

**S.N.C.B**  
**Enseignement Professionnel**

**Electricité élémentaire**

**Cours 1204**

I/I

**Leçons**  
**1 à 15**



Electricité élémentaire.

Introduction.

L'électricité est une forme d'énergie, comme l'énergie calorifique, l'énergie mécanique, l'énergie nucléaire, l'énergie lumineuse,...

Dans l'apprentissage de l'électricité, la production de l'énergie électrique, ainsi que sa transformation et son application y seront étudiées.

L'énergie électrique peut être produite par transformation d'énergie mécanique (par ex. turbine ou moteur diesel), d'énergie nucléaire (par ex. réacteur nucléaire), d'énergie chimique (batterie)...

D'autre part, l'énergie électrique peut être convertie en d'autres formes d'énergie; la forme choisie dépendra de l'application désirée.

Certaines transformations devront être évitées le plus possible à cause de leur caractère nuisible (par ex. l'échauffement exagéré dans un moteur). Ce cours a pour but de donner un aperçu succinct des principes de l'électricité, et d'expliquer les principaux principes des appareils et machines électriques.

Chapitre I - Théorie du courant continu.

1. Tension électrique.

a) Notion

Dans un récipient en verre rempli d'acide sulfurique dilué (Fig. 1.1), on plonge une plaque en cuivre et une plaque en zinc, en faisant attention à ne pas les mettre en contact. Une petite lampe d'une lampe de poche, placée dans un soquet et reliée à ces plaques ou électrodes au moyen de 2 fils en cuivre, s'allumera.

De même, si nous raccordons ces plaques aux 2 pôles d'une sonnette électrique, celle-ci sonnera.

Le fait que la lampe s'allume montre que les 2 électrodes sont dans un état différent.

2.

On dit qu'elles sont à un potentiel différent ou qu'il existe une différence de potentiel ou une tension électrique entre les 2 électrodes.

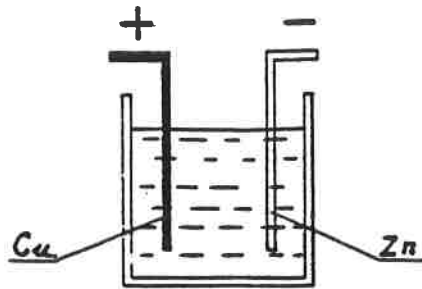


Fig. 1.1

Pour comprendre ce phénomène, nous pouvons comparer le circuit électrique simple (Fig. 1.1) avec un circuit hydraulique constitué de 2 réservoirs qui sont remplis d'eau à une hauteur différente et qui sont reliés entre eux par un tuyau (Fig. 1.2).

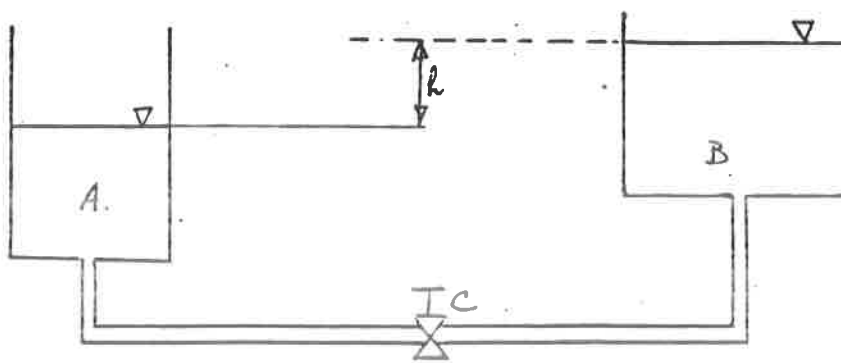


Fig. 1.2

Entre les plans supérieurs A et B existe une différence de niveau de telle sorte que la pression statique du côté gauche du robinet sera plus petite que celle du côté droit. Si on ouvre maintenant le robinet C, par suite de cette différence de pression, l'eau coulera de B vers A jusqu'à ce que les 2 niveaux soient à la même hauteur. Si on place maintenant entre A et B une pompe qui ramène l'eau vers B, il subsistera un courant continu, vu que la différence de niveau subsiste.

Dans un élément électrique, il existe entre les 2 pôles une différence de potentiel électrique ou une différence de potentiel analogue à la différence de niveau entre les réservoirs. On définit les 2 pôles comme un pôle positif (+) et un pôle négatif (-).

Quand on relie les 2 pôles entre eux par un conducteur, il circule un courant électrique qui correspond au courant d'eau au travers du tuyau de liaison dans le modèle hydraulique.

Les conducteurs peuvent alimenter un appareil utilisateur, tel une lampe ou un moteur.

On convient que, dans le circuit extérieur à la source, le courant circule du pôle positif vers le négatif.

La grandeur de la différence de potentiel entre les pôles d'un élément s'exprime dans une unité appelée Volt (V).

#### Exemples :

- Une pile pour lampe de poche à une tension de 1,5 V.
- La tension d'une batterie pour le démarrage et les services d'une voiture particulière est 6, 12 ou 24 V.
- L'éclairage d'une voiture de chemin de fer fonctionne avec une batterie de 72 V.
- Les réseaux publics sont alimentés à 220 V.
- Les caténaires de la S.N.C.B., pour la traction électrique, sont alimentées à 3.000 V.

#### b) Source de tension.

Suivant la nature de l'application, différents types de sources de tension sont utilisés. Nous donnons ci-après une première idée des sortes de sources de tension; plus loin dans le cours, celles-ci seront explicitées.

##### - Piles électriques.

A la fig. 1.1 est montrée une pile Volta élémentaire. Celle-ci n'est cependant pas utilisée sous cette forme.

En pratique, elle consiste en des anneaux de zinc et de cuivre séparés par des anneaux isolants et imbibés d'acide sulfurique. La pile Volta, à cause de ses propriétés peu intéressantes, est remplacée par la pile Leclanché.

##### - Accumulateurs.

Certains éléments peuvent, après épuisement, être rechargés en les faisant traverser par un courant électrique.

On les appelle accumulateurs.

Le plus simple des accumulateurs consiste en électrodes de plomb plongées dans de l'acide sulfurique.

Les batteries d'accumulateur trouvent beaucoup d'application au chemin de fer : éclairage des voitures, mise en marche des moteurs Diesel des véhicules moteurs, entraînement de certains tracteurs de gares et d'ateliers,...

#### - Machines rotatives.

Les piles et les accumulateurs sont des relativement petits producteurs d'électricité. Pour produire de l'électricité industrielle en grandes quantités, on utilise des machines rotatives (dynamos, alternateurs,...), lesquelles produisent de l'énergie électrique au dépend de l'énergie mécanique nécessaire à les mouvoir. Ces machines, dont le principe sera exposé plus loin, peuvent être entraînées soit au moyen de machines thermiques (machine à vapeur, moteur Diesel, turbine,...), soit au moyen de machines hydrauliques (turbines).

Les dynamos sont utilisées sur le matériel ferroviaire pour lancer les moteurs de traction, pour recharger les batteries et pour assurer l'éclairage des voitures.

#### 2. Courant électrique.

Si nous reprenons la comparaison ci-dessus, il est facile de comprendre que, suivant la différence de niveau entre les 2 récipients et en fonction du diamètre et de la longueur du tuyau en caoutchouc qui les relie, la quantité d'eau qui s'écoule par seconde au travers du tuyau, ou le débit d'eau, sera plus ou moins importante.

Le circuit est donc caractérisé par 2 éléments : la différence de niveau et le débit.

De même, la tension ne suffit pas pour caractériser un circuit électrique; la quantité de courant qui passe par seconde par le conducteur doit être connue; on l'appelle l'intensité.

Nous avons vu qu'on admet que, en dehors de la source de tension électrique, le courant va toujours du pôle positif vers le pôle négatif.

Le courant peut-avoir un résultat d'autant plus grand que l'intensité est plus grande. L'unité admise pour indiquer l'intensité s'appelle l'ampère (A).

### 3. Résistance.

Considérons à nouveau notre circuit électrique constitué d'une source de courant et d'un appareil utilisateur  $R$  raccordé à la source au moyen de 2 fils en cuivre.

Complétons le avec un Voltmètre destiné à mesurer la tension aux bornes de la source, et avec un ampèremètre destiné à mesurer l'intensité (Fig. 1.3).

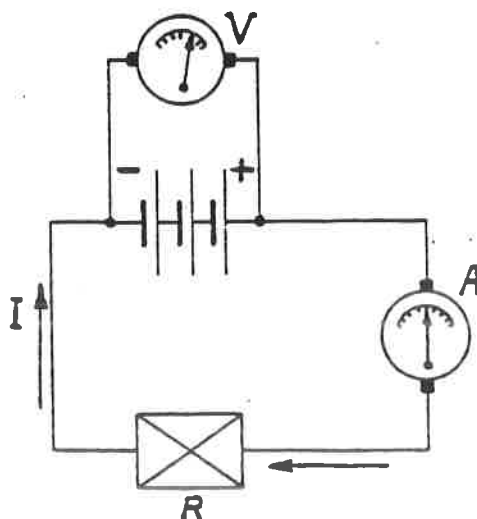


Fig. 1.3

Supposons que la tension indiquée par le Voltmètre soit de 220 V. Supposons que l'appareil utilisateur  $R$  soit une lampe à incandescence; l'ampèremètre indiquera par exemple 0,45 A. Si nous remplaçons cette lampe par un appareil de chauffage électrique, l'ampèremètre indiquera, par exemple, un courant de 2,2 A.

On constate par conséquent que, pour une même tension appliquée, la lampe et l'appareil de chauffage laissent passer un courant différent. L'appareil de chauffage laisse passer un courant plus important que la lampe; on dit qu'il a une plus petite résistance électrique que la lampe.

### 4. Loi d'Ohm.

Considérons encore le même circuit électrique dans lequel nous maintenons un utilisateur  $R$ , un appareil de chauffage par exemple, qui, pour une tension de 220 V, laisse passer un courant de 2,2 A.

Si nous remplaçons la source de courant de 220 V par un autre de 110 V, nous constatons que l'intensité atteint seulement 1,1 A.

Si nous la remplaçons par une source de 440 V, nous constatons que l'intensité est de 4,4 A.

6.

Il s'en suit que, pour un appareil bien déterminé, la tension représentée par E et le courant représenté par I sont dans un rapport fixe l'un par rapport à l'autre.

Dans l'exemple rapporté, ce rapport sera :

$$\frac{220 \text{ V}}{2,2 \text{ A}} = \frac{110 \text{ V}}{1,1 \text{ A}} = \frac{440 \text{ V}}{4,4 \text{ A}} = 100$$

Ce rapport, constant pour un appareil donné, détermine ce que l'on appelle la résistance électrique R de l'appareil.

On a donc :

$$\frac{\text{Tension}}{\text{Intensité}} = \text{Résistance ou } \frac{E}{I} = R .$$

On peut aussi l'écrire sous une autre forme

$$E = I \times R \quad \text{ou} \quad I = \frac{E}{R}$$

L'unité de résistance est l'Ohm ( $\Omega$ ).

Une résistance de 1 Ohm est celle qui est :

traversée par 1 A sous une tension de 1 V.

##### 5. Force Electromotrice.

En rapport avec les sources de courant, on utilise souvent l'expression force électromotrice, que l'on confond souvent avec la tension (ou différence de potentiel).

Cependant ces notions, exprimées toutes les deux en volts, sont différentes : tandis que la force électromotrice est la cause, la tension (ou différence de potentiel) en est seulement la conséquence.

Considérons par exemple un élément Leclanché et supposons qu'il ne soit pas raccordé à un appareil utilisateur R. Au moyen d'un voltmètre, nous mesurons à ses bornes une tension de 1,5 V, qui représente la force électromotrice de l'élément.

Si, par contre, l'élément est raccordé à l'appareil utilisateur, la tension aux bornes change suivant la valeur du courant fourni. Nous ne retrouvons plus la force électromotrice de 1,5 V, mais une tension plus basse.

La force électromotrice d'un élément, un accumulateur ou une machine est égale à la tension à ses bornes à circuit ouvert, c'est-à-dire quand les fils ne sont pas raccordés et quand il ne passe aucun courant. On la représente souvent en abrégé par : f.é.m.

La force électromotrice est toujours plus élevée que la tension aux bornes à circuit fermé, du fait de la résistance interne qui est traversée par un courant, ce qui provoque une chute de tension égale à :

$$E - V = R_i \times I, \text{ avec}$$

$E$  = la force électromotrice

$V$  = la tension

$R_i$  = la résistance interne

$I$  = le courant qui traverse la source.

## 6. Résistance interne - Court-circuit.

Relions les deux pôles d'un élément ( ou d'une source quelconque) par un conducteur en cuivre de grosse section, dont la résistance est pratiquement négligeable. On dit qu'il y a court-circuit. Le courant qui passe alors dans le circuit est important et n'est limité que par la résistance au courant à l'intérieur de l'élément (ou de la source de courant). Cette résistance est appelée résistance interne.

Il faut noter que dans l'élément même (ou dans la source de courant), contrairement à ce qui se passe dans le circuit extérieur, le courant va du pôle négatif vers le positif.

En pratique, un court-circuit a toujours des conséquences extrêmement dangereuses, à cause des intensités importantes qu'il provoque. A remarquer que, tandis que la f.é.m. produite dépend seulement des matières en présence et ne varie pas avec les dimensions de l'élément, la résistance interne peut prendre différentes valeurs suivant les dimensions.

## 7. Résistance d'un conducteur.

La résistance d'un conducteur dépend de :

- sa nature (cuivre, fer, aluminium);
- sa section;
- sa longueur.

La résistance d'un conducteur est calculée comme suit :

$$R = \frac{\rho \cdot L}{S}$$

dans laquelle

$\rho$  = la résistance spécifique de la matière;

$L$  = la longueur du conducteur en m;

$S$  = la section du conducteur en  $\text{mm}^2$ .

Le coefficient  $\rho$  est la résistance spécifique de la matière, et correspond à la résistance d'un conducteur de 1 m de longueur et de 1  $\text{mm}^2$  de section.

