivalent de l'induit : Moteur à excitation indépendante



$$U = E' + R.I$$

U : tension d'alimentation de l'induit (V)

E' : F.c.é.m. (force contre électromotrice (V))

R : résistance de l'induit (Ω)

I : courant absorbé par l'induit (A)

Le courant absorbé par l'induit d'un moteur à courant continu est donné par la loi d'Ohm

$$U = E' + R.I \rightarrow I = \frac{U - E'}{R}$$

Ce courant dépend de la f.c.é.m. E' étant donné que U et R sont deux constantes.

Entre la mise sous tension du moteur et son décollage, La vitesse est nulle donc la f.c.é.m. aussi ; le courant n'est limité que par R .

$$\text{D'où : } I_d = \frac{U}{R}$$

Exemple : Moteur $U=240V$; $R=1\Omega$; $P=3.6KW$

$$I_n = \frac{3600}{240} = 15A \Rightarrow I_d = \frac{240}{1} = 240A \mapsto I_d = 16I_n$$

✚ I_d est très grand.

✚ Dès que le moteur commence à tourner, E augmente et I_d diminue jusqu'à I_n .

Solution : ????????

🔗 Solutions pour limiter le courant

🔗 Première solution

Pour limiter ce courant à une valeur comprise entre 1 et 2 fois l'intensité nominale (on général : $1,5 I_n$), on monte une résistance en série avec l'induit. Le courant au moment de démarrage est alors de :

$$I_d = \frac{U}{R + R_h} \Rightarrow R_h = \frac{U}{I_d} - R$$

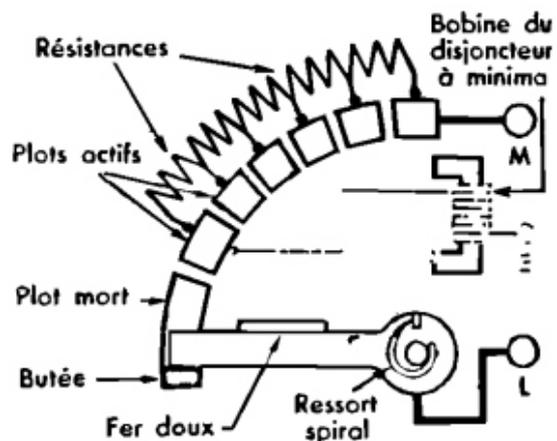
Pour l'exemple précédent, si on veut limiter le courant de démarrage à $I_d = 1,5 I_n = 22,5 A$.

$$R_h = \frac{240}{22,5} - 1 \Rightarrow R_h = 9,67 \Omega$$

Le rhéostat de démarrage comporte, en général, plusieurs plots de façon à diminuer la résistance R_h au fur et à mesure que la vitesse augmente.

🔗 Deuxième solution

On démarre sous une tension d'alimentation réduite. Dans notre exemple : $U_d = R \cdot I_d = R \cdot 1,5 \cdot I_n = 22,5 V$



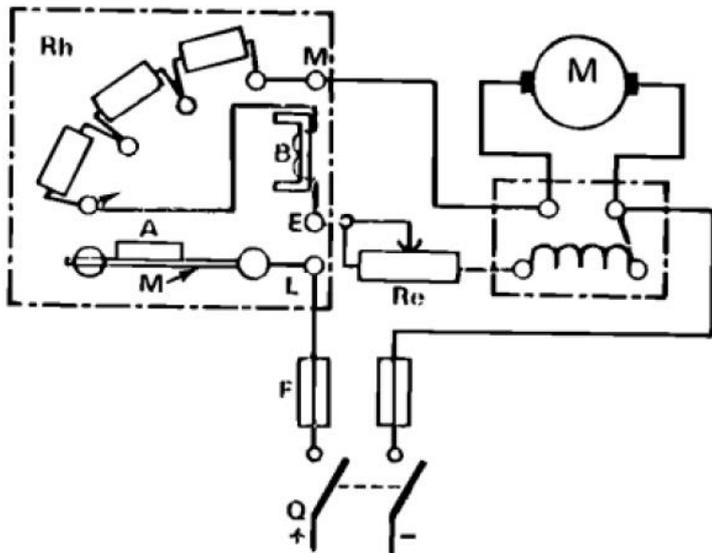
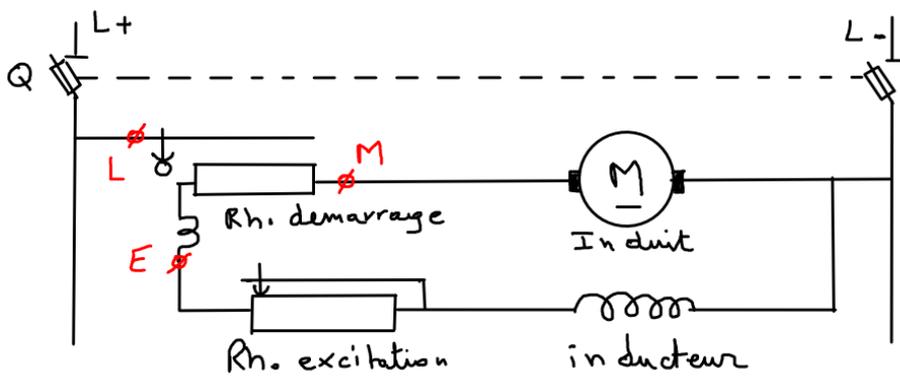
Démarrage d'un moteur à CC

Le rhéostat de démarrage est toujours au maximum de résistance au moment du décollage du moteur c.à.d. au plot mort.

Le rhéostat de champs ou d'excitation est toujours au minimum de résistance au moment du décollage du moteur afin que le flux soit au maximum pour démarrer avec petite vitesse.

1- Démarrage manuel

1.1 Démarrage manuel 1 sens de rotation

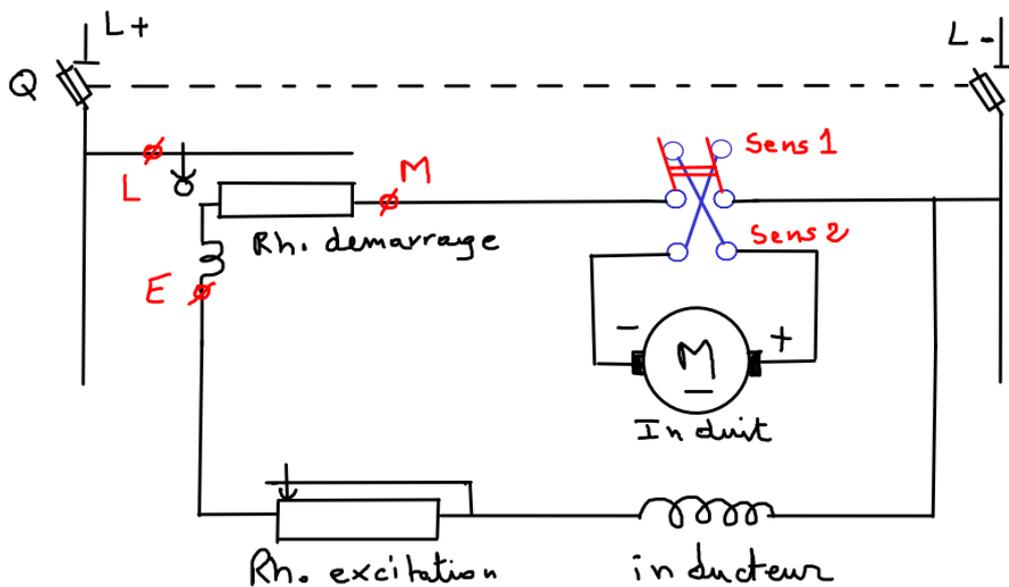


1.2 Démarrage manuel 2 sens de rotation

- Inversion du sens de rotation

Pour inverser le sens de rotation du moteur, il faut inverser le sens du courant :

