

Chapitre 5

LES MACHINES A COURANT CONTINU

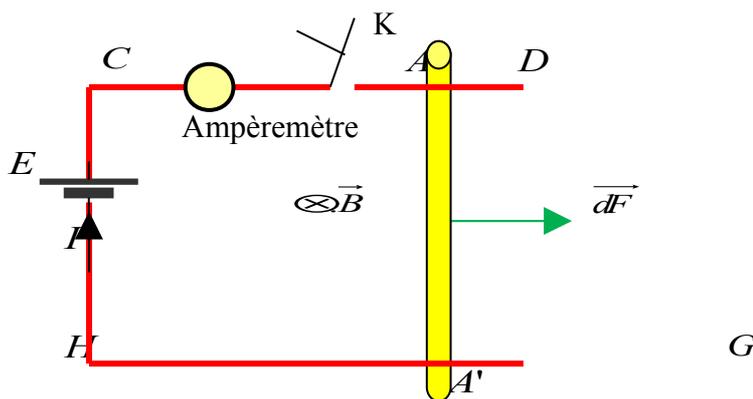
OBJECTIFS DU CHAPITRE

- Comprendre le principe, lié à sa constitution, de ce type de machine électrique tournante ;
- Connaître les grandeurs fondamentales qui caractérisent une telle machine ;
- En connaître les principales utilisations et les limites.

A- QUELQUES GENERALITES_

I- DEUX EXPERIENCES FONDAMENTALES

Considérons le montage ci-dessous. Il comporte un rail conducteur sur lequel repose une tige cylindrique conductrice, libre de se déplacer sur le rail. Ce rail est placé dans un champ d'induction \vec{B} , perpendiculaire au plan du rail (rentrant)



I-1 : Première expérience : principe du Moteur à courant continu

- Lorsqu'on ferme l'interrupteur K, on constate que la tige AA' se déplace de la gauche vers la droite.
- Si on change le sens de \vec{B} . (induction magnétique), le sens de déplacement de la tige s'inverse.
- Il en est de même si on change la polarité de la fém E, c-à-d le sens du courant I qu'elle débite.

Interprétation

Dans cette expérience, la tige conductrice est parcourue par un courant I débité par une f.é.m E et est soumise à un champ d'induction magnétique \vec{B} , perpendiculaire au plan du rail.

Chaque élément $I \cdot d\vec{\ell}$ de la tige conductrice est soumis à une force de Laplace $\vec{d.F}$ telle que $\vec{d.F} = I \cdot d\vec{\ell} \wedge \vec{B}$ et dont la résultante est $\vec{F} = \int \vec{d.F}$

Sous l'effet de cette force \vec{F} , la tige conductrice se met en mouvement de translation de vitesse \vec{v} (**principe fondamental de la dynamique**)

a) **Le sens de la force $\vec{d.F}$** s'obtient par application **de la règle des trois doigts de la main droite**. Ainsi,

- si l'intensité I (en fait $I.d\vec{\ell}$) est dirigée selon l'**I**ndex,
- et l'induction **M**agnétique \vec{B} selon le **M**ajeur (Magnétique),
- **alors la force $\vec{d.F}$** (ou **P**oussée) est dirigée selon le **P**ouce.

b) les trois grandeurs $I.d\vec{\ell}$, \vec{B} et $\vec{d.F}$ sont reliées par la relation vectorielle

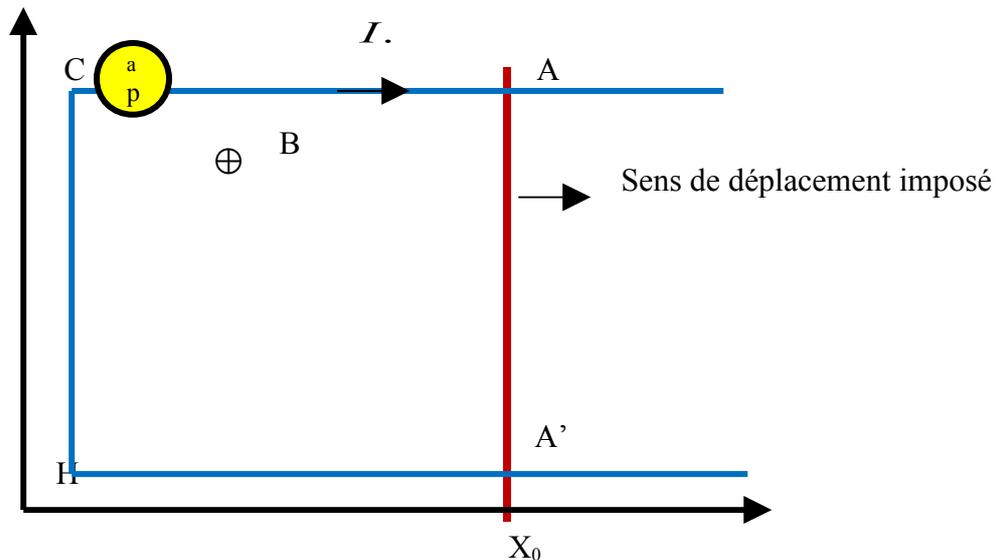
$$\vec{d.F} = I.d\vec{\ell} \wedge \vec{B}$$

I-2 : Deuxième expérience : principe de la génératrice

Le dispositif précédent est modifié de la manière suivante : on court-circuite la fém. E. On ferme l'interrupteur K et **on fait déplacer la tige** conductrice AA' sur les rails qui sont toujours placés dans le champ d'induction magnétique \vec{B} .

On observe les phénomènes suivants :

- l'aiguille de l'ampèremètre dévie, mettant en évidence la présence d'un courant qui circule dans la tige. Il revient au même de dire que l'on a mis en évidence la présence d'une fém aux bornes de la tige.
- Si l'on change le sens de déplacement de la tige sur les rails, on change le sens du courant.
- Il en est de même si on change le sens de l'induction \vec{B} .



Interprétation

Le déplacement de la tige fait varier le flux de \vec{B} dans la « spire » fermée constituée par le circuit CAA'HC. D'après la loi de Lenz, cette variation de flux va donner naissance à une fém. « e » d'induction telle que :

$$e = -\frac{d\phi}{dt}$$

La fém. « e » va faire circuler un courant dans la tige conductrice.

Remarques:

- a) Le sens du courant qui dépend de la polarité de la fém. induite est déterminé par la règle du flux maximal. En effet, un circuit électrique fermé, parcouru par un courant I , placé dans un milieu d'induction magnétique \vec{B} et capable de se déformer ou de se déplacer, tend vers une position d'équilibre stable correspondant au flux maximal embrassé par ce circuit. Ce flux maximal est rentrant par la face sud du circuit. Il convient de rappeler que les faces Sud et Nord d'un circuit sont déterminées par la règle du tire-bouchon. En faisant tourner le tire-bouchon dans le sens de parcours du courant, il progresse du sud vers le nord.
- b) Appliquons cela au cas du dispositif de l'expérience n°1 :
- Le circuit ACHA'A traversé par le courant I est déformable : le conducteur AA' est mobile ; compte tenu du sens de I , la face « haut » est le sud, tandis que la face « bas » est le nord. Ainsi donc, les lignes d'induction, c'est-à-dire les lignes de \vec{B} pénètrent par la face sud du circuit. (c-à-d par le haut et sortent par le bas)
 - Avant déplacement, le flux embrassé par le circuit est $\Phi_0 = B \cdot \ell \cdot x_0$.
 - Après déplacement, le flux embrassé devient $\Phi_1 = B \cdot \ell \cdot x_1$
 - On doit donc avoir $\Phi_1 > \Phi_0$. deux cas sont à envisager
 - α) \vec{B} a le sens indiqué sur le schéma : le sens du courant doit être de sorte que la face Sud soit au dessus et la face Nord en dessous
 - β) \vec{B} a le sens contraire, alors le courant change de sens dans la tige

Ces deux expériences sont à la base du fonctionnement des machines à courant continu. La première concerne le fonctionnement moteur et la seconde le fonctionnement en génératrice

II- DESCRIPTION DE LA MACHINE A COURANT CONTINU

II-1 : Constitution de la machine à courant continu

En tant que machine tournante, la machine à courant continu comporte essentiellement

- **une partie fixe appelée stator ou encore inducteur** ;
- **une partie mobile circulaire appelée rotor ou induit**, les deux parties étant séparées par un entrefer,
- et des accessoires (exemple : le collecteur) qui constituent son environnement.