La résistance d'un conducteur est également dépendante de la température de celui-ci. Pour cette raison, la valeur de  $\rho$  est toujours donnée à 20° C.

Pour obtenir la valeur de la résistance à une température plus élevée, il faut tenir compte du coefficient de température. La résistance à une température déterminée ( $t$ ) est donnée par la formule :

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha(t-20)]$$

Dans le tableau ci-dessous, on donne les valeurs de  $\rho$  et  $\alpha$  pour quelques conducteurs usuels :

Métal	$\rho$ en $\Omega/\text{mm}^2/\text{m}$	$\alpha$
fer	0,098	0,006
cuiivre	0,017	0,0039
argent	0,016	0,0038
constantan	0,5	0,000005

Il s'en suit que l'argent est le meilleur conducteur, mais il est cependant très peu utilisé en raison de son prix.

Le fil constantan par contre convient particulièrement bien pour la constitution d'éléments de résistance, surtout à cause de son très faible coefficient de résistance.

### 8. Conducteurs et matières isolantes.

Lorsqu'on relie les 2 pôles d'une source de courant (élément, accumulateur ou dynamo) à un appareil utilisateur, une lampe à incandescence par exemple, au moyen de fils en cuivre, on

constate que la lampe s'allume. Les fils de cuivre ont la propriété de laisser passer le courant électrique;

on les appelle conducteurs du courant électrique.

Si nous interposons entre un des pôles de la source et le fil une plaquette en mica, alors la lampe ne s'allumera plus. Cela s'explique du fait que le courant électrique ne passe pas par cette matière. C'est une matière non-conductrice appelée matière isolante ou encore isolateur.

#### a) Conducteurs

Les métaux sont généralement de bons conducteurs du courant électrique.

C'est pour cette raison qu'on les utilise dans les appareils et machines.

Les meilleurs conducteurs sont le cuivre, l'aluminium, l'argent,...

#### b) Matières isolantes.

Les matières isolantes empêchent des court-circuits entre organes sous tension dans les appareils. De même, elles empêchent que le personnel qui pourrait toucher les parties sous tension soit électrocuté.

Une matière isolante a une très grande résistance, de sorte que, même au travers d'une petite épaisseur, le courant est pratiquement inexistant.

Une matière isolante doit avoir les propriétés suivantes :

- La résistance spécifique doit être très grande, de sorte que le courant de fuite (le courant au travers l'isolation) soit très petit.
- Elle doit être mécaniquement solide.
- Elle ne peut être attaquée chimiquement, par exemple par l'huile de graissage.
- Elle doit maintenir ses propriétés à haute température. Les matières isolantes sont à ce sujet réparties en classes dépendant de la température maximale admise de l'appareil ou des conduites.

Les matières isolantes les plus utilisées sont :

- le mica est très résistant à la température, mais est assez peu résistant mécaniquement et assez cher;

10.

- les matières comprimées à base de bakélite ou polyester, éventuellement renforcé de fibre de verre.
- des matières durcies thermiquement;
- des vernis pour imprégnation ou protection de surface.

L'emploi de papier, bois, lin, coton, soie, marbre est en régression par suite des meilleures propriétés des matières synthétiques.

---

COURS 1204

9 - Principes de résolution des schémas simples

Il arrive souvent en pratique que dans un schéma électrique composé de résistances, on doit déterminer une ou plusieurs inconnues.

Sauf dans les méthodes expérimentales où les tensions et courants peuvent être déterminés par mesure, il est indispensable de déterminer ces inconnues à l'avance par calcul.

Dans ce qui suit, nous exposerons les lois qui pourront être utiles.

a) Combinaisons de résistances.

Mise en série de résistances.

Deux résistances sont mises en série lorsqu'elles sont reliées comme sur la Fig. 2.1.

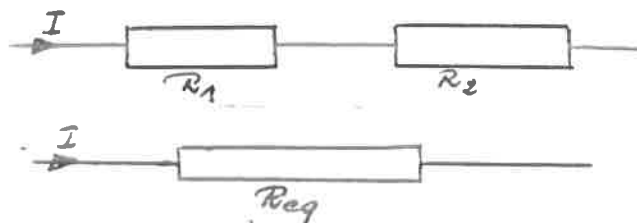


Fig. 2.1

Quand deux ou plusieurs résistances sont mises en série, la résistance totale est égale à la somme de ces résistances.

$$R_1 I + R_2 I = (R_1 + R_2) I$$
$$R_{\text{eq}} = R_1 + R_2$$

Mise en parallèle de résistances.

Deux résistances sont mises en parallèle lorsqu'elles sont raccordées comme sur la Fig. 2.2.

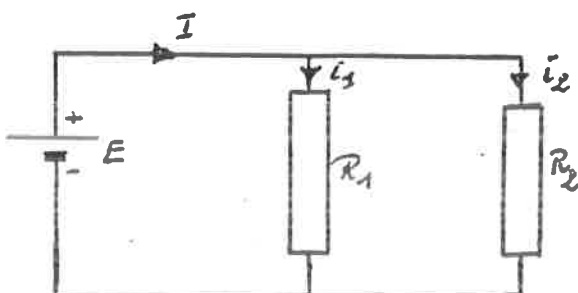


Fig. 2.2

$$I = i_1 + i_2$$
$$I = \frac{E}{R_1} + \frac{E}{R_2}$$
$$I = E \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{E}{R_{\text{eq}}}$$

Donc,

$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

ou

$$R_{\text{eq}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Lorsque 2 résistances sont mises en parallèle, la résistance équivalente est égale au produit de ces résistances, divisé par leur somme.

b) Lois de Kirchhoff.

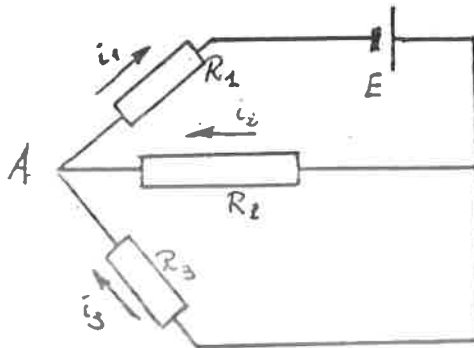
Première loi

En chaque noeud du réseau, la somme algébrique des intensités est nulle.

Pour faire l'addition des courants on donnera un sens aux courants dans chacun des conducteurs qui aboutissent au noeud A par exemple : Lors de la mise en équation, on considèrera par exemple comme positifs les courants qui vont vers le noeud et comme négatifs les courants qui s'en éloignent (Fig. 2.3.).

Cette loi est la conséquence du fait que les charges électriques qui se meuvent sous l'influence d'une tension sont incompressibles et ne peuvent s'accumuler en un point.

Fig. 2.3



Deuxième loi

Pour chaque maille fermée d'une chaîne électrique, la somme des forces électromotrices est égale à la somme algébrique des chutes de tension dans les différentes résistances.

Dans le schéma de la Fig. 2.3., on peut appliquer cette loi comme suit :

$$i_1 R_1 + i_2 R_2 = E$$

$$i_1 R_1 + i_3 R_3 = E$$

Quand on applique les 2 lois de Kirchhoff, on obtient autant d'équations qu'il y a d'inconnues.

Quand on obtient par le calcul une valeur négative pour un courant déterminé, cela signifie que ce courant a un sens opposé à celui initialement supposé.

## 10 - Pont de Wheatstone

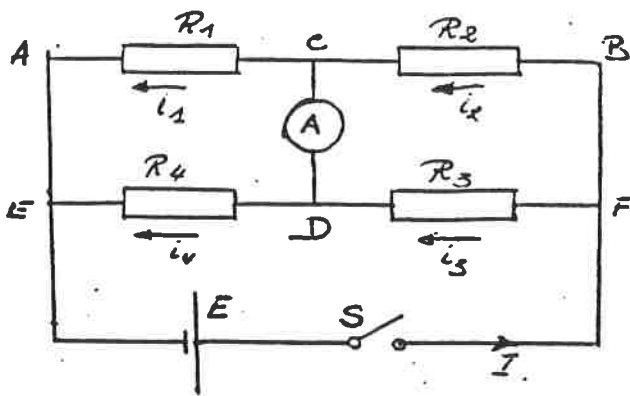


Fig. 2.4

Entre les points C et D est raccordé un galvanomètre. On peut choisir la valeur des résistances de telle sorte que le courant dans le galvanomètre est nul. Pour connaître la relation entre ces résistances, appliquons la 1ère loi de Kirchhoff.

$$\text{Maille ACDE} : - i_1 R_1 + i_4 R_4 = 0 \text{ ou } i_1 R_1 = i_4 R_4 \quad (1)$$

$$\text{CDBF} : - i_2 R_2 + i_3 R_3 = 0 \text{ ou } i_2 R_2 = i_3 R_3 \quad (2)$$

Vu qu'il n'y a pas de courant dans le galvanomètre :

$$i_1 = i_2 \quad i_3 = i_4$$

de sorte que (1) et (2) deviennent :

$$(1) \quad i_1 R_1 = i_3 R_4 \quad (3)$$

$$(2) \quad i_1 R_2 = i_3 R_3 \quad (4)$$

Divisons (3) et (4) membre à membre :

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \text{ ou } R_1 R_3 = R_2 R_4 \quad (5)$$

Il s'en suit que le courant dans le galvanomètre sera nul si le produit des résistances opposées est égal.

Le pont de Wheatstone est surtout utilisé pour la mesure de résistances électriques.

Il suffit pour cela de raccorder la résistance inconnue "x" entre les points B et C de la Fig. 2.4.

Les résistances  $R_1$  et  $R_4$  sont des résistances fixes connues. La résistance  $R_3$  est variable ; on la fait varier jusqu'à ce que le courant dans le galvanomètre soit nul.

A ce moment ,  $x = \frac{R_1 \times R_3}{R_4}$  , avec  $R_1$  et  $R_4$  connus  
 $R_3$  lu

Il est donc possible de calculer  $x$ .

Le pont de Wheatstone a différentes applications, comme par exemple :

- la mesure de la teneur en CO des fumées ;
- la mesure de tensions mécaniques avec jauges de contrainte ;
- des mesures de température, ...

#### 11 - Grouperment des sources de courant.

Il est rare qu'un élément suffise pour l'application désirée. C'est pourquoi, en pratique, on est obligé de grouper plusieurs éléments ensemble. L'accouplement de ces éléments peut s'effectuer de différentes manières.

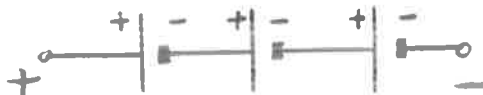
On distingue :

- l'accouplement série ;
- l'accouplement parallèle ;
- l'accouplement mixte.

##### a) L'accouplement série.

Dans cet accouplement (Fig. 2.5.), les éléments sont reliés entre eux avec leurs poles de nom contraire. Aux extrémités, il reste deux poles libres, le pole positif du premier élément et le négatif du dernier ; ceux-ci forment les deux poles de l'ensemble.

Fig. 2.5



Les forces électromotrices de tous les éléments s'ajoutent de sorte que la différence de potentiel obtenue aux deux poles de l'ensemble est égale à la somme des différences de potentiel de chaque élément.

Les résistances internes de tous les éléments s'ajoutent également ; il faut éventuellement en tenir compte lorsque le groupement doit débiter sur un circuit extérieur.

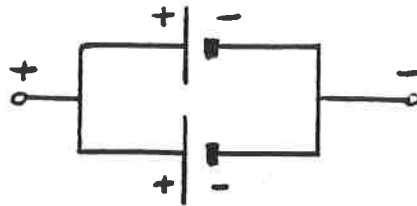
##### b) L'accouplement parallèle.

Dans cet accouplement (Fig. 2.6.), les éléments sont reliés par les poles de même nom, au moyen de barre en cuivre par exemple.

Dans ce cas, la force électromotrice de l'ensemble est égale à

celle d'un élément, mais la résistance interne est égale à celle d'un élément divisé par le nombre d'éléments.

Fig. 2.6



L'accouplement parallèle est donc seulement utilisé pour obtenir de fortes intensités sous une faible tension.

Il est évident que la f.é.m. des différents éléments doit être exactement identique ; si cela n'était pas le cas, vu la faible valeur de la résistance interne de la source, il existerait de très grands courants de circulation.

### c) L'accouplement mixte.

Lorsque nous combinons les 2 méthodes d'accouplement, il est possible de fixer la tension désirée et l'intensité désirée.

### 12 - Effet joule.

Le travail développé par le passage du courant dans une résistance est transformé en chaleur. Une résistance parcourue par un courant s'échauffe. Ce phénomène s'appelle l'effet joule.

La quantité de chaleur produite par l'effet joule est proportionnelle au travail nécessaire pour obtenir le courant ; ce travail est égal au produit de la puissance électrique par le temps et s'écrit donc :

$$E \times I \times t = J$$

ou encore

$$R \times I^2 \times t = J$$

La quantité de chaleur développée est donc proportionnelle à la résistance R, au carré du courant I et au temps.

L'effet joule est utilisé dans les radiateurs électriques et les appareils de chauffage, ainsi que dans les lampes à incandescence.

Dans les autres applications (dans les moteurs par exemple), l'effet joule, dû au passage du courant dans les conducteurs, est néfaste car il signifie une perte d'énergie.

Afin de limiter l'échauffement des conducteurs, la valeur de la résistance doit être limitée. On choisit par conséquent des conducteurs ayant une petite résistance spécifique (donc du cuivre) et une section suffisante.

### 13 - Puissance.

La puissance fournie par une résistance est donc égale à

$$W = \frac{RI^2t}{t} = RI^2 = E \times I$$

C'est l'équation générale pour le calcul de la puissance d'un appareil à courant continu.

### 14 - Unités.

Il faut noter que les unités actuellement utilisées sont : le mètre, le Newton, la seconde, le volt, l'ampère et le Watt.

Les unités composées telles le cheval, le kilogramme, la calorie tombent de plus en plus en désuétude et ne sont plus actuellement utilisées que pour rendre possible les comparaisons avec d'anciens appareils.

### 15 - Condensateur.

Considérons 2 plaques parallèles placées à une certaine distance l'une de l'autre.