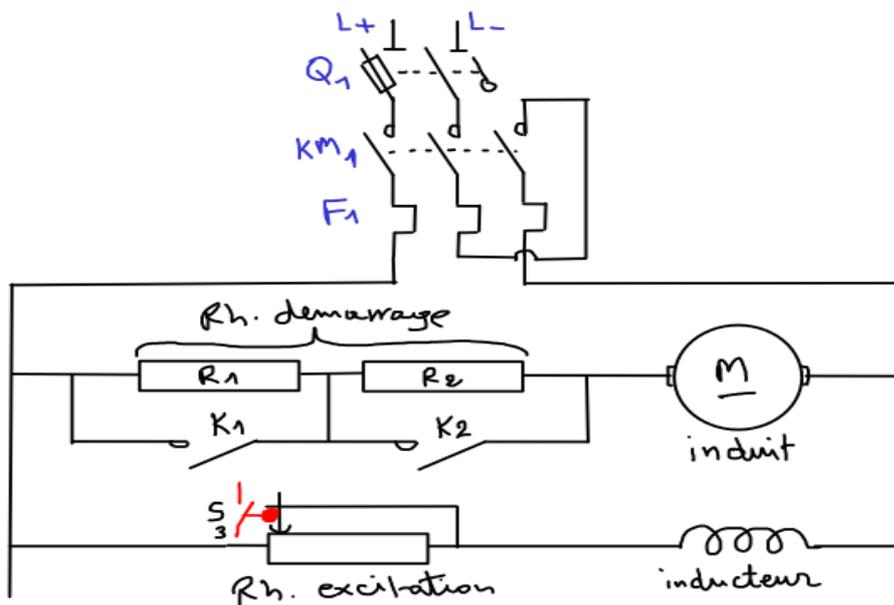
- soit dans le circuit inducteur,
- soit dans le circuit induit.



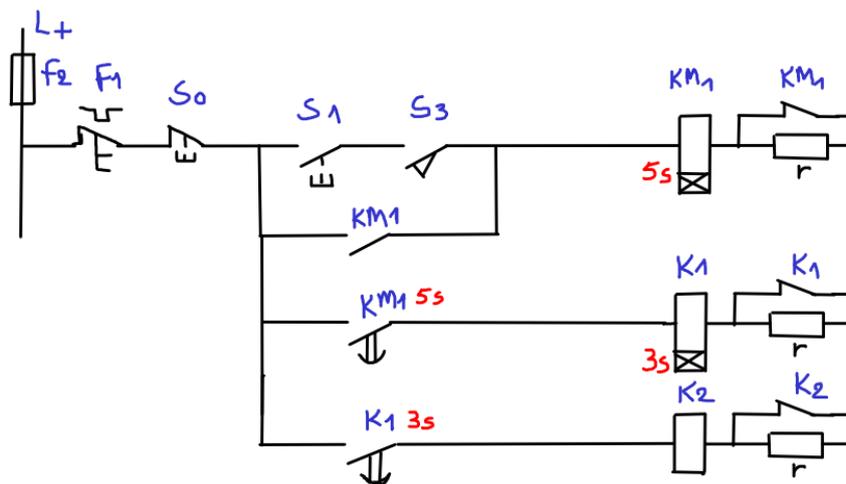
2- Démarrage semi-automatique

2.1- Démarrage semi-automatique 1 sens de rotation

Circuit de puissance :



Circuit de commande :



r : résistance d'économie

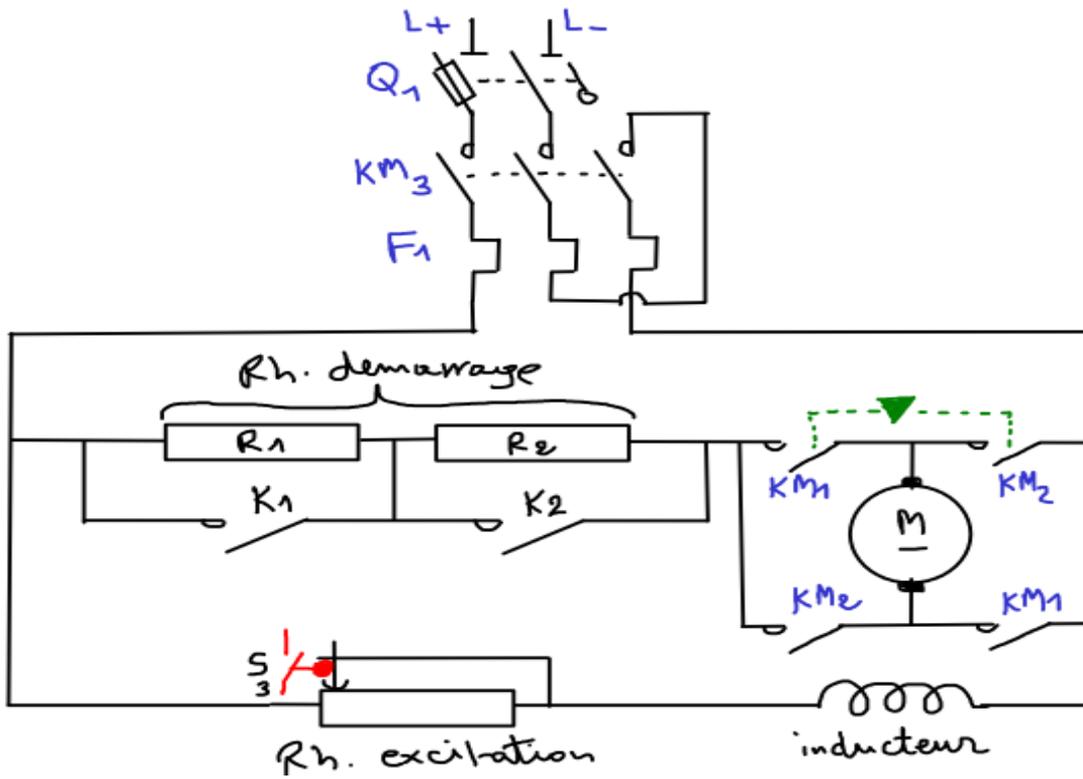
2.2- Démarrage semi-automatique 2 sens de rotation :

La variation de la vitesse :

