

Chapitre 2 :

## **LES MACHINES ELECTRIQUES GENERALITES**

	.....	2.2
<b>2.1.</b>	<b>INTRODUCTION</b> .....	2.2
	2.1.1. Classifications des machines électriques .....	2.2
	2.1.2. Intérêt des moteurs électriques .....	2.7
	2.1.3. Le moteur asynchrone .....	2.7
	2.1.4. Le moteur synchrone .....	2.8
	2.1.5. Les moteurs à courant continu .....	2.8
	2.1.6. Les autres types de machines électriques .....	2.9
	2.1.7. Associations moteurs - électronique .....	2.10
<b>2.2.</b>	<b>METHODES D'ETUDE DES MACHINES ELECTRIQUES</b> .....	2.12
	2.2.1. Généralités .....	2.12
	2.2.2. Choix du phénomène physique exploité .....	2.13
<b>2.3.</b>	<b>RAPPEL DES LOIS DE L'ELECTROMAGNETISME</b> .....	2.15
	2.3.1. Loi de la force magnétomotrice (f.m.m.) .....	2.15
	2.3.2. Loi de Maxwell .....	2.15
	2.3.3. Loi de Laplace .....	2.18
	2.3.4. Règles mnémotechniques des signes .....	2.18
<b>2.4.</b>	<b>PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT DES MACHINES ELECTRIQUES</b>	2.21
	2.4.1. Eléments constitutifs des machines électriques .....	2.21
	2.4.2. Machines hétéropolaires .....	2.22
<b>2.5.</b>	<b>COMPOSANTS DES MACHINES ELECTRIQUES</b> .....	2.34
	2.5.1. Circuit magnétique .....	2.34
	2.5.2. Circuit électrique .....	2.42
	2.5.3. Isolation des machines .....	2.48
	2.5.4. Refroidissement .....	2.50
<b>2.6.</b>	<b>GRANDEURS CARACTERISTIQUES DES MACHINES ELECTRIQUES</b>	2.52
	2.6.1. Grandeurs nominales .....	2.52
	2.6.2. Rendements des machines .....	2.52
	2.6.3. Caractéristiques des machines tournantes .....	2.56

Chapitre 2 :

## LES MACHINES ELECTRIQUES GENERALITES

### 2.1. INTRODUCTION

#### 2.1.1. Classifications des machines électriques

Le but essentiel des machines électriques est la transformation de l'énergie d'une forme dans une autre, l'une au moins de ces formes étant électrique, l'autre pouvant être électrique ou mécanique.

Les machines électriques font intervenir comme éléments fondamentaux :

- les courants électriques ;
- les champs magnétiques.

Le fonctionnement est donc basé sur les lois de l'électromagnétisme, qui ont été étudiées au cours d'électricité, et qui seront brièvement rappelées dans ce cours. Car c'est de **l'interaction des courants électriques et des champs magnétiques** que résulte leur fonctionnement.

On peut, a priori, classer les machines électriques en trois catégories principales :

**1. Les machines génératrices** qui transforment l'énergie mécanique en énergie électrique.

Leur fonctionnement est basé sur l'induction d'un courant électrique dans un circuit conducteur par **déplacement relatif** de celui-ci et d'un champ magnétique, à l'aide d'un engin d'entraînement mécanique.

Selon que le courant électrique induit est continu ou alternatif, la machine génératrice sera appelée **dynamo** ou **alternateur**.

Les Figures 2.1-1 et 2.1-2 schématisent le fonctionnement des machines génératrices.

On remarquera qu'en pratique, le déplacement relatif du circuit électrique et du champ magnétique est obtenu :

- dans le cas de l'alternateur, par rotation du champ magnétique, le circuit étant fixe ;
- et dans le cas de la dynamo, par rotation du circuit électrique dans un champ magnétique fixe.

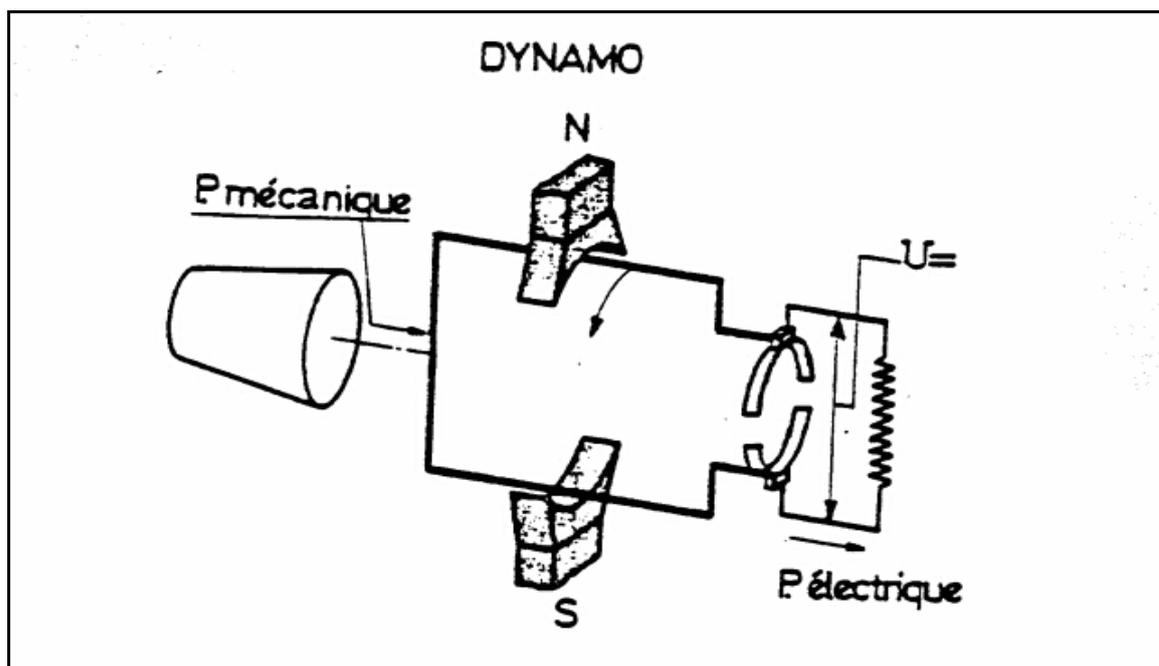


Figure 2.1-1

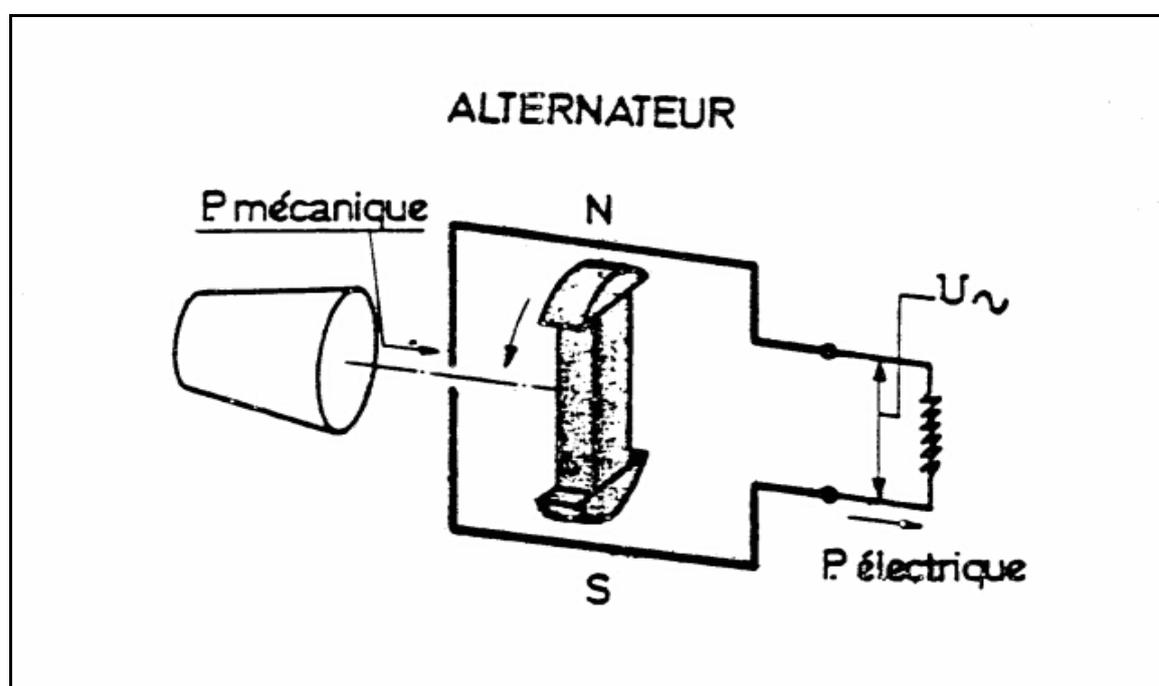


Figure 2.1-2

## 2. Les moteurs électriques

Leur fonctionnement est basé sur l'obtention d'un effort mécanique par action d'un champ magnétique sur un circuit électrique traversé par un courant fourni par une source extérieure, laquelle peut aussi produire éventuellement le champ magnétique.

Selon que le courant électrique fourni par la source extérieure est continu ou alternatif, la machine sera appelée **moteur à courant continu** ou **moteur à courant alternatif** (**synchrone** ou **asynchrone**).

Les Figures 2.1-3, 2.1-4 et 2.1-5 schématisent le fonctionnement de ces moteurs électriques.

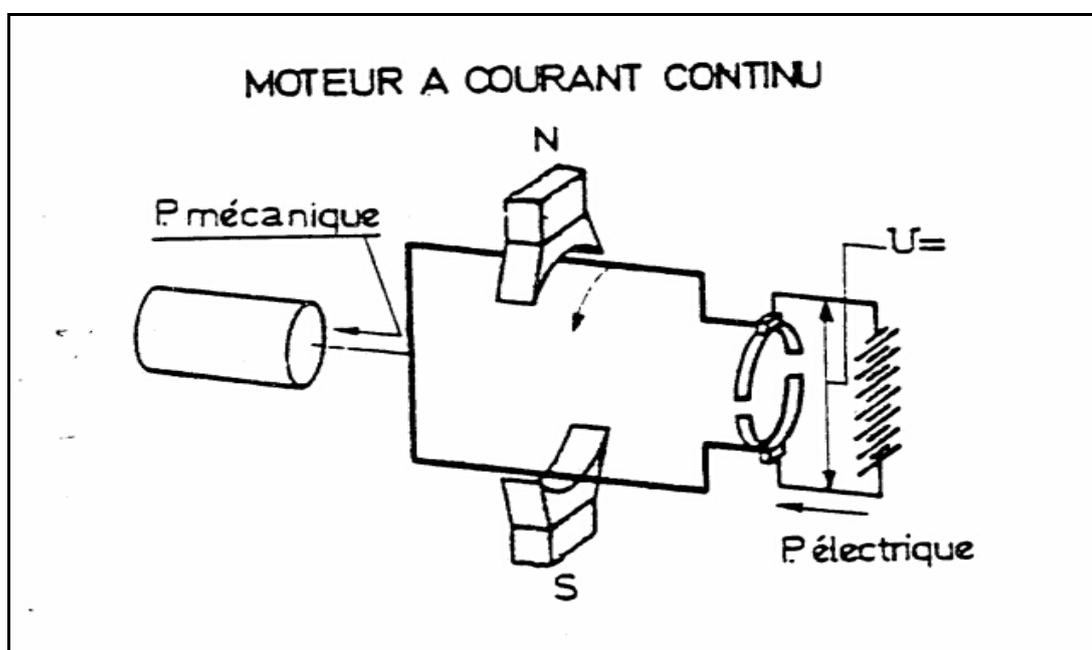


Figure 2.1-3

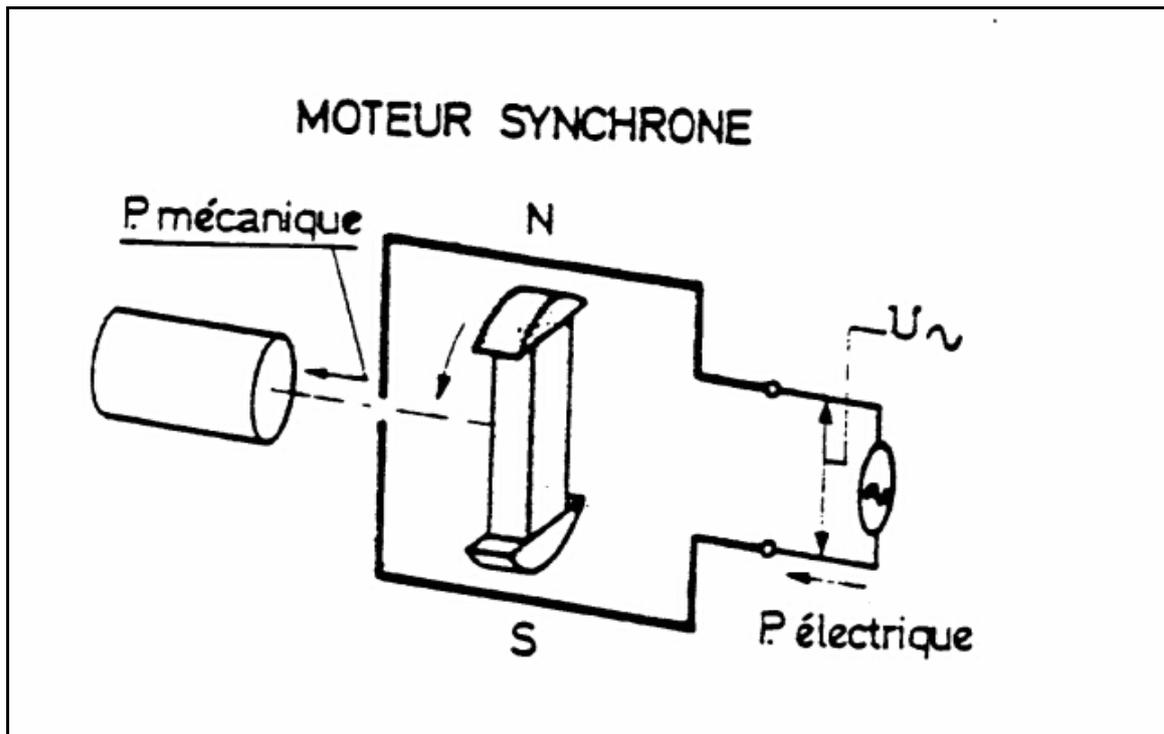


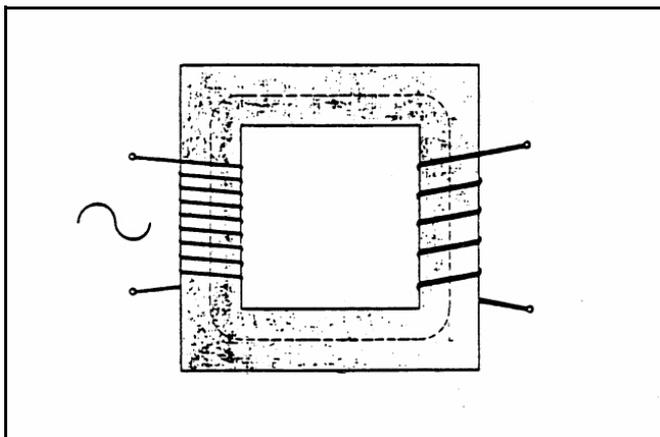
Figure 2.1-4

Figure 2.1-5

### 3. Les machines transformatrices

La catégorie la plus importante est le **transformateur** qui modifie la grandeur des courants et tensions alternatifs.

Son fonctionnement est basé sur l'induction d'un courant électrique dans un circuit conducteur fixe sous l'action d'un champ magnétique variable dans le temps mais fixe dans l'espace.



Les autres machines transformatrices (**changeurs de fréquence, commutatrices** transformant le courant alternatif en continu ou inversement) sont supplantées aujourd'hui par des systèmes statiques utilisant l'**électronique de puissance**.

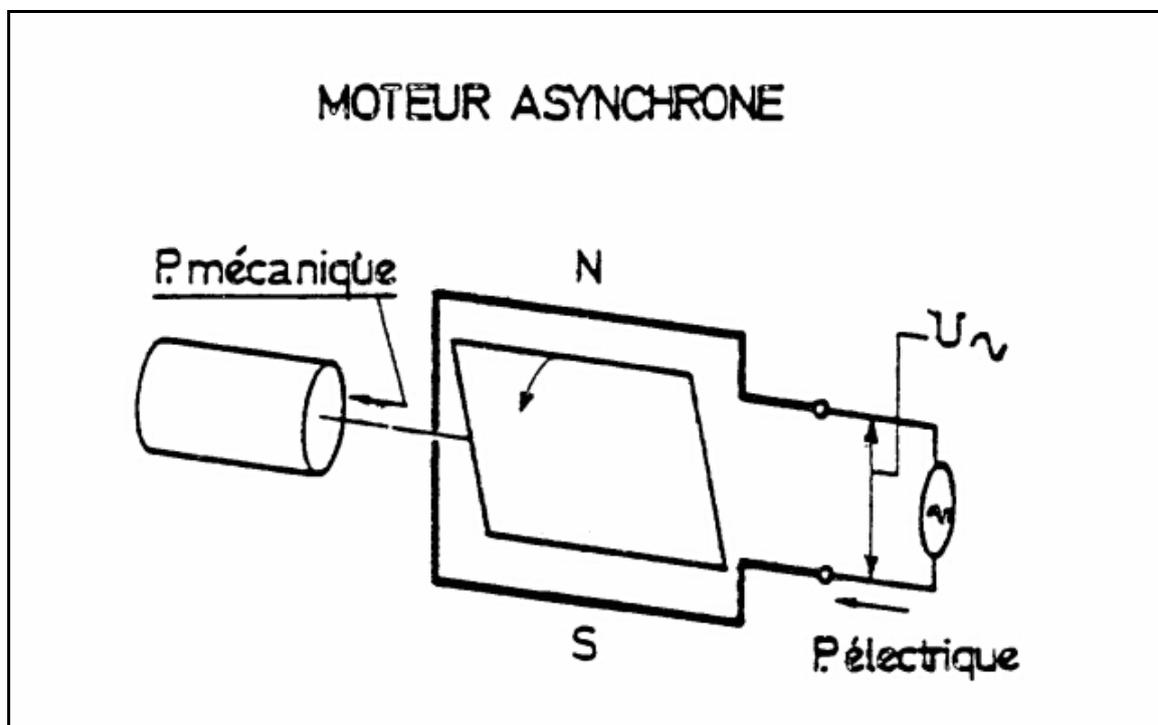


Figure 2.1-6

### 2.1.2. Intérêt des moteurs électriques

Les moteurs électriques ont sur les moteurs thermiques (à essence, gasoil ou gaz) de nombreux avantages :

- ils sont moins polluants et moins bruyants ;
- ils démarrent seuls et facilement ;
- ils ont souvent un fort couple moteur à faible vitesse et même à l'arrêt.

Cette dernière propriété est très importante. Parce que leur couple est faible à vitesse réduite et nul au démarrage (à vitesse nulle), les moteurs thermiques (à explosion ou diesels) nécessitent un embrayage et un dispositif mécanique à engrenages : la boîte de vitesses.

Le moteur tournant déjà, c'est en faisant patiner l'embrayage que l'on peut communiquer le mouvement à la charge : cela entraîne une dissipation d'énergie thermique par frottements. C'est aussi l'embrayage qui permet de découpler le moteur de la charge pour changer le rapport de la boîte de vitesses.

L'embrayage n'est pas un dispositif transposable dans le domaine des grandes puissances. C'est pour cela que sur les locomotives diesel-électriques, le moteur diesel n'entraîne pas la locomotive : il fait tourner un générateur qui alimente un moteur électrique et c'est ce dernier qui assure l'effort de traction.

Les qualités qui font la supériorité du moteur électrique sur le moteur thermique sont :

- la facilité d'emploi dans le cas de démarrages fréquents ;
- la régularité du couple utile ;
- la possibilité d'inversion du sens de rotation sans intervention de dispositifs mécaniques annexes (comme les engrenages).

Ces qualités sont encore accentuées aujourd'hui, grâce à l'utilisation de l'électronique de puissance.

### 2.1.3. Le moteur asynchrone

Le moteur asynchrone est le moteur le plus utilisé dans l'industrie. Il est peu coûteux, on le fabrique en grande série. Il est robuste et son entretien est très limité. Il est sûr : son fonctionnement ne génère pas d'étincelles à la différence d'un moteur à courant continu. Ce type de moteur équipe la quasi totalité des machines-outils classiques, tours, fraiseuses, scies bobineuses, tapis roulants, pompes, compresseurs, perceuses,...).

Fonctionnant directement sur le secteur alternatif, sans transformation préalable de l'énergie électrique qui l'alimente, c'est le moteur industriel par excellence qui ne possède pas d'organe délicats comme le collecteur du moteur à courant continu. Les courants qui circulent dans le stator constituent l'unique source externe de champ magnétique : le rotor n'a pas à être relié à une source d'énergie électrique. Il existe bien des courants rotoriques qui participent, eux aussi, à la création du champ magnétique, mais ce sont des **courants induits**. C'est de là que vient le nom parfois donné au moteur asynchrone : "**moteur d'induction**".

Lorsqu'on n'a pas d'exigence très marquée sur la constance de la vitesse d'un moteur, et lorsqu'il n'est pas nécessaire de faire varier celle-ci de manière continue, dans de larges proportions, c'est un moteur asynchrone que l'on utilise.

Sa vitesse varie un peu quand on le charge, on dit qu'il glisse, mais ce glissement, en général, ne dépasse pas quelques % de la vitesse à vide et il est négligeable le plus souvent.

Le démarrage des moteurs asynchrones ne pose pas de problème pour les unités de petite puissance : il est direct. Par contre, pour les moteurs de forte puissance, il faut démarrer sous tension réduite pour éviter un appel de courant trop élevé.