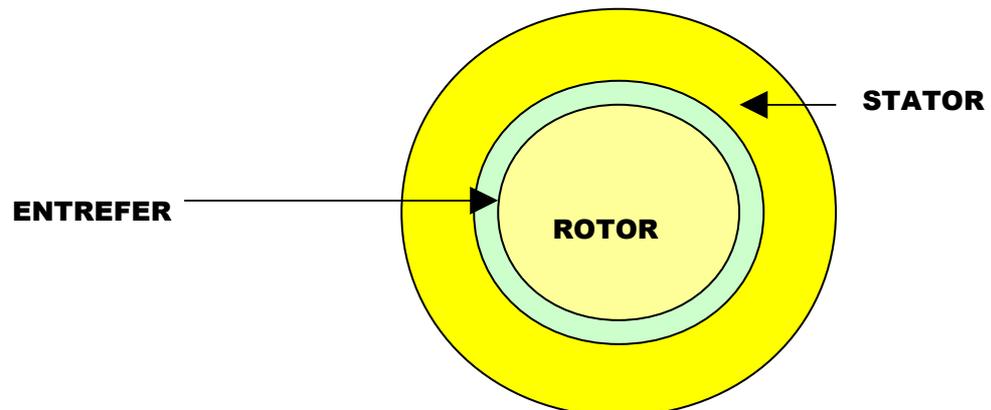
D'un point de vue électrique, la machine se compose des éléments suivants : (i) un circuit magnétique et (ii) deux circuits électriques.

a) Le circuit magnétique

Celui-ci est formé d'une partie ferromagnétique ou carcasse et d'un entrefer. La carcasse appartient pour partie au **stator solide** du bâti et pour partie au **rotor qui est en fait un cylindre concentrique mobile** autour d'un arbre.

Le circuit magnétique a pour fonctions principales la création du flux magnétique et sa canalisation vers l'entrefer qui est le siège des phénomènes électromécaniques, responsables de l'apparition du couple dû à l'action du flux du stator sur le courant du rotor

Le circuit magnétique peut être schématisé de la manière suivante (une coupe transversale de la machine):



b) Le circuit électrique de l'inducteur

Constitué de bobines branchées en série, il est alimenté en courant continu. Les bobines enroulées autour des noyaux polaires sont la source du champ magnétique. Suivant le nombre de bobines inductrices, on obtient :

- soit (i) une machine bipolaire ; on distingue l'axe des pôles et la droite perpendiculaire à l'axe des pôles qui est appelée ligne neutre.
- soit une machine multipolaire comportant $2p$ pôles (p pôles Nord et p pôles Sud). Cependant l'étude d'une machine $2p$ pôles peut être ramenée à celle d'une machine bipolaire.

Remarque : dans certaines machines de faible puissance, on utilise des aimants permanents à base de ferrites ou de terres rares, comme sources de champ magnétique, et donc comme inducteur.

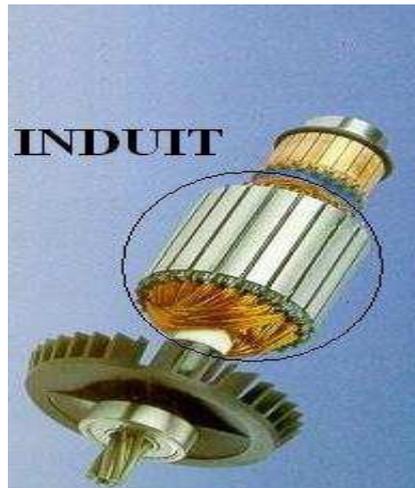


c) Le circuit électrique de l'induit

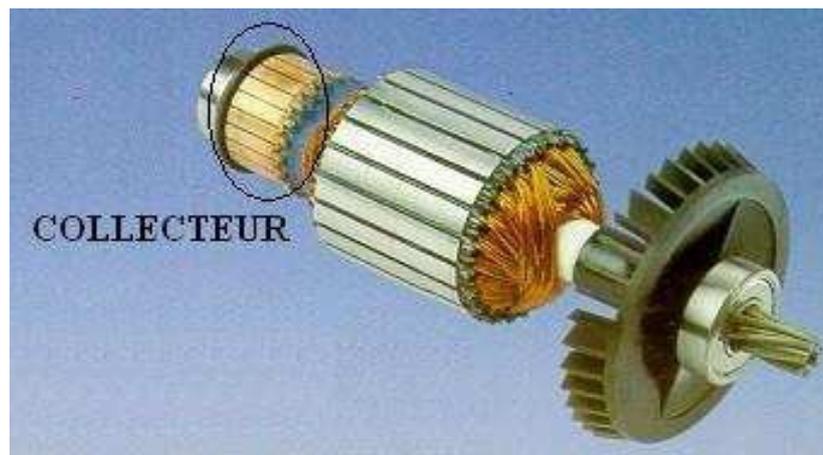
L'enroulement du rotor, plus complexe, est formé de conducteurs logés dans des encoches aménagées à la surface extérieure de la carcasse cylindrique formant le circuit magnétique du rotor.

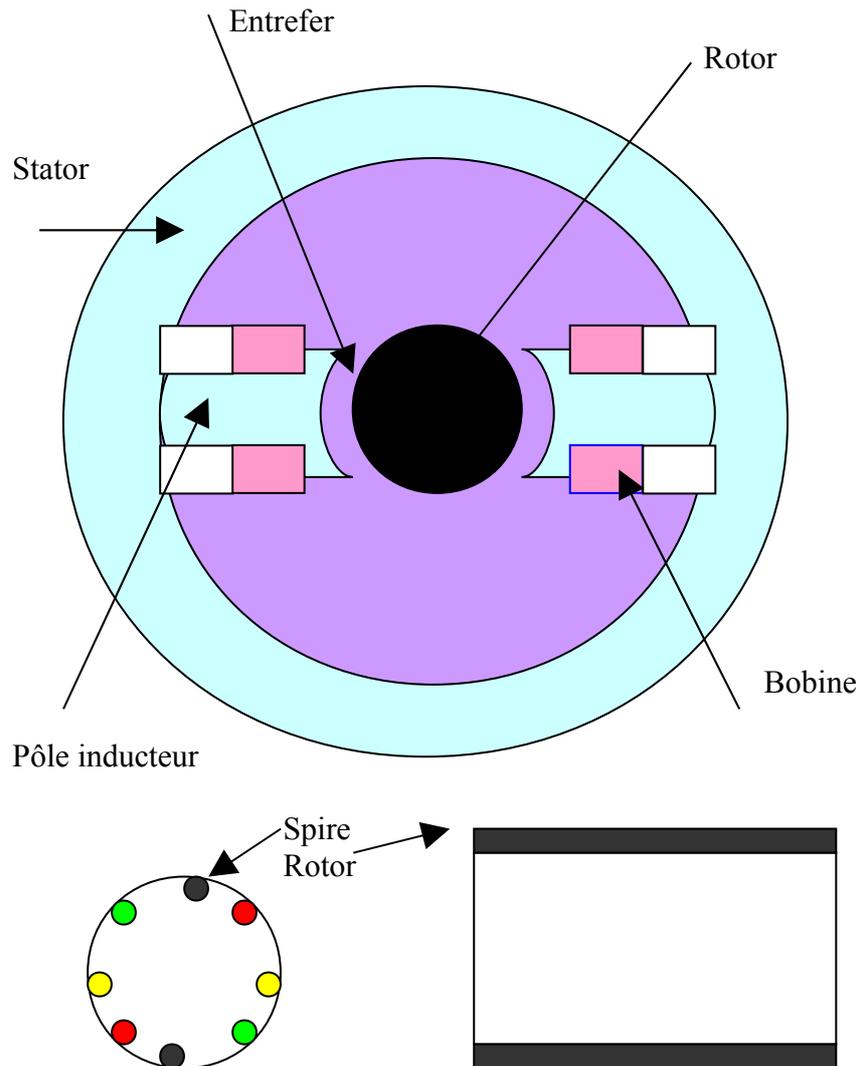
Ce sont ces conducteurs solidaires du cylindre soumis aux forces de Laplace, qui vont entraîner celui-ci dans leur mouvement de rotation.