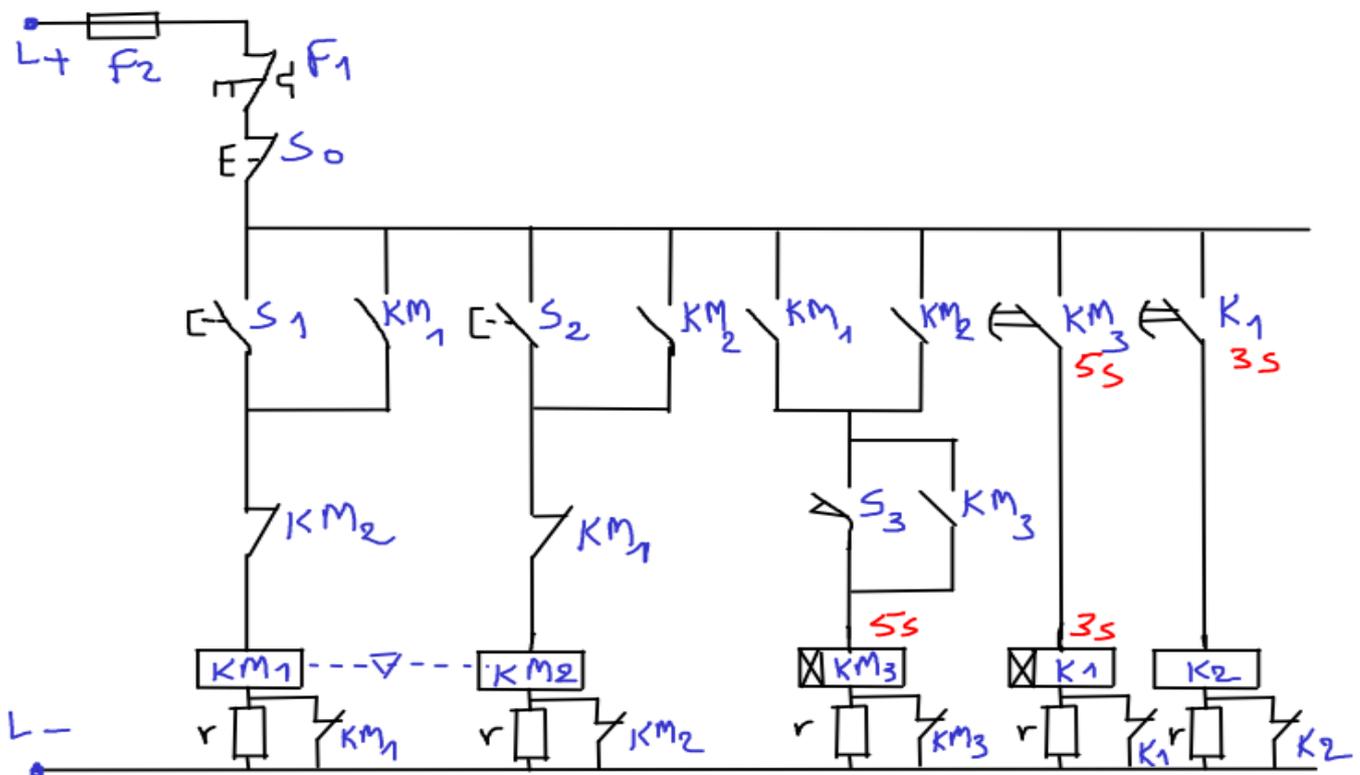
En règle générale et par rapport à la vitesse de rotation normale il est possible :

- D'augmenter cette vitesse en induisant le courant passant dans le circuit inducteur (agir sur le flux Φ).
- De diminuer cette vitesse en baissant la tension d'alimentation de l'induit U.

Circuit de puissance



Circuit de commande :



La plaque signalétique d'un moteur et d'une génératrice à cc.

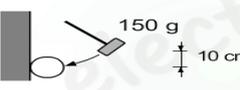
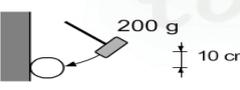
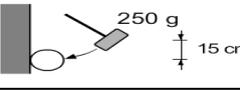
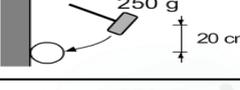
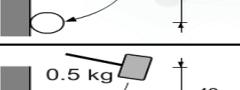
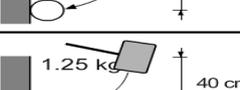
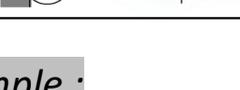
Les caractéristiques électriques nominales des machines à cc, sont portées sur une plaque signalétique fixée sur la carcasse.

Parmi ces caractéristiques on trouve :

- le nom du constructeur.
- le type de la machine et son mode d'excitation.
- le numéro de série (moteur ou génératrice).
- la tension nominale d'alimentation (en V).
- le courant nominal (en A).
- la vitesse de rotation (en tr/min).
- le courant d'excitation (en A).
- la puissance utile nominale (en KW).
- classe d'isolation : (A, B.....F.....). exemple A 105°C , F 155 °C
- genre de service : (S1 (continu), S2, S3.....).
- indice de protection IP. ex IP65

TABLEAU DE CLASSE DE PROTECTION

PROTECTION CONTRE UNE INTRUSION DE CORPS ETRANGERS SOLIDES		PROTECTION CONTRE UNE INTRUSION DE CORPS ETRANGERS LIQUIDES	
0	Aucune protection	0	Aucune protection
1	Protection contre les corps étrangers > 50mm	1	Protection contre les gouttes verticales
2	Protection contre les corps étrangers > 12,5mm	2	Protection contre les gouttes obliques (inclinaison maximale 15°)
3	Protection contre les corps étrangers > 2,5mm	3	Protection contre la pluie (inclinaison maximale de 60°)
4	Protection contre les corps étrangers > 1mm	4	Protection contre les éclaboussements de toutes les directions
5	Protection contre la poussière fine (talc...) ou de corps non visible.	5	Protection contre une eau projetée par une lance de 6,3mm à 0,3 bar
6	Protection contre la poussière fine, non visible, même microscopique	6	Protection contre une eau projetée par une lance de 12,5mm à 1 bar
		7	Protection contre une immersion totale à 1 mètre
		8	Matériel submersible

IK	Test	Définition
00	—	Pas de protection
01		Energie de choc : 0.15 J
02		Energie de choc : 0.20 J
03		Energie de choc : 0.37 J
04		Energie de choc : 0.50 J
05		Energie de choc : 0.70 J
06		Energie de choc : 1 J
07		Energie de choc : 2 J
08		Energie de choc : 5 J
09		Energie de choc : 10 J
10		Energie de choc : 20 J

Classe de température des isolants

A	105 °C
B	130 °C
F	155 °C
H	180 °C
N	200 °C
R	220 °C
S	240 °C
C	> 240 °C

Exemple :

SA		LEROY SOMER		CE	
16015 ANGOULEME Cedex FRANCE		MADE IN FRANCE		DATE	
LR 57008		MOTEUR A COURANT CONTINU		01/09/99	
2102718.A		DIRECT CURRENT MOTOR			
TYPE: LSK 1604 S 02	N° 7000000 / 001	M	249 Kg		
Classe / Ins class H	IM 1001	IP	23s	IC	06
M / Rated torque nom	810 N.m	Altit.	1000 m	Temp.	40 °C
	kW	min ⁻¹	V	A	V
Nom./Rat.	36,3	1150	440	95,5	360
					A
					3
T Systeme peinture: I		Induit / Arm.		Excit. Field SEPARÉE	
Service/ Duty	S1	DE	6312 2RS C3	NDE	6312 2RS C3

Le type du moteur : série : LSK hauteur d'axe : 160 Nombre de pôles : 4 Stator de type : S Indice constructeur : 02	LSK 1604 S 02
La classe d'isolation	Classe /ins class H
L'indice de protection	IP 23s
Le couple nominal	810 Nm
La température ambiante maxi de fonctionnement	Temp. 40 °
La tension nominale de l'induit	V 440
L'intensité dans l'induit	A 99,5
L'indice d'imprégnation de peinture	T système peinture : I