La gamme des puissances des moteurs asynchrones triphasés s'étend de 1 kW à une dizaine de MW. Au-dessous de 1 kW, et notamment pour les usages domestiques (compresseurs de réfrigérateurs, de congélateurs, moteurs de machines à laver, pompes de chauffage central,...), on utilise des moteurs asynchrones monophasés. Le rendement est plus faible que pour une machine triphasée de même puissance, mais cela est d'autant moins important que la puissance mise en jeu est faible.

#### 2.1.4. Le moteur synchrone

Parce que leur fréquence de rotation ne dépend que du réseau qui les alimente, les moteurs synchrones ont des emplois spécifiques, par exemple là où une rotation uniforme est primordiale.

Utilisés directement sur le réseau public, les moteurs synchrones ne peuvent démarrer seuls : on doit d'abord les entraîner à leur vitesse de rotation nominale avant de les coupler au réseau : cela nécessite un moteur auxiliaire. Les moteurs synchrones sont donc d'un emploi malaisé.

La véritable renaissance du moteur synchrone est assez récente : elle est due à l'association de ce moteur avec les onduleurs à thyristors que l'électronique de puissance a permis de mettre au point. Elle concerne le domaine de puissance de l'ordre des MW (donc des moteurs de forte puissance).

Les onduleurs qui alimentent les moteurs synchrones fournissent à ces machines des courants triphasés de fréquence variable à partir d'une source de courant continu (elle même obtenue par redressement à partir du réseau). Mais, afin que le moteur synchrone ne risque pas de "décrocher", la fréquence des courants créés par l'onduleur tient compte de la vitesse de rotation du moteur. On obtient ainsi les **moteurs synchrones auto-pilotés** qui équipent de nombreuses réalisations modernes (T.G.V. Atlantique, malaxeurs de l'industrie chimique). Ce type de moteur se développe à un rythme soutenu pour les grandes puissances, mais il faut remarquer que son utilisation mobilise une partie électronique au moins aussi importante que le moteur proprement dit.

#### 2.1.5. Les moteurs à courant continu

L'emploi des moteurs à courant continu est sans équivalent dans le domaine des très faibles puissances (jouets, perceuses miniatures,...). Il est en particulier presque obligatoire dans les équipements des automobiles (essuie-glaces, ventilateurs, lève-vitres, démarreurs,...). Dans le domaine industriel, on trouve des moteurs à courant continu de puissance moyenne dans

les applications à vitesse variable. En ce qui concerne les fortes puissances, les limitations technologiques liées à l'alimentation en puissance électrique du rotor font qu'ils sont maintenant supplantés par les moteurs synchrones auto-pilotés qui possèdent globalement les mêmes caractéristiques mécaniques.

La propriété essentielle des moteurs à courant continu est leur remarquable capacité de **variation de vitesse**. Celle-ci peut, en régime permanent, être réglée sans difficulté dans un rapport 1 à 1000. Cette gamme de variation est bien supérieure à celle que l'on peut obtenir avec les autres moteurs électriques, même associés à des dispositifs électroniques. Elle est sans commune mesure avec ce que peuvent assurer les moteurs thermiques.

La variation de vitesse des moteurs à courant continu s'effectue maintenant presque exclusivement grâce à la variation de la tension d'alimentation. Là encore, c'est l'intervention de l'électronique de puissance qui a permis de profiter pleinement des possibilités de ces moteurs. Les dispositifs, devenus usuels que sont, d'une part les **redresseurs commandés à thyristors** et d'autre part, les **hacheurs**, sont en mesure de fournir ces tensions variables à partir, respectivement, du secteur alternatif ou d'une source de tension continue fixe. Mais les moteurs à courant continu sont coûteux. A puissance égale, le prix d'un moteur à courant continu est plus de deux fois celui d'un moteur asynchrone de même puissance.

Aussi, si l'on met à part les usages spécifiques (jouets, automobile...) Imposés par des considérations particulières (sécurité, autonomie, nature de l'alimentation disponible), ce n'est que lorsqu'on a un besoin impérieux de réaliser un entraînement à vitesse très largement variable qu'il faut utiliser un moteur à courant continu. Actuellement, même ce créneau est grignoté par les moteurs asynchrones qui, associés à des onduleurs autonomes permettent l'entraînement à vitesse variable à des coûts tout à fait compétitifs.

Le domaine d'utilisation privilégié des moteurs à courant continu est celui de la traction électrique (traction automobile, chariots élévateurs, traction ferroviaire). Ce sont alors des **moteurs "série"**.

On emploie aussi les moteurs à courant continu dans les asservissements de vitesse très performants. En effet, pour asservir à une grandeur de commande même constante la vitesse d'un moteur dont la charge varie, il faut pouvoir agir sur cette vitesse de manière à être capable de rattraper les écarts entre la grandeur de consigne et la vitesse effective. Ainsi, les platines de chaînes Hi-Fi sont équipées de moteurs à courant continu et non de moteurs asynchrones monophasés.

On trouve encore des moteurs à courant continu dans les fabriques de papier (où les différents moteurs agissant sur une même feuille de papier sont asservis les uns aux autres), dans les laminoirs (où les phases de ralentissement et d'inversion du sens de rotation sont extrêmement fréquents), dans beaucoup d'ascenseurs, de machines-outils et de servomécanismes de grandes performances.

## 2.1.6. Les autres types de machines électriques

### A.. LES MOTEURS UNIVERSELS

Les moteurs universels sont les moteurs les plus utilisés dans la vie domestique. Ils équipent

les moulins à café, les mélangeurs, mixeurs et robots ménagers, les foreuses, ponceuses et autres scies sauteuses des bricoleurs, les petits ventilateurs, les sèche-cheveux, aspirateurs... Il s'agit de moteurs à collecteur, qui sont prévus pour fonctionner en courant alternatif monophasé (mais qui fonctionneraient mieux encore en courant continu : faites l'essai avec une foreuse en lui appliquant une tension continue d'une cinquantaine de volts). La vitesse de ces moteurs chute très vite lorsqu'un couple important leur est demandé comme nous le verrons.

On reconnaît, au bruit, que l'on a affaire à un moteur universel à l'extrême variation de sa vitesse avec la charge.

L'usage des moteurs universels est limité aux puissances inférieures au kW. En effet, le fonctionnement du collecteur en courant sinusoïdal est encore plus délicat qu'en courant continu, et l'ensemble balais-collecteur constitue la partie fragile de ces machines.

## B. LES MOTEURS PAS A PAS

Il faut signaler la montée extrêmement rapide, sur le marché industriel, de ce type de moteurs. Associés aux processeurs qui équipent les machines outils à commande numérique, à tous les dispositifs nécessitant un positionnement précis, ces moteurs, très simples par leur constitution, mais nécessairement associés, là encore, à des dispositifs électroniques de commande et d'alimentation, ont des puissances comprises entre quelques watts et quelques centaines de watts.

Ils offrent des caractéristiques qui simplifient considérablement la conception des équipements de position : ils permettent en effet, un blocage à l'arrêt en une position spécifiée, alors que les autres moteurs électriques doivent être bloqués, de l'extérieur, par un frein, dans la position qu'ils ont atteinte lorsqu'ils étaient alimentés. Cela est dû au fait que l'on peut les considérer comme composé d'un aimant (le rotor), venant se placer successivement devant les bobines qui sont alimentées à tour de rôle en courant continu. Il suffit de maintenir l'alimentation de la bobine en vis-à-vis du rotor arrêté, pour que celui-ci soit bloqué dans cette position.

On rencontre ces moteurs en horlogerie, dans les machines à découper, dans les ensembles qui leur associent processeurs de contrôle et de calcul d'une part, laser d'usinage d'autre part, dans les automates ...

La variation de vitesse de ces moteurs est obtenue par action sur le rythme de succession des bobines alimentées : c'est lorsqu'on les commande par microprocesseur, que ces moteurs atteignent leurs performances optimales (rapidité, précision).

### **2.1.7. Associations moteurs - électronique**

Nous venons de voir que les moteurs d'utilisation récente (pas-à-pas pour les petites puissances, synchrones autopilotés pour les fortes puissances) sont nécessairement associés à des équipements électroniques.

Même les vieux moteurs à courant continu ont un fonctionnement rénové grâce aux alimentations à tension variable qui peuvent les compléter.

Pour les exigences classiques, le moteur asynchrone reste le moteur le plus utilisé. Pour profiter au maximum de ses qualités fondamentales de prix et de robustesse, on fait appel, même en ce qui le concerne, à l'électronique de puissance qui lui apporte ce qui lui manque

lorsqu'il est utilisé seul sur un réseau triphasé : la variation de vitesse.

Ainsi, pour toutes les utilisations un peu fines, il faut concevoir les problèmes d'entraînement en termes d'ensembles "moteur + électronique associée". Ce n'est que munis de leur mode d'alimentation standard (secteur triphasé pour un moteur synchrone ou asynchrone, tension continue fixe pour un moteur à courant continu), que les moteurs possèdent des caractéristiques bien distinctes. Dans les autres cas, les solutions apportées par la partie électronique de l'équipement modifient les performances connues et atténuent les différences : c'est alors le coût qui détermine le choix de l'ingénieur.

---

## 2.2. METHODES D'ETUDE DES MACHINES ELECTRIQUES

### 2.2.1. Généralités

Les considérations qui suivent vont être illustrées dans la suite du cours. Mais on peut déjà dire qu'il existe deux méthodes différentes pour aborder l'étude des machines électriques :

A) la méthode dite " des circuits " ou de Kirchhoff : ( 1<sup>e</sup> méthode )

On écrit les équations des différents circuits électriques et l'équation de conservation de l'énergie (travail mécanique + apport d'énergie électrique = accroissement d'énergie potentielle), dont on déduit l'expression de la force en fonction des paramètres globaux du circuit. C'est une méthode systématique, semblable quelle que soit la machine étudiée, elle ne demande pas la connaissance approfondie du phénomène physique exploité. Le dispositif se présente comme une "boîte noire", un "paquet" d'équations différentielles. On peut aisément en faire un modèle mathématique, qu'il suffira d'insérer dans celui d'un ensemble. C'est particulièrement intéressant lorsque le moteur ( ou tout autre dispositif ) vient s'inscrire comme élément d'un ensemble, dans une chaîne de régulation. C'est donc **l'optique de l'automaticien**. ( cfr. Théorie des systèmes )

B) la méthode dite " des champs " ou de Maxwell : ( 2<sup>e</sup> méthode )

On part des phénomènes physiques (loi de Coulomb ou loi de Laplace), on calcule les grandeurs intervenant réellement dans le phénomène physique. C'est **l'optique du constructeur**.

### Choix de la méthode

D'après le **critère de l'utilité pratique** :

La Belgique n'ayant plus qu'une activité réduite en construction de grosses machines électriques, le point de vue de l'utilisateur intéresse un plus grand nombre de futurs ingénieurs que le point de vue du constructeur. On est donc tenté de choisir la **méthode des circuits**. Il ne faut cependant pas oublier que le nombre de constructeurs de petites machines ou de dispositifs électromécaniques particuliers ou simplement d'ingénieurs d'entretien, est beaucoup plus élevé. Il ne faut pas non plus oublier les possibilités offertes par les pays étrangers proches ou lointains.

D'après le **critère de la formation** :

La **méthode des circuits** permet grâce à quelques principes de base employés systématiquement, un développement logique de tous les problèmes, avec un minimum de mémorisation.

La préférence va donc à la méthode des circuits, mais il sera cependant parfois fait appel à la méthode des champs, ceci d'une part afin de permettre le dialogue avec les personnes formées à cette méthode, et d'autre part afin d'éviter le sentiment de frustration que pourrait

ressentir l'étudiant qui apprend à prévoir sans comprendre le principe physique qu'il applique. Notons toutefois qu'Heaviside disait :

*"Ce n'est pas parce que je ne comprends pas le mécanisme de la digestion que je dois m'empêcher de bien dîner"...*

---

### 2.2.2. Choix du phénomène physique exploité

On pourrait imaginer des moteurs capacitifs (Force donnée par la loi de Coulomb). Or la plupart (pour ne pas dire la totalité) des moteurs électriques utilisés sont de type inductif (Force donnée par la loi de Laplace). Pourquoi?

L'énergie mécanique s'obtient au détriment de l'énergie potentielle électrique (cas capacitif) ou magnétique (cas inductif).

Cas capacitif : densité d'énergie potentielle électrique =  $\frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$

dans l'air, E est limité à 3 kV/mm, c-à-d  $3 \cdot 10^6$  V/m

$$\text{d'où } W_{\max} = \frac{1}{2} \frac{1}{36\pi} 10^{-9} (3 \cdot 10^6)^2 \approx 40 \text{ Joules/m}^3$$

Cas inductif : densité d'énergie potentielle magnétique =  $\frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0}$

dans le fer, B est limité à 1 à 2 Wb/m<sup>2</sup>

$$\text{d'où } W_{\max} = \frac{1}{2} \frac{1}{4\pi \cdot 10^{-7}} * 1 \approx 400.000 \text{ Joules/m}^3$$

On remarque donc qu'une machine capacitive serait 10.000 fois plus volumineuse qu'une machine inductive développant la même puissance. C'est pourquoi presque toutes sont **inductives**.<sup>1</sup>

Le dispositif magnétique le plus simple est l'électro-aimant illustré à la Figure 2.2-1 pour laquelle la force est donnée par la relation :

$$f_{em} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(x)}{dx} \quad (2.2-1)$$

---

<sup>1</sup> Voici déjà l'occasion de mettre en évidence une des caractéristiques de la démarche de l'ingénieur : efficacité, rendement, optimisation tant du point de vue technique que, surtout, du point de vue économique.

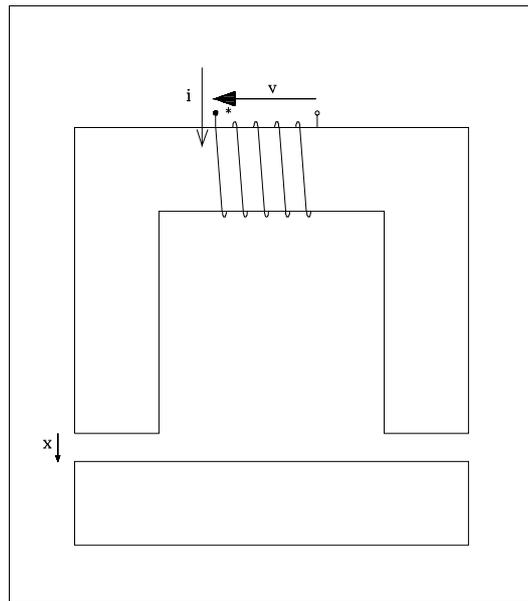


Figure 2.2-1

Les machines électriques sont donc en réalité des machines *magnétiques* si l'on fait référence aux principes de base. Nous continuerons cependant à les appeler *machines électriques* en faisant référence à une des sources d'énergie, l'autre étant évidemment mécanique. Comme on le verra dans la suite de ce cours, la quasi-totalité des machines électriques sont des machines *tournantes* et pas des machines *glissantes*.

---

## 2.3. RAPPEL DES LOIS DE L'ELECTROMAGNETISME

Dans ce qui suit, l'espace est rapporté à un système cartésien d'axes orthogonaux et d'orientation dextrogyre.

### 2.3.1. Loi de la force magnétomotrice (f.m.m.)

Cette loi intervient dans le calcul des ampère-tours nécessaires pour magnétiser un circuit magnétique. Elle peut également se mettre, soit sous forme intrinsèque ou vectorielle :

$$\text{rot } \bar{H} = \bar{J}_t \quad (2.3-1)$$

où  $\bar{H}$  est le champ magnétique local et  $\bar{J}_t$  la densité de courant, soit sous la forme d'une intégrale de contour

$$\mathcal{F} = \oint \bar{H} d\bar{l} = \sum i \quad (2.3-2)$$

$\mathcal{F}$  est la force magnétomotrice le long d'un contour fermé embrassant un faisceau de conducteurs parcourus par des courants  $i$ .

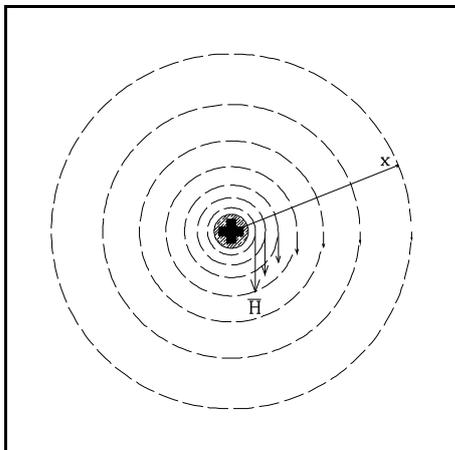


Figure 2.3-1

Une application évidente de cette formule permet de calculer la valeur du champ magnétique créé par un courant  $i$  circulant dans un conducteur cylindrique de section circulaire et de longueur infinie (Figure 2.3-1). Par raison de symétrie, les lignes de champ sont des circonférences et la valeur du champ magnétique à une distance  $x$  de l'axe est donnée par :

$$H(x) = \frac{i}{2\pi x} \quad (2.3-3)$$

### 2.3.2. Loi de Maxwell

Cette loi exprime la force électromotrice induite dans un **circuit** (boucle **fermée**) en fonction de la valeur du flux qu'il embrasse.

$$\text{forme locale} : \text{rot } \bar{E} = - \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (2.3-4)$$

*forme globale : intégrale de contour*

$$e = r i = \oint \bar{E} \, d\bar{l} = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.3-5)$$

Cette dernière relation est la forme classique de la loi de Maxwell dans laquelle la f.e.m. induite  $e$  fait circuler un courant  $i$ . La forme qui respecte la convention "récepteur" sera présentée au chapitre 3.

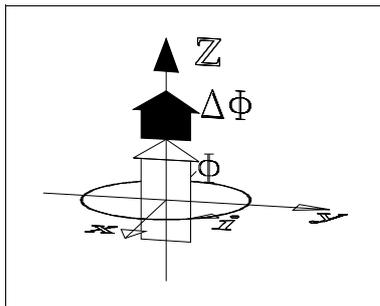


Figure 2.3-2

Un *accroissement* du flux coupé par un circuit y fait circuler un courant dans le sens *négalif* de la trigonométrie. Cette loi est plus facile à visualiser si on considère un circuit plan et les lignes d'induction dirigées selon l'axe  $z$  d'un trièdre trirectangle dont les axes  $x$  et  $y$  sont situés dans le plan du circuit (Figure 2.3-2).

Lorsque le circuit est fixe et l'induction variable, on parlera de f.e.m. **induite**. Lorsque le circuit est mobile dans un champ d'induction fixe, on parlera de f.e.m. **engendrée**.

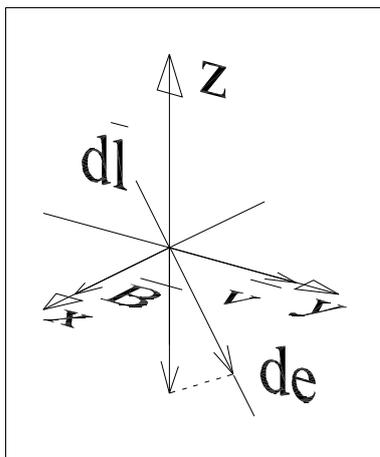


Figure 2.3-3

Pour un circuit mobile, la loi se met sous la forme :

$$de = - [ \bar{B} \times \bar{v} ] \cdot d\bar{l} \quad (2.3-6)$$

où  $\bar{v}$  est la vitesse relative par rapport à un champ d'induction  $\bar{B}$  d'un élément de longueur élémentaire  $d\bar{l}$  du circuit électrique concerné (Figure 2.3-3) (Le contexte doit permettre de différencier  $v$ , la tension aux bornes, et  $\nu$ , la vitesse). Le plan  $xy$  est celui des vecteurs  $\bar{B}$  et  $\bar{v}$  qui ne doivent pas nécessairement être perpendiculaires comme dans la Figure 2.3-3 mais la relation (2.3-6) montre que la f.e.m. est, dans ce cas, la plus élevée possible. Pour la même raison, le conducteur  $d\bar{l}$  est généralement perpendiculaire au plan  $\bar{B} \bar{v}$ .

Pour un élément de conducteur linéaire de longueur finie  $l$  se déplaçant à la vitesse constante  $\nu$  dans un champ d'induction uniforme  $B$ , cette loi devient :

$$e = - [ \bar{B} \times \bar{\nu} ] \cdot \bar{l} \quad (2.3-7)$$

Si le déplacement du conducteur linéaire se fait normalement à son axe et à la direction du champ, on peut écrire plus simplement en valeur absolue :

$$e = B l \nu \quad (2.3-8)$$

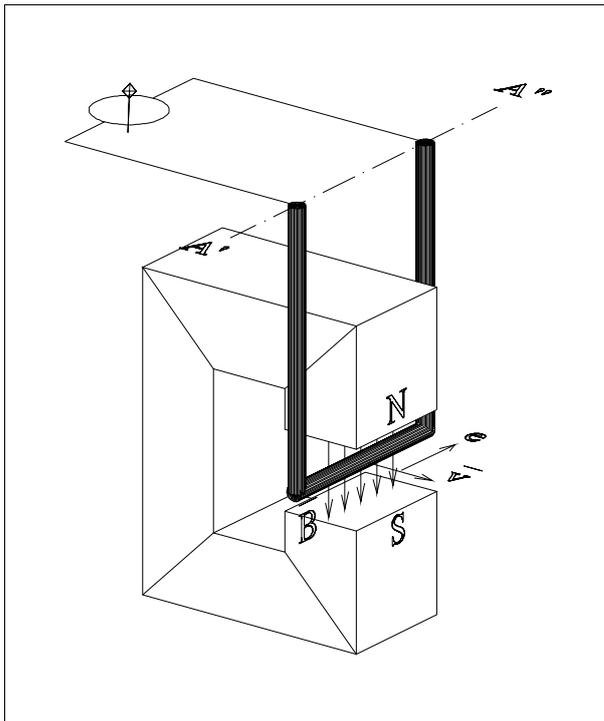


Figure 2.3-4

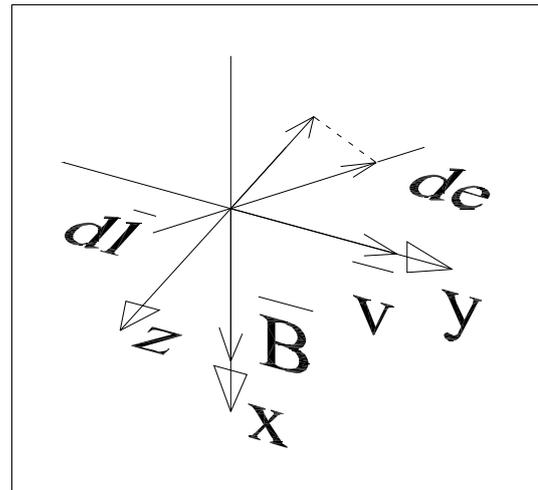


Figure 2.3-5

L'expérience classique qui permet d'illustrer la formule (2.3-8) est illustrée à la Figure 2.3-4 . Un conducteur en forme de U peut osciller autour d'un axe  $A'A''$ . La partie horizontale de ce conducteur se déplace dans le champ d'induction créé par un aimant permanent. Dans l'entrefer, les lignes d'induction vont du pôle Nord au pôle Sud. Pour la valeur représentée de la vitesse, la f.e.m. a le sens indiqué, comme le montre la Figure 2.3-5 qui est identique à la Figure 2.3-3 si ce n'est le point de vue adopté. Elle se mesure à l'aide d'un voltmètre.