On relie ensemble deux conducteurs presque diamétralement opposés, pour constituer une spire dont les extrémités sont soudées à deux lames voisines d'un collecteur, solidaire de l'arbre.



- d) **Le collecteur** est constitué de lames de cuivre isolées les unes des autres. Sur ce collecteur frottent des balais fixes en carbone et de ces balais partent les fils qui assurent la liaison électrique entre le rotor et l'extérieur de la machine ;





II-2 : Description et principe de fonctionnement d'une machine bipolaire

Pour simplifier, nous allons considérer une **génératrice bipolaire**.

Par référence à l'expérience fondamentale, pour qu'une telle machine puisse fonctionner, il nous faut :

- a) **un dispositif de création d'un champ d'induction magnétique \vec{B} .**

Celui-ci est réalisé par deux bobines magnétisantes branchées en série, parcourues par un courant continu. Le sens d'enroulement des bobines est tel que nous avons un pôle Nord et un pôle Sud.

Le dispositif de ces bobines est appelé **inducteur**. En outre, il est fixe. **C'est le stator.**

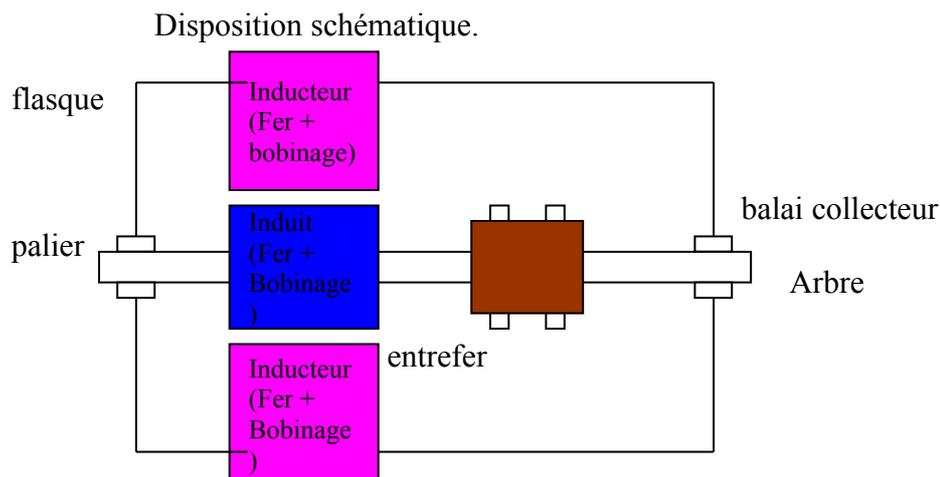
- b) **des conducteurs mobiles dans le champ d'induction magnétique produit par les bobines.**

De fait, ces conducteurs sont dans des encoches aménagées selon les génératrices à la surface d'un cylindre animé d'un mouvement de rotation

autour de son axe. Le noyau de ce cylindre est constitué par un empilage de tôles au silicium, séparées par un vernis isolant. Ce dispositif est **l'induit**, en ce sens que la f.é.m (et par voie de conséquence le courant) sera induite dans ce dispositif. Etant mobile, l'induit est également appelé **rotor**. Le dispositif inducteur (les bobines inductrices et leur support, les pôles) et le dispositif de l'induit (le cylindre mobile) sont séparés par un **entrefer** dont le rôle est essentiel dans le fonctionnement de cette machine.

En outre pour que le flux créé par l'inducteur soit aussi grand que possible, il est canalisé par une carcasse ferromagnétique tant au stator qu'au rotor. Cette carcasse constitue avec l'entrefer **le circuit magnétique**.

Le bobinage de l'induit est relié par l'intermédiaire d'un **commutateur mécanique** formé par **des balais** s'appuyant sur **le collecteur**. Ces balais ont pour rôle de faire passer dans un sens le courant qui circule dans les conducteurs de l'induit lorsque ceux-ci sont sous le pôle Nord et en sens inverse quand ils sont sous le pôle Sud. De cette manière, le couple qui s'exerce sur un conducteur garde le même sens que ce conducteur soit sous un pôle Nord (le sens de \vec{B} est positif) ou sous un pôle Sud (le sens de \vec{B} est négatif).



Conclusion

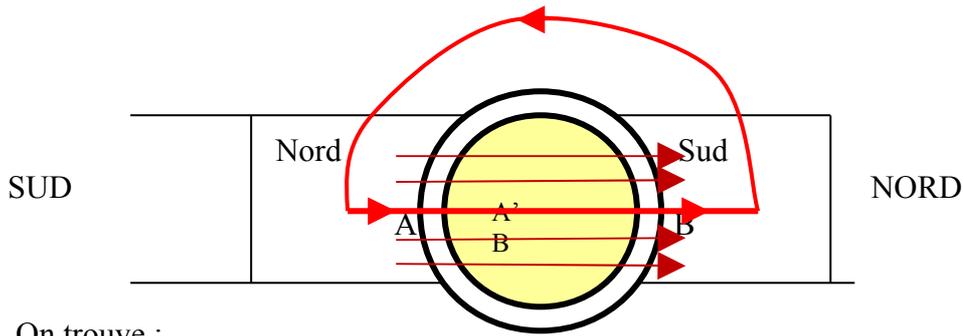
La machine à courant continu est un convertisseur d'énergie réversible : la génératrice transforme en énergie électrique l'énergie mécanique qu'elle reçoit, alors que le moteur effectue la transformation inverse. Ces transformations s'accompagnent inévitablement de pertes.

III- PARAMETRES DE LA MACHINE

Le fonctionnement de la machine dépend des paramètres suivants : l'existence d'une fém aux bornes de l'induit (le rotor) et d'un couple sur l'arbre de la machine.

III-1 : Topographie du champ magnétique dans l'entrefer.

Appliquons le théorème d'Ampère dans l'entrefer, en suivant une ligne d'induction fermée AA'BB'A .



On trouve :

$$\Sigma \int H dl = N_d J_d = \int_{\text{Fer}} H dl + \int_{AA'} H dl + \int_{BB'} H dl$$

$N_d =$ le nombre de spires de l'enroulement inducteur

$i = J_d =$ le courant inducteur dans cet enroulement

On sait que $H dl = \mathfrak{R} \phi$ où \mathfrak{R} est la réluctance et ϕ le flux

Or la réluctance est inversement proportionnelle à la perméabilité magnétique μ du matériau. On peut donc

négliger $\int_{\text{Fer}} H dl$ devant $\int_{AA'} H dl + \int_{BB'} H dl$.

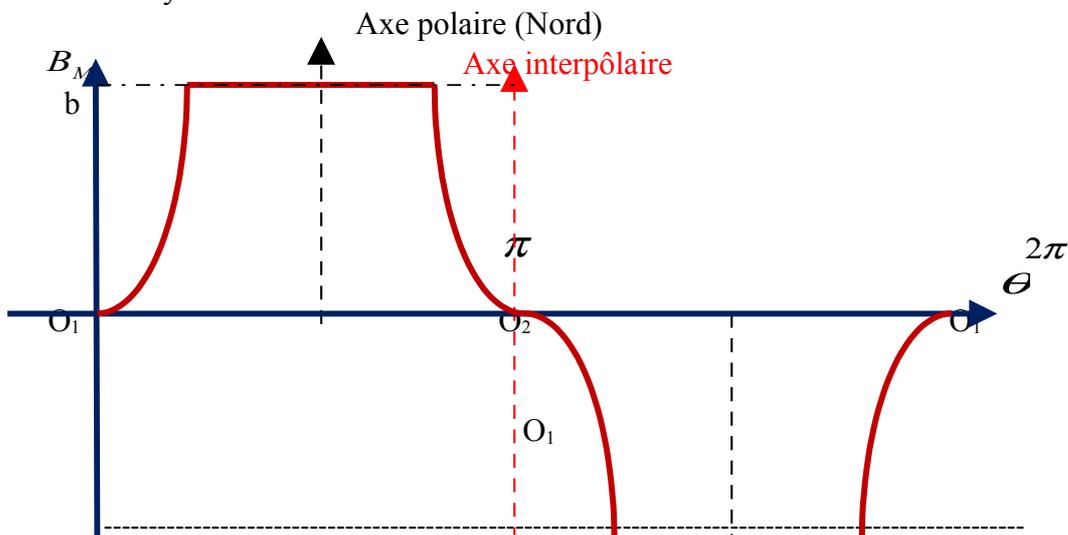
On rappelle que $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ et μ_0 est très faible devant μ_r dans des matériaux ferromagnétiques.