Amenons maintenant des charges opposées sur les 2 plaques ; on peut alors faire les constatations suivantes :

- la charge des 2 plaques est la même, mais de signe opposé ;
- la quantité de charge accumulée est beaucoup plus grande que lorsque nous considérons seulement une seule plaque.

Du fait de ces propriétés, on appelle cet appareil un CONDENSATEUR.

La capacité d'un condensateur est son aptitude à accumuler une quantité de charge déterminée pour une différence de potentiel donnée entre les 2 électrodes.

La capacité est d'autant plus grande que les plaques sont plus grandes et leur écartement plus petit.

Le condensateur a quelques propriétés très intéressantes. On y reviendra lors de l'étude des courants alternatifs.

Il faut noter que tous les appareils ont une certaine (petite) capacité. Pour des appareils complètement isolés, il faut parfois, après coupure de la tension, éliminer la charge par court-circuit avant de toucher les éléments sous tension.

C'est ainsi que les câbles haute tension, du fait de leur grande longueur et de leur faible espacement, ont une assez grande capacité. Il est donc excessivement dangereux de toucher ces câbles après interruption du courant et avant de décharger les conducteurs.

Ce déchargement dure d'autant plus longtemps que la capacité est plus grande (longueur) et la résistance plus élevée.

COURS 1204.Chapitre II - Magnétisme et électromagnétisme.1. Magnétisme.a) Notion.

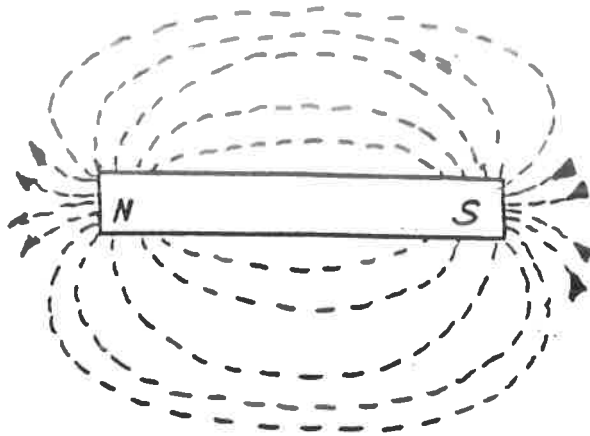
Un aimant est un corps qui a la propriété d'attirer la limaille de fer. Il existe des aimants naturels qui possèdent cette propriété de nature, et des aimants artificiels qui l'obtiennent sous l'influence d'un champ magnétique.

De l'acier trempé est une matière qui peut très facilement être magnétisée. Le fer et la fonte possèdent aussi cette propriété, mais dans une moindre mesure.

Quand on éparpille de la limaille de fer au-dessus d'un aimant, nous remarquons que ces particules s'orientent suivant des lignes bien déterminées (fig. 3.1). Nous constatons aussi que la force d'attraction est plus forte aux extrémités.

On appelle ces extrémités les pôles.

Fig. 3.1



2.

On distingue le POLE NORD et le POLE SUD.

Conventionnellement, on appelle POLE NORD celui qui s'orientera vers le nord lorsque l'aimant pend librement.

Un troisième phénomène est que, lorsqu'on rapproche deux aimants l'un de l'autre, 2 pôles de même nom se repoussent, tandis que 2 pôles de nom contraire s'attirent.

La grandeur de cette force est inversement proportionnelle au carré de la distance entre les 2 aimants.

Coupons maintenant un aimant juste au milieu. Nous constatons alors que ces 2 parties se comportent chacune séparément comme un aimant avec un pôle N et un pôle S. Un aimant est indivisible. La propriété magnétique repose en fait sur une propriété moléculaire. Il n'existe en fait aucun pôle N ni aucun pôle S séparé. Leur détermination repose sur une convention.

b) Champ magnétique.

L'espace qui entoure un aimant est appelé le champ magnétique. Considérons maintenant un aimant disposé librement. Dans l'espace qui l'entoure, imaginons qu'un pôle nord élémentaire puisse se mouvoir. Celui-ci se déplacera du nord vers le sud suivant une ligne déterminée.

Cette ligne s'appelle la ligne de force.

L'aimant élémentaire est soumis à une force qui, en chacun des points de la ligne de force, est dirigée suivant la tangente à cette courbe. Toutes les lignes de force partent du pôle nord et sont dirigées vers le pôle sud. Les lignes de force se ferment à l'intérieur de l'aimant.

Nous pouvons maintenant déterminer la force du champ magnétique ( $\mathcal{H}$ ). C'est la force exercée sur une unité de masse magnétique.

L'induction magnétique ( $\mathcal{B}$ ) est l'état magnétique de la matière; elle dépend du champ magnétique qui la crée ainsi que de la nature de la matière.

$\mathcal{H}$  = champ magnétique  
 $\mathcal{B}$  = induction  
 $\mu$  = perméabilité magnétique de la matière

La perméabilité magnétique est la capacité du milieu d'être traversée par les lignes de force magnétique. Cette perméabilité absolue d'une matière est comparée à la perméabilité du vide :

$$\mu = \mu_0 \times \mu_r$$

$\mu_0$  est la perméabilité du vide;  
 $\mu_r$  est la perméabilité relative;

pour l'air :  $\mu_r = 1$   
 pour l'acier :  $\mu_r \approx 5000$

### c) Flux magnétique.

Quand on considère un champ magnétique, il règne en un point déterminé une certaine force du champ qui provoque l'induction.

Considérons maintenant cette induction sur une surface déterminée; nous pouvons alors déterminer un flux magnétique comme suit :

$$\phi = B \times S$$

$\phi$  = flux magnétique  
 B = l'induction  
 S = la grandeur de la surface

### d) Unités.

Unité de flux : Weber (Wb).

Unité d'induction : Tesla (T) ou Wb/m<sup>2</sup>.

## 2. Electromagnétisme.

### a) Champ électromagnétique.

Considérons une aiguille magnétisée qui est suspendue en son centre de gravité : cette aiguille prendra toujours une orientation bien déterminée, environ celle du pôle nord géographique; c'est ce qui se passe dans une boussole.

Approchons maintenant un conducteur électrique près de cette aiguille aimantée : tant qu'elle n'est pas parcourue par un courant, l'aiguille aimantée gardera sa direction. Cependant, dès qu'un courant parcourera le conducteur, l'aiguille déviara dans une direction bien déterminée. Quand le courant sera interrompu, l'aiguille reprendra sa position initiale.

Si on inverse la polarité du courant dans le conducteur, l'aiguille déviara en sens inverse.

Si on augmente l'intensité du courant, l'angle d'inclinaison augmentera.

Cette expérience permet les conclusions suivantes :

- 1) Un courant électrique crée un champ magnétique qui s'ajoute au champ magnétique existant.
  - 2) Le champ magnétique est étroitement lié au courant électrique; dès que celui-ci disparaît, le champ magnétique est également supprimé; on parle donc dans ce cas d'électromagnétisme.
  - 3) La direction du courant détermine la direction des lignes de force du champ électromagnétique; une inversion des courant inverse le sens des lignes de force.
  - 4) L'intensité du champ électromagnétique dépend de l'intensité du courant électrique.
- b) Quelques caractéristiques du champ électromagnétique.

Considérons un conducteur rectiligne (fig. 3.2).

Le champ électromagnétique en un point quelconque A peut être déterminé comme suit.

Plaçons en A un plan perpendiculaire au conducteur électrique.

Les lignes de force sont des cercles concentriques situés dans ce plan et dont le centre est le point de passage du conducteur; le sens des lignes de force est déterminé par la règle de Maxwell : "Le sens des lignes de force crée par un courant électrique est celui dans lequel on devrait tourner un tire-bouchon pour le faire avancer dans le sens du courant".

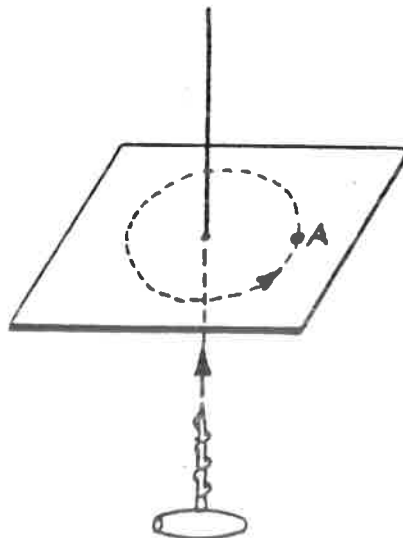


Fig. 3.2

L'intensité du champ en un point quelconque est inversement proportionnel à la distance de ce point au conducteur rectiligne.

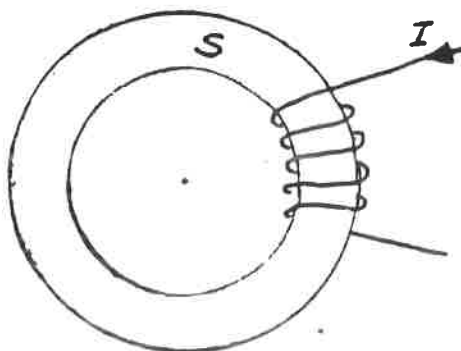
Cette règle est approximative et est d'autant plus exacte que le conducteur rectiligne est plus long.

c) Magnétisme induit.

Considérons un circuit magnétique, constitué d'un noyau en fer de section constante (fig. 3.3).

Enroulons autour de ce noyau un conducteur parcouru par un courant  $I$ .

Fig. 3.3



Le courant fait naître dans le noyau un flux magnétique  $\phi$ . On dit que le courant provoque une force magnétomotrice.

Le flux dans le circuit subit une certaine résistance appelée réluctance.

La loi de Hopkinson dit :

$$\phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}}, \text{ dans lequel } \begin{array}{l} \mathcal{F} = \text{f.m.m.} \\ \mathcal{R} = \text{réluctance} \end{array}$$

La f.m.m. est proportionnelle au courant  $I$  dans la bobine et au nombre de spères :

$$\mathcal{F} = n.I.$$

La réluctance est proportionnelle à la longueur du circuit, inversement proportionnelle à la section, et dépend de la nature de la matière.

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu S}$$

dans lequel  $\mu$  est la perméabilité magnétique de la matière.

On peut en déduire :

$$\mathcal{F} = \phi \times \frac{l}{\mu S} \quad \text{ou} \quad \frac{\phi}{S} = \mu \frac{\mathcal{F}}{l}$$

$\frac{\phi}{S}$  est la densité de flux ou l'induction

$\frac{\mathcal{F}}{l}$  est la f.m.m. par unité de longueur ou la force du champ magnétique.

$$\mathcal{H} = \frac{\mathcal{F}}{l}$$

Nous tirons la relation entre l'induction et le champ :

$$B = \mu \cdot \mathcal{H}$$

d) Unités.

Des définitions ci-dessus sont déduites les unités suivantes :

Flux	$\phi$	Weber	Wb
Induction	B	Tesla	T
		Weber/m <sup>2</sup>	Wb/m <sup>2</sup>
f.m.m.	$\mathcal{F}$	Ampère-tour	At
Champ	$\mathcal{H}$	Ampère-tour par mètre	At/m

e) Caractéristique de magnétisation.

Quand on magnétise un morceau d'acier pour la première fois, on obtient la courbe 1 de la fig. 3.4. L'induction augmente d'abord à peu près linéairement, mais à partir d'un certain champ, la pente diminue ou la réluctance augmente, pour une augmentation importante du champ magnétique, on obtienne une faible augmentation de l'induction.

On dit que le métal est saturé.

Si on diminue ensuite progressivement la valeur du champ, on peut constater que les valeurs de B ne correspondent plus à celles de la courbe 1, mais sont un peu plus élevées.

En diminuant  $\mathcal{H}$ , B suit la courbe 2a.

Lorsque le champ est nul, il subsiste encore une certaine induction, appelée magnétisme rémanent.

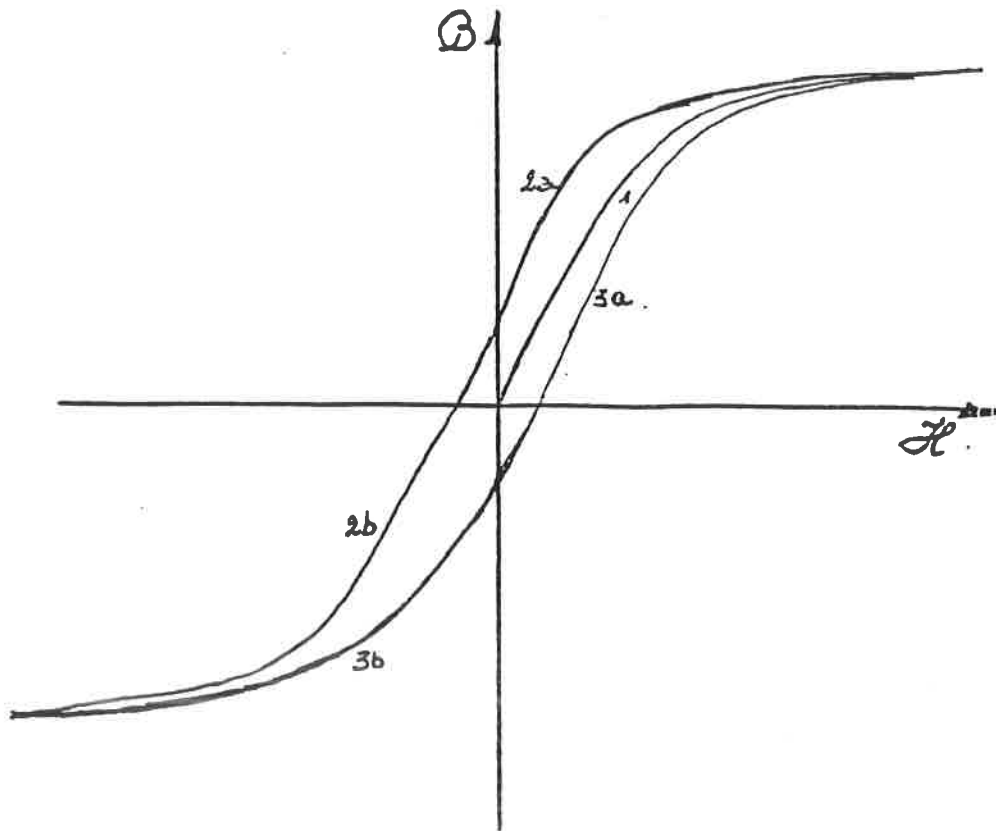


Fig. 3.4

Lorsqu'on inverse le sens du champ, on peut annuler progressivement l'induction et lui donner ensuite des valeurs négatives (courbe 2b).