*Il faut être très prudent dans l'application des relations (2.3-7) et (2.3-8) et bien se souvenir que l'élément  $l$  doit faire partie d'un circuit.*

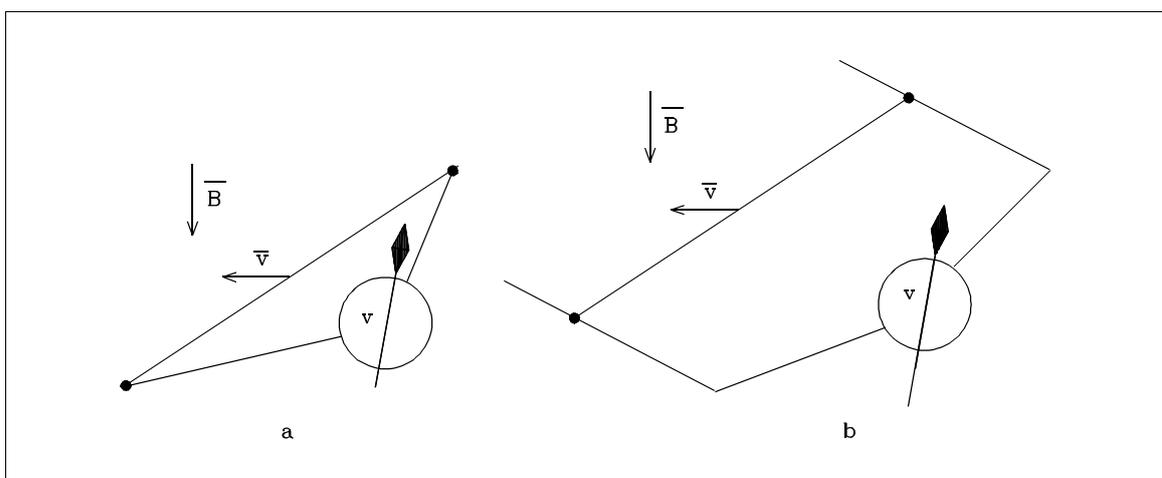


Figure 2.3-6

Pour s'en convaincre, le lecteur voudra bien considérer (Figure 2.3-6) le cas d'une barre se déplaçant dans un champ d'induction à la vitesse  $v$  mais où le voltmètre de mesure accompagne la barre dans son mouvement (a) ou bien est fixé (b).

### 2.3.3. Loi de Laplace

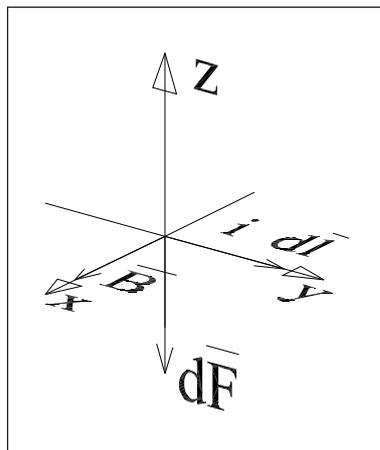


Figure 2.3-7

Celle-ci donne l'expression de la force qui s'exerce sur un conducteur parcouru par un courant et plongé dans un champ d'induction  $\vec{B}$ .

On l'écrit,  $d\vec{F}$  étant l'élément de force agissant sur l'élément  $d\vec{l}$ ,

$$d\vec{F} = - [ \vec{B} \times i d\vec{l} ] \quad (2.3-9)$$

L'application de cette formule au cas d'un conducteur linéaire de longueur  $l$ , parcouru par un courant  $i$ , plongé dans un champ d'induction  $B$  uniforme qui lui est perpendiculaire, donne la force  $F$  qui s'exerce sur ce conducteur, en valeur absolue,

$$|\vec{F}| = B i l \quad (2.3-10)$$

### 2.3.4. Règles mnémotechniques des signes

Bien que ces lois soient suffisamment explicites par elles-mêmes, il est cependant commode, pour faciliter la mémorisation, de les compléter par certaines règles de signes qui s'énoncent comme suit :

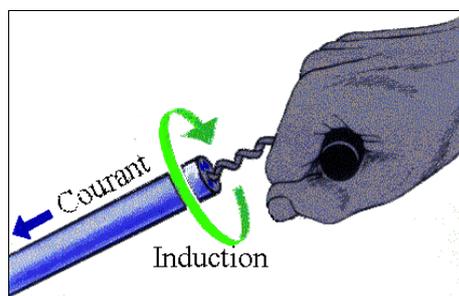


Figure 2.3-8

1° Le sens du champ magnétique engendré par un courant est donné par la **règle du "tire-bouchon"** ou **règle de la "main droite"**.

La première de ces règles exprime que le sens positif des lignes de force engendrées est donné par le sens de rotation d'un tire-bouchon ( de droitier ) progressant dans le sens de circulation du courant.

2° La **Loi de Lenz** exprime que le sens de la force électromotrice induite ou engendrée dans un circuit est tel qu'elle tendra à y faire circuler un courant qui s'oppose à la variation de flux qui lui a donné naissance. Cette règle n'est que la traduction en langage ordinaire et intuitif de la règle des signes définie implicitement par les relations de Maxwell. Elle équivaut à dire que si on observe un circuit électrique fermé dans le sens des lignes de force

qui traversent la surface s'appuyant sur son contour (c'est à dire que les lignes d'induction entrent dans l'oeil), une augmentation du flux embrassé par le circuit tend à engendrer dans celui-ci un courant circulant, pour l'observateur, dans le sens rétrograde de la trigonométrie et inversement. On vérifiera que cette loi correspond bien à la Figure 2.3-2 et qu'elle est cohérente avec la règle du tire-bouchon.

3° Enfin la **règle de Cruciani** permet de trouver aisément, soit le sens de la force électromotrice engendrée dans un conducteur qui se déplace dans un champ, soit le sens de la force qui s'exerce sur un conducteur parcouru par un courant et plongé dans un champ d'induction magnétique.

Elle consiste à considérer les lignes de force comme des fils élastiques. Si le conducteur que l'on considère se déplace dans le champ, il tend à entraîner les lignes de force qui se déforment en s'enroulant autour de lui. Le sens de la force électromotrice engendrée est alors donné par le sens de progression d'un tire-bouchon qui tournerait dans le sens d'enroulement des lignes de force.

Si le conducteur plongé dans le champ est parcouru par un courant, le sens de la force mécanique qui s'exerce sur lui est le même que celui de l'effort qui serait exercé par les lignes de force si, supposées élastiques, elles se déformaient de façon à s'enrouler autour du conducteur dans le sens de rotation d'un tire-bouchon qui progresserait comme le courant.

Toutes ces règles très commodes, plus aisées à appliquer qu'à exprimer en langage ordinaire, sont d'un usage constant dans l'étude du fonctionnement des machines électriques.

### Exemple :

La Figure 2.3-9-a représente la détermination du sens de la force électromotrice engendrée dans un conducteur normal au papier se déplaçant suivant  $\vec{v}$  dans un champ d'induction  $\vec{B}$ . La règle de Cruciani indique que cette force électromotrice est plongeante vers le papier ce qui se représente conventionnellement par une croix. Une force électromotrice sortante serait représentée par un point.

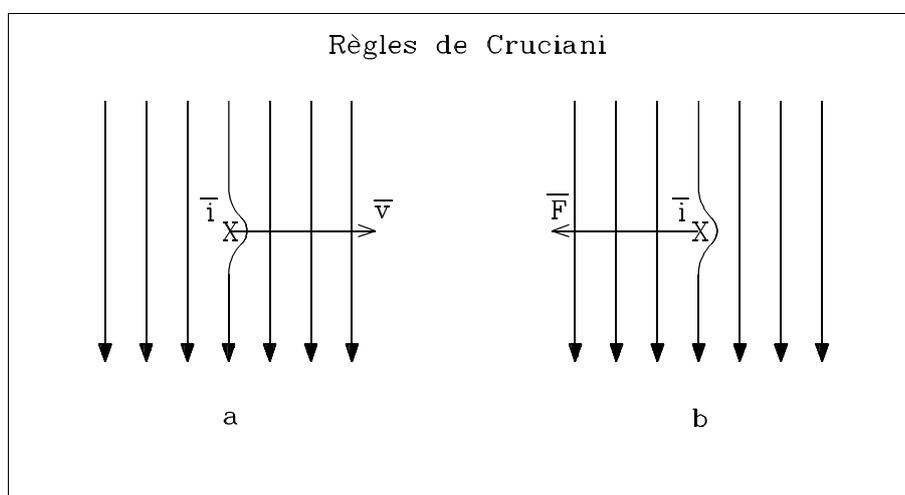


Figure 2.3-9

La Figure 2.3-9-b représente la détermination du sens de l'effort  $\vec{F}$  qui s'exerce sur un conducteur parcouru par un courant plongeant et baignant dans un champ d'induction  $\vec{B}$ . La règle de Cruciani exprime que l'effort est de même sens que celui qui serait exercé par la ligne de force élastique déformée de façon à circuler autour du conducteur comme poussée par un tire-bouchon s'enfonçant dans le papier.

---

## 2.4. PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT DES MACHINES ELECTRIQUES

### 2.4.1. Eléments constitutifs des machines électriques

Pratiquement toutes les machines électriques qui transforment l'une en l'autre les énergies mécanique et électrique sont des machines tournantes qui comportent presque toujours un organe fixe dénommé **stator** et un organe mobile dénommé **rotor**. Ces deux organes sont séparés par un **entrefer**, dont le rôle essentiel, comme on le verra par la suite, n'est pas uniquement de permettre la rotation du rotor par rapport au stator.

D'autre part, dans toute machine électrique quelle qu'elle soit, on pourra toujours distinguer un organe destiné à créer le flux magnétique et que l'on désignera pour cette raison sous le nom "d'**inducteur**" et un organe portant les conducteurs qui sont le siège de forces électromotrices sous l'effet des phénomènes d'induction et que l'on désigne par le nom "d'**induit**".

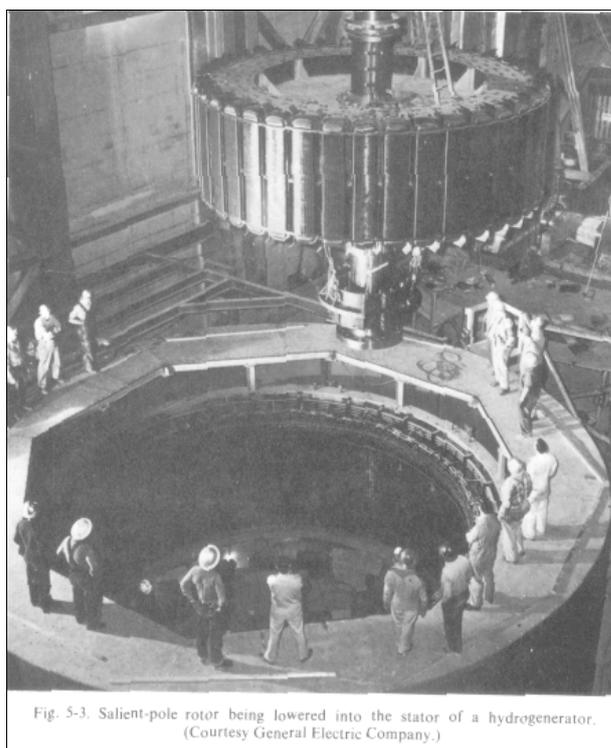


Fig. 5-3. Salient-pole rotor being lowered into the stator of a hydrogenerator. (Courtesy General Electric Company.)

Figure 2.4-1

Dans les machines tournantes, l'inducteur et l'induit seront tantôt fixes (stator), tantôt mobiles (rotor) suivant les nécessités de la construction.

Le flux créé par l'inducteur peut être dû à la présence d'aimants permanents ou à des conducteurs parcourus par des courants et disposés sur l'organe inducteur de la machine. Les lignes de force de ce flux se referment à travers un circuit fermé dit circuit magnétique, qui concerne l'inducteur et l'induit et qui traverse l'entrefer.

Le lecteur n'aura aucune peine à reconnaître à la Figure 2.4-1 (extraite de [MAT01]), l'inducteur situé au rotor et l'induit situé au stator d'un alternateur à axe vertical.

Une même machine peut jouer les deux rôles, moteur et générateur. Cependant elle sera plus spécialement dédiée à une des deux fonctions. Un alternateur (=générateur) de centrale électrique usuelle ne pourrait fonctionner en moteur sans conséquence grave pour la turbine mais pas pour lui-même puisqu'il passe d'une fonction à l'autre dans une centrale de pompage. Le moteur d'entraînement d'un laminoir réversible passe transitoirement en générateur. Les grandeurs auxquelles on s'intéresse sont évidemment différentes en fonctionnement moteur et en fonctionnement générateur. Dans un cas (générateur), ce sont les grandeurs électriques (tensions, courants, puissances), dans l'autre (moteur), ce sont les grandeurs mécaniques et notamment le couple

et la vitesse qui sont liées par ce qu'il a convenu d'appeler la *caractéristique mécanique*.

## 2.4.2. Machines hétéropolaires (B n'a pas le même signe partout dans l'entrefer)

### Principes de fonctionnement

Soit le dispositif suivant (Figure 2.4-2 et Figure 2.4-3):

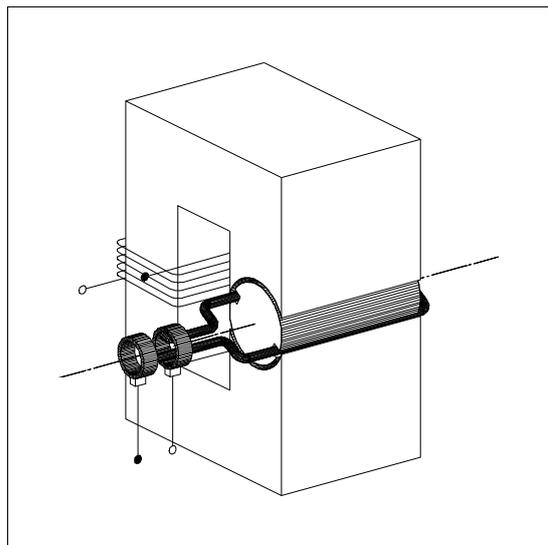


Figure 2.4-2

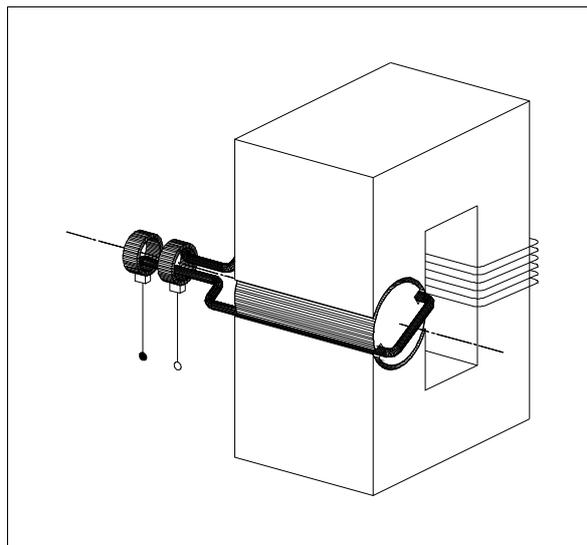


Figure 2.4-3

Il comprend : - un stator métallique portant un circuit inducteur composé de  $N_s$  spires parcourues par un courant continu  $i_s$  ;

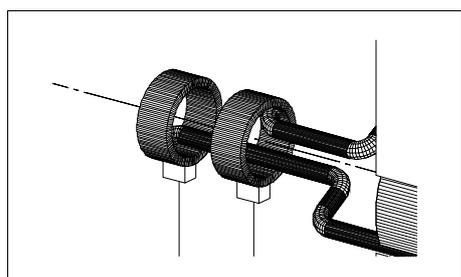


Figure 2.4-4

- un rotor lisse, métallique également et supportant l'induit, composé de la spire  $II'$ , constituée de deux conducteurs diamétralement opposés. Pour des raisons de résistance mécanique, les conducteurs sont déposés dans des encoches. Les bornes  $I$  et  $I'$  sont connectées à des disques conducteurs solidaires de l'axe de rotation et sur lesquels reposent des balais (Figure 2.4-4).

Le flux créé par l'inducteur traverse l'entrefer du stator vers le rotor dans une moitié et dans l'autre sens dans l'autre moitié. La longueur utile  $l$  d'un conducteur est pratiquement égale à la largeur du circuit magnétique car l'induction est faible en dehors de l'expansion polaire (Figure 2.4-5).

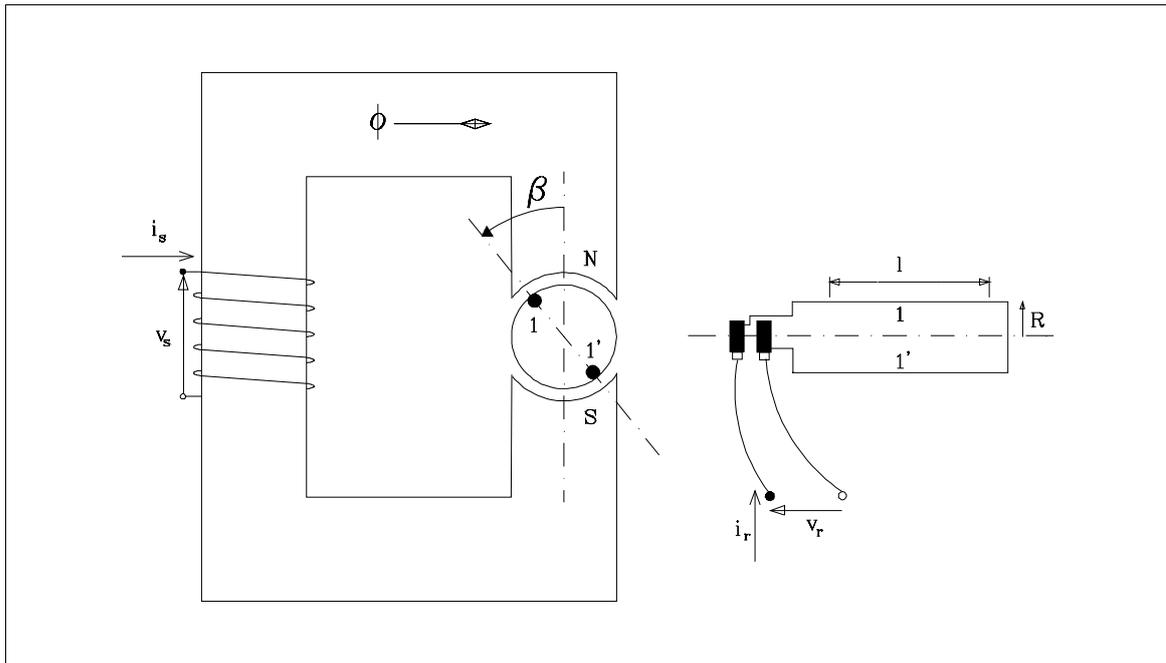


Figure 2.4-5

### 1. Méthode des champs

Considérons le fonctionnement à vide :  $i_r = 0$ .

Pour simplifier l'exposé, le fer sera supposé parfait c'est-à-dire de perméabilité infinie. Tous les A.t. se concentrent donc dans l'entrefer. En considérant un contour fermé traversant l'entrefer au droit des conducteurs  $I$  et  $I'$ , il vient :

$$N_s i_s = 2 H \delta(\beta) \quad (2.4-1)$$

avec  $\delta$  : largeur de l'entrefer (fonction de  $\beta$ )

Donc (Figure 2.4-6) :

$$B(\beta) = \mu_0 H = \mu_0 \frac{N_s i_s}{2 \delta(\beta)} \quad (2.4-2)$$

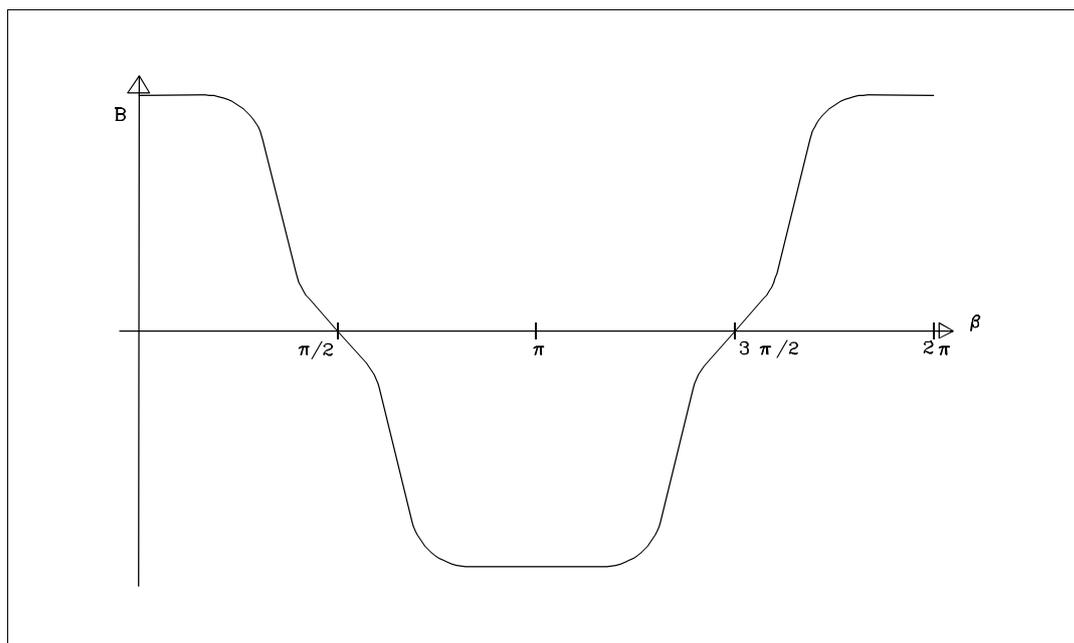


Figure 2.4-6

Lorsque le rotor tourne à vitesse  $\Omega_r$  constante, il apparaît "aux bornes du conducteur", une f.e.m. égale à :

$$e_1 = B l v = B(\beta) l R \Omega_r \quad (2.4-3)$$

où R est le rayon du rotor.