En tenant compte de la symétrie du dispositif, on peut écrire que :

$$\int_{AA'} H dl = \int_{BB'} H dl \text{ et donc que } N_d J_d = 2 \int_{AA'} H dl$$

Dans l'entrefer, $H = H_0 = \frac{B}{\mu_0}$

D'où la forme du champ d'induction B dans l'entrefer en fonction de l'angle que fait l'axe neutre O_1O_2 avec la position du conducteur sur la génératrice du cylindre.



$-B_M$

Axe polaire (Sud)

Remarque : le champ d'induction magnétique b est compté positivement lorsque la ligne d'induction pénètre dans le noyau de l'induit et négativement lorsqu'elle en sort.

III-2 : Expressions de la Force électromotrice et du couple électromagnétique

a) Force électromotrice dans un conducteur

On rappelle qu'un conducteur de longueur ℓ , animé d'une vitesse v et placé dans un champ d'induction magnétique \vec{B} , est le siège d'une force électromotrice (f.é.m) e telle que : (si v et B sont perpendiculaires)

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

Il s'ensuit que la forme de e sera la même que celle de \vec{B} . (voir paragraphe précédent). Elle est donc alternative.

b) Force électromotrice E dans une génératrice bipolaire

- Forme de la Fém. dans une spire

On réalise une spire en reliant deux conducteurs diamétralement opposés. Les conducteurs de liaison en avant et en arrière du rotor sont inactifs (ils ne coupent pas de lignes de champ). Compte tenu du mode de connexion, les fém. induites dans les deux conducteurs s'ajoutent, de sorte qu'aux bornes de chaque spire on a une fém. égale à $2e$

- Rôle du collecteur et allure de la fém entre les balais

Le dispositif « balais-collecteur » joue ici le rôle d'un redresseur mécanique de fém. Il redresse la partie négative de la fém. entre les balais qui a maintenant l'allure ci-après.

e

 θ

- Expression de la Fém.

Soit n le nombre de conducteurs actifs et N la vitesse de rotation (N est exprimée en tours par seconde).

D'après la loi de Lenz, on a $e = - \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = - \frac{\Delta\phi}{\Delta\theta} \cdot \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$ pour un conducteur.

Δt est le temps mis par un conducteur pour prendre la place de celui qui le précède. Donc $\Delta t = \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{N}$

$\Delta \phi$ est le flux coupé (variation de flux) dans la rotation pendant le temps Δt

Si les conducteurs sont régulièrement répartis à la surface du cylindre

En remarquant que $\frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \text{vitesse angulaire} = N$ est constante

La somme des flux coupés est le flux qui sortant d'un pôle entre dans l'induit. Il s'obtient en sommant sur un angle de 2π . **Ce flux est appelé flux utile par pôle et par spire de la machine et se note Φ ,**

$$\text{avec } \Phi = \sum \frac{\Delta \phi}{\Delta \theta}$$

$$E = n \cdot \sum e = n \cdot \sum \frac{\Delta \phi}{\Delta \theta} = N \cdot n \cdot \Phi$$

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

Où n = nombre de spires et N est la vitesse de rotation de la machine (N est exprimée en tours par seconde : tr/s).

c) Expression du couple électromagnétique Γ_e

Soit I_a le courant débité par la génératrice. La puissance électromagnétique s'écrit, (en appliquant le principe de la conservation de la puissance électromagnétique):

$$P_e = E \cdot I_a = \Gamma_e \cdot \Omega \Rightarrow \Gamma_e = \frac{E \cdot I_a}{\Omega}$$

où

Γ_e est le couple électromagnétique,

Ω est la vitesse exprimée en radians par seconde (rd/s)

$$\text{Comme } \Omega = 2\pi \cdot N \Rightarrow \Gamma_e = \frac{N \cdot n \cdot \Phi \cdot I_a}{2\pi \cdot N} = \frac{n}{2\pi} \cdot \Phi \cdot I_a$$

Γ_e peut encore s'écrire sous la forme suivante (en posant $k = \frac{n}{2\pi}$)

$$\Gamma_e = k \cdot \Phi \cdot I_a$$

d) Expressions générales

Les formules ci-dessus ne sont valables que pour une machine bipolaire. Pour une machine ayant $2p$ pôles avec $2a$ voies d'enroulements, ces formules deviennent :

$$E = \frac{p}{a} \cdot N \cdot n \cdot \Phi$$

et

$$\Gamma_e = \frac{p \cdot n}{a \cdot 2\pi} \cdot \Phi \cdot I_a$$

B- ETUDE DE LA GENERATRICE A COURANT CONTINU

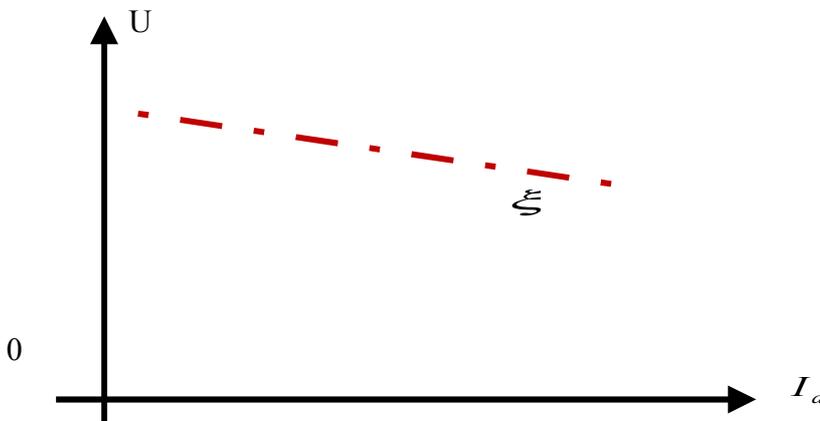
I- REACTION D'INDUIT DANS UNE GENERATRICE EN CHARGE

I-1) Mise en évidence et explication du phénomène

Considérons une génératrice qui débite sur une charge. On s'intéresse à la courbe de la tension U (aux bornes de la génératrice) en fonction du courant I (débité par la machine).

La loi d'Ohm appliquée à ce dispositif donnant $U = E - r_a \cdot I_a$ (où r_a est la résistance interne de la machine), l'on s'attend à ce que la courbe $U = f(I)$ soit une droite de type $y = ax + b$. (courbe ξ)

Avec $U = y$; $E = b$; et $I_a = x$



L'expérience montre que cette caractéristique n'est pas une droite. En fait, on observe une chute de tension supplémentaire (du même ordre de grandeur que $r_a \cdot I$: courbe f lorsque le courant débité devient important. Cette chute de tension supplémentaire s'explique par le phénomène dit de « **réaction magnétique d'induit** ».

En effet, supposer que E est constant, revient à considérer que le flux utile, responsable de la naissance de E ne dépend que des ampères-tours de l'inducteur. Or l'induit, lui aussi, est constitué de bobines traversées par le courant induit (lorsque la machine est en charge). Les ampères-tours créés par les bobines de l'induit créent à leur tour un flux qui s'oppose (loi de Lenz) au flux inducteur. D'où une baisse de la f.é.m lorsque la machine est en charge. Et donc baisse subséquente de U .