En augmentant à nouveau le champ, l'induction suivra la courbe 3.

Il s'en suit que la valeur de la magnétisation ne dépend pas seulement de  $\mathcal{H}$ , mais aussi de la magnétisation antérieure.

Ce phénomène s'appelle hystérésis.

La surface comprise entre les 2 courbes 2 et 3 est une mesure de l'énergie nécessaire pour faire changer l'induction de sens.

Cette surface représente les pertes d'énergie qui sont transformées en chaleur.

### Chapitre III - Induction électromagnétique.

#### 1. Notion.

De même qu'un courant électrique produit un champ magnétique on peut montrer qu'à l'aide d'un aimant, on peut produire un courant dans un conducteur.

Considérons un solénoïde (fig. 3.5) dont les 2 extrémités sont raccordées à des bornes sur lesquelles est branché un milliampèremètre, c'est-à-dire un ampèremètre pour la mesure de très faibles courants.

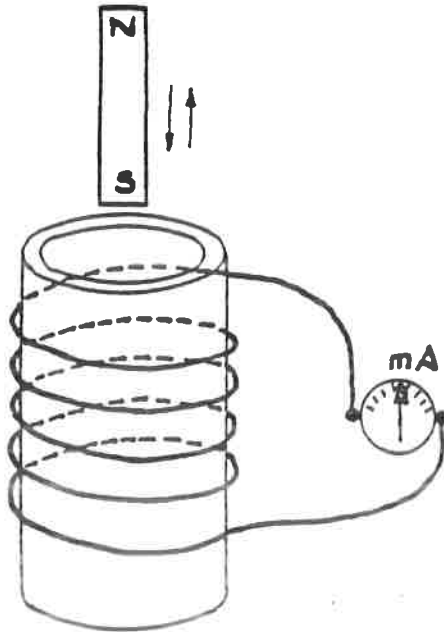


Fig. 3.5.

Quand on introduit une barre magnétisée dans le tube, on constate que l'aiguille du milliampèremètre dévie lorsqu'on avance la barre. Si on la retire, l'aiguille dévie à nouveau, mais en sens inverse. Si l'aimant est immobile dans la bobine, il ne se produit aucune déviation.

Les déviations du milliampèremètre montrent la présence d'un courant dans le conducteur du solénoïde, courant qui se produit lors du déplacement de l'aimant par rapport aux conducteurs. Le courant se produirait aussi si c'était le conducteur qui était déplacé par rapport à la barre aimantée.

C'est un courant induit. La production des courant montre la présence d'une f.é.m. induite.

On retiendra la règle fondamentale suivante : quand un conducteur se déplace par rapport à un aimant et inversement, une f.é.m. est induite dans le conducteur.

A remarquer que l'énergie électrique produite dans le circuit provient ici de la transformation de l'énergie mécanique nécessaire pour déplacer l'aimant. Nous avons donc trouvé un moyen pour convertir l'énergie mécanique en énergie électrique.

Ce principe est à la base du fonctionnement des dynamos ou générateurs d'énergie électrique.

Le sens du courant induit est tel qu'il produit un flux magnétique qui s'oppose à la variation de flux; si le courant est provoqué par une baisse du flux, il produira un flux qui tiendra à renforcer celui-ci.

## 2. Self-induction.

La variation de flux nécessaire pour induire un courant dans un enroulement peut être obtenu de différentes façons.

On peut, comme dans l'exemple ci-dessus, déplacer un aimant, ou bien faire varier le courant dans une bobine voisine, ou bien modifier la réluctance de la bobine.

On peut encore envoyer un courant variable dans la bobine même. Le courant a un flux variable qui, à son tour, induira une f.é.m. dans l'enroulement. On appelle ce phénomène "self-induction".

C'est le flux qui entoure l'enroulement qui produit les effets de self-induction; ceux-ci seront d'autant plus importants que, pour un courant donné, le flux produit sera plus important. Nous déterminons ainsi le coefficient de self-induction d'un enroulement (une spire)

$$\mathcal{L} = \frac{\phi}{I} \quad \text{appelé aussi inductance}$$

est le rapport entre le flux produit et le courant qui induit le flux.

Si nous avons à faire à  $n$  spires (bobine),

$$\mathcal{L} = \frac{n \cdot \phi}{I}$$

si nous supposons que le même flux  $\phi$  traverse toutes les spires ( $n$ ).

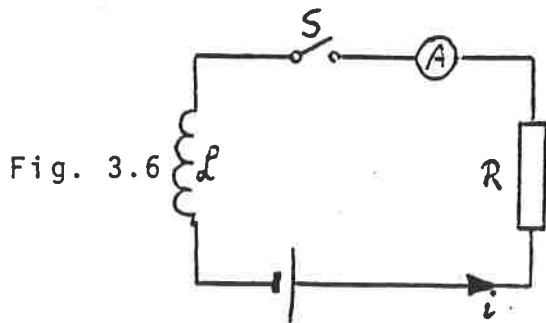
La f.é.m. induite est égale à :  $e = - \frac{\Delta \phi}{\Delta t}$

Sachant que  $\mathcal{L} = \frac{\phi}{I}$  ou  $\phi = \mathcal{L} \cdot I$ , nous obtenons :

$$e = - \frac{\Delta \mathcal{L} I}{\Delta t} = - \mathcal{L} \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Unité d'inductance.

L'unité d'inductance est l'inductance d'un enroulement dans lequel une variation d'un ampère par seconde induit une f.é.m. d'un volt. Cette unité s'appelle le Henrz (H).

Exécution pratique de la self-induction.

Considérons le circuit ci-contre (fig. 3.6).

A un certain moment, nous fermons l'interrupteur **S**. Nous constatons que le courant ne prend pas directement une valeur déterminée, mais qu'il augmente progressivement jusqu'à une valeur constante.

Le courant produit en effet une variation de flux, ce qui induit un courant qui s'oppose au courant qui le produit.

Ouvrons maintenant l'interrupteur; nous remarquons alors une étincelle aux contacts.

Lors de l'ouverture, on provoque une diminution du courant et donc du flux. Cette variation du flux induit un courant qui s'oppose à la cause, c'est-à-dire qui veut maintenir le courant principal.

A cause de la grande vitesse avec laquelle se produit l'interruption ( $\Delta t$  est petit), la f.é.m. est grande, ce qui provoque une étincelle aux contacts de l'interrupteur.

Beaucoup de moyens sont utilisés pour diminuer ce phénomène qui est très nuisible.

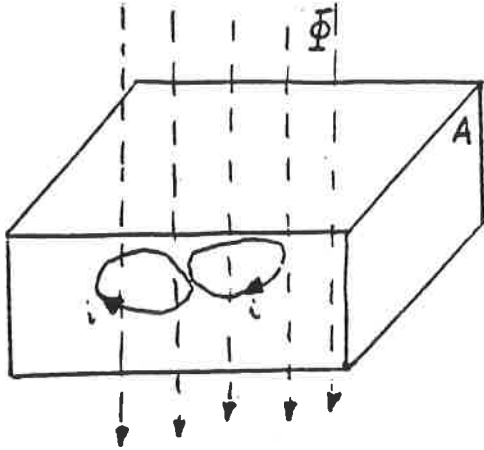
C'est ainsi que pour les grands contacteurs, on place des coupe-flammes, des bobines de soufflages et même des installations de soufflage pneumatique.

D'autre part, on place parfois sur les bobines une diode qui court-circuitera le courant inverse dû à la self-induction.

Le placement de condensateurs sur les contacts de plus petits interrupteurs, ainsi que la mise en série de plusieurs contacts sont autant de moyens utilisés pour diminuer l'effet méfaste des étincelles sur les contacts.

### 3. Courants de Foucault.

Fig. 3.7



Considérons un objet métallique A qui est soumis à une magnétisation croissante et descendante (fig. 3.7). L'objet est donc parcouru par un champ variable.

Dans l'objet, nous pouvons dessiner un nombre de cercles quelconque parcourus par le champ variable et dans lesquels un courant est induit.

Ces courants sont absolument inutiles et incontrôlables.

D'autre part, ils provoquent un échauffement de l'objet par effet Joule, d'où une perte d'énergie.

Ces courants s'appellent courants de Foucault.

Ces courants sont perpendiculaires au flux.

Ils jouent un rôle important dans la construction des machines électriques, comme par exemple les dynamos, les transformateurs, etc.... à cause de la diminution de rendement qu'ils occasionnent.

Les courants de Foucault peuvent être considérablement diminués en constituant les circuits magnétiques de fines tôles isolées les unes des autres, et placés perpendiculairement à la direction du courant; de cette façon, les courants de Foucault sont fortement diminués par l'augmentation de la résistance.



COURS 1204INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE (SUITE)4. Induction électromagnétique par mouvement

Les tensions induites discutées jusqu'à présent étaient obtenues par modification du champ magnétique, sans déplacement de l'enroulement même.

On peut également obtenir des tensions induites en déplaçant un enroulement dans un champ magnétique fixe, de telle sorte que le champ magnétique qui traverse cet enroulement est variable.

Considérons un champ magnétique vertical et un enroulement qui peut tourner autour d'une horizontale telle  $OO'$ . Le champ magnétique entouré par l'enroulement varie pendant la rotation de l'enroulement, ce qui donne naissance à un courant dont le sens est donné par la loi de Lenz.

Supposons d'abord que l'enroulement soit perpendiculaire aux lignes de force (fig. 4.1); le champ est alors maximum; quand l'enroulement tourne dans la direction indiquée, le champ entouré diminue, ce qui donne naissance à un courant dont le champ s'ajoute au champ diminué; on appelle ce courant le courant direct.

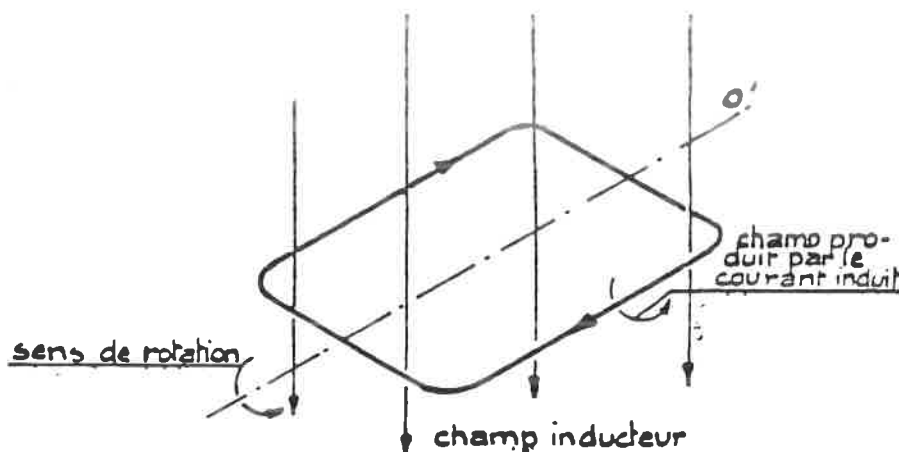


Fig. 4.1

Quand l'enroulement est parallèle au champ, le champ entouré est nul; si on continue la rotation, le champ qui traverse l'enroulement augmente, ce qui engendre un courant, dont le champ s'oppose au champ excitatif; ce courant a le même sens que lors de la première phase; on l'appelle courant opposé parce que son champ s'oppose au champ excitatif.

2.

Lorsque l'enroulement est à nouveau en position horizontale, le champ est maximum; si on continue le mouvement, le courant s'inverse et devient à nouveau un courant direct parce que son champ a le même sens que le champ excitatif.

Le sens du courant direct est donné par la règle de MAXWELL : le courant direct induit correspond au sens de rotation d'un tire bouchon qu'on fait avancer dans le sens du champ.

La grandeur de la f.é.m. dans un conducteur est égale à :

$$e = B.l.v.$$

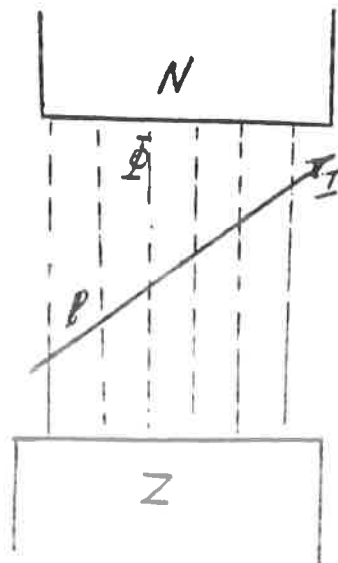
avec  $B$  = l'induction du champ magnétique

$l$  = la longueur du conducteur

$v$  = la vitesse avec laquelle le conducteur se séplace.

### Force électromagnétique

Fig. 4.2



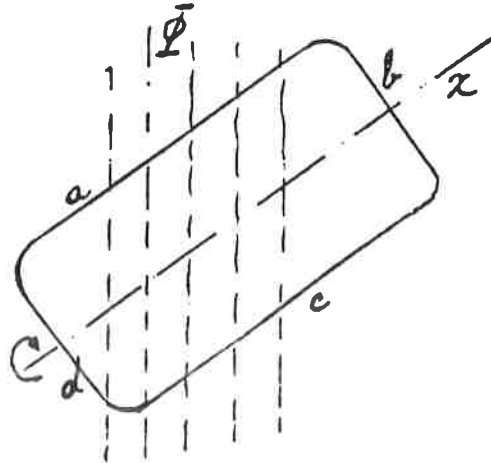
Quand un conducteur parcouru par un courant  $I$  se trouve dans un champ magnétique (Fig. 4.2), ce conducteur est soumis à une force. Cette force est égale à :  $F = B \times l \times I$  (en Newton).