Comme cela a été rappelé au paragraphe 1.3.1., la f.e.m. "aux bornes du conducteur I" ne peut être calculée que parce que le conducteur appartient à un circuit.

Comme  $e_{I'} = -e_I$ , entre I et I' apparaît la f.e.m.  $e_r$  :

$$e_r = e_1 - e_{I'} = 2 l R B(\beta) \Omega_r \quad (2.4-4)$$

**Cette relation se retrouvera par la suite pour tous les types de machines : la f.e.m. engendrée est proportionnelle au produit d'un flux et d'une vitesse.**

Puisque  $\beta = \Omega_r t$  et que  $\Omega_r$  est supposé constante, on peut écrire :

$$e_r = c^{te} B(\Omega_r t) \quad (2.4-5)$$

**$e_r(t)$  apparaît comme une fonction périodique du temps qui**

**reproduit dans le temps la répartition spatiale de l'induction. Si le profilage des pôles est tel que la répartition spatiale de l'induction soit sinusoïdale,  $e_r(t)$  sera une fonction sinusoïdale du temps.**

Si une bobine est constituée par la mise en série de spires confondues, il suffit de multiplier l'amplitude de la tension aux bornes d'une spire par le nombre de spires.

Pour éviter les problèmes de contacts glissants à fort courant, les emplacements de l'inducteur et de l'induit peuvent être échangés, soit dans une structure à pôles saillants (Figure 2.4-7-a), soit dans une structure à pôles lisses (Figure 2.4-7-b).

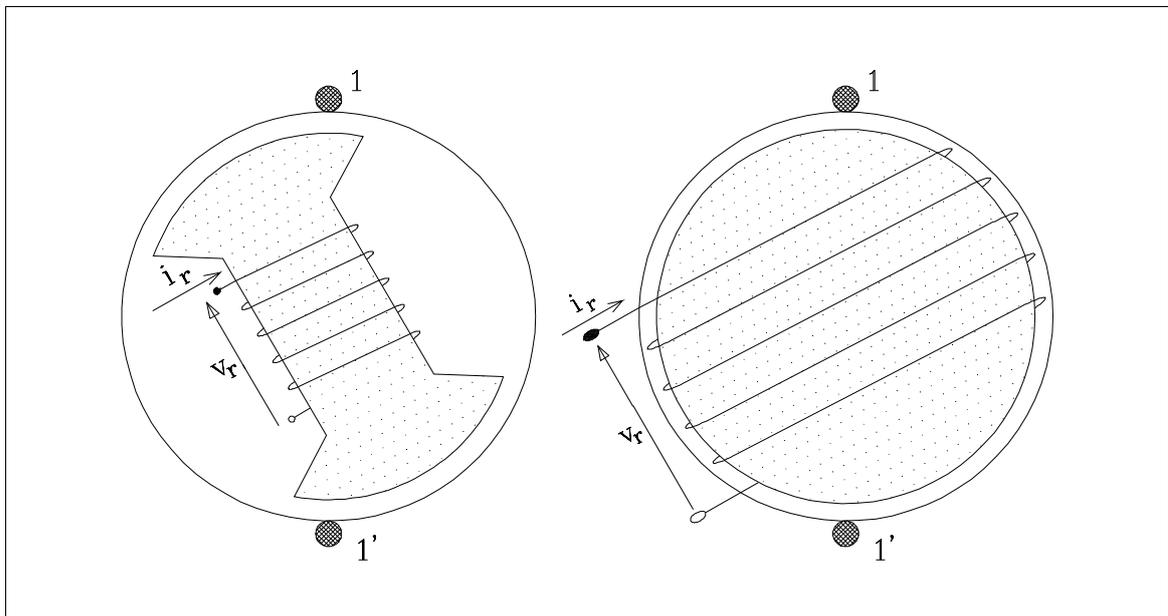


Figure 2.4-7

## 2. Méthode des circuits

Par définition  $\psi$  est le flux totalisé coupé par un enroulement comportant  $N$  spires:

$$\psi = \sum_{i=1}^N \Phi_i \quad (2.4-6)$$

Si la dispersion est négligeable :  $\psi = N \Phi$ .

En supposant le système linéaire, il vient :

$$\begin{aligned} \psi_r &= L_r i_r + M i_s \\ \psi_s &= M i_r + L_s i_s \end{aligned} \quad (2.4-7)$$

où  $L_r$  et  $L_s$  sont éventuellement fonction de  $\beta$  mais où  $M$  l'est certainement.

En considérant le fonctionnement à vide ( $i_r = 0$ ),

$$\begin{aligned} \psi_s = L_s i_s = c^{te} \text{ puisque} & \quad \left| \begin{array}{l} i_s = c^{te} \text{ (Courant continu)} \\ \text{et} \\ L_s = c^{te} \text{ (Rotor lisse)} \end{array} \right. & (2.4-8) \\ \text{donc : } v_s = R i_s & \quad \text{(la tension est continue)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \psi_r &= M i_s \\ \text{donc : } e_r &= - \frac{d\psi_r}{dt} = - \frac{d}{dt}(M i_s) & (2.4-9) \\ &= - i_s \frac{dM}{dt} \\ &= - i_s \frac{\partial M(\beta)}{\partial \beta} \Omega_r \end{aligned}$$

La relation (2.4-4) est strictement identique à la relation (2.4-9).

**Il faut insister sur le fait que la répartition temporelle de la f.e.m. engendrée  $e(t)$  reproduit exactement la répartition spatiale de l'induction  $B(\beta)$  si la vitesse de rotation est constante.**

### Répartition sinusoïdale

Si la disposition des enroulements pour les machines à rotor lisse ou si le profil des pôles saillants est tel que la répartition spatiale de l'induction est sinusoïdale, la répartition temporelle de la f.e.m. l'est également.

En effet, si  $B(\beta) = B^M \cos \beta$

il vient, d'après (2.4-3) et  $\beta_t = \Omega_r t + \beta_0$

$$\begin{aligned}
 e_1 &= B l v = B^M l R \Omega_r \cos(\Omega_r t + \beta_0) \\
 &= E_M \cos(\Omega_r t + \beta_0) \\
 &\cdot \quad \text{ayant posé } E_M = B^M l R \Omega_r = \text{valeur de crête} \\
 &= E \sqrt{2} \cos(\Omega_r t + \beta_0) \\
 &\cdot \quad \text{ayant posé } E = \frac{E_M}{\sqrt{2}} = \text{valeur efficace}
 \end{aligned}
 \tag{2.4-10}$$

Cette tension peut se représenter par le phaseur

$$\underline{E}_1 = E \angle \beta_0 = E e^{j \beta_0}
 \tag{2.4-11}$$

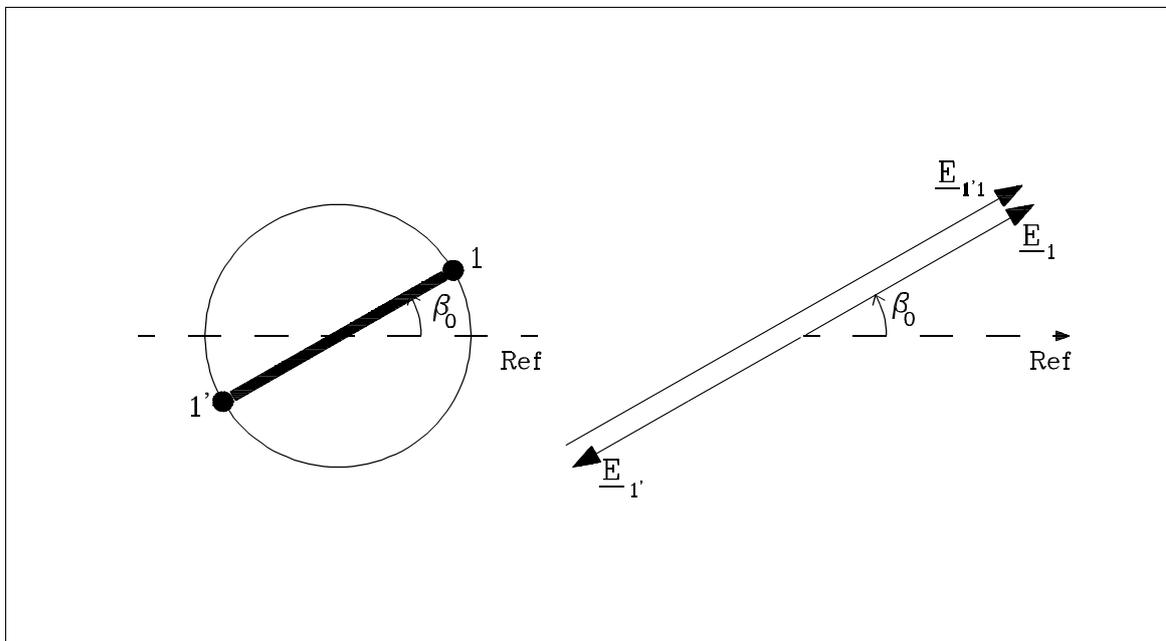


Figure 2.4-8

Le conducteur de retour d'une spire diamétrale est décalé de  $\pi$  par rapport au conducteur d'entrée, donc

$$\begin{aligned}
 \beta_{1'} &= \Omega_r t + \beta_0 - \pi \\
 \underline{E}_{1'} &= E \angle \beta_0 - \pi = -\underline{E}_1
 \end{aligned}
 \tag{2.4-12}$$

La tension aux bornes de la spire, la seule qui existe physiquement, est égale à

$$\underline{E}_{1/1'} = \underline{E}_1 - \underline{E}_{1'} = 2 \underline{E}_1
 \tag{2.4-13}$$

### Spire non diamétrale

Si le conducteur de retour  $I'$  est décalé de  $\theta_1$  en avant par rapport au conducteur de retour  $I''$  d'une spire diamétrale, la connexion d'extrémité de la spire raccourcie est plus courte que celle de la spire diamétrale ( ce qui est un avantage ) mais la tension à ses bornes est aussi plus faible (Figure 2.4-9), ( ce qui est un inconvénient )<sup>2</sup>. On définira plus loin un facteur de raccourcissement.

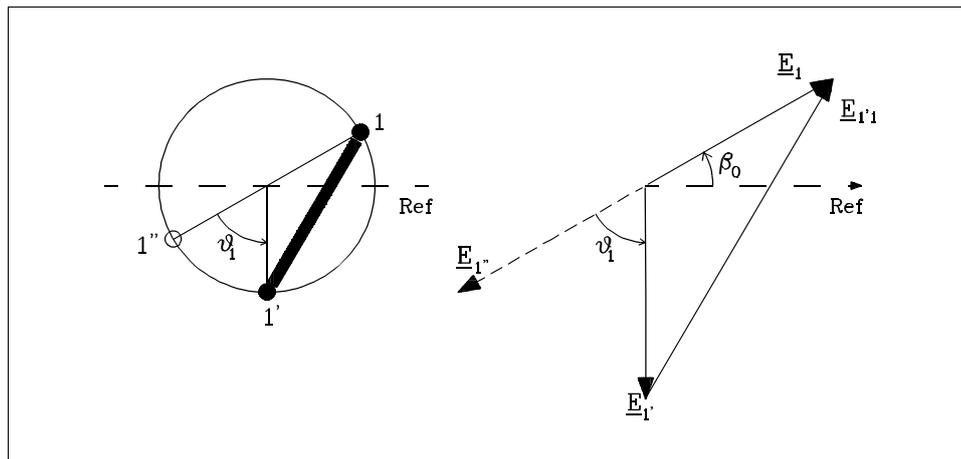


Figure 2.4-9

### Enroulement

La machine qui ne comporterait qu'une spire ( ou un groupe de spires confondues) au rotor serait évidemment bien mal utilisée<sup>3</sup>.

Si on considère (Figure 2.4-10) une spire  $22'$  décalée par rapport à la spire  $11'$  d'un angle  $\theta_1$ , le phaseur de la tension à ses bornes est lui aussi déphasé de  $\theta_1$  :

$$\underline{E}_{22} = \underline{E}_{11'} e^{j\theta_1} \quad (2.4-14)$$

<sup>2</sup> Optimisation !...

<sup>3</sup> Point de vue économique !...

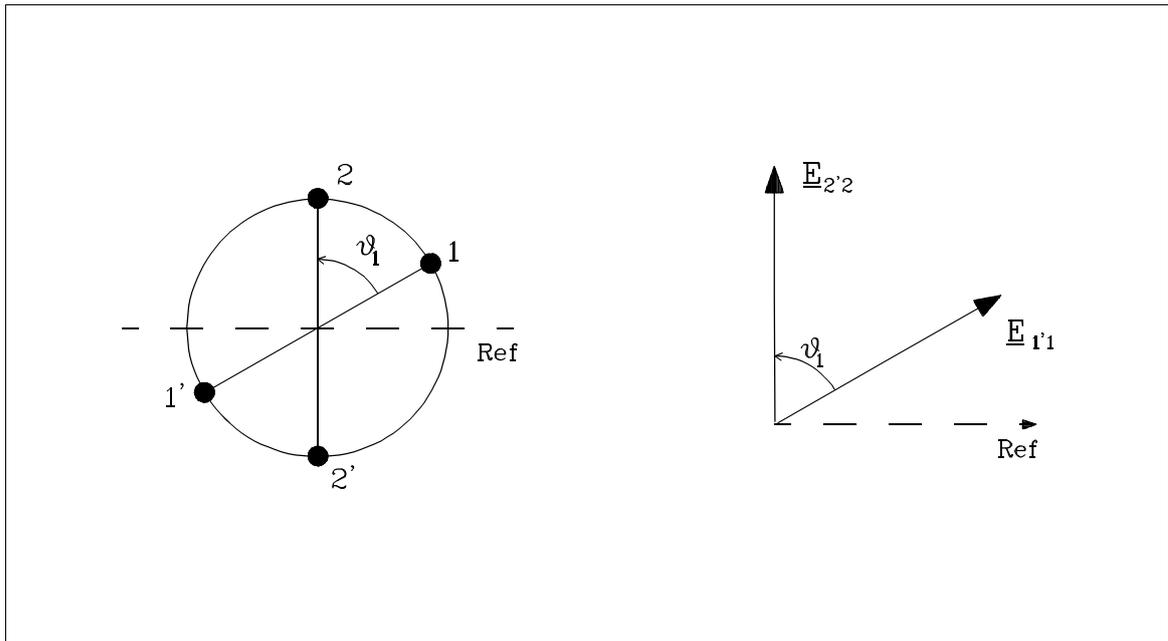


Figure 2.4-10

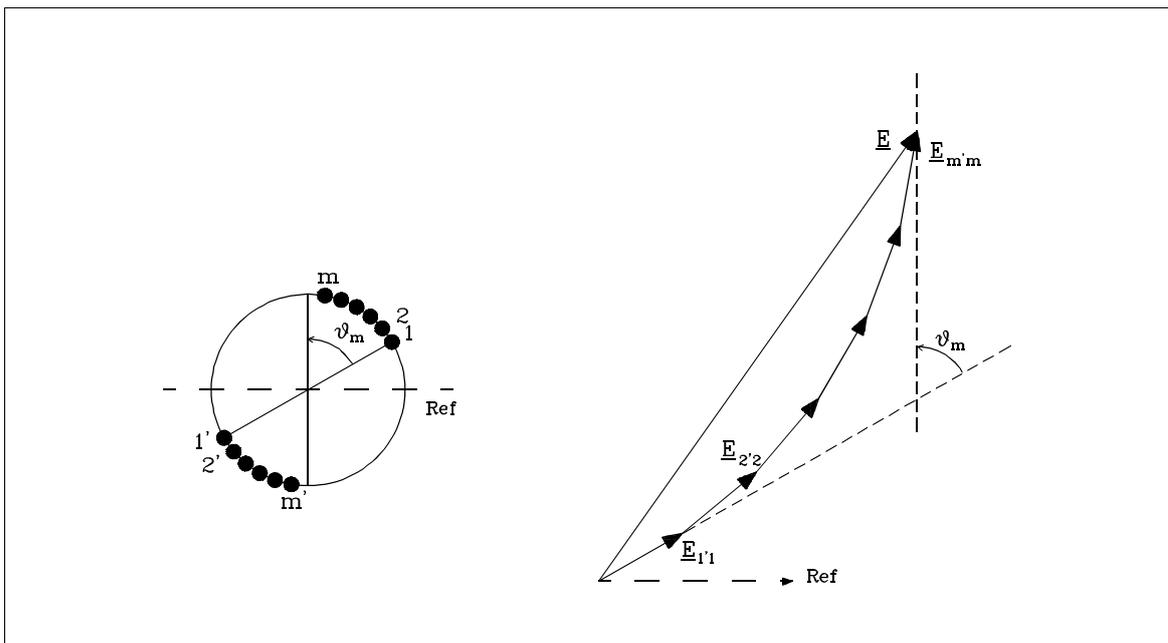


Figure 2.4-11

Il est permis de mettre ces deux spires en série mais pas en parallèle (pq?).

On peut procéder à la mise en série pour toutes les spires situées sur un arc  $\theta_m$  du rotor (Figure 2.4-11).

Lorsque  $\theta_m$  est augmenté, les ajouts de spires sont de moins en moins efficaces :

l'accroissement de tension  $E$  est faible. Il n'est pas économique de dépasser  $\theta_m = \pi/3$ . Pour  $\theta_m = \pi/3$ , le rotor peut accueillir trois enroulements indépendants aux bornes desquels sont engendrées des f.e.m. d'amplitudes égales, mais décalées de  $2\pi/3$ . C'est le système **triphase équilibré**. En toute généralité, le système peut comporter  $m$  phases, c'est-à-dire  $m$  enroulements indépendants dont les tensions sont décalées l'une par rapport à l'autre de  $2\pi/m$ .

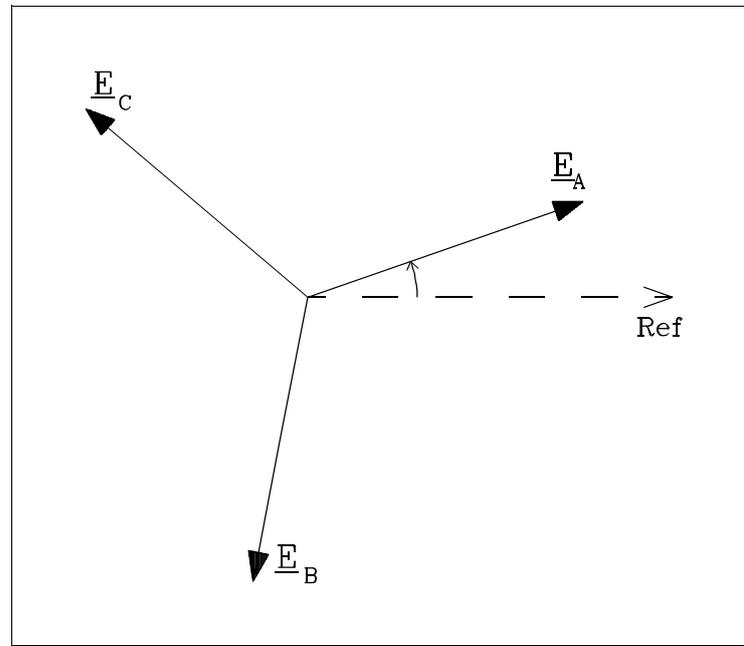


Figure 2.4-12

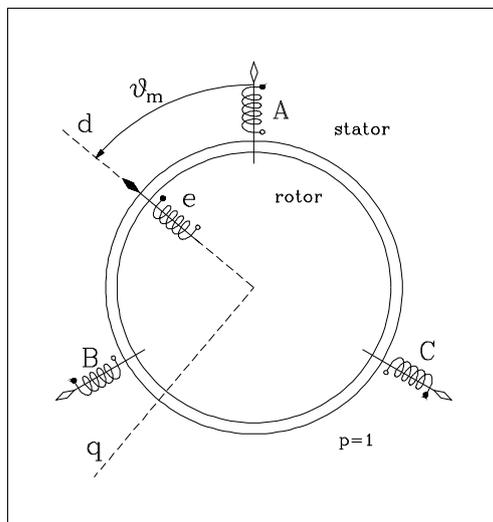


Figure 2.4-13

Cette machine triphasée représente un type particulier d'alternateur puisque, pour les raisons évoquées plus haut, l'induit se trouve en réalité au stator. La Figure 2.4-13 représente schématiquement une machine synchrone à rotor lisse à une paire de pôles ( $p=1$ ). Ce rotor pourrait être à pôles saillants comme indiqué à la Figure 2.4-7. L'étude de ces machines ne sera pas faite dans ce cours. La relation (2.4-5) montre que l'amplitude des tensions triphasées dépend du flux créé par l'inducteur donc du courant rotorique appelé **d'excitation** et de la vitesse de rotation et que la fréquence est, pour une machine à une paire de pôles, égale à la vitesse de rotation. L'importance de ces machines est très grande

puisque pratiquement toute la production d'électricité est assurée par des alternateurs synchrones entraînés par des turbines à vapeur, à gaz ou hydrauliques. Dans un réseau interconnecté comme le réseau européen, toutes ces machines tournent strictement à la même vitesse (3000 tr/min).