I-2- Conséquences de la réaction magnétique d'induit

a) Décalage de la ligne neutre

Lorsque l'inducteur et l'induit sont parcourus par des courants, l'induction totale dans l'entrefer est la somme des inductions produites par chacun des enroulements. De fait, il y a d'une part une réaction longitudinale et une réaction transversale. C'est l'induction résultante qui est responsable du flux utile dans l'entrefer et donc de la fém en charge. Il s'en suit que la ligne neutre inter polaire se déplace.

b) Expression de la réaction d'induit

Du fait de ce phénomène est présent dès qu'il circule des courants dans l'induit, et les équations de la machine sont modifiées de la manière suivante :

A vide : la fém. s'écrit :
$$E_0 = \frac{P}{a} \cdot N \cdot n \Phi_0$$

En charge, elle devient :
$$E_{ch} = \frac{P}{a} \cdot N \cdot n \Phi_{ch}$$

$$E_0 - E_{ch} = \frac{P}{a} \cdot N \cdot n (\Phi_0 - \Phi_{ch}) = \mathcal{E}(I_a) = c' \text{ est la réaction d'induit}$$

c) Inconvénients de la réaction d'induit

- diminution du flux utile et donc de la f.m.m par rapport à la marche à vide
- une induction différente de zéro sous la ligne neutre théorique augmente les difficultés de commande de la machine.
- danger de « flashage » de la machine
- danger d'instabilité pour le fonctionnement en charge.

d) Quelques remèdes à la réaction d'induit

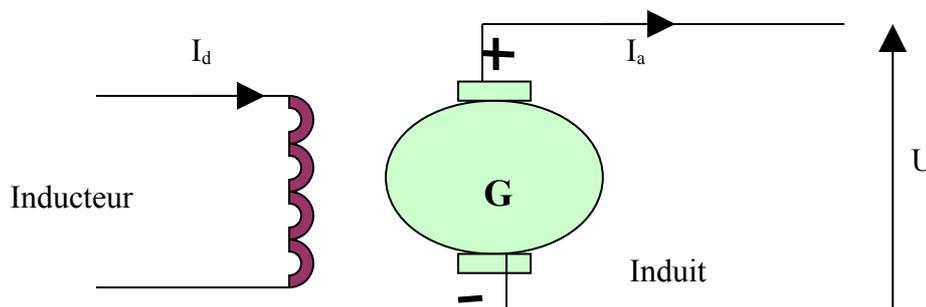
- On se contente en général de limiter l'influence des ampères-tours de la réaction d'induit. Pour cela, on prévoit un entrefer plus important et on renforce les ampères-tours de l'inducteur.
- Certains cas conduisent à une réaction d'induit inacceptable. On peut diminuer considérablement la réaction d'induit en prévoyant un enroulement parcouru par le courant d'induit disposé de manière à renforcer le flux inducteur.

II- ETUDE DES DIFFERENTS TYPES DE GENERATRICES A C.C.

Les génératrices à courant continu sont classées en fonction de leur mode d'excitation. On distingue quatre types de génératrices à courant continu. Pour chaque type, on peut étudier la caractéristique à vide, la caractéristique en charge et la caractéristique de réglage.

II-1) La génératrice à excitation séparée (ou indépendante).

a) Schéma canonique



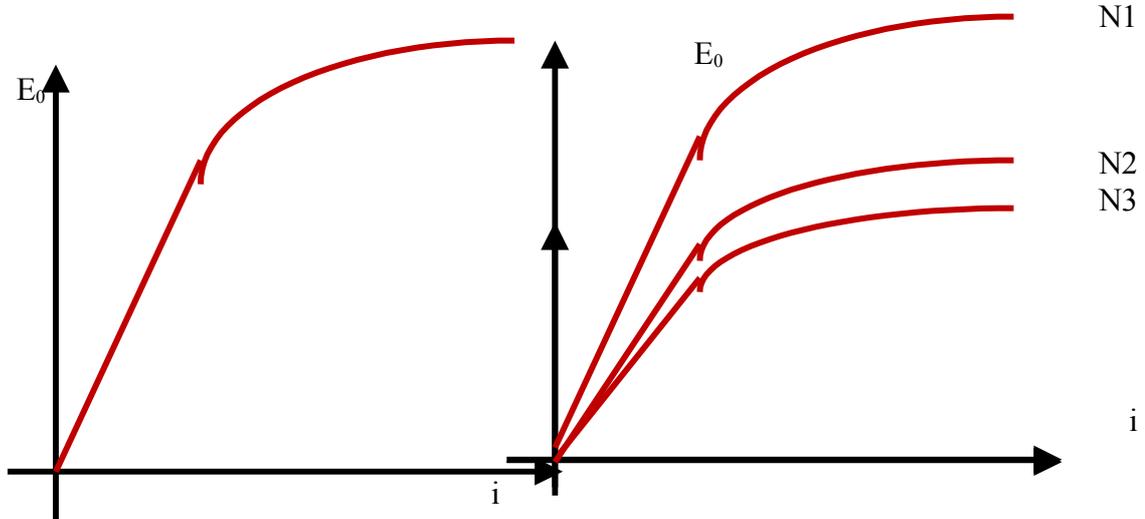
b) Caractéristique à vide

On note i le courant d'excitation ou courant inducteur ; U est la tension aux bornes de sortie de la machine. La machine tourne, on fait varier le courant i (grâce, par exemple

à un rhéostat intercalé dans le circuit inducteur), on mesure U . Un tachymètre permet de relever la vitesse N de la machine.

La courbe comprend en fait deux parties :

- Une partie rectiligne qui rend compte du fait que $E = k.N.\Phi = K.i$ (à N cte)
- Une partie à la pente moins accentuée qui traduit la saturation de la machine.



Remarques.

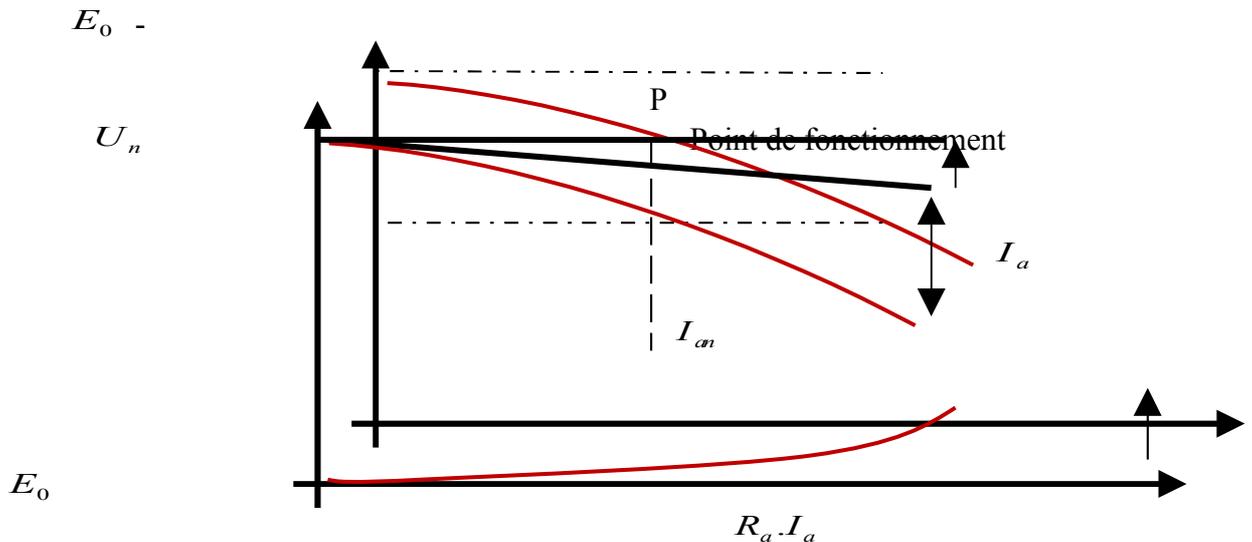
- * Pour une vitesse donnée, on peut relever $E = f(i)$, d'abord en augmentant régulièrement le courant inducteur jusqu'à la saturation, puis en décroissant i .
- * Il se peut que l'on observe un phénomène d'hystérésis. La caractéristique à vide s'obtient alors en prenant la moyenne des deux courbes.
- * On peut également tracer les caractéristiques pour différentes valeurs de la vitesse d'entraînement de la génératrice.

c) Caractéristique en charge

Étudions la caractéristique $U = f(I_a)$ où I_a est le courant débité par la génératrice pour une vitesse et une excitation constantes

On a $U = E_0 - r_a \cdot I_a - \varepsilon(I_a)$

- Tracé de la caractéristique $U = f(I_a)$ à $i = cte$ et $N = cte$



$$\mathcal{E}(I_a)$$

$$h = f(I_a)$$

- Influence de la vitesse

Si U est la tension induite à la vitesse N lorsque $I_d = cte$
 et U' la tension induite à la vitesse N' lorsque $I_d = cte$