Le numéro de série suivi du numéro d'ordre dans la série	N° 70000000 / 001
La date d'expédition	01/06/99
La masse	M 249 Kg
La position de fonctionnement	IM 1001
L'indice de refroidissement	IC 06
L'attitude maxi de fonctionnement	Altit 1000 m
La puissance nominale La vitesse nominale	36,3 kW 1150 tr.min ⁻¹
La tension nominale de l'inducteur	V 360
L'intensité dans l'inducteur	A 3
Des indications relatives aux roulements employés coté entraînement coté opposé à l'entraînement	DE 6312 2RS C3 NDE 6312 2RS C3

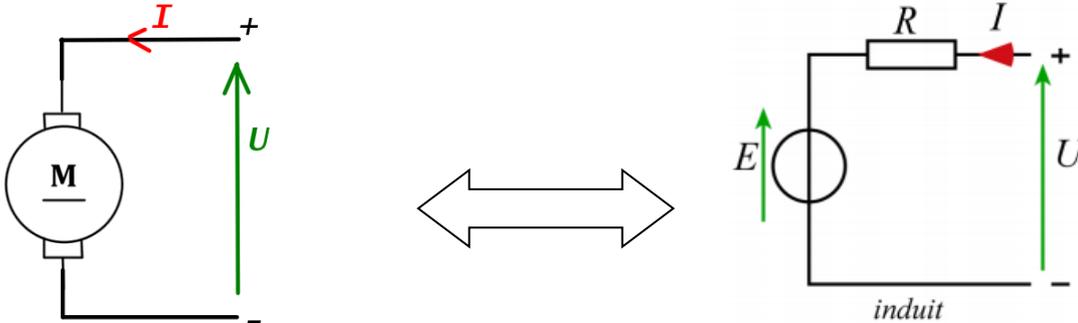
Exercice : identifier les renseignements inscrits sur cette plaque signalétique :

ROZZANO-MI-ITALIE			
DE LORENZO			
Moteur c.c excitat		Dérive	
Type	DL 2055	N° 863386	
			220 V
			15,6 A
			3 KW
			1500 tr/min
			0,78 A
			F

Bilan de puissance et caractéristiques des machines à CC

Moteur à CC :

Modèle équivalent de l'induit :



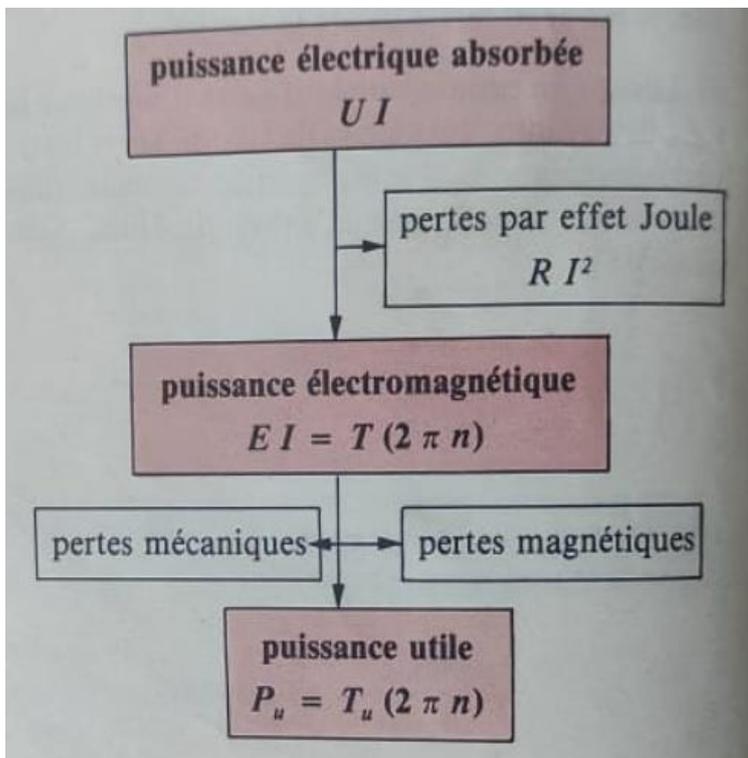
Avant il faut identifier le courant passant dans l'induit et la tension aux bornes de l'induit ;

Les lois utilisées en CC tel que loi des mailles, de nœud et loi d'ohm sont applicable ;

$$U = E' + R \cdot I \quad E' = \frac{P}{a} N n \Phi$$

NB : L'étude se fait au niveau de l'induit

Le bilan de puissance du moteur :



Puissance absorbée par l'induit

$$P_a = U \cdot I$$

Pertes joules induit

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

Puissance électromagnétique

$$P_{em} = P_a - P_{jI} = U \cdot I - R \cdot I^2 = (U - R \cdot I) \cdot I$$

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

Puissance utile

$$P_u = P_a - P_{jI} - P_{méc} - P_{mag}$$

$$P_u = P_{em} - P_C$$

La puissance utile P_u , c'est-à-dire la puissance dont on dispose sur l'arbre

$$P_u = P_{em} - (P_{mag} + P_{mec})$$

Il en résulte que le couple utile T_u appliqué par le moteur à la machine qu'il entraîne, est légèrement inférieur au couple électromagnétique T

$$T_u (2\pi n) = T (2\pi n) - (P_{mag} + P_{mec})$$

n : vitesse de rotation en tr/s

$$\frac{T_u(2\pi n)}{2\pi n} = \frac{T(2\pi n)}{2\pi n} - \frac{(P_{mag}+P_{mec})}{2\pi n}$$

$$T_u = T - \frac{(P_{mag}+P_{mec})}{2\pi n}$$

$$T_u = P_u/2\pi n \text{ avec } n : \text{vitesse en tr/s}$$

$$T_u = 60.P_u/2\pi n \text{ avec } n : \text{vitesse en tr/min}$$

La différence entre T et T_u est appelée **couple de pertes** T_p (T : couple électromagnétique)

$$T_u = T - T_p \quad ; \quad T_p = T - T_u = \frac{P_c}{2\pi n}$$

En conclusion, l'ensemble tourne à la vitesse de rotation n telle que

$$T_u = T_r \quad T_r : \text{Couple résistant}$$

Pertes constantes ou collectives PC

$PC = P_{mag} + P_{mec}$; pour déterminer leur valeurs on réalise un essai à vide du MCC

$$P_0 = PC + R \cdot I_0^2 ; \text{ Donc } PC = P_0 - R \cdot I_0^2 = U \cdot I_0 - R \cdot I_0^2 = E_0 \cdot I_0$$

Rendement du moteur à CC

Le rendement se calcule avec l'une des deux méthodes.