Nous avons vu au chap. 1 comment connecter les enroulements de l'alternateur pour assurer **économiquement** la distribution de l'énergie électrique. Nous avons vu également que si des impédances égales sont branchées sur les enroulements, les courants débités constituent également un système triphasé équilibré. Un moteur synchrone raccordé à ce réseau entraînera donc sa charge à une vitesse rigoureusement constante.

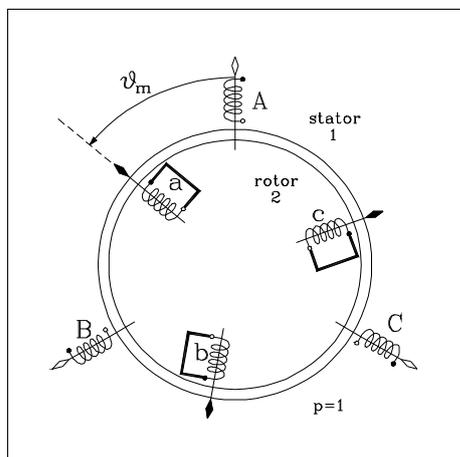


Figure 2.4-14

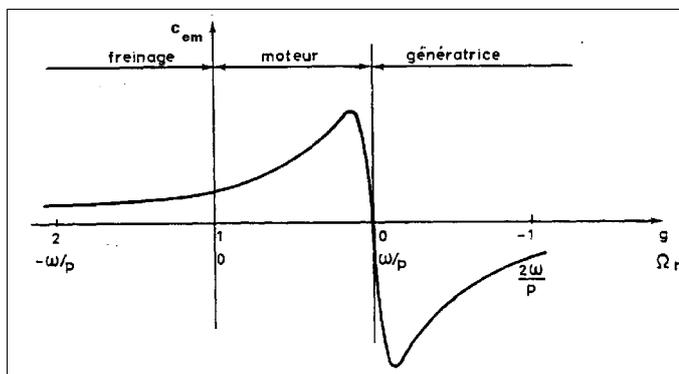


Figure 2.4-15

Nous étudierons au chapitre 5 un autre type de moteur comportant trois enroulements triphasés tant au stator qu'au rotor (Figure 2.4-14). Les enroulements rotoriques sont court-circuités, ce qui conduit à une construction économique et robuste. On pressent, et cela sera démontré, qu'il ne peut y avoir de courants engendrés dans les enroulements rotoriques court-circuités si le moteur tourne au synchronisme. Le moteur ne peut fournir un couple qu'en dehors du synchronisme, d'où son nom : **moteur asynchrone**. La caractéristique mécanique se présente comme indiqué à la Figure 2.4-15. Si l'on veut conserver une bonne valeur au rendement, le point de fonctionnement ne peut se trouver que dans la partie linéaire, proche du synchronisme. Un moteur asynchrone n'est donc pas non plus un moteur à vitesse réglable à moins d'être alimenté par une source à fréquence variable comme c'est par exemple le cas pour l'Eurostar où des moyens électroniques sont utilisés pour transformer l'alimentation monophasée 50 Hz de la caténaire en continu et ensuite en triphasé à fréquence réglable.

## Machine à courant continu

La f.e.m. qui apparaît aux bornes de la spire  $I'I'$  est alternative de pulsation  $\Omega_r$ . Il est possible de la redresser par un inverseur mécanique synchrone.

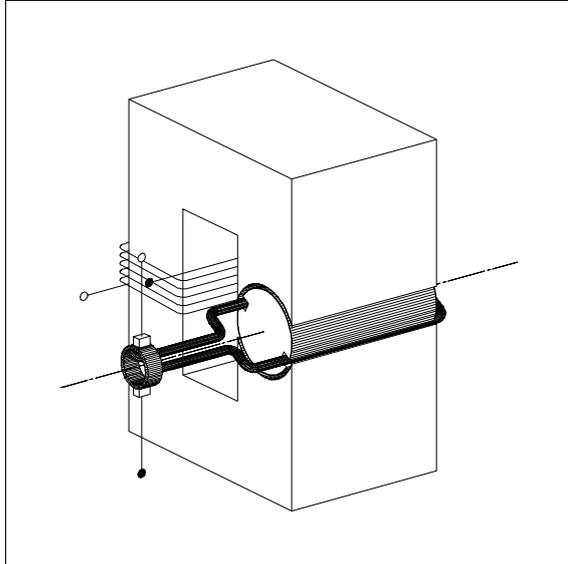


Figure 2.4-16

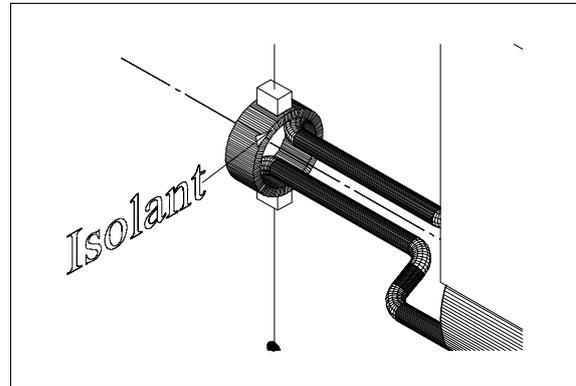


Figure 2.4-17

Les extrémités de la spire sont connectées chacune à un secteur conducteur tournant isolé de l'autre. Sur ces secteurs, appelés lames de collecteur, reposent deux balais fixes diamétralement opposés. La

commutation, c'est-à-dire le passage d'un balai d'un secteur à l'autre, se produit évidemment de manière synchrone avec la tension, à un moment choisi pour donner la tension maximale (lorsque la tension d'une spire s'inverse, dans le cas de deux secteurs). La tension aux bornes des balais a toujours la même polarité. L'ondulation résiduelle diminue lorsque le nombre de lames augmente. Le contact balais/collecteur limite la puissance et nécessite de l'entretien.

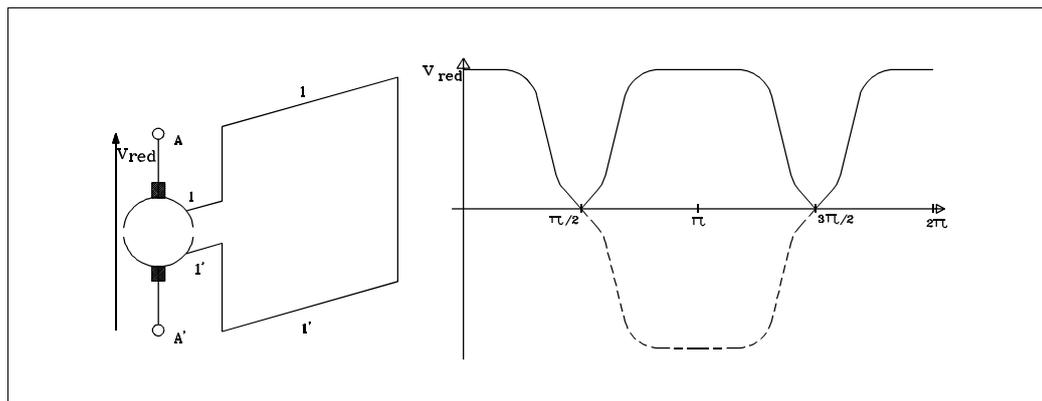


Figure 2.4-18

La théorie de la machine à courant continu sera développée au chapitre 4 mais on comprend déjà que la f.e.m. apparaissant entre les balais est proportionnelle au flux d'excitation et à la vitesse de rotation. Il est très aisé de régler la vitesse d'un moteur à courant continu par action

soit sur le courant d'excitation, soit sur la tension d'alimentation. Par la loi de Laplace (2.3-9), on pressent également que le couple est proportionnel au courant d'induit (dit aussi d'armature). Il n'est donc pas étonnant que les machines à courant continu aient été et restent très utilisées dans les entraînements à vitesse variable, notamment en robotique, malgré leur coût d'achat et d'entretien.

### Machine à plusieurs paires de pôles

Dans une machine à  $p$  paires de pôles, la période de l'onde d'induction n'est plus  $2\pi$  mais  $2\pi/p$ . Pour en tenir compte, il suffit de définir des angles électriques multiples des angles mécaniques.

$$\begin{aligned}\beta_{\text{él}} &= p \beta_{\text{méca}} \\ \omega &= \Omega_r \text{ él} = p \Omega_r \text{ méca}\end{aligned}\tag{2.4-15}$$

En Europe, un moteur asynchrone à 2 paires de pôles tourne pratiquement à 1500 tr/min et un alternateur hydraulique à 10 paires de pôles tourne strictement à 300 tr/min.

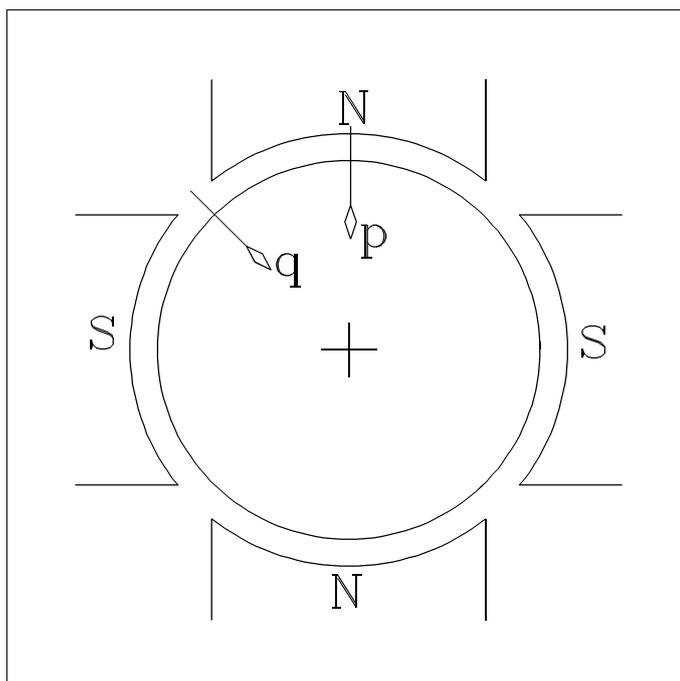


Figure 2.4-19

## 2.5. COMPOSANTS DES MACHINES ELECTRIQUES

Pour concentrer le champ magnétique et faciliter la circulation du flux, on utilise des pièces en fer (acier). Le fer canalise le flux magnétique. L'ensemble de ces pièces en fer constitue **le circuit magnétique**.

Pour localiser géométriquement les courants électriques et faciliter leur circulation, on utilise comme matériau le cuivre (parfois l'aluminium). L'ensemble des conducteurs en cuivre constitue **le (ou les) circuit(s) électrique(s)**.

Le courant électrique ne circule qu'entre des points se trouvant à des potentiels différents. Il existe donc nécessairement une différence de potentiel entre les différents points d'un circuit électriques et entre celui-ci et le fer constituant le circuit magnétique. De là résulte la nécessité d'introduire **un isolement** d'une part entre conducteurs et d'autre part entre conducteurs et masse.

La circulation du courant dans les circuits électriques ainsi que celle du flux dans le circuit magnétique entraîne des pertes qui se traduisent par une dissipation de calories. A ces pertes électriques et magnétiques s'ajoutent, dans le cas de machines tournantes, les pertes mécaniques dues au mouvement de rotation de la machine. D'où la nécessité d'assurer **le refroidissement** de toute machine électrique.

Comme il est nécessaire d'assurer un mouvement relatif entre un circuit magnétique et un circuit électrique, on utilise le mouvement le plus simple à réaliser, c'est-à-dire le mouvement de rotation. On réalise des machines à symétrie tournante. Ces machines comportent donc une partie fixe appelée **stator** et une partie mobile (en rotation) appelée **rotor**. Ces deux parties sont séparées par un intervalle d'air appelé **entrefer** et dont le but est de permettre la libre rotation relative des circuits en présence.

### 2.5.1. Circuit magnétique

**Rôle** : conduire le flux qui, dans l'entrefer, doit agir sur les courants circulant dans le circuit électrique.

La détermination de l'induction en chaque point de la machine permet le calcul de la caractéristique de magnétisation (relation entre flux (donc tension) et courant d'excitation), les réactances des enroulements (réaction d'induit), les pertes locales, etc... Cette détermination utilise des programmes mettant en oeuvre la méthode des éléments finis ou des éléments de frontière. Ce point ne sera pas abordé ici.

La Figure 2.5-2 montre la grille utilisée par un programme d'éléments finis employé au service Génie Electrique pour l'étude d'une machine synchrone à entrefer constant dont les résultats sont présentés à la Figure 2.5-1. On notera l'effet important des encoches.

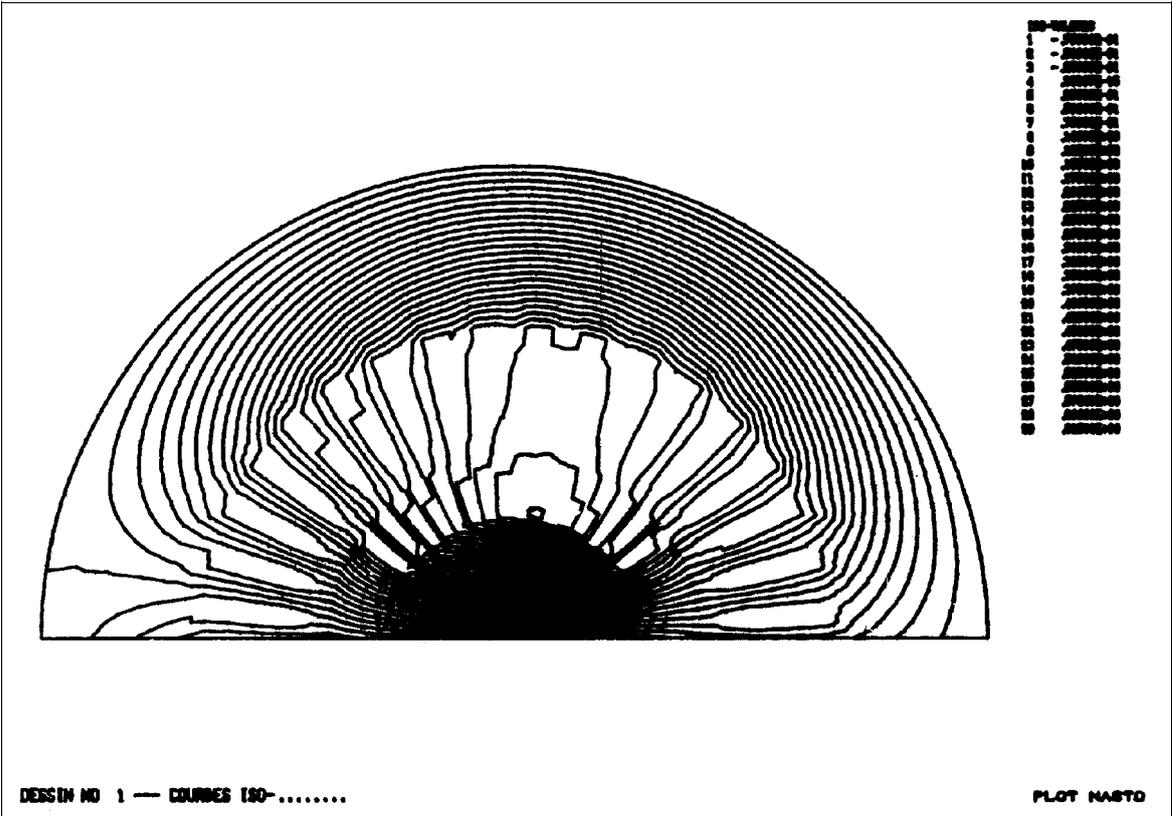


Figure 2.5-1

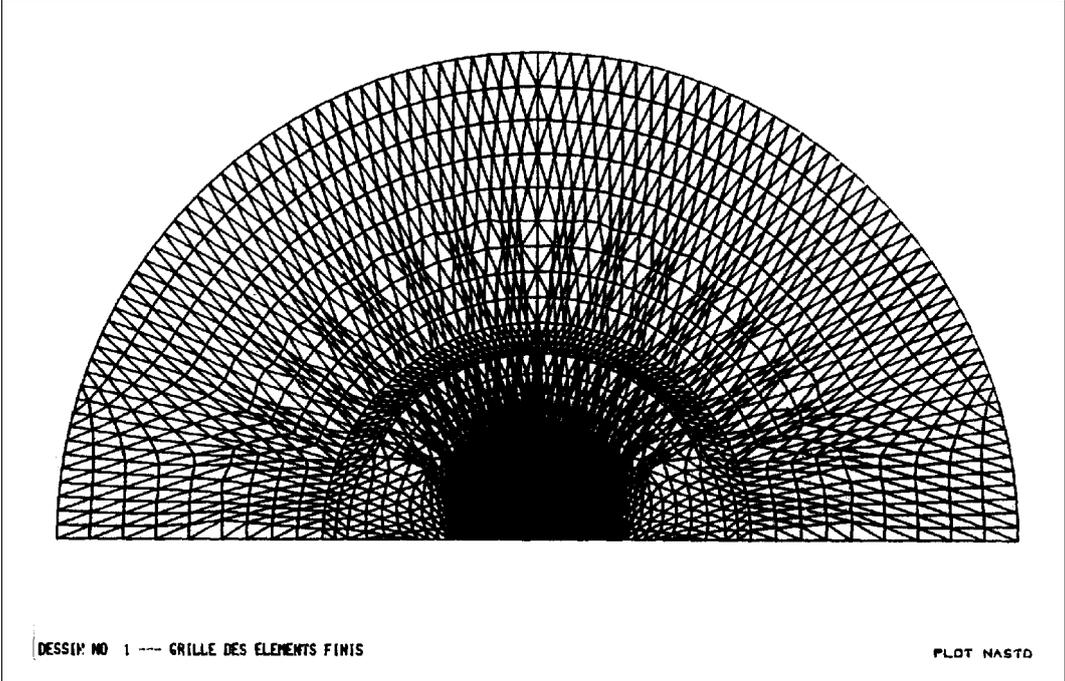


Figure 2.5-2

Le circuit magnétique est constitué d'un solide (de forme appropriée au type de machine) de forte **perméabilité magnétique** (fer par rapport à l'air qui l'entoure).

Les lignes de force du champ magnétique suivent ce solide et s'y referment, tout comme les lignes de courant suivent le conducteur électrique et s'y referment, d'où le nom de **circuit magnétique** par analogie avec le **circuit électrique**.

Il est quelquefois utile de se rappeler les correspondances suivantes entre grandeurs électriques et magnétiques. Il ne s'agit évidemment pas de correspondances strictes mais tout au plus d'analogie.

<i>I</i> : <i>courant</i>	$\Phi$ : <i>flux</i>	
<i>J</i> : <i>densité de courant</i>	<i>B</i> : <i>induction</i>	
<i>V</i> : <i>potentiel électrique</i>	<i>V</i> : <i>potentiel magnétique</i>	
<i>E</i> : <i>f. électromotrice</i>	$\mathcal{F}$ : <i>f. magnétomotrice</i>	
$\Delta V = R I$	$\Delta V = \mathfrak{R} \Phi$	
<i>R</i> : <i>résistance</i>	$\mathfrak{R}$ : <i>réductance</i>	(2.5-1)
$= \int_0^l \rho \frac{dl}{S}$	$= \int_0^l \frac{1}{\mu} \frac{dl}{S}$	
<i>G</i> : <i>conductance</i>	$\mathcal{P}$ : <i>perméance</i>	
$= \iint_S \frac{1}{\rho} \frac{dS}{l}$	$= \iint_S \mu \frac{dS}{l}$	

Les circuits électriques étant *plus familiers* que les circuits magnétiques, ces analogies facilitent la compréhension et les calculs, et réduisent les risques d'erreurs. A titre d'exemple, si on néglige les flux de fuites, l'analogie électrique du circuit magnétique de la partie gauche de la Figure 2.5-3, Figure 2.5-4 est représenté à droite de cette figure. Son calcul est très aisé. Pour des circuits plus compliqués, il existe des programmes de calcul de réseaux électriques.

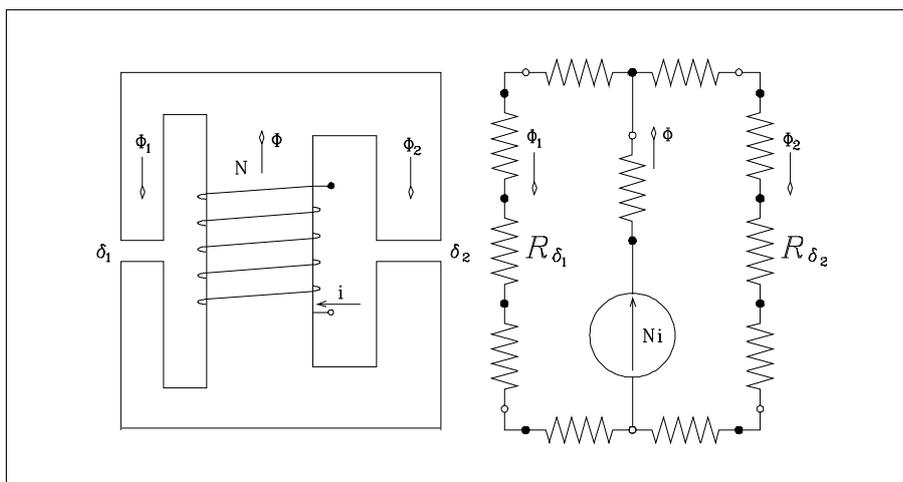


Figure 2.5-3

### DISPERSION MAGNETIQUE

La perméabilité relative  $\mu_r$  du fer par rapport à l'air est de l'ordre de 1000. Il en résulte que si presque tout le flux passe dans le fer, il en passe tout de même une fraction en dehors. C'est cette partie de flux passant à l'extérieur du circuit magnétique que l'on appelle **flux de dispersion magnétique** ou flux de fuite.