CHAPITRE IV. THEORIE DES COURANTS ALTERNATIFS.

1. Généralités

Considérons un enroulement qui tourne dans un champ uniforme autour d'un axe  $x$ , perpendiculaire aux lignes de force (Fig. 4.3).

Fig. 4.3



Quand l'enroulement tourne, le nombre de lignes de force coupées dépend de la position de l'enroulement par rapport au plan horizontal.

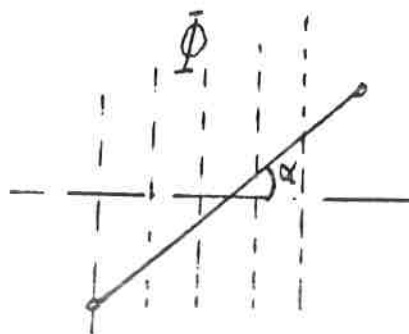
Le flux qui traverse l'enroulement est le plus grand quand l'enroulement est horizontal et est nul quand il est vertical.

Dans une position quelconque, ce flux est égal à :

$$\Phi = B \times S'$$

$$\text{où } S' = S \times \cos \quad (\text{fig. 4.4.})$$

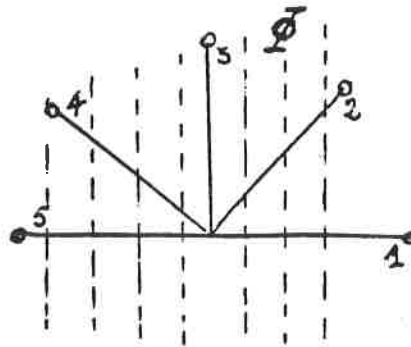
Fig. 4.4



4.

Considérons maintenant différentes positions de la barre C pendant la rotation (fig. 4.5).

Fig. 4.5



Pendant le passage de la position 1 à la position 2, le flux coupé ne diminue que faiblement.

Vu que la f.é.m.  $e = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ ,

Cette f.é.m. sera petite.

La variation de flux augmentera progressivement au fur et à mesure que la barre C se rapproche de la position 3 (verticale); pendant ce temps, la f.é.m. augmentera également.

Une fois que la barre a passé la position verticale (3), le flux traversant l'enroulement ne diminuera plus, mais augmentera. La variation de flux diminuera au fur et à mesure que l'on atteint la position 4 et la position 5. En position 5, le flux ne varie pas, de sorte que la f.é.m. est nulle.

Faisons tourner la barre plus loin; le sens de la f.é.m. s'inversera, de sorte que la f.é.m. dans le conducteur C, pendant un tour complet, se présentera comme à la fig. 4.6.

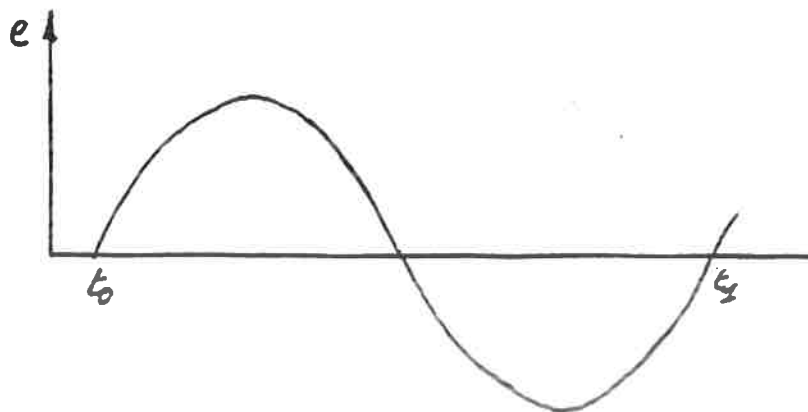


Fig. 4.6

La tension produite dans le conducteur a une forme sinusoïdale.

$$e = E_{\max} \times \sin \omega t$$

où  $e$  est la valeur instantanée

$E_{\max}$  est la valeur maximale ou l'amplitude

$\omega$  est la pulsation

$t$  le temps.

Le temps entre  $t_1$  et  $t_2$  s'appelle la période.

La pulsation est telle que  $\omega T = 2\pi$

de sorte que  $\omega = \frac{2\pi}{T}$

Le nombre de périodes par seconde s'appelle la fréquence  $f = \frac{1}{T}$   
de sorte que  $\omega = 2\pi f$

## 2. Valeur efficace de la tension alternative

La valeur instantanée de la tension ou du courant n'est pas utilisable pour effectuer des calculs. C'est pour cela qu'une tension ou un courant alternatif est déterminé par sa valeur efficace.

La valeur efficace est la racine carrée de la moyenne quadratique de la valeur instantanée pendant une alternance :

$$E_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T/2} \times e^2}$$

En développant, on obtient :

$$E_{\text{eff}} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \quad \text{et} \quad I_{\text{eff}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

Pratiquement, on peut considérer la valeur efficace d'un courant alternatif comme étant la valeur qui produit dans une résistance le même effet joule qu'un courant continu de même valeur.

## 3. Déphasage

Différentes grandeurs sinusoïdales comme les tensions et les courants peuvent non seulement varier en amplitude, mais également être décalées dans le temps l'une par rapport à l'autre. Il existe entre les deux une différence de phase ou déphasage.

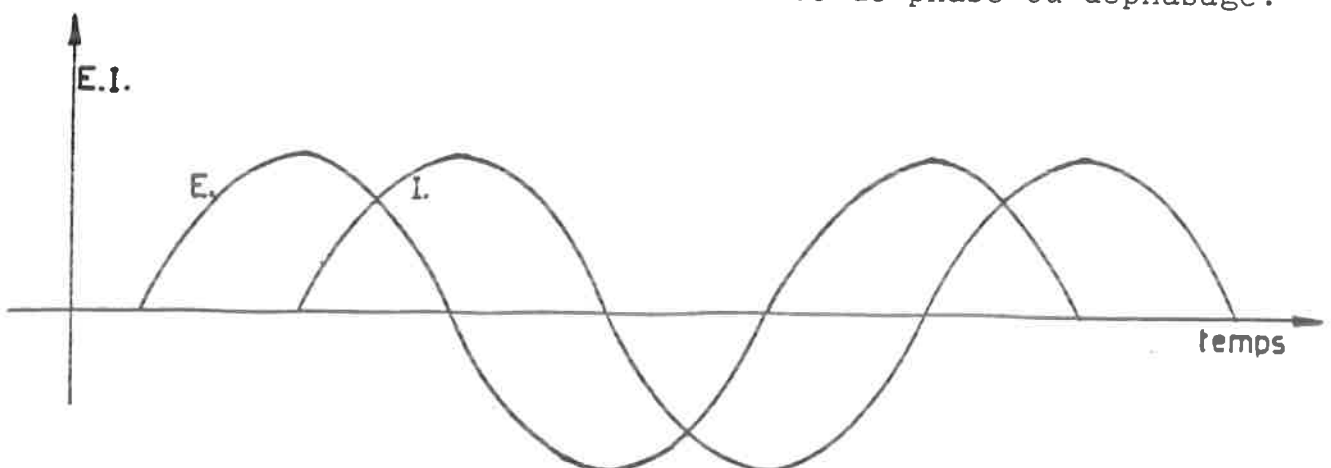


Fig. 4.7

6.

Dans la figure précédente (fig. 4.7),  $e = E_m \sin \omega t$  et  $i = I_m \sin (\omega t + \varphi)$ .

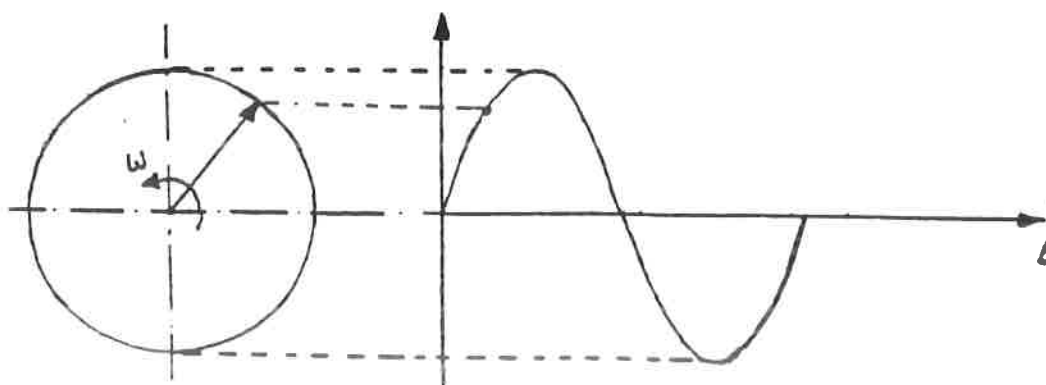
On dit que le courant est en avance sur la tension. Si l'angle est négatif, le courant est en retard.

Deux grandeurs sont "en phase" si l'angle de déphasage est nul. Deux grandeurs sont en quadrature si le déphasage est de  $\pm 90^\circ$ , et en opposition si l'angle est de  $180^\circ$ .

#### 4. Représentation vectorielle

La représentation graphique d'une grandeur alternative n'est pas très pratique. On peut cependant représenter aussi une telle valeur par un vecteur qui tourne dans un plan avec une vitesse angulaire  $\omega$  (fig. 4.8).

Fig. 4.8



Les conventions suivantes doivent être acceptées :

1. Le vecteur tourne dans le sens anti-horlogique.
2. Pour la longueur du vecteur, nous prenons la valeur efficace.
3. Le déphasage est représenté en partant de l'horizontale vers la droite.

La représentation vectorielle a l'avantage qu'on peut appliquer la théorie vectorielle pour additionner des grandeurs de forme sinusoïdale. Il faut toutefois noter que, sur une figure, les vecteurs de courant alternatif doivent représenter des grandeurs de même fréquence.

#### 5. Puissance en courant alternatif

Dans la théorie du courant continu, nous avons vu que la puissance est déterminée comme suit :  $w = E \times I$ .

En courant alternatif, cette relation n'est plus valable.

Quand le courant est décalé par rapport à la tension, la puissance est  $w = E \times I \times \cos \varphi$

Le courant se compose de 2 composantes, soit  $I \cos \varphi$  qui est la composante active, en phase avec la tension, et  $I \sin \varphi$  qui est la composante réactive; celle-ci est en quadrature avec la tension et ne donne pas de puissance.

## 6. Importance pratique du cos

Le facteur de puissance ( $\cos \varphi$ ) est une grandeur d'une importance technique considérable pour le transport et la distribution d'énergie électrique.

La formule de la puissance nous permet de dire que le courant absorbé est d'autant plus grand que le  $\cos \varphi$  est plus petit.

Du fait de cette grande intensité, la perte d'énergie par effet joule augmente très vite dans les conducteurs. Un plus petit  $\cos \varphi$  exige donc des conduites de section plus importante. On s'efforcera donc d'obtenir un  $\cos \varphi$  le plus grand possible. En général, la société obligera l'utilisateur de respecter une valeur minimale du  $\cos \varphi$ .

Dans ce qui suit, on discutera comment améliorer le facteur de puissance.

## 7. Circuits à courant alternatif

### A. Circuit avec une résistance pure

Lorsqu'on a un circuit avec une résistance pure, le courant est déterminé par la loi d'Ohm.

$$e = Ri = E_m \sin \omega t$$

$$\text{donc } I = \frac{E_m \sin \omega t}{R} = I_m \sin \omega t$$

$$I_m = \frac{E_m}{R} \quad \text{ou } I \sqrt{2} = \frac{E_m}{R} \quad \text{ou } I = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \times \frac{1}{R} = \frac{E}{R}$$

La tension et le courant sont en phase  
 $\cos \varphi = 1$

### B. Circuit avec résistance et self induction

Nous savons que la self induction s'exprime en Henry. Considérons le circuit ci-après (fig. 4.9).

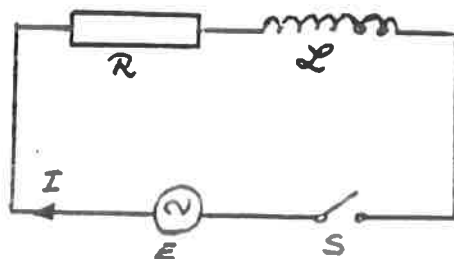


Fig. 4.9

8.

La self induction d'une bobine joue un rôle d'autant plus grand que la fréquence est grande.

Dans un circuit avec une self induction, le courant n'est plus égal à  $\frac{E}{R}$ , mais bien à  $I = \frac{E}{Z}$ , ou  $Z$  représente l'impédance.

L'impédance est la résistance apparente du circuit en courant alternatif. Elle est plus grande que la résistance et ceci d'autant plus que la fréquence augmente.

L'impédance dans le circuit est déterminée par

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

dans laquelle  $R$  = la résistance du circuit en courant continu

$\omega$  = la pulsation ou  $2\pi f$

$L$  = la self induction du circuit

$\omega L$  = la réactance (également exprimée en ohm).

Il faut noter que le courant et la tension ne sont pas en phase, mais sont décalés d'un certain angle.

Dans un circuit inductif, le courant est toujours en retard sur la tension.

Le  $\cos \varphi = \frac{R}{Z}$

En cas d'inductance pure, ce décalage est de  $90^\circ$  ( $\cos \varphi = 0$ ).

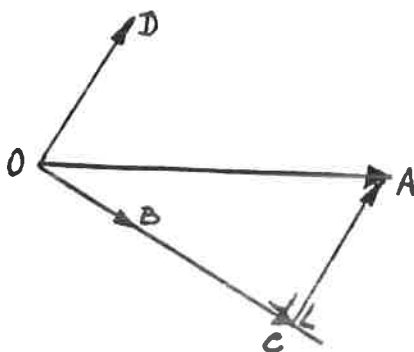
#### Représentation graphique

Il est toujours intéressant de représenter graphiquement certains modèles mathématiques.

Dans certains cas, cela permettra de résoudre des schémas compliqués.

La tension  $E$  est dessinée comme vecteur de référence ( $\vec{OA}$ ) (fig. 4.10).