1^{ère} méthode :

On travaille avec la puissance absorbée par l'induit seule P_a séparée de la puissance d'excitation

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

2^{ème} méthode :

On travaille avec la puissance absorbée par le moteur induit et inducteur $P_a.T$

Avec : $P_u = P_a.T - P_{ex} - P_{jI} - PC$ avec $P_a.T - P_{ex} = P_a$

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

Puissance d'excitation ou pertes joule inducteur

$$P_{exc} = U_{ex} \cdot i_{ex} \quad \text{ou} \quad P_{ex} = r \cdot i_{ex}^2 \quad \text{ou} \quad P_{exc} = U_{ex}^2 / r$$

Interprétations des caractéristiques du moteur

- Vitesse de rotation

$$E = k \Phi \Omega$$

d'où :

$$\Omega = \frac{U - RI}{k\Phi}$$

- Caractéristique $\Omega(i)$ à U constante

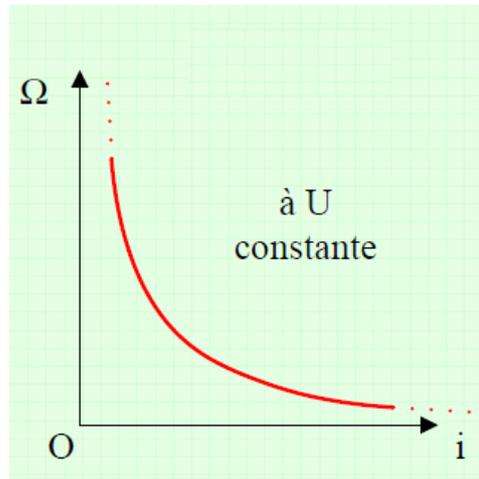
Charge ↗ courant d'induit I ↗

En pratique : $RI \ll U$

$$\Omega \approx \frac{U}{k\Phi}$$

$\Phi \propto i$

Finalement : $\Omega \propto \frac{1}{i}$

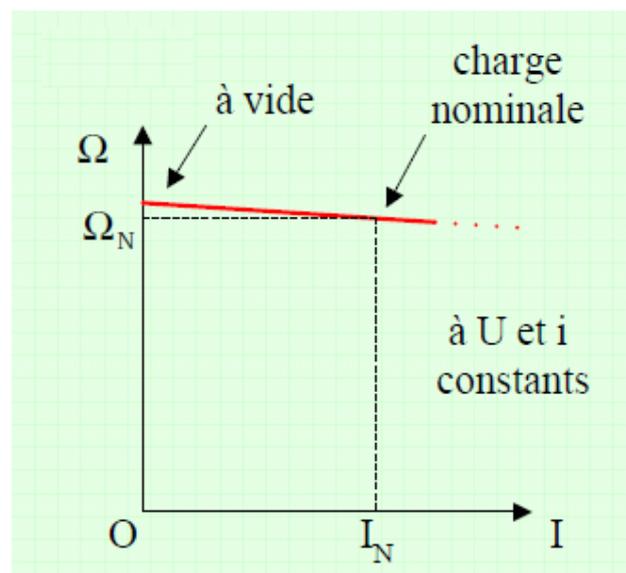


Si on coupe accidentellement le courant d'excitation ($i = 0$), la vitesse augmente très rapidement : Le moteur s'emballe !

- Caractéristique $\Omega(I)$ en charge
à U constante et i constant (Φ constant)

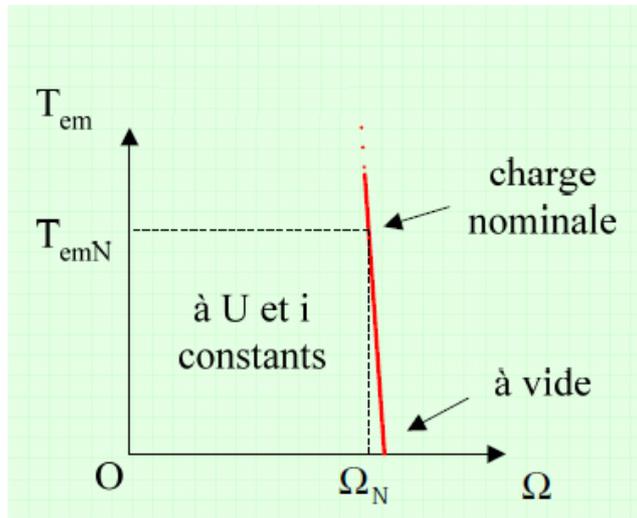
Charge ↗ courant d'induit I ↗ et vitesse de rotation ↘

$$\Omega = \frac{U - RI}{k\Phi}$$



La vitesse de rotation varie peu avec la charge 😊.

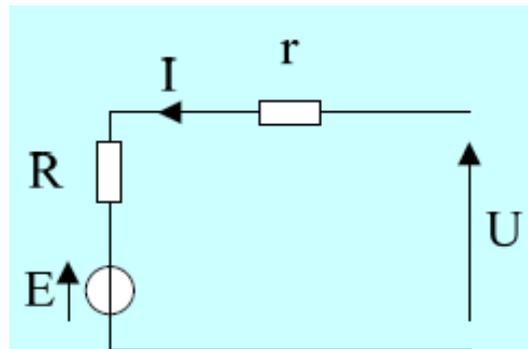
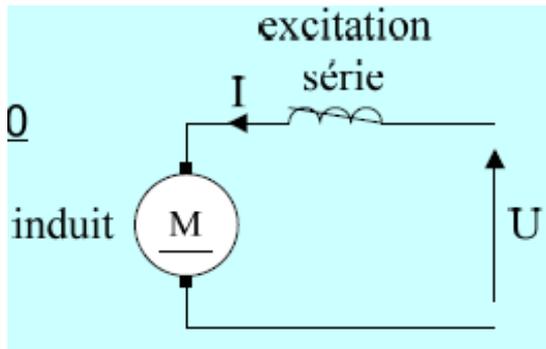
- Caractéristique mécanique $T_{em}(\Omega)$ à U constante et i constant



Le couple de démarrage ($\Omega = 0$) est important.

Le moteur démarre seul 😊.

Moteur série :



$$U = E + R_{\text{totale}} I$$

$$\text{avec : } R_{\text{totale}} = r + R$$

- *Avantages du moteur série*

Tem est proportionnel au I^2

⇒ couple important (en particulier au démarrage).

- *Inconvénients*

La vitesse de rotation dépend fortement de la charge :

Elle augmente rapidement quand la charge diminue.

A vide, $I \approx 0$ donc $E \approx U$

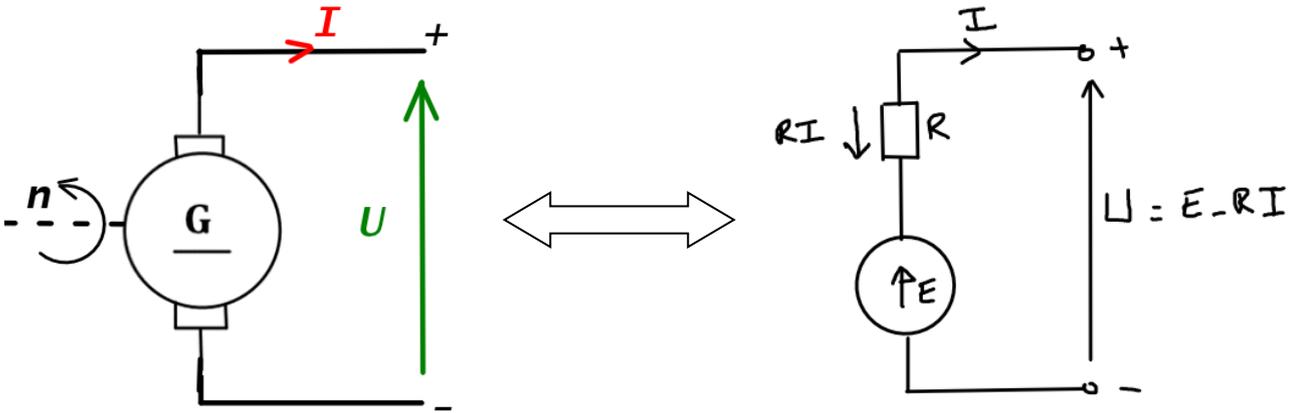
$E = K.n.\phi$ or ϕ dépend de $I \Rightarrow E = U = K.n.I^2$

D'où $n = U/K.I^2$

Ce moteur doit toujours avoir une charge car à vide il s'emballe !