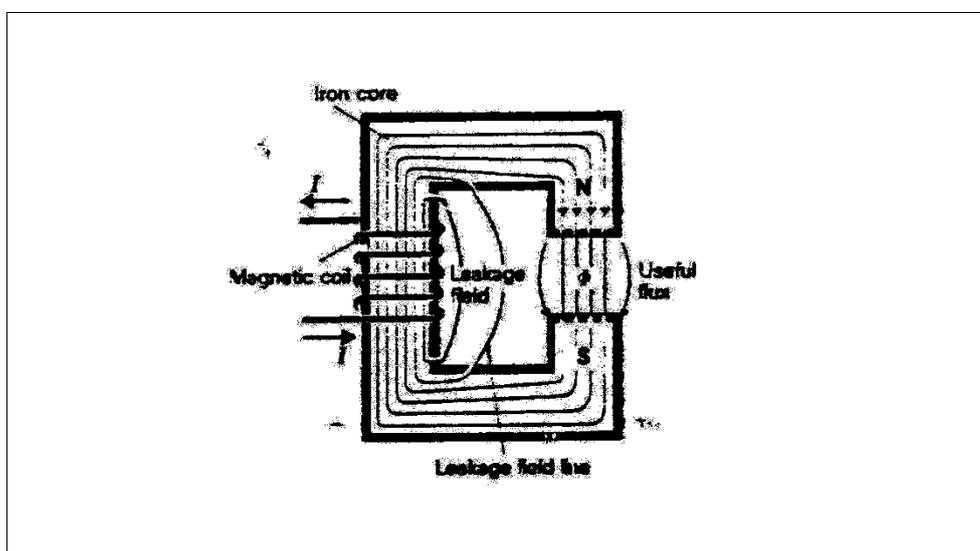


Figure 2.5-4

Considérons un circuit magnétique entouré d'un circuit électrique (enroulement inducteur) qui produit un flux total  $\Phi_t$ . La partie la plus importante de ce flux suit le circuit magnétique :  $\Phi_m$ . La partie restante de ce flux a des lignes de force ou lignes de dispersion qui se referment à l'extérieur du circuit magnétique, soit dans l'air, soit dans l'huile :  $\Phi_d$ . Ce flux est appelé flux de dispersion. On a bien sûr :

$$\Phi_t = \Phi_m + \Phi_d$$

$$\Phi_t = \Phi_m \left( 1 + \frac{\Phi_d}{\Phi_m} \right) = \nu \Phi_m \quad (2.5-2)$$

La grandeur

$$\nu = \frac{\Phi_t}{\Phi_m} \quad (2.5-3)$$

est appelée **coefficient de Hopkinson**. Elle a une valeur supérieure à l'unité, généralement comprise entre 1.05 et 1.2.

### PERTES DANS LE FER

Au cours du fonctionnement, le fer actif des machines électriques est soumis à un cycle d'inversion d'aimantation périodique :

- soit parce que le flux a une grandeur constante, mais que sa position varie (par suite de la rotation de la machine);
- soit parce que le flux a une position fixe, mais que son amplitude varie dans le temps.

#### a Pertes hystériques

L'énergie absorbée par le circuit pendant le temps  $dt$  est égale à

$$dW = P dt = \nu i dt = i d\psi \quad (2.5-4)$$

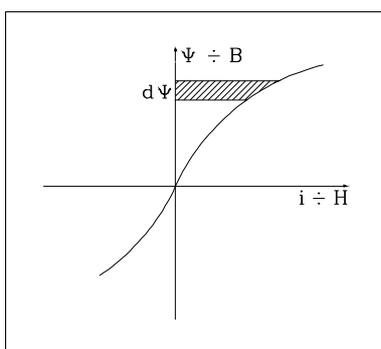


Figure 2.5-5

Pour une variation  $\Delta\psi$ , cette expression est représentée par l'aire hachurée de la (2.5-4). Si le flux varie périodiquement dans le temps et si la relation entre  $\psi$  et  $i$  est biunivoque, l'énergie sera tantôt absorbée tantôt fournie par le circuit de sorte qu'après une période, l'intégrale sera nulle. Par contre si la relation  $\psi - i$  n'est pas biunivoque, l'énergie absorbée par période est égale à la surface d'un cycle d'hystérèse  $\psi - i$ , elle est donc proportionnelle à la surface d'un cycle d'hystérèse  $B - H$ .

Pour réduire cette perte, il y a lieu de rechercher des matériaux magnétiques présentant une surface de cycle d'hystérèse aussi réduite que possible. La Figure 2.5-6 ( extraite de [FIT01] ) montre les cycles obtenus pour un acier de fabrication

américaine pour des inductions de  $1$  et  $1,5 \text{ Wb/m}^2$ .

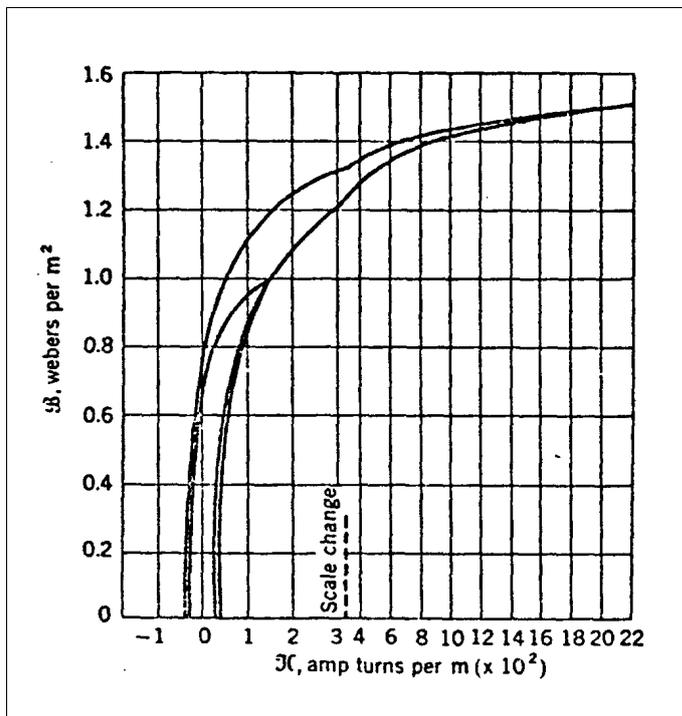


Figure 2.5-6

Les fabricants fournissent généralement la valeur de la perte par  $\text{kg}$  ou  $\text{m}^3$  en fonction de l'induction maximale atteinte. Elle est évidemment proportionnelle à la fréquence. STEINMETZ [RIC01] a proposé des formules empiriques pour le fer doux

$$P_{pH} = \eta_1 f B_M^{1,6} \quad (2.5-5)$$

et les tôles au silicium

$$P_{pH} = \eta_2 f B_M^2 \quad (2.5-6)$$

où :

- $B_M$  est la valeur maximale de l'induction
- $f$  la fréquence
- $\eta_i$  un coefficient spécifique à chaque matériau

## b. Pertes par courants de Foucault

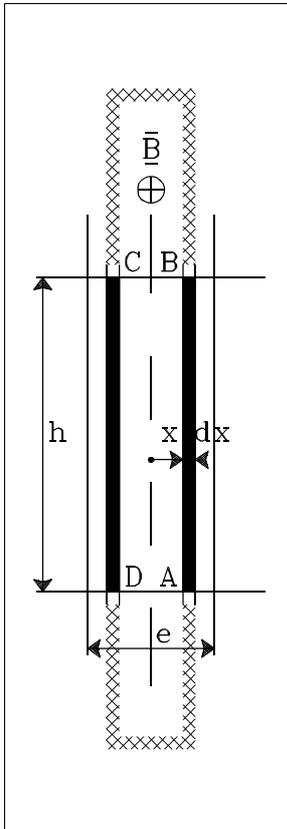


Figure 2.5-7

Considérons une tôle d'épaisseur  $e$  soumise à un champ d'induction sinusoïdal dans le temps et dirigé selon la tranche. Dans cette tôle, particulierons un élément de hauteur  $h$  et de longueur  $l$ , petites par rapport aux dimensions de la tôle. D'après 2.3-5 La f.e.m. induite dans le circuit  $ABCD$  constitué par un tube d'épaisseur  $dx$ , de longueur  $l$ , de largeur  $h$  et de hauteur  $2x$  (Figure 2.5-7) vaut :

$$\sqrt{2} E_{ABCD} = 2 \pi f B_M S_{ABCD} \quad (2.5-7)$$

avec  $S_{ABCD} = \text{section} = 2x h$

La résistance du circuit vaut

$$R_{ABCD} = \rho \frac{2h}{l dx} \quad (2.5-8)$$

Le courant qui circule vaut donc, à supposer que la circulation du courant ne modifie pas le champ d'induction

$$dI = \frac{E_{ABCD}}{R_{ABCD}} = \frac{\pi \sqrt{2} f B_M l x dx}{\rho} \quad (2.5-9)$$

La perte de puissance dans le circuit  $ABCD$  vaut

$$dP_{pF} = E dI = \frac{(\pi \sqrt{2} f B_M)^2 2 l h x^2 dx}{\rho} \quad (2.5-10)$$

Donc, pour l'élément de hauteur  $h$  et de longueur  $l$ , la perte de puissance vaut

$$P_{pF} = \int_0^{\frac{e}{2}} dP_{pF} = \frac{(\pi \sqrt{2} f B_M)^2 l h e^3}{12 \rho} \quad (2.5-11)$$

$$= \text{Volume} \frac{\pi^2 f^2 e^2 B_M^2}{6 \rho}$$

ou, puisque  $V = \sqrt{2} \pi f N B_M S$  (Formule qui sera démontrée au chap 3)

$$P_{pF} = \text{Volume} \frac{V^2 e^2}{12 \rho N^2 S^2} \quad (2.5-12)$$

où  $S$  est la section du circuit magnétique supposée constante  
 $V$  la valeur efficace de la tension aux bornes du circuit électrique supposé sans résistance

Ces relations ne sont qu'approximatives, les pertes réelles étant plus importantes que les valeurs qu'elles fournissent mais elles permettent de tirer des conclusions valables. La relation (2.5-12) montre que les pertes par courants de Foucault sont proportionnelles au carré de la fréquence alors que les pertes par hystérèse sont directement proportionnelles à la fréquence.

La dernière relation (2.5-12) montre que les pertes sont proportionnelles au carré de l'épaisseur. C'est la raison pour laquelle les circuits magnétiques soumis à une *induction variable* sont réalisés par empilage de tôles d'épaisseur 0,3-0,4 mm isolées entre elles par du papier, du vernis ou simplement par l'oxyde. Il convient de tenir compte d'un coefficient de remplissage de l'ordre de 0,9 à 0,95.

### c. Pertes globales

En pratique, on considère toujours les pertes fer globales. La grandeur de ces pertes s'exprime en W/kg pour une induction variant sinusoïdalement entre +1Wb/m<sup>2</sup> et -1Wb/m<sup>2</sup> à la fréquence de 50 Hz.

Pour les tôles ordinaires, les pertes sont de l'ordre de 3,5 W/kg. En utilisant des tôles à forte teneur en silicium, on ramène ces pertes à des valeurs de l'ordre de 1 W/kg.

### MATERIAUX UTILISES

Pour la fabrication du circuit magnétique, on utilise différents matériaux ferro-magnétiques:

- l'acier magnétique de différentes nuances ;
- la fonte ;
- l'acier coulé ;
- les tôles d'acier ;
- l'acier forgé ;
- les alliages d'acier spéciaux (pour les aimants permanents).

La propriété la plus importante de ces matériaux est, outre les pertes fer par kg, la loi qui lie l'induction au champ magnétique. Cette relation est complexe, car la perméabilité d'un matériau varie en fonction du champ qui lui est appliqué.

La Figure 2.5-8 représente l'allure qualitative des deux courbes  $B=f(H)$ ,  $\mu_r=f(H)$ .  
 La courbe  $B=f(H)$  s'appelle **courbe de magnétisation**. On remarquera le phénomène de **saturation** au champs magnétiques élevés qui se marque par la diminution importante de la perméabilité relative qui tend vers 1 ( $\approx$

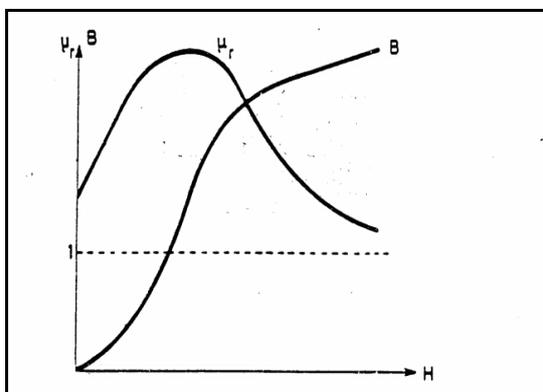
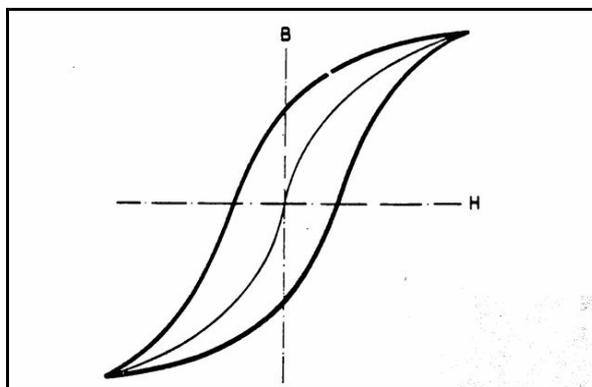


Figure 2.5-7



perméabilité de l'air).

## 2.5.2. Circuit électrique

On distingue l'**inducteur** chargé de créer le flux utile et l'**induit** chargé de créer les f.e.m. dans les génératrices ou les couples dans les moteurs.

### DISPOSITION DES ENROULEMENTS

#### a. Inducteur

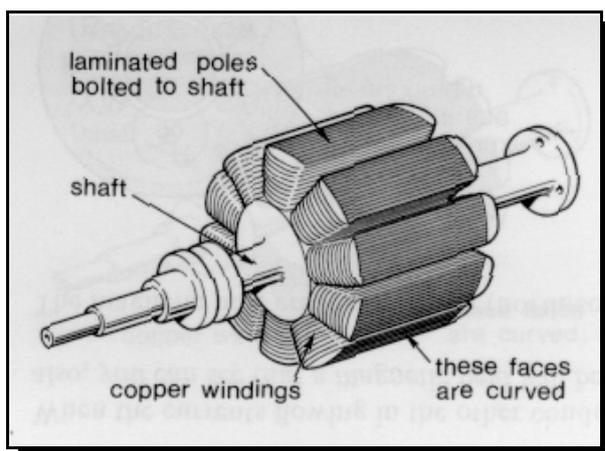
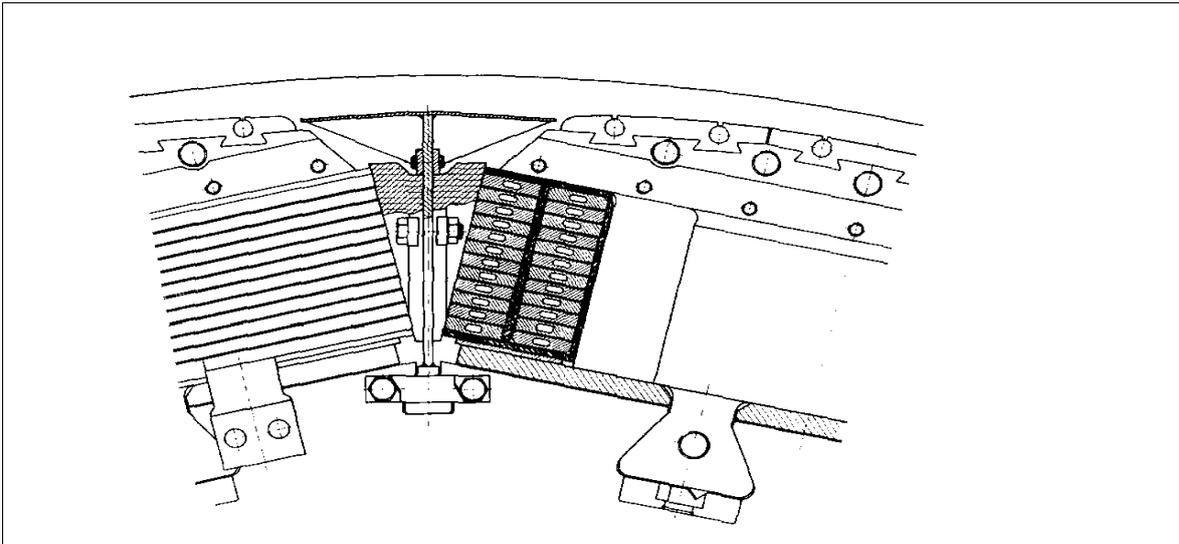


Figure 2.5-9

- l'inducteur peut être situé au rotor ou au stator selon le type de machine.
- des aimants permanents sont utilisés dans les machines de petite puissance : 10 kW en robotique, 200 kW pour des entraînements
- l'étude de l'inducteur est abordée au §3.2 relatif au circuit magnétique. On distingue les inducteurs à pôles saillants (Figure 2.5-9, extraite de [UNK01] et Figure 2.5-10, extraite de [BOD01]) des inducteurs à pôles lisses pour lesquels les conducteurs sont déposés dans les encoches (Figure 2.5-11 et Figure 2.5-12 [RIC01]).



henkelpole mit wassergekühlter Feldwicklung eines Wasserkraftgenerators für 86 MVA, 428,5 U/min.  
Figure 2.5-10

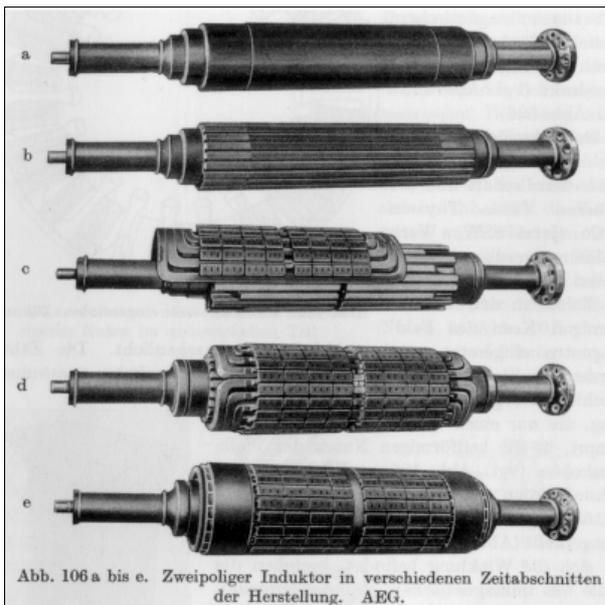


Abb. 106 a bis e. Zweipoliger Induktor in verschiedenen Zeitabschnitten der Herstellung. AEG.

Figure 2.5-11

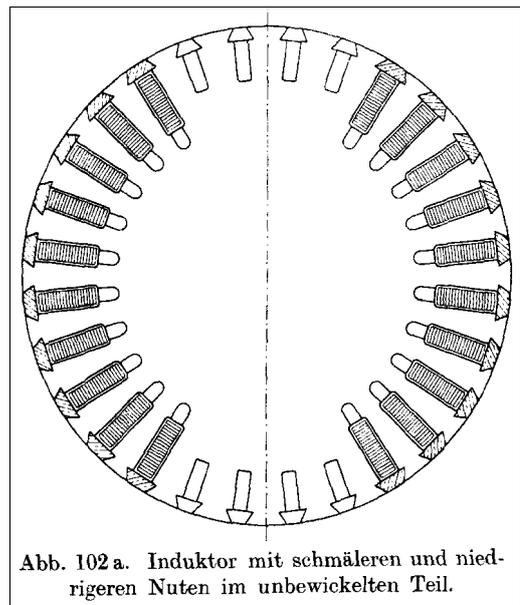


Abb. 102 a. Induktor mit schmälere und niedrigeren Nuten im unbewickelten Teil.

Figure 2.5-12

## b. Induit

- les conducteurs (éventuellement creux pour le refroidissement direct) sont isolés entre eux et par rapport à la masse et déposés dans des encoches fermées par des cales (en bronze ou en matériau synthétique)(Figure 2.5-13, [BOD01]). Ceci permet une réduction de l'entrefer (et des pertes par frottement) et une meilleure résistance aux efforts mécaniques. Le bobinage est réalisé par la mise en série et en parallèle des conducteurs d'encoches.