Fig. 4.10



On dessine ensuite le courant ( $\vec{OB}$ ), déphasé de l'angle  $\varphi$ .

La chute de tension dans la résistance est  $I \times R$  et est dessinée ( $\vec{OC}$ ) dans le prolongement de  $\vec{OB}$ .

La chute de tension dans la bobine est  $\vec{OD}$  ( $wLI$ ), en quadrature et en avance sur  $\vec{OB}$ .

La somme vectorielle des 2 chutes de tension est la tension totale,  
ou  $\vec{OC} + \vec{CA} = \vec{OA}$ .

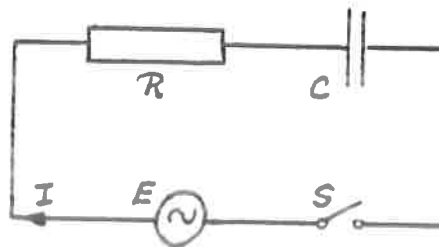
### C. Circuit avec une résistance et une capacité

Dans le premier chapitre, nous avons déterminé ce qu'est un condensateur.

Si nous relient les 2 plaques à une source de courant alternative, le conducteur se chargera et se déchargera toujours, de sorte qu'il circulera un courant alternatif.

Ce courant n'est pas en phase avec la tension mais est en retard.

Fig. 4.11



Dans le circuit de la fig. 4.11, le courant ne sera pas égal à  $\frac{E}{R}$ , mais à  $\frac{E}{Z}$ .  $Z$  est à nouveau l'impédance ou la résistance

apparente égale à :  $Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{wC}\right)^2}$

dans laquelle  $R$  = la résistance ohmique du circuit

$C$  = la capacité du condensateur

$w$  = la pulsation ou  $2\pi f$

$\frac{1}{wC}$  = la capacitance du circuit

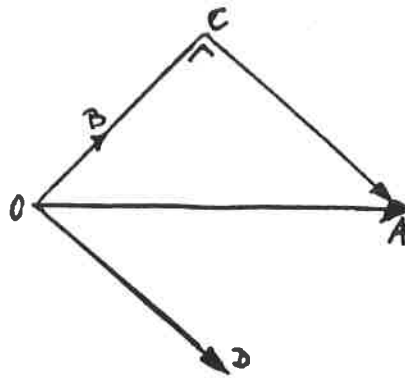
Le courant est en avance sur la tension, et  $\cos \varphi = \frac{R}{Z}$

Pour une capacité pure, le courant est en avance de  $90^\circ$ .

### Représentation graphique

La tension  $E$  est dessinée comme vecteur de référence ( $\vec{OA}$ ) (fig. 4.12)

Fig. 4.12



Le courant  $I$  est dessiné avec l'angle de déphasage déterminé ( $\overrightarrow{OB}$ ).

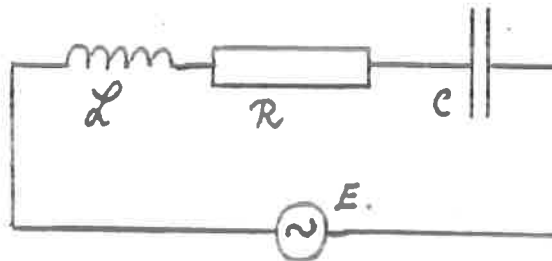
La chute de tension dans la résistance ( $RI$ ) est en phase avec  $\overrightarrow{OB}$ , soit  $\overrightarrow{OC}$ .

$\overrightarrow{OD}$  est la chute de tension dans la capacité et est égale à  $\frac{I}{\omega C}$ , soit  $\overrightarrow{OD}$ .

La somme vectorielle de  $\overrightarrow{OD}$  et  $\overrightarrow{OC}$  est  $\overrightarrow{OA}$ , puisque  $\overrightarrow{OC} + \overrightarrow{CA} = \overrightarrow{OA}$ .

#### D. Circuit mixte

Fig. 4.13



Quand une inductance, une capacité et une résistance sont mises en série (Fig. 4.13), l'impédance totale est calculée par la formule  $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$

dans laquelle  $R$  = la résistance ohmique  
 $L$  = le coefficient de self induction  
 $c$  = la capacité  
 $w$  = la pulsation ou  $2 \pi f$ .

Le déphasage du courant dépendra de la valeur de chacune des impédances.

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \quad \text{ou} \quad \cos \varphi = \frac{R}{Z}$$

Le déphasage est positif ou négatif, c'est-à-dire en avance ou en retard, suivant que le terme  $\omega L - \frac{1}{\omega C}$  est plus petit ou plus

grand que 0, ou suivant que le terme relatif à l'inductance est plus petit ou plus grand que le terme  $\omega C$  (relatif à la capacité).

Cours 1204

CHAPITRE IV - Théorie du courant alternatif (suite)

8. Courant alternatif triphasé

Jusqu'à présent, les courants alternatifs étudiés étaient du type monophasé. En électricité industrielle, ces réseaux ne sont presque pas utilisés, sauf pour l'éclairage.

Les courants alternatifs triphasés les plus utilisés sont constitués comme suit (fig. 5.1).

Considérons trois génératrices qui produisent des courants de même fréquence et même amplitude, mais décalés de  $120^\circ$  ou  $1/3 T$ .

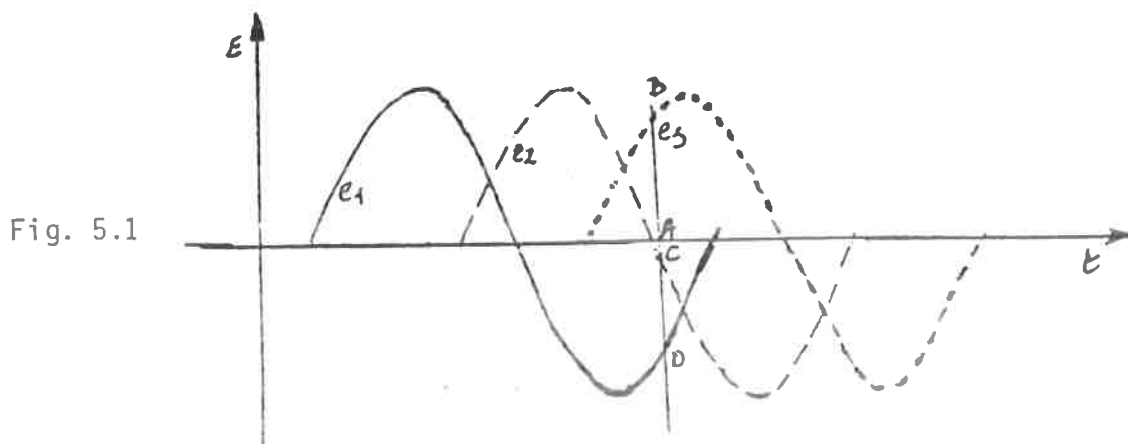


Fig. 5.1

$e_1$  est en retard de  $120^\circ$  sur  $e_2$ , qui lui-même est en retard de  $120^\circ$  sur  $e_3$ .

$$e_1 = E \sin \omega t$$

$$e_2 = E \sin (\omega t + 120^\circ)$$

$$e_3 = E \sin (\omega t + 240^\circ)$$

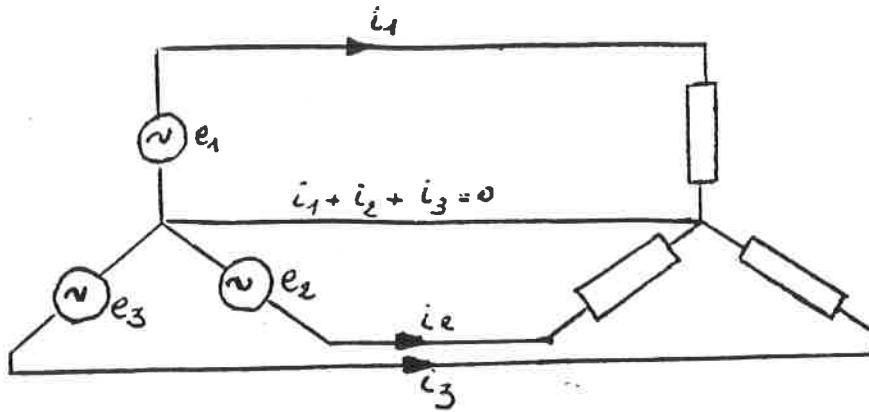
À l'instant  $t$ , les 3 génératrices fourniront une tension égale aux longueurs AD - AC - AB. On peut démontrer qu'à chaque instant, la somme des valeurs instantanées est nulle.

$$\text{Donc } e_1 + e_2 + e_3 = 0$$

Les 3 génératrices peuvent être rassemblées dans une machine avec 3 enroulements indépendants (fig. 5.2). Cela ne donne pas encore d'avantage par rapport au courant monophasé.

On peut cependant relier les 3 génératrices à un point commun, et cela peut se faire avec les résistances de charge de chaque enroulement.

Fig. 5.2



Dans ce cas, pour l'alimentation des 3 résistances, 2 conducteurs peuvent être supprimés.

Le courant qui passe par la liaison du point commun des génératrices et des charges est la somme des 3 valeurs instantanées et est égal à zéro. Ce conducteur n'est donc pas parcouru par un courant et peut être supprimé. Il ne reste donc que 3 fils.

Pour la transmission de la même puissance, les câbles d'un système triphasé devront donc avoir la même section mais ils seront moins nombreux. Les câbles seront donc moins coûteux, d'où une économie considérable.

Le raccordement ci-après (fig. 5.3) s'appelle le raccordement étoile.

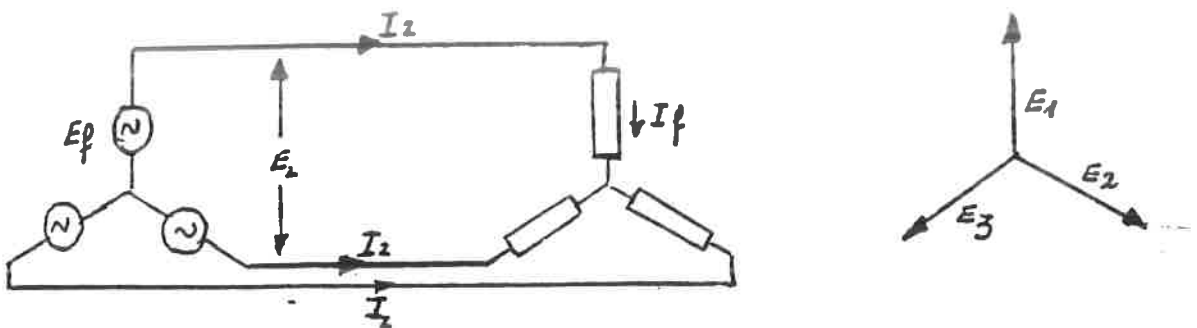


Fig. 5.3

Les bobines de la génératrice peuvent également être raccordées en triangle. Les charges peuvent être raccordées soit en étoile soit en triangle (fig. 5.4).

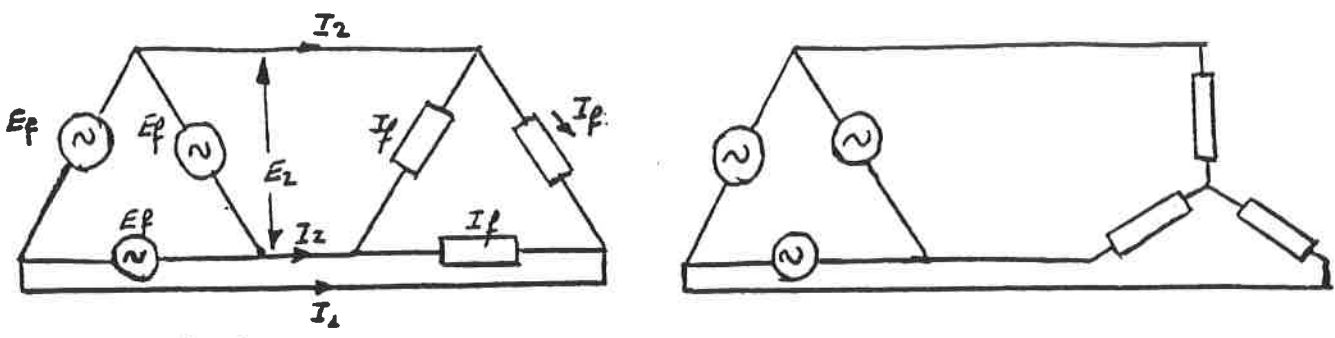


Fig. 5.4

Puissance d'un système triphasé

Si nous appelons

$E_{ph}$  la tension d'une génératrice (tension de phase)

$I_L$  le courant qui passe par le conducteur (courant de ligne)

$I_{ph}$  le courant de la génératrice (courant de phase).

$E_L$  la tension entre 2 conducteurs (tension de ligne), la puissance est alors

$$W = \sqrt{3} E_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi$$

CHAPITRE V - Piles électriques et accumulateurs

1. Piles électriques

Considérons un bac avec de l'acide sulfurique dilué dans lequel on a plongé 2 électrodes, l'une est en cuivre, et l'autre en zinc (fig. 5.5).

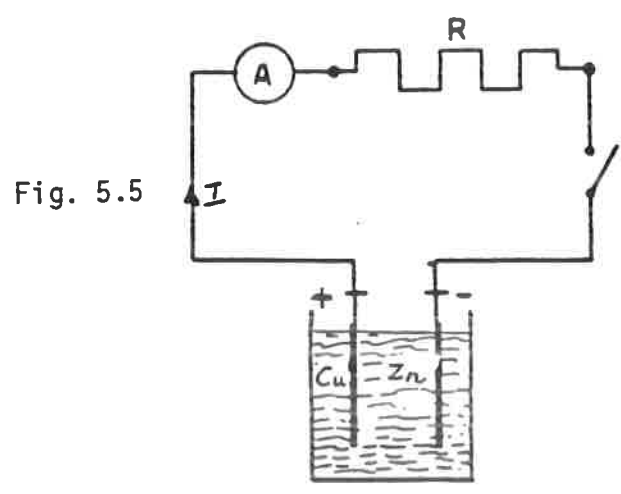
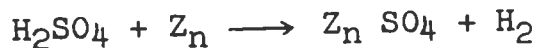


Fig. 5.5

Du fait qu'il se produit une tension entre l'électrolyte et l'électrode, cette tension étant différente pour chacune des 2 électrodes, il naîtra une tension entre les 2 électrodes. Relions maintenant les 2 électrodes par une résistance ; nous constatons qu'un courant y passe. Le courant va du + vers le - dans le circuit extérieur, ou de l'électrode en cuivre vers celle en zinc. Dans l'électrolyte, le courant va de l'électrode en zinc vers celle en cuivre.