Génératrice à CC :

Modèle équivalent de l'induit :



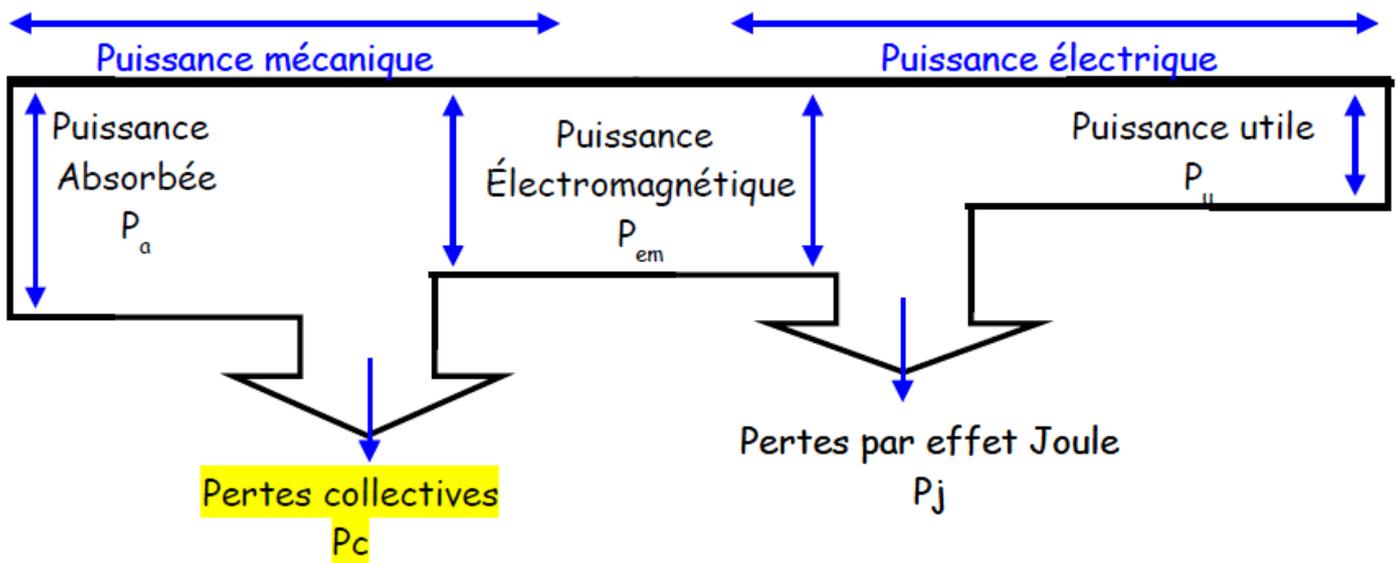
Avant il faut identifier le courant débité par l'induit et la tension aux bornes de l'induit ; ainsi le courant absorbé par l'inducteur et celui qui est fourni à la charge

Les lois utilisées en CC tel que loi des mailles, de nœud et loi d'ohm sont applicable ;

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

NB : L'étude se fait au niveau de l'induit

Le bilan de puissance de la génératrice :



La puissance absorbée est la puissance mécanique d'entraînement

$$P_a = P_{mec} = C_{mec} \cdot \Omega$$

$$P_c = P_{mag} + P_{méc}$$

$$P_{em} = P_a - P_c = P_u + P_j \quad \text{avec } P_j = R \cdot I^2$$

Rendement :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a.T} \quad \text{Ou} \quad \eta = \frac{P_u}{P_a + P.ex}$$

Avec : $P_u = U . I$

Puissance d'excitation ou pertes joule inducteur

$$P.ex = U_{ex} . i_{ex} \quad \text{ou} \quad P.ex = r . i_{ex}^2 \quad \text{ou} \quad P.ex = U_{ex}^2 / r$$

Exercices d'application sur les MCC

Moteur à excitation shunt

Un moteur shunt est alimenté sous une tension constante de 200 V. Il absorbe un courant $I_t = 22A$. La résistance de l'inducteur est $r = 100 \Omega$, celle de l'induit $R = 0,5\Omega$. Les pertes constantes sont de 200 W. Calculer :

- Les courants d'excitation et d'induit.
- La force contre électromotrice.
- Les pertes par effet Joule dans l'inducteur et dans l'induit.
- la puissance absorbée, la puissance utile et le rendement global.
- On veut limiter à 30 A l'intensité dans l'induit au démarrage. Quel doit être la valeur de la résistance du rhéostat de démarrage.

Moteur à excitation séparée

Un moteur à courant continu est à excitation indépendante et constante. Il a une résistance $R = 0,20 \Omega$. Il est alimenté sous une tension constante $U = 38 V$.

1. A charge nominale, l'induit est parcouru par une intensité $I = 5 A$ et il tourne à la vitesse de rotation de 1000 tr/min.

- Calculer la force électromotrice de l'induit.
- Calculer le moment du couple électromagnétique T_{em} .

2. Par suite d'une variation de l'état de charge, l'intensité à travers l'induit devient $I' = 3,8 A$ calculer :

- Le nouveau moment du couple électromagnétique T'_{em} ,
- La nouvelle vitesse de rotation Ω' .

Moteur à excitation série

1- Donner le schéma électrique équivalent d'un moteur à courant continu à excitation série.

2- On donne :

- ✓ tension d'alimentation du moteur : $U = 200 \text{ V}$
- ✓ résistance de l'inducteur : $r = 0,5 \Omega$
- ✓ résistance de l'induit : $R = 0,2 \Omega$
- ✓ courant consommé : $I = 20 \text{ A}$
- ✓ vitesse de rotation : $n = 1500 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$

Calculer :

2-1- La f.é.m. du moteur.

2-2- La puissance absorbée, la puissance dissipée par effet Joule et la puissance utile si les pertes collectives sont de 100 W .

En déduire le moment du couple utile et le rendement.

2-3- Au démarrage, le courant doit être limité à $I_d = 40 \text{ A}$.

Calculer la valeur de la résistance du rhéostat à placer en série avec le moteur

Génératrice à excitation shunt

Une génératrice à excitation shunt compensée fournit un courant de 36 A à une charge sous une tension de 225 V . ($R. \text{ induit}$)= 0.4Ω , ($r. \text{ inducteur}$)= 150Ω et les pertes constantes sont de 1 kW .

Schématiser le circuit de la génératrice

Calculer :

1° La f.é.m. en charge

2° Les pertes par effet Joule dans les inducteurs ;

3° Les pertes par effet Joule dans l'induit ;

4° La puissance utile ;

5° La puissance absorbée ;

6° Le rendement

Génératrice à excitation séparée

Pour un courant d'excitation de 4A, la force électromotrice constante d'une génératrice à excitation indépendante, parfaitement compensée, est $E_c = 240V$.