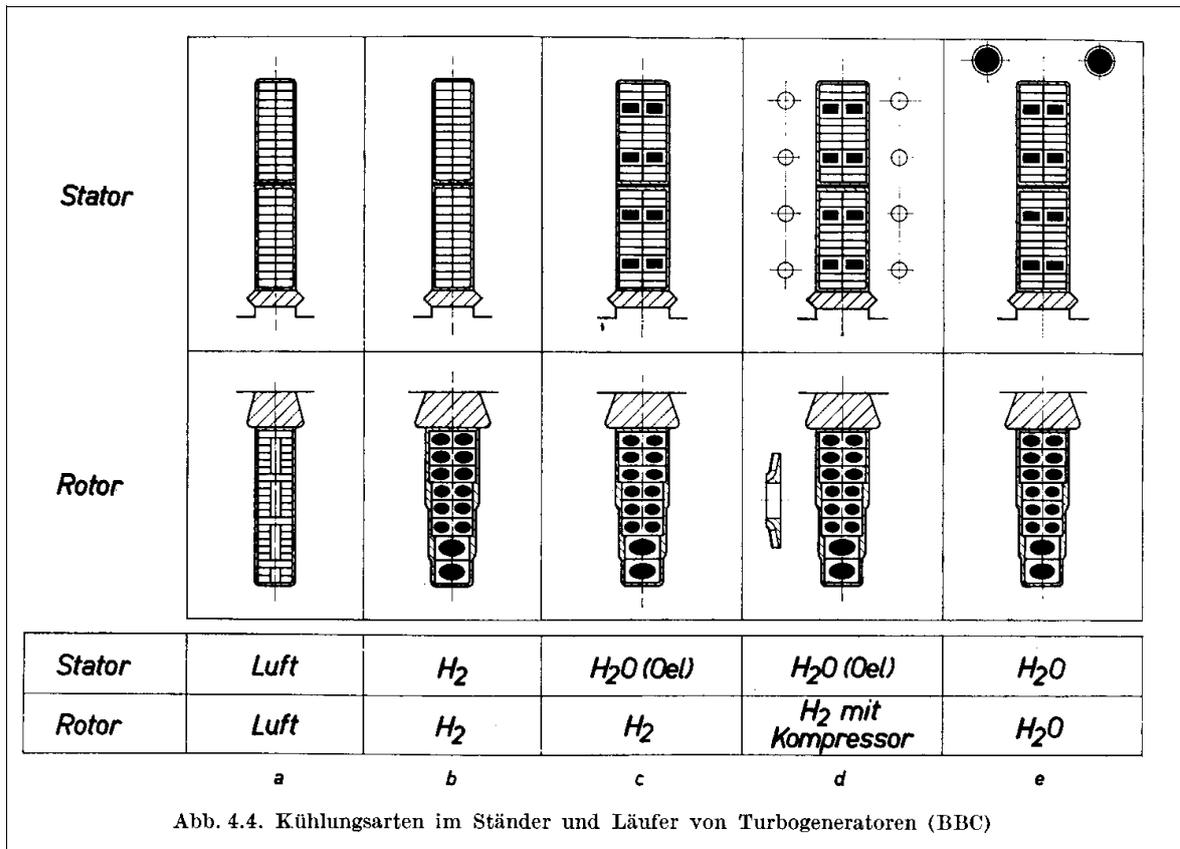


Figure 2.5-13

## GROUPEMENT DES CONDUCTEURS

L'association des conducteurs d'une machine constitue le **bobinage**. Cette association varie essentiellement suivant le type de machine et sa puissance. Les termes généraux utilisés dans la technique du groupement des conducteurs sont définis ci-dessous :

### a. Conducteurs

Pour véhiculer un courant  $I$ , on peut utiliser un seul conducteur (massif ou creux) ou plusieurs conducteurs raccordés en parallèle. La densité de courant admise dans un conducteur varie de 2 à 5 A/mm<sup>2</sup> selon le type de refroidissement utilisé.

### b. Spire

Une spire est constituée de deux conducteurs dont les tensions sont déphasées d'environ 180°.

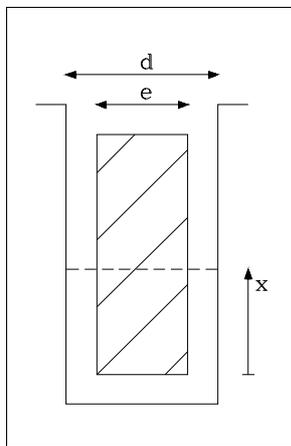
### c. Bobine

Dans un sens plus général, lorsqu'il y a plusieurs conducteurs par encoche, on appelle bobine un groupe de conducteurs connectés en série.

#### d. Phase

On appelle phase un groupe de bobines associées en série ou en parallèle et raccordées à deux bornes. Les phases constituant l'enroulement d'une machine se caractérisent par une symétrie tournante d'ordre  $m$ , c'est-à-dire que l'enroulement est constitué de  $m$  groupes de bobines ( $m$  phases) identiques l'un à l'autre et disposés sur un cylindre selon une symétrie circulaire d'ordre  $m$ . Le cas le plus fréquent dans la pratique est l'enroulement triphasé où les phases peuvent être **couplées en étoile ou en triangle** (couplage en polygone).

### PERTES JOULES DANS LES CONDUCTEURS



Des courants circulent dans les enroulements soit sous l'effet des f.e.m. engendrées dans les génératrices raccordées à une charge, soit sous l'effet des sources extérieures dans les moteurs. Ces courants sont continus ou alternatifs. En continu,  $P_{pJ} = \text{pertes Joule} = RI^2$  avec  $R = \rho l/S$ . Dans un conducteur massif, la densité de courant est constante  $J = I/S$ . Supposons qu'il en soit de même en alternatif et montrons que l'on aboutit à une **absurdité**.

Considérons un conducteur massif dans une encoche fraisée dans un matériau magnétique parfait. Supposons encore  $J = \text{constante}$ . Il vient :

Figure 2.5-14

$$H(x) d + 0 = \int_0^x J e dx \quad \text{donc} \quad (2.5-13)$$

$$H(x) = \frac{J e}{d} x$$

H varie linéairement avec x.

Le flux embrassé par le circuit constitué par cette partie du conducteur et le retour à l'infini vaut, par unité de longueur :

$$\begin{aligned}
 \frac{\Delta \varphi(x)}{\Delta l} &= \text{constante} - \int_0^x B(x) dx \\
 &= \text{constante} - \mu_0 \int_0^x H(x) dx \\
 &= \text{constante} - \frac{\mu_0 J e}{d} \frac{x^2}{2}
 \end{aligned}
 \tag{2.5-14}$$

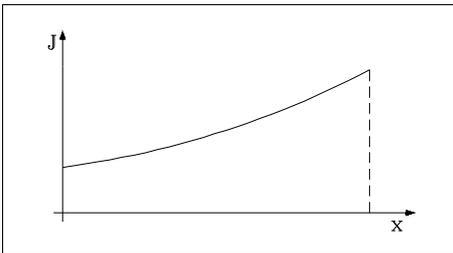


Figure 2.5-15

La chute de tension inductive par unité de longueur du conducteur dépend donc de la position du filet de courant (et de la fréquence). Par raison de symétrie, les coupes telles que celle représentée à la Figure 2.5-14 sont des équipotentielles. Il n'est donc pas correct de supposer que  $J = \text{constante}$ . Qualitativement, l'allure de la courbe  $J(x)$  est indiquée à la Figure 2.5-15. La densité maximale est atteinte au sommet de l'encoche (près de l'entrefer). La variation de densité augmente

lorsque la fréquence augmente. Le fait que la densité ne soit pas constante dans la section implique une augmentation des pertes donc de la résistance apparente. A **50 Hz**, la résistance apparente vaut de **1,2** à **1,4** fois la résistance mesurée en continu. Cette valeur est obtenue en limitant à **1,5 cm** la hauteur d'un conducteur d'encoche. Pour réduire cet effet, il faut décomposer la barre en conducteurs isolés qui sont transposés = barre Roebel (Figure 2.5-16 [BOD01]).

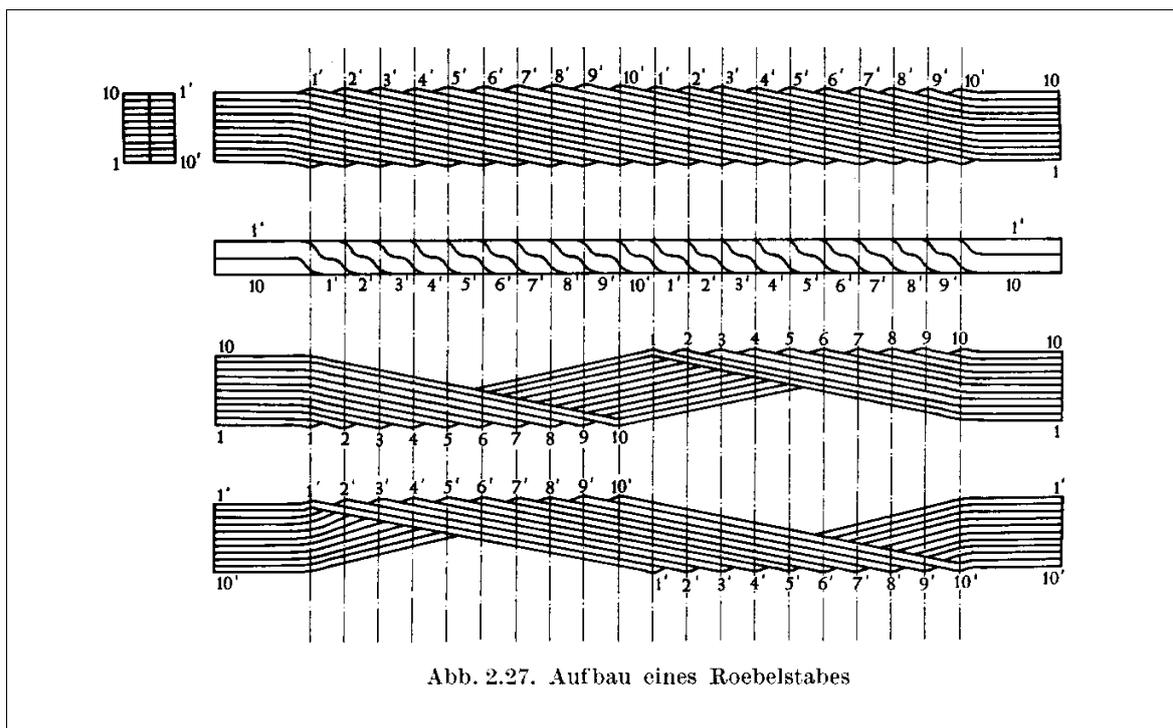


Figure 2.5-16

### MATERIAUX UTILISES

En électrotechnique, les matériaux conducteurs utilisés sont le cuivre et l'aluminium dont les propriétés sont comparées dans le tableau suivant :

#### **Matériaux conducteurs**

	Cu	Al	unités	rapp. Cu/Al
$\rho_{20^\circ}$	0,017 8	0,029 0	$\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$	0,6
$\alpha$	$3,92 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	1/K	~
masse volumique	8,9	2,7	$\text{kg}/\text{dm}^3$	3,3
$R_{\text{traction}}$	30	12	$\text{kg}'/\text{mm}^2$	2,5
$T_{\text{fusion}}^\circ$	1080	650	$^\circ\text{C}$	

Considérons deux conducteurs de même longueur  $l$  et même résistance  $R$  :

$$R_{Al} = \rho_{Al} \frac{l}{S_{Al}} = \rho_{Cu} \frac{l}{S_{Cu}} = R_{Cu}$$

$$\text{donc } S_{Al} = \frac{\rho_{Al}}{\rho_{Cu}} S_{Cu} = 1,6 S_{Cu}$$

La section (donc le volume) du conducteur d'Al vaut **1,6** fois la section du conducteur de Cu mais sa masse ne vaut que la moitié (*masse = masse volumique \* S \* l*). L'aluminium est intéressant économiquement si son prix au kilo est inférieur au double du prix du Cu. Pour les lignes aériennes, l'emploi de l'Al est très répandu, essentiellement sous forme d'alliages. Pour les câbles souterrains également bien que dans une mesure moindre notamment par suite des difficultés liées à la section plus importante. Pour les moteurs, l'Al n'est pratiquement utilisé que dans les rotors coulés notamment à cause de l'encombrement, des difficultés technologiques et de la résistance mécanique moindre. Actuellement, il se réalise des moteurs asynchrones à cage en Al (barres brasées).

### 2.5.3. Isolation des machines

Isolement entre conducteurs, entre conducteur et masse

#### CLASSIFICATION DES ISOLANTS

Entre conducteurs : guipage de papier, coton, amiante  
conducteurs de faible section : émaillage

Entre conducteur et masse : cartons, toiles huilées, agglomérés de mica, tissus de verre imprégnés de vernis de silicone.

D'après la CEI : Commission électrotechnique internationale :

Classe	T° max (° C)	
Y	90	coton, soie, papier et matières organiques similaires sans imprégnation, ni immersion dans un diélectrique liquide
A	105	les mêmes matières, mais imprégnées ou immergées dans un diélectrique liquide tel que l'huile
E	120	émaux aux résines époxydes ou formol-polyvinyle et textiles imprégnés de certains plastiques
B	130	matières minérales tels que mica, fibre de verre, amiante avec matières d'agglomération convenables (verniss)
F	155	mêmes matières mais avec d'autres agglomérants (résines)

		alkyles, époxydes, polyesters)
H	180	élastomères de silicones ou mica, fibre de verre, amiantes agglomérées avec résines de silicone
C	> 180	mica sans agglomérant, porcelaine, quartz, verre

### LOI DE MONTSINGER - VIEILLISSEMENT DES ISOLANTS

L'action prolongée de la température endommage les isolants. Une température élevée maintenue trop longtemps peut détruire l'isolant.

Montsinger a établi expérimentalement une loi liant la durée de vie à la température :

$$t = a b^{-\theta} \quad (2.5-16)$$

$a$  et  $b$  : constantes pour un isolant donné.

$$\log t = \log a - \theta \log b \quad (2.5-17)$$

$\log t$  est une fonction linéaire de  $\theta$ .

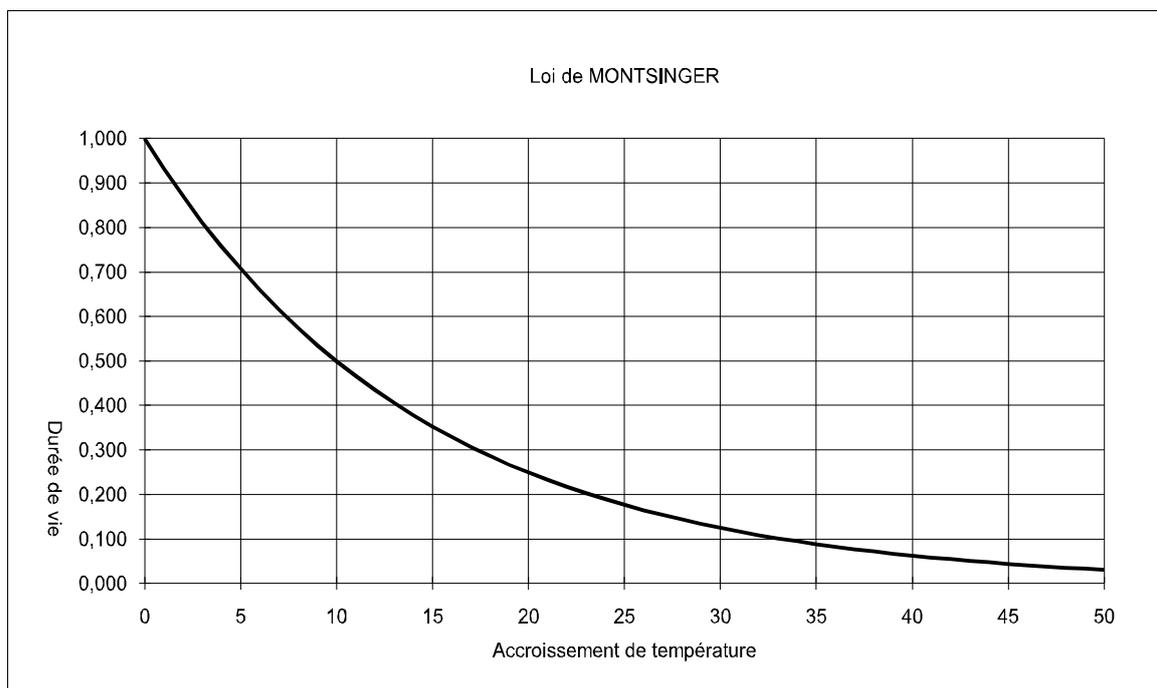


Figure 2.5-17

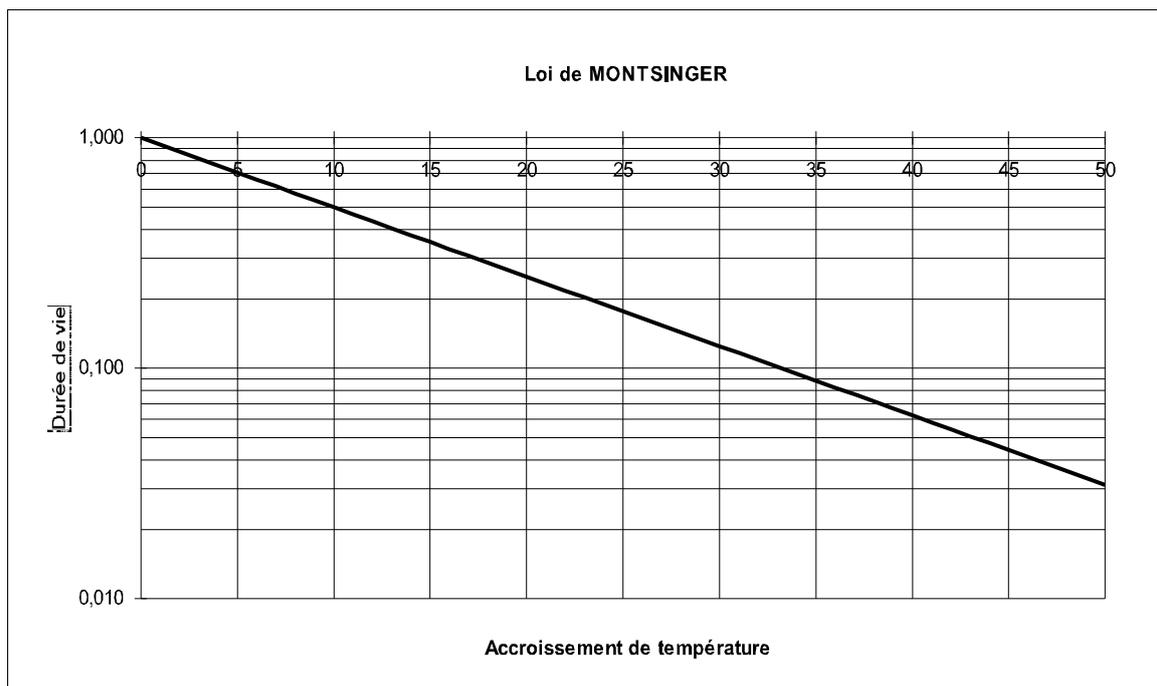


Figure 2.5-18

- élever la température de  $6$  à  $10^\circ$ , réduit de moitié la durée de vie (les courbes de la Figure 2.5-17 et de la Figure 2.5-18 ont été tracées pour une valeur de  $10^\circ$ ).
- la température normale est telle qu'elle correspond à une durée de vie de  $\pm 20$  ans pour une machine.
- la température varie en général lentement suite à une variation de charge, une surcharge temporaire est donc possible (voir NBN 7).

## CONTROLE DE L'ISOLEMENT

Voir cours de haute tension : essais à 50 Hz et au choc.

### **2.5.4. Refroidissement**

Puisque des pertes existent, un refroidissement est nécessaire.

## AGENTS DE REFROIDISSEMENT

a. Air : le plus courant

- il doit atteindre la partie chaude
- un ventilateur est nécessaire
- ventilation axiale, radiale, mixte

- ventilation intérieure (Figure 2.5-19)  
ou extérieure (enceinte close) pour atmosphère fort polluée (scierie, broyage, charbon) (Figure 2.5-20)

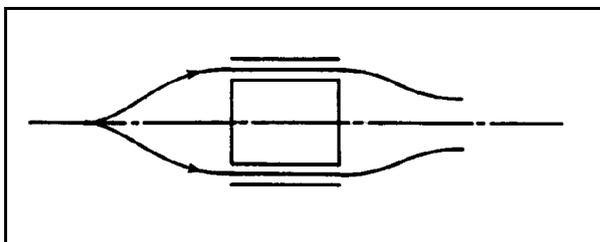


Figure 2.5-19

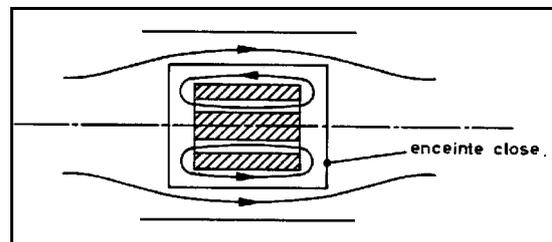


Figure 2.5-20

#### b. Hydrogène

- conductibilité thermique : 7 fois celle de l'air
- densité : **1/14** celle de l'air : les pertes par ventilation sont réduites
- circulation **dans** les conducteurs
- radiateurs extérieurs pour échange avec eau
- danger d'explosion si mélange avec air (pression : 2 à 3 at )

#### c. diélectrique liquide

- transfo : huile ou, anciennement, pyranol maintenant interdit
- machines : eau dans stator et rotor

### CONTROLE DE L'ECHAUFFEMENT

- thermomètre à alcool, pas à Hg (métal)
- thermocouples placés à la construction.

## 2.6. GRANDEURS CARACTERISTIQUES DES MACHINES ELECTRIQUES

### 2.6.1. Grandeurs nominales

La valeur d'une grandeur physique propre à un appareil quelconque est dite  **nominale**  lorsque le constructeur garantit, avec un coefficient de sécurité dont il est responsable, que cet appareil pourra fonctionner indéfiniment à cette valeur sans subir d'usure ou de vieillissement anormal. En pratique, il faut entendre par "indéfiniment" la durée de vie raisonnable d'un engin industriel (20 à 30 ans au maximum). Il faut noter que les différentes valeurs nominales d'un appareil ne sont pas toujours utilisées pleinement, pour des raisons d'économie d'échelle, de normalisation ou de gestion de pièces de réserve par exemple.

Les différentes valeurs nominales d'une machine figurent dans la  **spécification**  de la machine et sont indiquées clairement sur la  **plaque signalétique** .

Dans un système triphasé, la tension nominale est la tension entre phases. Donc, si une tension nominale d'un réseau électrique est donnée sans autre spécification, il faut  **toujours**  l'entendre comme une tension entre phases.

En ce qui concerne les  **puissances nominales** , il faut préciser de quoi on parle exactement :

- pour une génératrice à courant continu (dynamo), il s'agit de  **la puissance électrique**  (active puisqu'il s'agit de courant continu)  **développable**  à ses bornes, exprimée en kW.
- pour un alternateur et un transformateur, il s'agit de  **la puissance électrique apparente développable**  à ses bornes, exprimée en kVA. La puissance active dépend des conditions d'utilisation.
- pour un moteur (à courant alternatif ou à courant continu), il s'agit de  **la puissance mécanique disponible**  sur l'arbre du moteur, exprimée en kW.