Le passage du courant provoque la réaction chimique suivante dans la pile :



L'hydrogène se forme à l'électrode positive en cuivre et s'y déposera comme une couche. C'est le phénomène de polarisation. Elle fera baisser la tension, ce qui n'est pas souhaité.

C'est pour cela qu'on ajoutera dans l'électrolyte des produits destinés à combattre le phénomène de polarisation (par ex. du bioxyde de manganèse). Le dépolarisant ne peut toutefois pas toucher les électrodes.

Si on enverrait du courant dans cette pile (appelée aussi pile Volta), de l'électrode en cuivre vers celle en zinc, il se produirait alors une réaction différente de celle produite lors de la fourniture du courant.

La réaction n'est pas réversible.

### Nature des électrodes et de l'électrolyte

Il existe différents types de piles électriques. Les plus connues et les plus utilisées sont celles au chlorure d'ammonium  $\text{NH}_4 \text{Cl}$ , appelées couramment "éléments ammoniacque" ou "éléments Leclanché" (du nom de leur inventeur). Il existe également des éléments en soude. Dans les 2 cas, l'électrode négative est constituée de zinc et la positive est en carbone, après avoir subi un traitement approprié. Les piles "Leclanché" se conservent très bien. Leurs pertes sont limitées et peuvent se conserver des mois en magasin.

Elles peuvent également être renversées un court moment sans pour cela provoquer des dégâts irréparables.

La dépolarisation se fait par l'air ; il faut donc veiller, lors de la mise en service, à ce que des trous soient formés pour le passage de l'air (dévisser les bouchons prévus à cet effet).

La pile ou soude est également dépolarisée à l'air ; elle est toutefois très fragile et ne peut être renversée, car la perte de liquide rendrait la pile inutilisable.

## 2. Accumulateurs

Les accumulateurs sont des piles réversibles. Cela veut dire que la réaction chimique, transformée en énergie électrique, peut-être retransformée en énergie chimique. Celle-ci peut à nouveau être retransformée en énergie électrique.

## Sortes d'accumulateurs

- Suivant la nature, par ex. :
  - accumulateurs au plomb
  - accumulateurs alcalins, tels CaNi ou Fe Ni
- Suivant l'utilisation, par ex. :
  - accumulateurs de démarrage ;
  - accumulateurs de traction ;
  - accumulateurs fixes.

L'utilisation et la nature de l'accumulateur influenceront fortement ses caractéristiques électriques et de fabrication.

### A. Accumulateurs au plomb

#### Fonctionnement

Considérons un bac en matériau isolant, rempli d'acide sulfurique dilué  $H_2SO_4$ .

Plongeons-y deux électrodes, l'une en plomb (pb) et l'autre en peroxyde de plomb ( $PbO_2$ ). Relions maintenant ces deux plaques par une résistance ; nous voyons qu'un courant y circule pendant un certain temps. L'élément se décharge.

Pendant la décharge, le peroxyde de plomb, qui travaille comme dépolarisant, s'unit avec l'acide sulfurique pour former du sulfate de plomb, lequel recouvre l'anode (électrode +) ; le plomb de la cathode (électrode -) est également attaqué par l'acide sulfurique la cathode se recouvre aussi de sulfate de plomb. Celui-ci a une couleur blanchâtre.

Si nous rechargeons ensuite l'élément, les réactions inverses se produisent : l'anode se recouvre de peroxyde de plomb, tandis qu'à la cathode le plomb est régénéré ; le sulfate de plomb disparaît.

De cette manière, on peut soumettre l'accumulateur à de nombreuses charges et décharges successives.

#### Capacité

La quantité d'énergie électrique qu'une batterie peut fournir s'appelle la capacité. On exprime cette quantité en Ampère-heures.

Pour augmenter la capacité d'un élément, il suffit de prévoir des plaques plus grandes et plus nombreuses.

De ce fait, la masse totale de matière active sur les plaques augmente, ce qui permet à plus d'énergie chimique d'être transformée.

Les plaques sont généralement placées en parallèle. La capacité d'un accumulateur au plomb est très peu liée à la manière de décharger ; pour une raison d'uniformité, la capacité est donnée pour une décharge d'une durée de 20 heures.

$c = I \times t$  (Ampère-heures).

### Propriétés de l'accumulateur au plomb.

#### La température :

L'augmentation de la température favorise une augmentation de la capacité ; on admet que celle-ci croît de 1 % par degré centigrade au-dessus de 25° C.

La modification de la capacité avec la température a aussi une influence sur le comportement de la batterie par temps froid ; quand la température remonte, la capacité de la batterie réaugmente.

La température a encore une plus grande influence sur les batteries moins chargées. Vu que la teneur d'acide est plus faible, il existe un risque<sup>de</sup> gel lors de basses températures.

#### Le vieillissement :

La transformation chimique qui se produit lors de chaque charge et décharge modifie la qualité des électrodes. Les plaques négatives perdent lentement leur matière active.

Les plaques positives sont de plus en plus attaquées par l'acide ; elles deviennent de plus en plus poreuses, ce qui, au début, fait peut-être augmenter la capacité, mais après quelque temps, la matière active s'effrite, ce qui fait diminuer la capacité.

#### Charge nulle :

Une batterie qui est stockée longtemps se déchargera lentement. Si elle n'est pas rechargée, il existe un risque de détérioration définitive de la batterie.

En effet, la formation de cristaux de  $\text{SO}_4$  dépend de la vitesse de réaction. Si cette vitesse est faible, les cristaux auront le temps de croître. Si nous voulons recharger cet accu, cette vitesse sera trop grande pour éliminer les cristaux. Les plaques resteront sulfatées. La capacité diminue fortement.

Si nous voulons conserver une batterie en bon état, il est indispensable d'appliquer une charge à intervalles réguliers. Ainsi, les cristaux de sulfate déjà formés s'élimineront et la batterie restera en bon état.

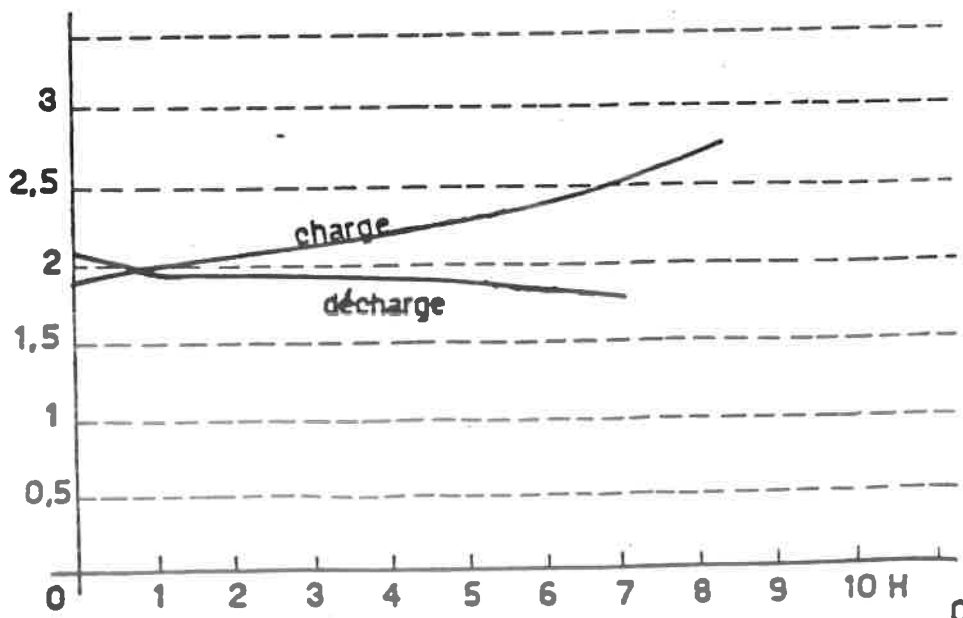
La batterie au plomb doit être placée dans un bac isolant ; de ce fait, la robustesse est parfois insuffisante. Avec le développement des matières synthétiques, comme par exemple le polypropylène, cet inconvénient (de l'ébonite) a fortement diminué. Avec l'application de ces matières, le poids des batteries au plomb est également tombé ; pour le même poids, on peut ainsi obtenir une plus grande capacité.

#### Caractéristiques de charge des accumulateurs au plomb.

Un accumulateur est chargé lorsque la tension aux bornes reste constante, ainsi que la densité de l'électrolyte. Lorsque cette situation est obtenue, l'accumulateur ne peut plus continuer à être chargé. Le courant qui passe alors est une pure perte d'énergie et provoque l'électrolyse dans l'élément, ce qui veut dire que l'eau est transformée en oxygène et hydrogène. La formation de cet hydrogène est dangereuse, car il est très explosif dans un espace limité et à une certaine concentration.

Quand l'élément fournit son intensité normale pendant la décharge, on admet que la décharge est terminée lorsque la tension a baissé jusqu'à 1,85 V (fig. 5.6). Si après la décharge, on procède à la recharge, nous voyons que la tension aux bornes augmente très vite jusqu'à 2,1 V, ensuite lentement jusqu'à 2,3 V pour alors augmenter très vite jusqu'à 2,6 à 2,7 V, quand commence le bouillonnement.

Fig. 5.6



La différence de tension lors de la charge et de la décharge trouve son origine dans la chute de tension chimique dans la résistance interne  $R_i$ .

Lors de la charge :  $U = E + R_i \cdot I$

Lors de la décharge :  $U = E - R_i \cdot I$ .

avec  $U =$  tension aux bornes

$E =$  tension de l'élément

$R_i \cdot I =$  la chute de tension dans l'élément.

La courbe de décharge d'une batterie dépend fortement de l'intensité de décharge. Les courbes ci-après sont prises à courant constant. Au plus la décharge est rapide, au plus vite la tension de décharge sera atteinte (fig.5.7). La capacité de l'élément est donc plus faible suivant que la vitesse de décharge est plus grande.

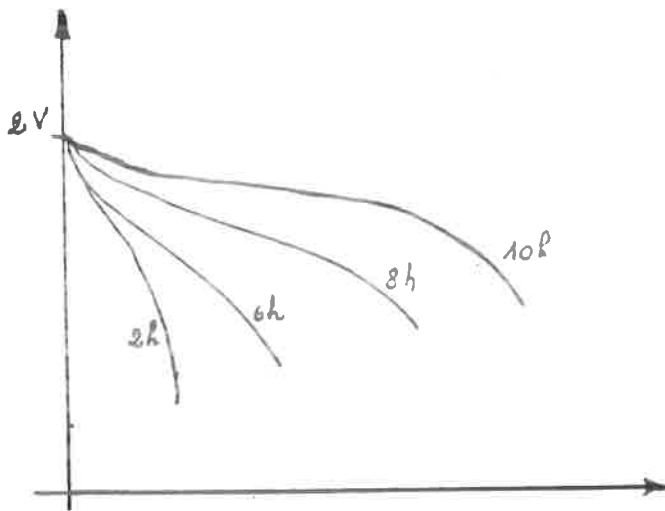


Fig. 5.7

La tension critique pour laquelle la décharge doit être considérée comme terminée, sans danger de sulfatation, n'est pas exactement définie.

On admet que c'est le point où la caractéristique augmente vite. Partant des courbes, on peut admettre que pour une plus grande vitesse, la tension de décharge sera plus petite. Cela prouve que l'énergie chimique ne peut être fournie immédiatement, vu que le fonctionnement repose sur une réaction chimique. Cette réaction exige un certain temps.

### Résistance interne d'un élément

De ce qui précède, on peut conclure que la résistance interne d'un élément est d'autant plus petite que la capacité est plus grande.

En effet, pour obtenir une plus grande capacité, on raccorde plusieurs plaques en parallèle et on augmente la surface de contact.

La résistance interne d'un élément sera donc très faible ( $\approx 0,001$  Ohm).

Quand la température augmente, la résistance interne diminue. D'autre part, celle-ci augmentera lors de la décharge et surtout à la fin de la décharge.

### Batterie d'accumulateurs

Un accumulateur fournit seulement une f.e.m. de  $\pm 2$  V. Quand on veut obtenir une tension industrielle de 6 V - 12V - 24 V - 72 V, on doit raccorder plusieurs éléments en série. Un tel groupe s'appelle une batterie.

### Mise en parallèle des batteries au plomb.

On peut effectuer des raccordements mixtes pour augmenter d'une part la tension (mise en série), et d'autre part la capacité (mise en parallèle). Quand des éléments sont raccordés en parallèle, on doit veiller à ce que ces éléments aient une même tension et une même résistance interne.

Si un déséquilibre existe, une batterie fournira plus de courant que l'autre, ce qui donnera naissance à des courants de circulation qui peuvent parfois être très grands du fait de la petite résistance interne ; les éléments peuvent ainsi être avariés.

Pour diminuer ces courants de circulation, on placera des liaisons équipotentiellles entre les différents éléments d'une batterie.

## B. Accumulateurs alcalins

On distingue différents types d'accumulateurs alcalins.

### 1. Accumulateur Nickel-Fer (Ni-Fe)

Le type nickel-fer est le type d'origine.

En position de charge complète, l'électrode positive se compose d'oxyde de nickel, et la négative de fer. L'électrolyte est une solution d'hydroxyde de potassium (KOH).

Les réactions chimiques complètes sont très compliquées, mais cela revient à ce que, lors de la décharge, la matière active de l'électrode positive est transformée en un oxyde de nickel plus faible, tandis que l'électrode négative est oxydée.