Les résistances des enroulements sont : $R = 0,08\Omega$, $r = 30\Omega$.

Les pertes constantes sont $p_c = 450W$. Pour un débit $I = 80A$; calculer ;

1° La tension U

2° Les puissances suivantes ;

a) Puissance utile,

b) Pertes par effet joule dans l'induit,

c) Pertes par effet joule dans l'inducteur,

d) Puissance absorbée.

3° Le rendement.

Génératrice à excitation composée

Une génératrice compound courte dérivation fournit à un circuit de charge un courant de 80A sous une tension de 220V. Les résistances des enroulements sont : induit $R_a = 0.1\Omega$, inducteur série $R_{fs} = 0.05\Omega$, inducteur parallèle $R_{fp} = 112\Omega$. Calculer :

1) Les courants qui traversent chaque partie de la machine ;

2) La f.é.m. en charge ;

3) P_u , les différentes pertes par effet Joule et la puissance totale P_a sachant que $P_C = 400W$

4) le rendement

EXERCICES

Exercice 1 :

1. Un moteur à excitation indépendante alimenté sous 220V possède une résistance d'induit de $0,8\Omega$. A la charge nominale, l'induit consomme un courant de 15A. Calculer la f.é.m. E du moteur.
2. La machine est maintenant utilisée en génératrice (dynamo). Elle débite un courant de 10A sous 220V. En déduire la f.é.m.

Exercice 2 :

Une génératrice à excitation indépendante fournit une f.é.m. de 220V pour un courant d'excitation de 3,5A. La résistance de l'induit est de $90m\Omega$. Calculer la tension d'induit U lorsqu'elle débite 56A dans le circuit de charge.

Exercice 3 :

La plaque signalétique d'un moteur à courant continu à excitation indépendante indique :

1,12 kW ; 1200 tr/min ; induit 220 V - 5,7 A ; excitation 220 V - 0,30 A ; 57 kg

1. Calculer le couple utile nominal.
2. Calculer le rendement nominal.

Exercice 4 :

La plaque signalétique d'une génératrice à courant continu à excitation indépendante indique :

11,2 Nm 1500 tr/min ; induit 220 V / 6,8 A ; excitation 220 V / 0,26 A ; masse 38 kg

1. Calculer la puissance mécanique consommée au fonctionnement nominal.
2. Calculer la puissance consommée par l'excitation.
3. Calculer la puissance utile.
4. En déduire le rendement nominal.

Exercice 5 :

Une génératrice à excitation indépendante délivre une f.é.m. constante de 210V pour un courant inducteur de 2A. Les résistances des enroulements induit et inducteur sont respectivement $0,6\Omega$ et 40Ω . Les pertes constantes sont de 400W.

Pour un débit de 45A, calculer :

1. La tension d'induit U
2. La puissance utile P_u .
3. Les pertes Joule induit et inducteur.
4. La puissance absorbée P_a .
5. Le rendement η .

Exercice 6 :

Un moteur à courant continu à excitation indépendante et constante est alimenté sous 240V. La résistance d'induit est égale à $0,5\Omega$, le circuit inducteur absorbe 250W et les pertes collectives s'élèvent à 625W. Au fonctionnement nominal, le moteur consomme 42A et la vitesse de rotation est de 1200tr/min.

1. Calculer :
 - a. La f.é.m.
 - b. La puissance absorbée, la puissance électromagnétique et la puissance utile.
 - c. Le couple utile et le rendement.
2. Quelle est la vitesse de rotation du moteur quand le courant d'induit est de 30A ?
3. Que devient le couple utile à cette nouvelle vitesse ?
4. Calculer le rendement.

Exercice 7 :

Un moteur à excitation indépendante et constante, a une résistance d'induit $R=0,2\Omega$. Il est alimenté sous une tension constante $U=38V$. En charge nominale, l'induit absorbe le courant $I=5A$, et tourne à la vitesse $N=1000$ tr/min.

1. Représenter le modèle équivalent de l'induit, en fléchant la tension et le courant.
2. Calculer la force électromotrice E de l'induit.
3. Calculer la puissance électromagnétique P_{em} . En déduire le couple électromagnétique T_{em} ?
4. Montrer que l'on peut exprimer E en fonction de la vitesse N suivant la relation : $E=k.N$
5. Montrer que l'on peut exprimer T_{em} en fonction de courant d'induit I suivant la relation :
 $T_{em}=k'.I$

Par suite d'une variation de l'état de charge, l'intensité à travers l'induit devient $I' = 3,8A$, calculer :

- a. Le nouveau moment du couple électromagnétique $T'em$.
- b. La nouvelle fréquence de rotation N' . Comparer N' et N . Commenter ?

Exercice 8 :

La plaque signalétique d'un moteur à excitation indépendante porte les indications suivantes :

$$U = 240 \text{ V} \quad I = 35 \text{ A} \quad P = 7 \text{ kW} \quad n = 800 \text{ tr/min}$$

Calculer (à la charge nominale) :

1. Le rendement du moteur sachant que les pertes Joule inducteur sont de 150 watts.
2. Les pertes Joule induit sachant que l'induit a une résistance de $0,5 \Omega$.
3. La puissance électromagnétique et les pertes « constantes ».
4. Le couple électromagnétique, le couple utile et le couple des pertes « constantes ».

Exercice 9 :

Un moteur à courant continu, en excitation indépendante maintenue constante, a pour résistance d'induit $R = 0,80 \Omega$. Il est alimenté sous une tension nominale $U = 130 \text{ V}$ également maintenue constante.

- A vide, l'induit absorbe le courant $I_0 = 1,2 \text{ A}$
- En charge, lorsque le courant I est de 20 A , la fréquence de rotation vaut 1200 tr/min (fonctionnement normal).

a) La pointe de courant acceptée au démarrage étant égale à 2, calculer la valeur de la résistance R_d à mettre en série avec l'induit.

b) Déterminer, pour le fonctionnement en charge,

- la f.é.m. E ,
- le couple électromagnétique T ,
- le couple de pertes T_p (que l'on supposera constant quel que soit n),
- la puissance utile P_u .

c) Calculer la fréquence de rotation :

- A vide ; et • Lorsque le couple résistant vaut 10 Nm .

Pose des machines :

a) Levage des machines

L'installation des petites machines électriques (jusqu'à 5 kW) ne pose pas de problème, leur mise en place s'effectue à bras d'homme avec l'aide d'une barre de fer rond, passé dans l'anneau de levage.

Les machines excédant le poids de 150 kg demandent le secours d'un appareil de levage tel qu'un palan accroché à une chèvre, à un monorail ou à un pont roulant. Une grue convient également

b) Fixation des machines électriques

- Rigide, avec fixation par boulons scellés, soit contre un mur, soit sur le sol cimenté, soit sur un massif de béton.
- Rigide, par boulonnage sur chaises ou sur le bâti d'une machine-outil.
- Réglable, avec fixation sur des glissières.