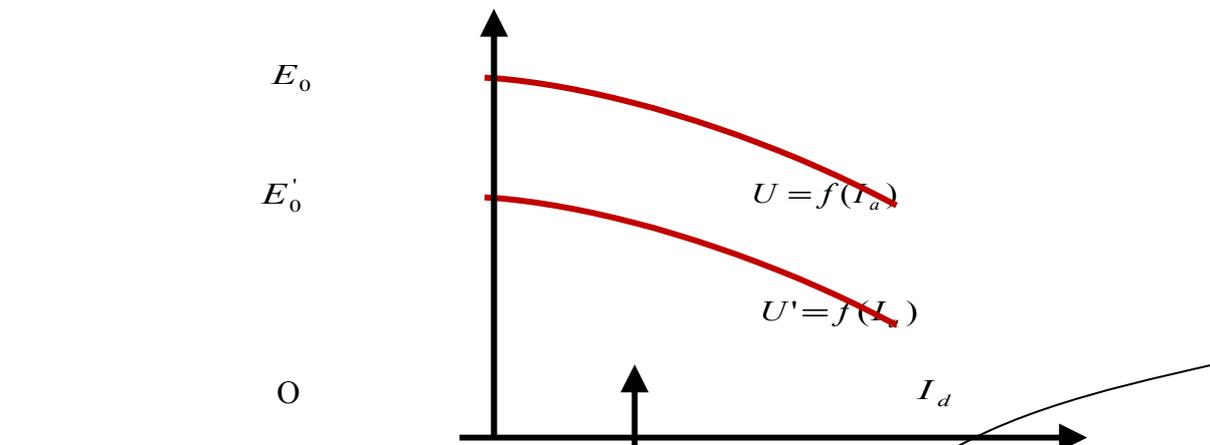
Si la réaction d'induit est considérée comme compensée, alors

$$U = E_0 - r_a \cdot I_a \quad \text{avec } E_0 = k \cdot I_d \cdot N$$

$$U' = E'_0 - r_a \cdot I_a \quad \text{avec } E'_0 = k \cdot I_d \cdot N'$$

Comme à $I_d = cte$, on peut écrire $E'_0 = E_0 \cdot \frac{N'}{N} \Rightarrow U' = E_0 \cdot \frac{N'}{N} - r_a \cdot I_a$

Ainsi donc, pour des vitesses proches les unes des autres, on obtient une famille de caractéristiques par translation.



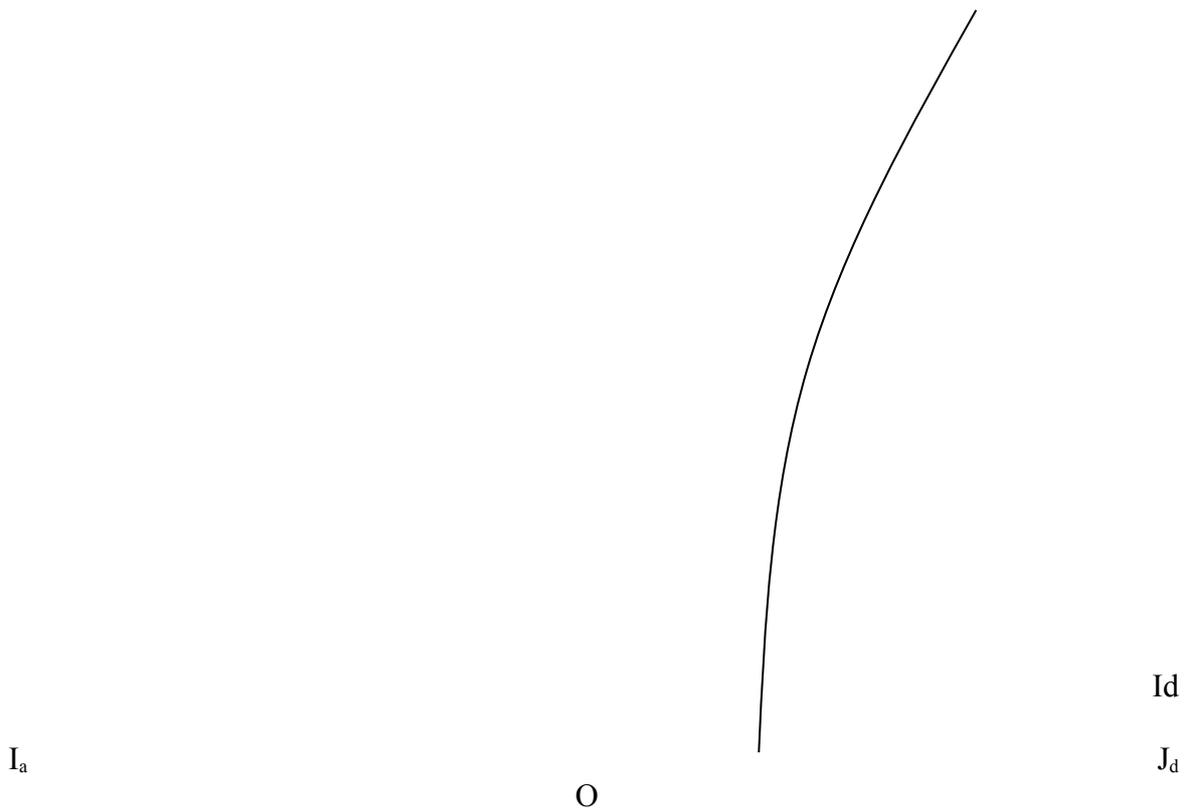
d) Caractéristique de réglage

On maintient la vitesse N constante ainsi que U . On veut connaître la variation de I_a en fonction de I_d . On peut d'ailleurs obtenir cette courbe dite de réglage par

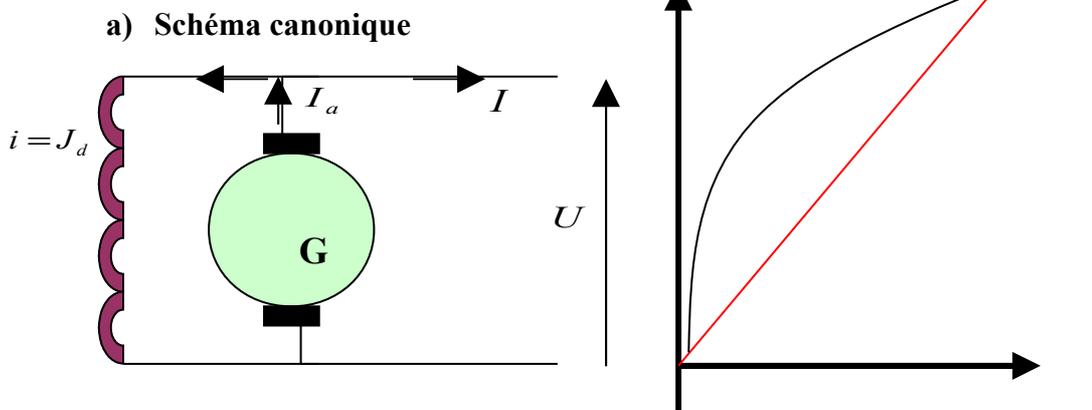
construction graphique à partir des courbes à vide et en charge (voir construction ci-dessous).

Chapitre 7 déf : Machines à courant continu- Génératrices à courant continu :

$U \quad E_0, I_a$



I-2) Génératrice à excitation shunt ou en dérivation



b) Caractéristique à vide

Elle se relève en réalisant un montage à excitation séparée. Elle n'a donc rien de particulier par rapport à la génératrice à excitation séparée.

En effet, à vide, on a $U_a = E_0 - r_a I_a - \mathcal{E}(I_a)$.

Comme $r_a I_a + \mathcal{E}(I_a) \cong 0$, on a $U_a = E_0 = R_d \cdot J_d$ car ici, $I_a = J_d$

Avec $R_d =$ résistance de l'enroulement inducteur

c) Problème d'amorçage

A partir de ce qui précède, on remarque sur la courbe d'aimantation que, même à vide, il existe aux bornes de la génératrice shunt une aimantation rémanente responsable d'une faible tension E_r . Cette tension rémanente va créer un faible courant inducteur qui doit renforcer le flux inducteur, d'où augmentation de la f.é.m, et encore augmentation du courant inducteur, ainsi de suite jusqu'à atteindre le point de fonctionnement à vide défini sur la courbe par le point M.