Dans un système triphasé alternatif, la puissance nominale est la puissance triphasée.

### 2.6.2. Rendements des machines

Par définition, le  **rendement**  (ce que la machine rend de ce qu'on lui donne) s'exprime par le rapport :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \quad (2.6-1)$$

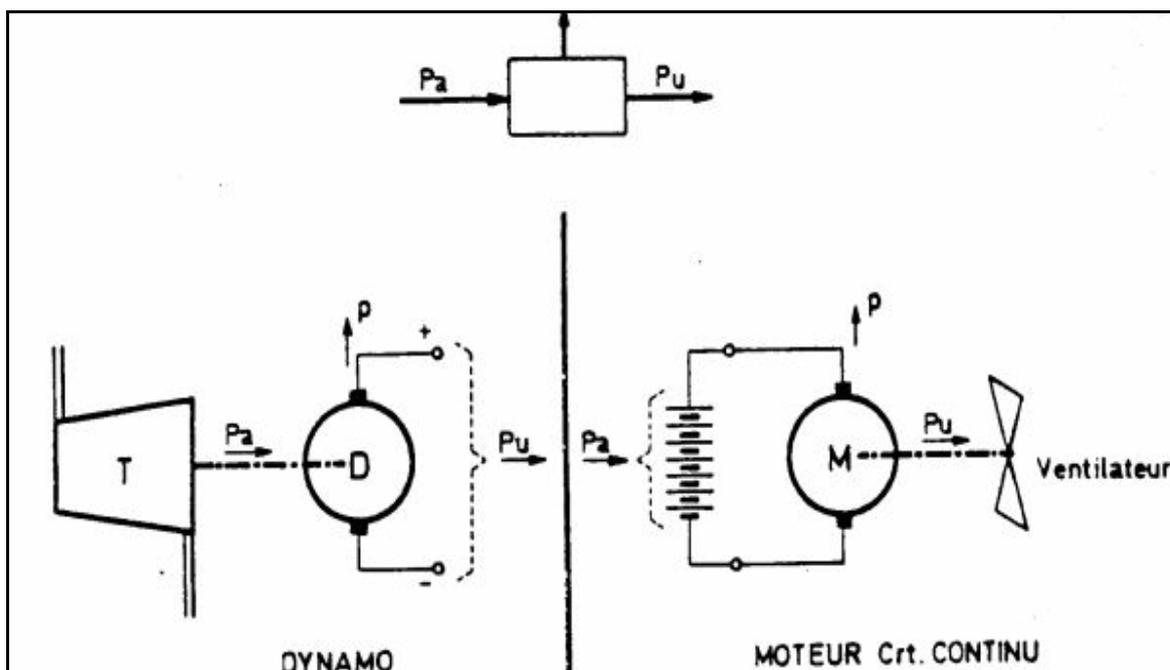


Figure 2.6-1

$P_u$  étant la puissance utile à la sortie de la machine et  $P_a$  la puissance absorbée par la machine.

La Figure 2.6-1 représente schématiquement le fonctionnement d'une machine génératrice et d'une machine motrice dans le cas particulier du courant continu.

La formule du rendement peut encore s'écrire :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_a - p}{P_a} = \frac{P_u}{P_u + p} \quad (2.6-2)$$

C'est la dernière expression qu'il faut utiliser dans les calculs car elle donne une plus grande précision. Dans le cas des machines génératrices, la puissance absorbée  $P_a$  est une puissance mécanique et la puissance utile  $P_u$  est une puissance électrique. C'est l'inverse pour une machine motrice. Dans les machines transformatrices enfin,  $P_u$  et  $P_a$  sont toutes deux des puissances électriques.

En fonctionnement industriel (tension constante et fréquence constante), les pertes  $p$  comportent un terme fixe et un terme variable avec la puissance apparente  $S$  (fournie ou absorbée).

Les pertes fixes sont :

- les pertes mécaniques, fonction uniquement de la vitesse qui est constante ;

- les pertes fer, fonction de la fréquence et de l'induction qui sont constantes.

Les pertes cuivre, par contre, sont variables en fonction de l'intensité :

$$P_{pCu} = 3 R I^2 \quad (2.6-3)$$

La tension étant supposée constante, on peut écrire :

$$P_{pCu} = k V^2 I^2 = k S^2 \quad (2.6-4)$$

Les pertes totales s'expriment donc par une relation de la forme :

$$p = a + b S^2 \quad (2.6-5)$$

L'expression du rendement peut donc s'écrire, par exemple pour une machine motrice :

$$\eta = \frac{P_a - p}{P_a} = \frac{(S \cos \varphi - a - b S^2)}{S \cos \varphi} \quad (2.6-6)$$

Examinons d'abord le cas des machines à  $\cos \varphi$  constant (dans lesquelles nous incluons bien entendu les machines à courant continu).

Pour établir la valeur maximale du rendement, calculons l'expression de sa dérivée par rapport à  $S$ .

$$\frac{d\eta}{dS} = \frac{S \cos \varphi (\cos \varphi - 2bS) - (S \cos \varphi - (a + bS^2)) \cos \varphi}{S^2 \cos^2 \varphi} \quad (2.6-7)$$

Le maximum est atteint pour

$$\frac{d\eta}{dS} = 0 \text{ soit pour } S = \sqrt{\frac{a}{b}} \quad (2.6-8)$$

pour lequel **les pertes constantes sont égales aux pertes variables**.

Dans le cas où le  $\cos \varphi$  est variable, on pourra pour chaque valeur du  $\cos \varphi$  tracer une courbe de rendement.

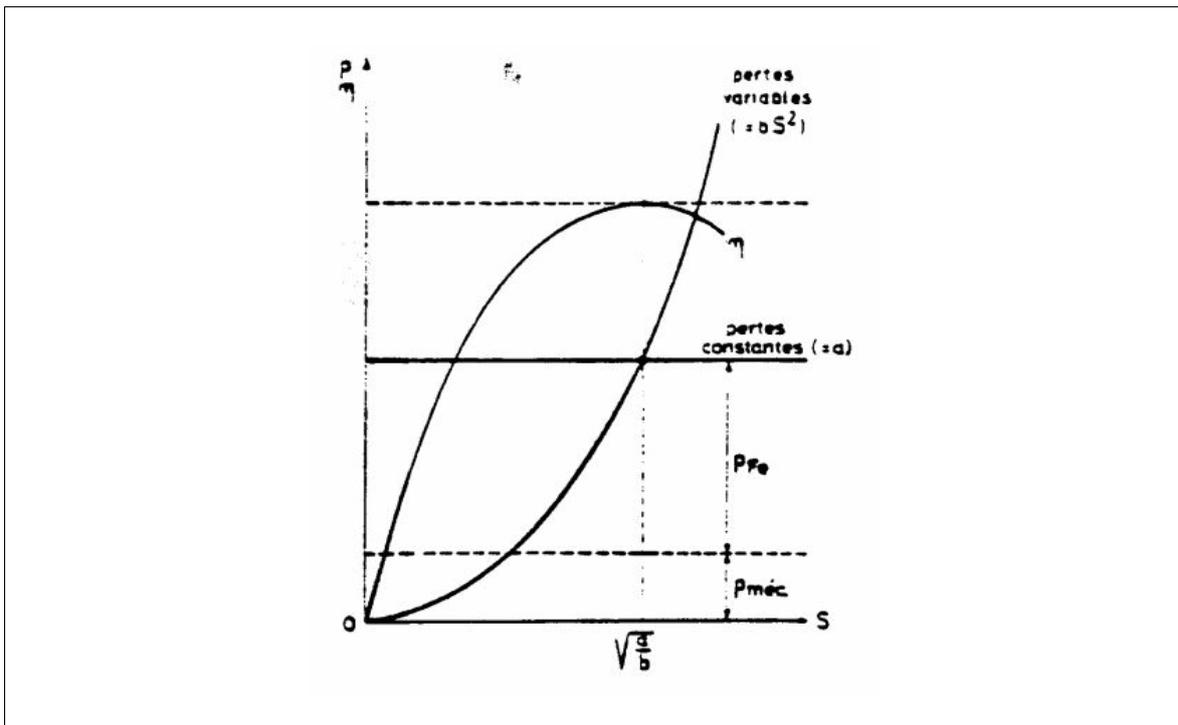


Figure 2.6-2

La forme de la courbe de rendement qu'il est souhaitable d'avoir dépend des conditions d'utilisation de la machine.

Si la machine fonctionne toujours à une puissance voisine de la puissance nominale, il faudra choisir une machine dont le rendement maximum est obtenu à la puissance nominale. Si, par contre, la machine fonctionne le plus souvent à une puissance inférieure, on choisira une machine dont le rendement maximum correspond si possible à cette puissance.

### Mesure du rendement

Il y a deux méthodes de mesure du rendement

- la méthode directe :

elle consiste à mesurer la puissance électrique (wattmètre en courant alternatif ou voltmètre et ampèremètre en courant continu) et la puissance mécanique (frein ou torsiomètre et tachymètre). Cette méthode est difficile à réaliser et n'offre pas une grande précision. La difficulté de réalisation provient, dans le cas d'un alternateur de grande puissance par exemple, de ce qu'il faut disposer d'un circuit récepteur capable d'absorber la pleine puissance et d'un entraînement capable de produire cette puissance augmentée des pertes.

- la méthode indirecte :

elle consiste à **mesurer les pertes** et à en déduire le rendement par la formule 2.6-2.

Pour mesurer les pertes, on peut utiliser l'une ou l'autre des deux méthodes suivantes

- a) mesurer l'énergie correspondant aux pertes en mesurant l'échauffement du fluide réfrigérant ou, dans le cas du refroidissement "intérieur", celui de l'air qui, dans ce cas, traverse la machine. Il faut y ajouter les pertes par rayonnement de la surface de la machine. Cette méthode est très délicate et offre l'inconvénient de nécessiter la pleine puissance de la machine.
- b) mesurer les pertes **séparément**. Les diverses pertes sont mesurées une à la fois dans un type d'essai où chacune d'elles existe pratiquement seule.

Exemple de l'alternateur :

- mesures sans alimentation électrique : pertes mécaniques ;
- mesures à vide : pertes fer + pertes mécaniques ;
- mesures en court-circuit : pertes cuivre + pertes mécaniques.

Le rendement des machines électriques est en général très bon, supérieur à 90 % et même 99 % pour les gros transformateurs et les alternateurs les plus puissants.

### 2.6.3. Caractéristiques des machines tournantes

Les caractéristiques des machines électriques sont d'un intérêt fondamental pour **l'utilisateur**. Ainsi, nous avons déjà brièvement abordé les pertes et le rendement, qui nécessitent une connaissance des phénomènes internes à la machine. Pour l'utilisateur, la machine électrique ne constitue qu'une partie d'un **système** plus large, par exemple, pour une machine motrice :

Alimentation - Machine - Charge - Régulations (vitesse, tension) - Protections ...

Dans un tel contexte, il est intéressant de considérer la machine électrique comme **une boîte noire** possédant des entrées et des sorties liées par des relations qui sont **caractéristiques** de la machine.

Les relations utiles dépendent du problème étudié. Elles peuvent être formulées sous forme :

- de systèmes d'équations différentielles (linéaires ou non) pour l'étude des phénomènes dynamiques, de la stabilité, de la régulation.
- d'équations algébriques réelles ou complexes, linéaires ou non, pour l'étude des fonctionnements en régime.
- de relations vectorielles entre phaseurs pour le fonctionnement en régime des machines à courant alternatif.
- de courbes caractéristiques (mesurées ou prédéterminées) liant les grandeurs intéressantes

l'utilisateur et paramétrées par des grandeurs de réglage.

Il faut être sensibilisé au fait que toute application des machines électriques nécessite, comme toute application technique :

- **un modèle adéquat** suffisamment simple ;
- une formulation complète des **hypothèses** (et donc des limitations) de ce modèle ;
- le choix d'une **méthode d'analyse** ;
- un **traitement** qui se révèle souvent l'étape la moins compliquée ;
- une **interprétation des résultats**.

### MOTEURS

La caractéristique fondamentale d'un moteur est la courbe

$$C_m = f(N) \quad (2.6-9)$$

du couple moteur en fonction de la vitesse de rotation, pour une position donnée des organes de réglages du moteur. Suivant la forme de cette courbe, un moteur sera plus ou moins bien adapté à la charge qu'il entraîne. En effet, la charge est également définie par une relation caractéristique :

$$C_r = f(N) \quad (2.6-10)$$

entre le couple résistant de l'engin et la vitesse de rotation de ce dernier.

Le fonctionnement de l'ensemble **moteur + charge** est fixé par la position relative de ces deux caractéristiques. Deux régimes distincts sont à considérer : la mise en vitesse et la vitesse normale.

#### a) Mise en vitesse

Comme les phénomènes transitoires liés au comportement mécanique de l'ensemble moteur+charge ont des constantes de temps d'ordre de grandeur plus élevé que les phénomènes transitoires électriques liés à l'établissement du flux, on peut supposer le régime électrique établi dans la plupart des cas.

A l'instant initial de la mise sous tension, il faut donc que le couple moteur de démarrage soit plus grand que le couple résistant initial

$$C_{md} > C_{ro} \quad (2.6-11)$$

faute de quoi, l'ensemble ne démarrera jamais. Par contre, pour éviter une accélération trop brutale, il ne faut pas que l'écart entre ces deux couples soit trop grand.

La différence entre le couple moteur et le couple résistant est appelé **couple accélérateur** et on a :

$$C_m - C_r = J \frac{d\Omega_r}{dt} \quad (2.6-12)$$

relation dans laquelle **J** représente le moment d'inertie de l'ensemble moteur et engin entraîné. Il faut que la vitesse de régime soit atteinte en un temps suffisamment court. On ne peut en effet admettre, dans l'industrie que le démarrage d'un engin dont on a besoin dure par exemple 1/4 h. D'autre part, dans le cas du moteur asynchrone par exemple, pour lequel le courant de démarrage atteint 5 à 6 fois la valeur du courant nominal, on risquerait d'atteindre un échauffement excessif et donc dangereux du moteur.

Pour déterminer la durée du démarrage, séparons les variables :

$$\int_0^{\Omega_n} \frac{d\Omega_r}{C_m - C_r} = \frac{1}{J} \int_0^{t_d} dt = \frac{t_d}{J} \quad (2.6-13)$$

En général, la forme des caractéristiques Couple/Vitesse est assez difficile à exprimer analytiquement et on procède par intégration graphique ou numérique.

La forme de la courbe  $C_m(N)$  peut varier, en cours de démarrage, par actions sur les organes de réglage extérieurs.

#### b. Vitesse normale

La vitesse de régime est atteinte lorsque

$$\frac{d\Omega_r}{dt} = 0 \quad \text{c-à-d lorsque} \quad C_m = C_r \quad (2.6-14)$$

Il est à remarquer que les vitesses de rotation de la charge et du moteur ne sont égales que dans le cas d'accouplement direct, et pas dans le cas d'accouplement hydraulique ou par engrenage. Dans la suite nous considérerons, cependant que le rapport des vitesses de rotation est égal à l'unité.

Une fois la vitesse normale atteinte, elle doit se maintenir même si de légères modifications de fonctionnement viennent à se produire. **L'équilibre doit être stable**. Si la vitesse tend à croître, il faut que  $C_m - C_r$  soit négatif et inversément.

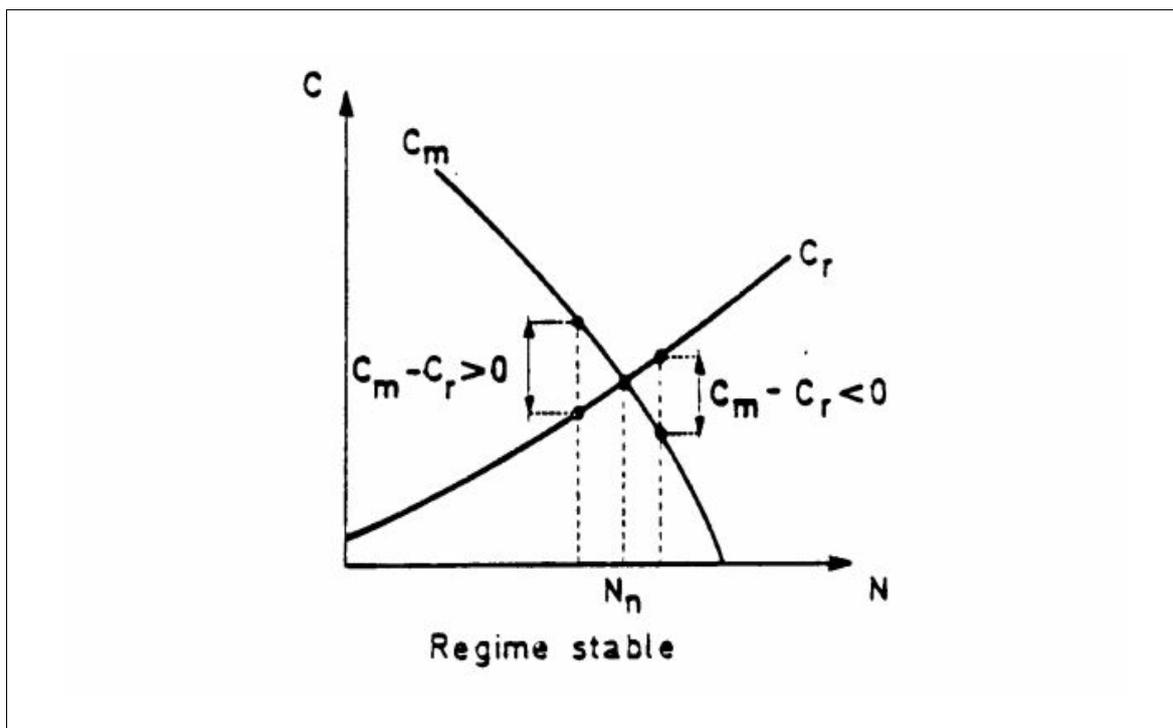


Figure 2.6-3

Si le système est instable, deux cas peuvent se présenter, soit un emballement du moteur (voir moteur série) soit, lorsqu'on augmente le couple résistant jusqu'à une valeur où les deux courbes n'ont plus d'intersection, calage et l'ensemble moteur + charge ralentit jusqu'à l'arrêt complet.

### GENERATRICES

Dans ce cas, la caractéristique fondamentale pour l'utilisateur est la caractéristique externe

$$U_g = f(I) \text{ pour } i_e, N \text{ et } \cos \varphi = \text{cte} \quad (2.6-15)$$

:En effet, le circuit de consommation est lui aussi caractérisé par une courbe

$$U_r = f(I) \quad (2.6-16)$$

Le point **P** de la figure suivante représente le point de fonctionnement pour lequel

$$U_g = U_r \text{ et } I_g = I_r \quad (2.6-17)$$

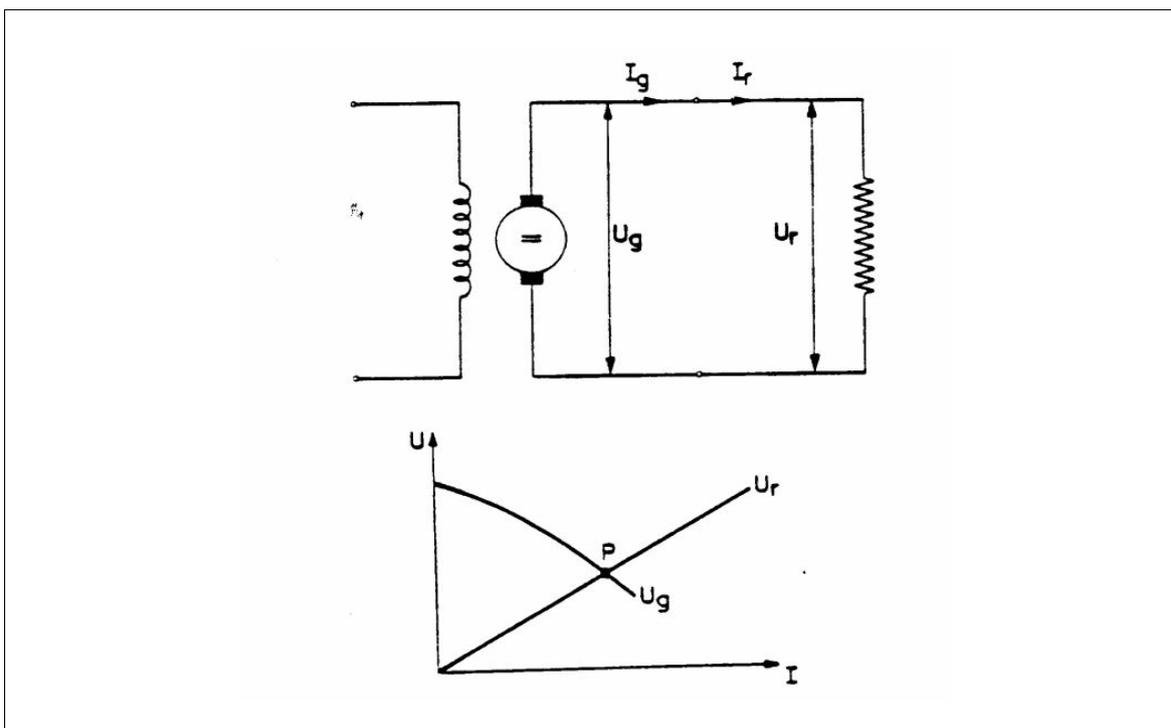


Figure 2.6-4

Ce point de fonctionnement sera stable si, quand  $I$  varie, la différence de potentiel  $U_g - U_r$  est telle que le système revient à son état initial. Par exemple, si  $I$  augmente, il faut que  $U_g < U_r$ , de manière à faire diminuer le courant.

Du point de vue mécanique, la stabilité des génératrices est un cas particulier de la stabilité mécanique des ensembles moteur + engin entraîné, la génératrice étant dans ce cas l'engin entraîné.