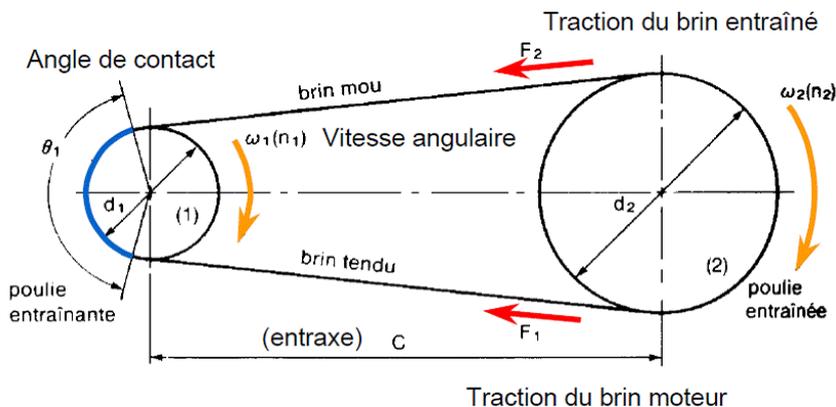
Entraînement des machines :

Une génératrice a besoin d'être entraînée pour fournir un courant.

Un moteur électrique est accouplé pour transmettre son énergie mécanique.

a) Entraînement par courroie

Il est employé chaque fois que la vitesse de la machine motrice est différente de celle que doit avoir la machine entraînée. C'est par le jeu du diamètre des poulies que l'on obtient la vitesse désirable de la machine ou de l'arbre récepteur :



S'il n'y avait pas de glissement :

$$\begin{cases} v_1 = v_2 = v \\ \pi d_1 n_1 = \pi d_2 n_2 \end{cases} \Rightarrow R_v = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1}$$

$D = d \times (n / N)$ où :

n - la vitesse de la machine réceptrice

d - le diamètre de sa poulie

N - la vitesse du moteur

D - le diamètre de sa poulie

Il existe des courroies en : Caoutchouc, poil de chameau, Coton, Matière, plastique, Soie et Cuir

Entraînement par manchons d'accouplement :

Les accouplements d'arbres bout à bout sont de plusieurs types.

- *Accouplement rigide*



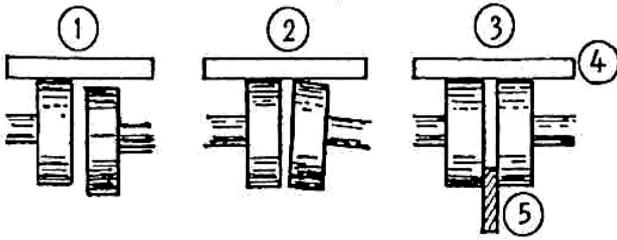
- *Accouplement semi-élastique*



- *Accouplement élastique*



Contrôle de l'alignement :

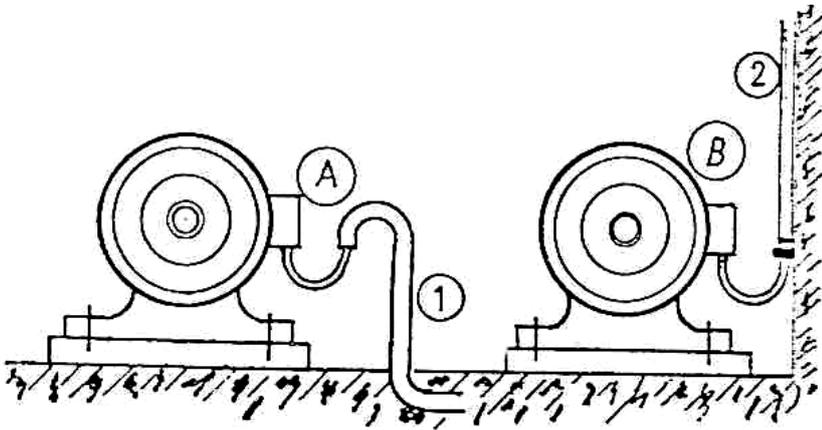


Réglage des manchons d'accouplement.

En (1) et (2) le réglet indique que les Plateaux ne sont pas alignés. En (3) les Plateaux sont alignés et la jauge (5) indique partout le même écartement.

Raccordement des canalisations au moteur :

Le raccordement de la ligne électrique à la boîte à bornes des génératrices ou des moteurs doit être souple. On doit éviter toute traction entre ligne et bornes et les conducteurs exigent un certain mou, voir même un boudinage de quelques spires, à proximité de la plaque à bornes.



Entretien et réparation des machines électriques :

Leur entretien est assez réduit, car il se limite :

- ✓ au renouvellement de la graisse pour les paliers à roulements à billes et au niveau d'huile dans les paliers à coussinets
- ✓ au dépoussiérage, qui peut être fait au soufflet, à l'air comprimé et à l'aide de chiffons
- ✓ à la propreté du collecteur, que l'on peut entretenir en utilisant du papier de verre à grain fin.
- ✓ à la vérification des charbons des balais, tant au point de vue de leur pression sur le collecteur. S'il y a lieu de les remplacer, il faut choisir les balais de même composition que les anciens
- ✓ à la vérification du serrage des fils d'arrivée à la plaque à bornes
- ✓ à la vérification de la tension de la courroie ou du serrage du manchon d'accouplement.

Les réparations qui peuvent se présenter dans les parties électriques d'une machine proviennent :

- ✓ d'un court-circuit entre lames du collecteur (à vérifier avec un grognard)
- ✓ de l'usure du collecteur (que l'on rafraîchira au tour)
- ✓ du débordement des micas entre les lames du collecteur (que l'on supprime avec une fraise ou une lame de scie à métaux)
- ✓ de sections en court-circuit
- ✓ d'un défaut d'isolement entre sections ou entre le bobinage et la masse métallique du moteur
- ✓ d'une coupure dans le bobinage ou entre le bobinage et le collecteur.

La méthode de diagnostic

Le diagnostic est une phase importante de la maintenance corrective. De sa pertinence et de sa rapidité dépend l'efficacité de l'intervention dans l'entreprise.

Il est précédé par deux actions :

- ✓ - La détection : qui décèle au moyen d'une surveillance accrue, continue ou non l'apparition d'une défaillance ou l'existence d'un élément défaillant ;
- ✓ - La localisation : qui conduit à rechercher précisément l'(les) élément(s) par le(s) quel(s) la défaillance se manifeste.

Le diagnostic permet de confirmer, de compléter ou de modifier les hypothèses faites sur l'origine et la cause des défaillances et de préciser les opérations de maintenance corrective nécessaires.

La conduite d'un diagnostic nécessite un grand nombre d'informations saisies :

- ✓ Auprès des utilisateurs de la machine
- ✓ Dans les documents des constructeurs
- ✓ Dans les documents du service technique
- ✓ Dans les documents des méthodes de maintenance.

La méthode générale du diagnostic comporte :

- L'inventaire des hypothèses :

- ✓ *Le diagnostic doit identifier les causes probables de la défaillance*
- ✓ *L'efficacité du diagnostic doit conduire à hiérarchiser les hypothèses par rapport à deux grands critères : leur probabilité de se révéler vraies et la facilité de leur vérification.*

- La vérification des hypothèses retenues

- ✓ *En les prenant dans l'ordre de leur classement chaque hypothèse doit être vérifiée.*
- ✓ *L'enchaînement de ses vérifications jusqu'à la constatation d'un essai Bon.*
- ✓ *La recherche d'une panne dans un circuit électrique ou électronique relève d'un raisonnement logique faisant appel aux étapes suivantes :*