Remarque

Pour que la génératrice shunt puisse s'amorcer, il faut que:

- le flux rémanent existe dans la machine ;
- les ampères-tours de l'inducteur renforcent le magnétisme rémanent. Le sens de branchement de l'inducteur doit donc être convenable. Il en est de même du sens de rotation, mais en général, celui-ci est imposé ;
- la droite des inducteurs rencontre la caractéristique à vide.

Ainsi donc, à vide on a les équations suivantes : $I_a = J_d$ et $U = E_0 - h(J_d)$ et donc

$$J_d = \frac{U}{R_{dT}} = \frac{E_0 - h(J_d)}{R_{dT}} \text{ qui est le courant inducteur.}$$

On en déduit donc que $E_a(J_d) = U = h(J_d) = R_{dT} \cdot J_d + h(J_d)$

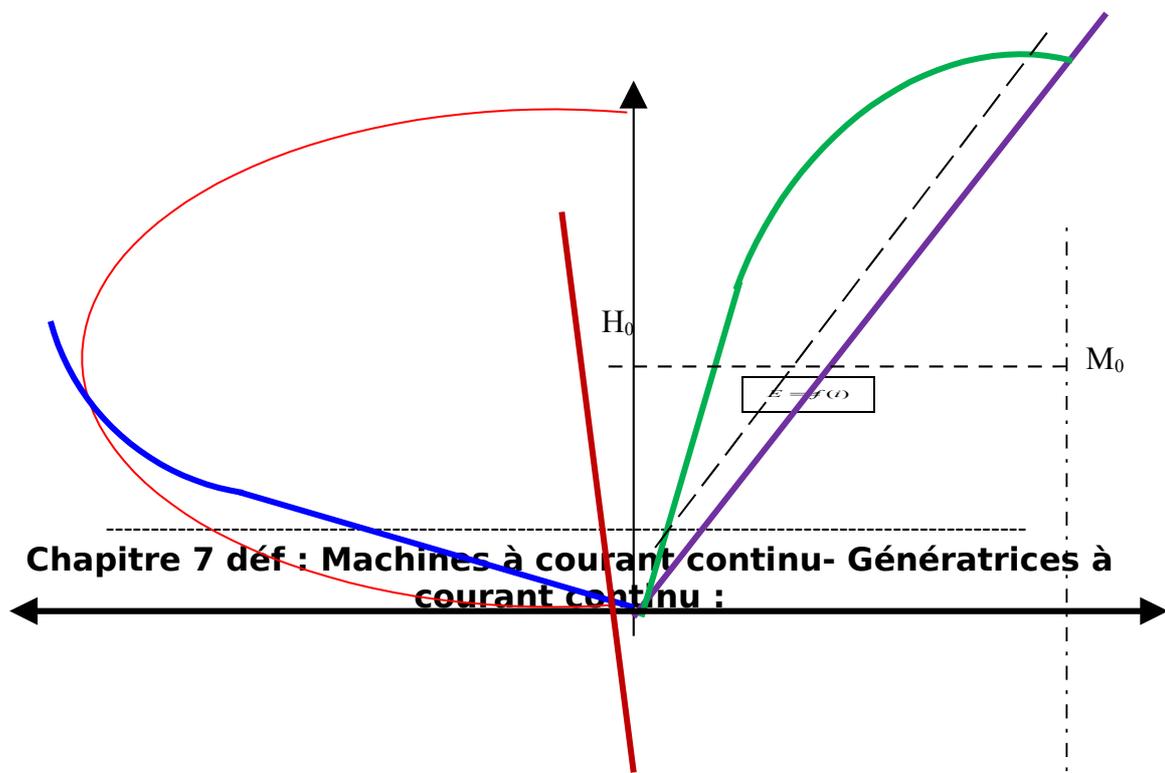
d) Caractéristique en charge : construction de Picou

Soit à tracer la caractéristique $U = f(I_a)$ à N et R_{dT} constantes : On notera que :

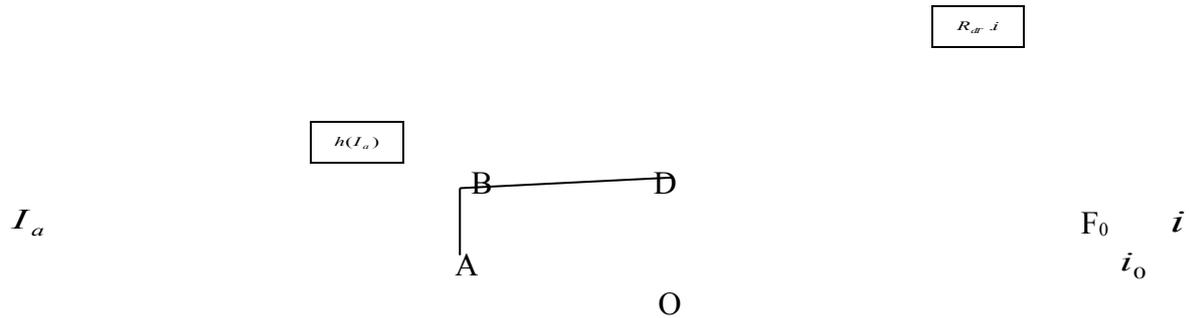
$R_{dT} = R_d + R_{rh}$ où R_d et R_{rh} sont respectivement la résistance de l'enroulement inducteur et la résistance du rhéostat en série avec ce dernier.

On dispose de données permettant de tracer immédiatement :

- la caractéristique à vide $E_0 = f(J_d)$
- la caractéristique $h(I_a) = r_a \cdot I_a + \mathcal{E}(I_a)$



$$U = f(I_a)$$



On trace la droite d'équation $E_0 = R_{dt} \cdot i$. Elle coupe la caractéristique à vide $E_0 = f(i)$ en un point M_0 . L'abscisse de M_0 sur l'axe des i donne le courant d'excitation i_0 . On obtient le point F_0 tel que $OF_0 = i_0$. L'ordonnée de M_0 donne H_0 qui est la tension à vide lorsque $\mathcal{E}(I_a)$ est négligeable.

Pour chaque valeur de I_a , repérée ici par OA , on lit sur la caractéristique $h(I_a)$, on obtient ainsi le point B auquel correspond le point D sur l'axe des tensions.

Par D on mène la parallèle à OM_0 qui coupe la caractéristique à vide $E_0(i)$ en M . L'abscisse de M est OF . Mais FM coupe la droite d'équation $R_{dt}i$ en G . On remarquera tout de suite que pour une valeur donnée de I_a , on a trouvé deux points M et G .

$$FM = E_0(i) = ri + h(i)$$

$$FG = ri$$

$$\text{Et donc } FM - FG = GM = h(i)$$

L'obtention de G permet d'obtenir OZ , ordonnée qui permet à son tour d'avoir le point H recherché de la caractéristique $U(I_a)$

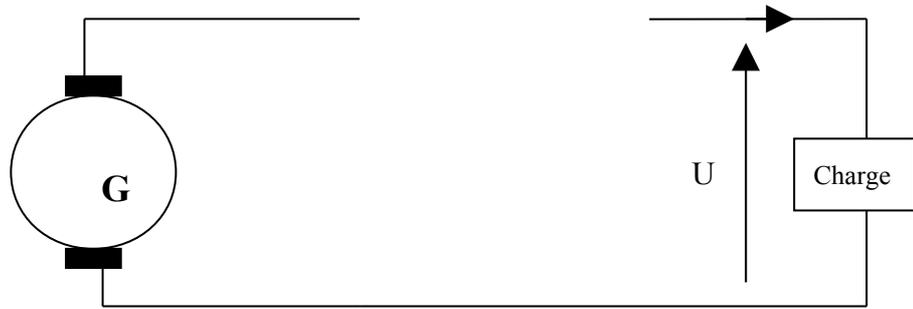
Remarque

- Nous avons déjà deux points qui correspondent respectivement aux courants I_{cc} (courant de court circuit) et I_{max} (courant maximal). I_{cc} s'obtient en faisant la construction précédente à partir de l'induction rémanente E_{or} . Le courant maximal est obtenu en considérant le point de tangence à la caractéristique à vide où passe la droite parallèle à la droite des inducteurs.
- En outre, pour chaque valeur de I_a , nous avons en fait deux points d'intersection M et M' de la droite $E_0 = R_{dt} \cdot i + h(I_a)$ avec la caractéristique à vide.

II-3 : Génératrice à excitation série

a) Schéma canonique



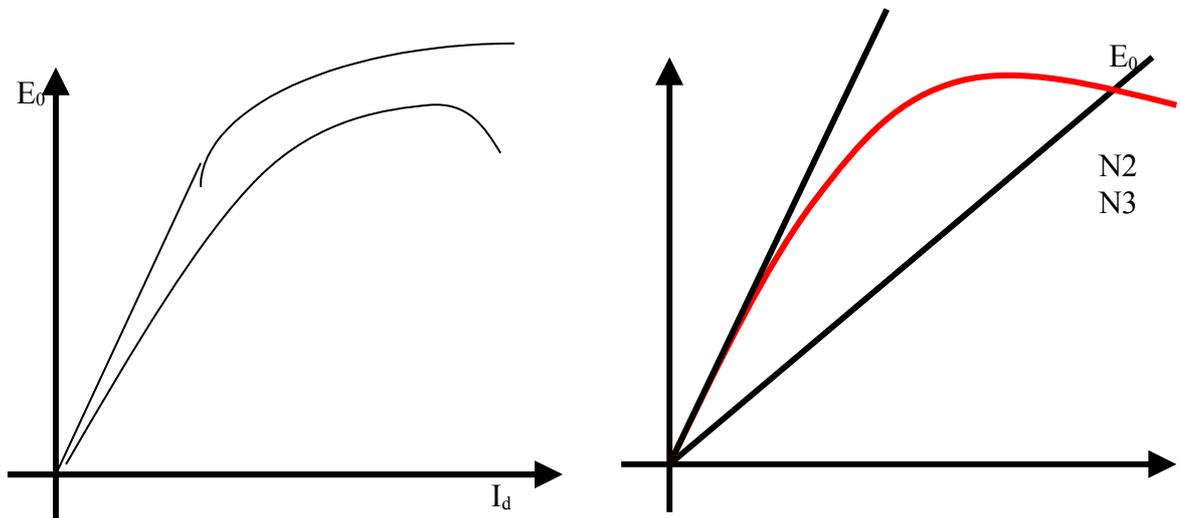


b) Caractéristique à vide

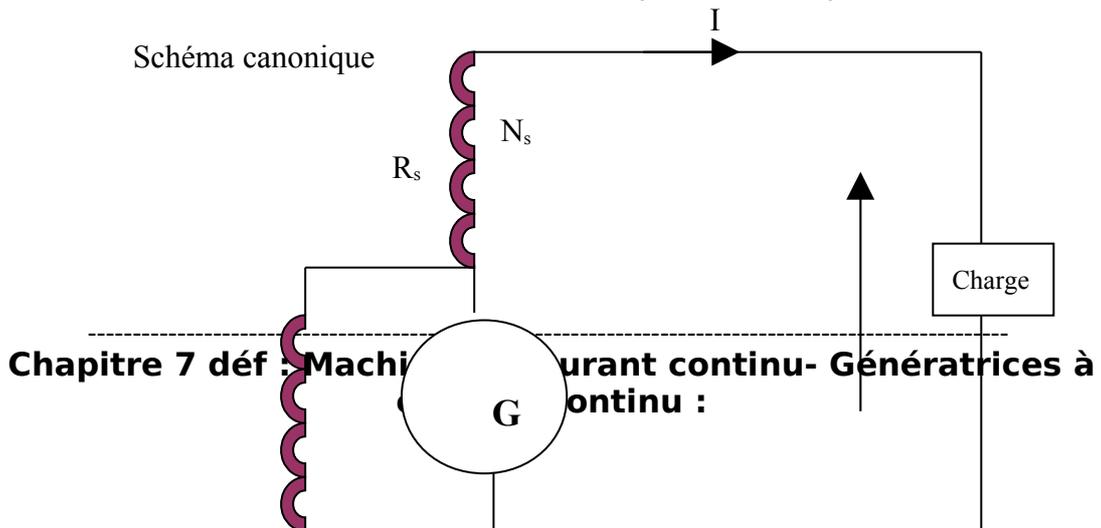
La caractéristique à vide se relève dans un montage à excitation séparée. La génératrice ne peut s'amorcer à vide.

c) Caractéristique en charge

$$U = E_0 - (R_a + R_s) I_a - \mathcal{E} = R I_a \text{ (si R est la résistance de la charge) ;}$$



II-4 : Génératrice à excitation composée (compound)



$N_d \quad R_d \quad R_a$

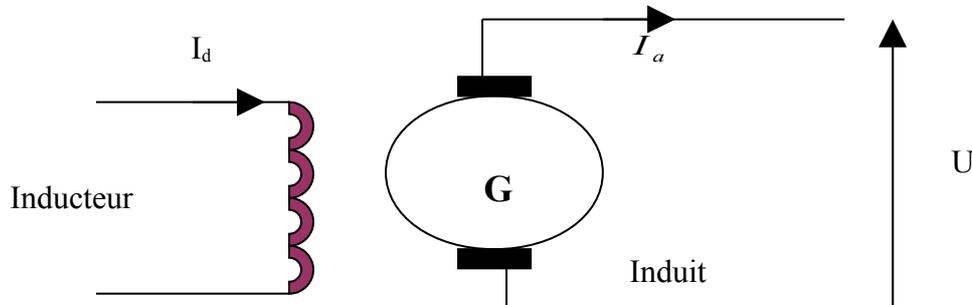
Remarque sur l'utilisation de cette génératrice

Cette génératrice essaie en fait de combiner les caractéristiques des génératrices à excitations shunt et série.

En effet, la f.m.m produite par l'enroulement série peut s'ajouter à celle produite par l'enroulement shunt ou se retrancher de cette dernière. La machine est en général calculée pour obtenir la même tension à vide et en charge.

III- CALCUL DU RENDEMENT

Considérons une génératrice à excitation séparée.



Nous pouvons faire le bilan des puissances mises en jeu à U , I_a et N donnés.

Pour I_a donné, on connaît $h(I_a)$

La puissance utile est $P_u = UI$

Si on connaît les pertes mécaniques p_m et les pertes fer p_{Fer} , alors le rendement s'écrit :

$$\eta = \frac{U.I}{U.I + U_{\text{exc}}.i + h(I).I + p_m + p_{\text{Fer}}}$$

IV- UTILISATION DES GENERATRICES A COURANT CONTINU

Il faut le dire très clairement : depuis le développement prodigieux des composants à semi-conducteurs (redresseurs à semi-conducteurs) et leur généralisation dans les applications industrielles et domestiques, les génératrices à courant continu ont quelque peu perdu de leur intérêt. Néanmoins, en dehors de leur intérêt historique, elles continuent à être employées dans quelques cas particuliers.

On notera que :

- 1) les génératrices à excitation shunt et indépendante peuvent être utilisées comme des excitatrices d'alternateurs

- 2) les génératrices série fonctionnent en récupération du moteur série d'un véhicule (locomotive électrique)
- 3) la génératrice compound permet d'alimenter un réseau à tension constante. Elle se retrouve dans des postes à souder, ainsi que dans des machines alimentant une ligne longue pour la compensation de la chute de tension en ligne.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

- 1- Electrotechnique industrielle, par Guy SEGUIER et Francis NOTELET. 2^e Edition chez Lavoisier TEC & DOC.
- 2- Cours d'Electrotechnique : Machines électriques : Machines à courant continu- Asservissements linéaires ; par Francis MILSANT ; chez Eyrolles
- 3- Manuel de Génie Electrique par Michel BEUGNIEZ et Jean-Luc WILLOT ; chez Eyrolles
- 4- Cours –Problèmes d'Electrotechnique générale (Cours photocopiés du Département Génie Electrique de l'INSET ; Tome1 par Remy BENINGER
- 5- Cours photocopié d'Electrotechnique de l'INP Nancy, par Alain Mailfert .