L'électrolyte KOH reste inchangé ; de ce fait, la densité ne varie pas. L'électrolyte sert uniquement de "moyen de transport" des éléments chimiques (oxygène O), qui passent d'une plaque à l'autre.

## 2. Accumulateur cadmium-Nickel (cd-Ni)

Dans l'accumulateur Cd-Ni, la réaction chimique se passe comme dans le type Ni-Fe. Pendant la décharge, l'oxyde de nickel de la plaque positive sera désoxydée, tandis que la plaque négative en cadmium sera oxydée. L'électrolyte est également au KOH, dont la densité est invariable.

### Courbe de charge et de décharge de l'accumulateur alcalin

#### a) Courbe de charge (fig. 5.8)

La figure montre la modification de la tension aux bornes en fonction du temps pendant la charge. Les différentes courbes sont dessinées avec un autre courant de charge.

Nous remarquons une forte variation de la tension pendant la charge.

#### b) Courbe de décharge (fig. 5.8)

La capacité d'une batterie est indépendante du courant de décharge. La caractéristique montre cependant que la tension finale est d'autant plus limitée que le courant de décharge est plus important.

Cela n'est pas un grand avantage, puisque le nombre d'ampère-heures à basse tension est de peu d'utilité.

### Comparaison entre l'accumulateur alcalin et au plomb

#### a) Point de vue constructif

- Les batteries alcalines sont mécaniquement plus résistantes, vu que les bacs sont constitués en acier, alors que les bacs des batteries au plomb sont en matière synthétique.
- L'électrolyte des batteries alcalines est sans danger (KOH), comparé à l' $H_2SO_4$  des batteries au plomb, avec pour conséquence que les exigences de stockage et d'entretien sont plus avantageuses pour la batterie alcaline.

#### b) Point de vue économique

Une batterie alcaline est très chère, environ 10 fois le prix d'une batterie au plomb. D'autre part, la durée de vie d'une batterie alcaline est plus élevée (10 ans).

Une batterie au plomb, utilisée comme batterie de démarrage pour gros moteurs diesel, a seulement une durée de vie de 2 à 3 ans. Une batterie d'éclairage peut cependant rester en service jusqu'à 5 ans.

L'entretien courant de la batterie alcaline est plus simple, mais elle doit être lavée régulièrement à cause de la carbonisation des plaques. Le lavage est une opération très longue et donc très coûteuse.

Le développement récent dans la technique des batteries au plomb a permis de fabriquer des batteries nécessitant peu d'entretien ; par l'ajoute de certaines matières, l'utilisation de l'eau a fortement diminué.

Il y a même sur le marché des batteries sans entretien ; en théorie, aucun entretien ne doit y être effectué. Certains types sont même construits de telle sorte qu'il ne faut y faire aucune ajoute d'eau.

Une régénération d'une batterie au plomb, analogue aux batteries alcalines, n'est pas possible. Lorsque ces plaques sont effritées, elles doivent être tout simplement remplacées, ce qui, vu leur prix limité, n'est pas un problème insurmontable.

Le stockage des batteries alcalines demande moins de précautions. Elles peuvent rester des mois sans surveillance. Les batteries au plomb par contre, doivent ou bien être stockées dans un endroit sec, ou bien être rechargées périodiquement pour éviter que ne subsistent des dommages.

#### c) Point de vue électrique

L'accumulateur alcalin a comme inconvénient sa faible f.e.m., de sorte que le nombre d'éléments nécessaire pour obtenir une tension industrielle est nettement plus élevé.

L'accumulateur alcalin est plus résistant que l'accumulateur au plomb. Il résiste mieux aux court-circuits. La capacité est indépendante du courant de décharge. La capacité de l'accumulateur au plomb par contre dépend fortement du régime de décharge, mais la baisse de tension pendant la décharge est plus limitée (1,8 à 2 V) comparée à celle de l'accumulateur alcalin (1 à 1,4 V).

La densité de l'électrolyte reste constante dans la batterie alcaline, de sorte que la mesure de la densité, qui est si utile pour les batteries au plomb, ne donne aucune indication quant à la charge de la batterie alcaline.

## CONCLUSIONS

Le choix du type de batterie dépend de différents facteurs :

- Le but de la batterie.

La batterie peut être utilisée comme :

- batterie de démarrage pour le matériel roulant, les véhicules routiers et les bateaux ;
  - source d'énergie de secours dans les centrales électriques, les hôpitaux, etc...;
  - éclairage des installations éloignées ;
  - source de tension dans les appareils portatifs, tels les lampes de secours , les lampes de mine, les appareils photo, etc...;
  - comme source de traction pour certains appareils (par ex. engins de manutention).
- Le personnel disponible pour l'entretien et la réparation.
- Les fonds disponibles.
- La capacité nécessaire ; par ex. pour de petits engins, on va de 20 à 80 Ah, et pour de plus gros jusqu'à 320 Ah pour des batteries de démarrage. Pour des batteries de traction, on a encore besoin d'une plus grande capacité.

BATTERIES ALCALINES  
 COURBES APPROCHEES DE LA TENSION POUR LA CHARGE ET LA DECHARGE A DES INTENSITES DIFFERENTES, DONNEES EN FONCTION  
 DE C

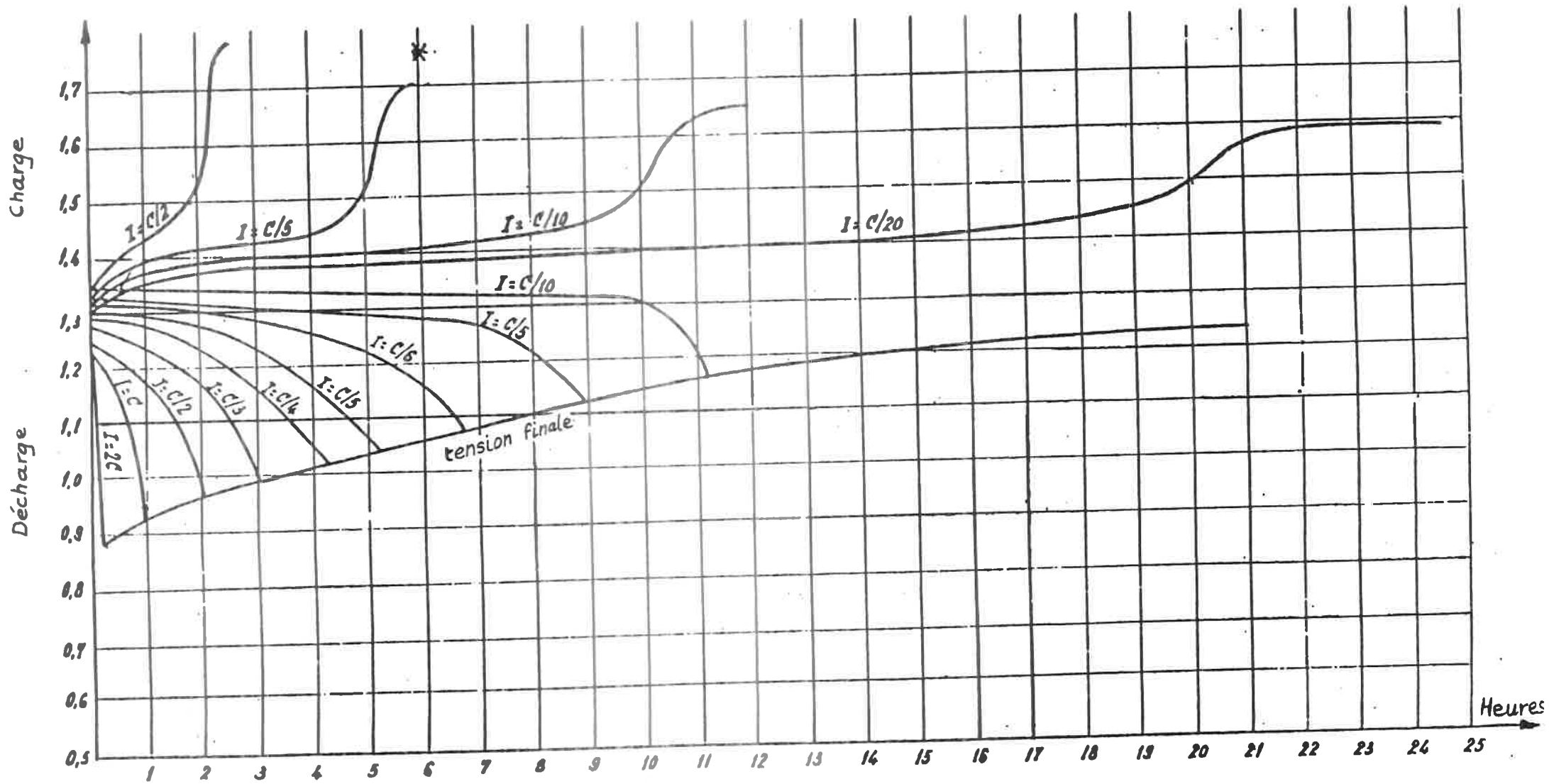


Fig. 5.8

C = capacité nominale



Cours 1204

Chapitre VI - Dynamos.

1. Généralités.

Une dynamo est une machine qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique, et s'appuie sur les lois de l'induction.

Elle comprend les organes principaux suivants :

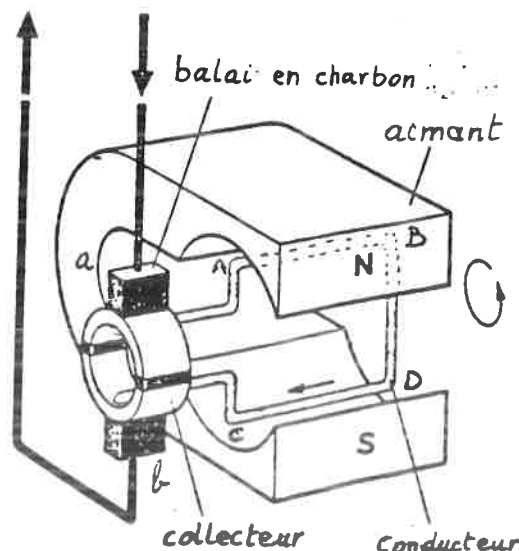
- a) Un enroulement inducteur pour la création d'un champ magnétique, enroulé sur une ou plusieurs paires de pôles fixés au bâti de la dynamo.
- b) Un induit formé d'un enroulement (isolé au moyen de papier ou de vernis) disposé dans les encoches d'un tambour métallique; l'induit tourne dans le stator.
- c) Un collecteur, formé de lamelles en cuivre isolées les unes des autres et isolées de l'arbre d'induit; le collecteur tourne avec l'induit.
- d) Des balais de contact fixes placés dans des porte-balais et qui captent l'énergie électrique du collecteur. Il y a une ou plusieurs rangées de balais; chaque rangée comprend en certain nombre de balais placés en parallèle. Les balais sont pressés contre le collecteur au moyen de ressorts.

Principe de fonctionnement du collecteur.

Considérons une spire ABDC (fig.6-1) qui tourne autour d'un axe horizontal et qui est reliée à 2 demi-cylindres en cuivre isolés l'un par rapport à l'autre.

Deux balais fixes frottent contre les demi-cylindres et sont reliés à une résistance externe fixe.

Fig. 6.1



2.

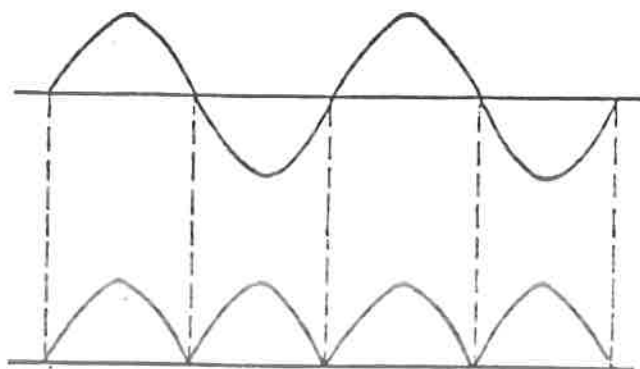
Nous avons déjà vu que dans ces conditions un courant naît dans les branches AB et CD, dirigé de A vers B, lorsque la branche AB occupe une position située au dessus du plan horizontal qui passe par l'axe de rotation; dans cette position, le courant dans CD va de D vers C.

Quand par contre la branche AB est située sous le plan horizontal passant par l'axe de rotation, le courant dans AB va de B vers A et dans CD, de C vers D.

Si nous considérons le courant qui passe dans la résistance R, nous constatons que ce courant conserve la même direction; on l'appelle courant continu.

Dans les branches AB, CD et BD circule un courant alternatif (fig. 6-2), tandis que dans la résistance R circule un courant de même sens qui a la forme de la fig. 6-3 et qui, bien qu'ayant le même sens, est loin d'être constant.

Fig. 6.2  
et 6.3



Nous pourrions aussi considérer 2 spires décalées l'une par rapport à l'autre de  $90^\circ$ , et reliées à 4 quarts de cylindre sur lesquels frottent 2 balais.

Les liaisons entre les spires sont effectuées de telle sorte que les tensions induites s'ajoutent l'une à l'autre.

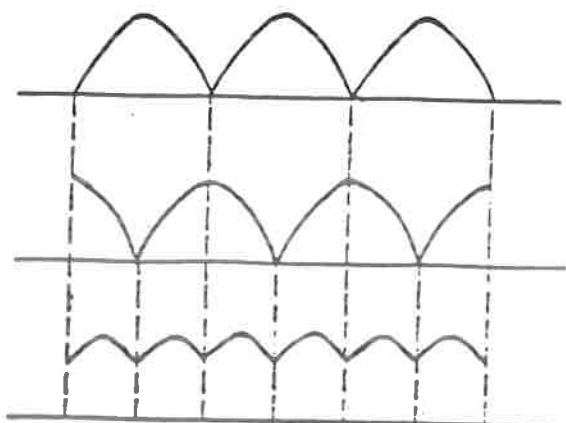
La tension dans chaque spire aurait respectivement la forme de la fig. 6-4 pour la 1ère spire et de la fig. 6-5 pour la 2e spire.

La tension totale qui envoie un courant dans la

résistance R est égale à la somme des 2 tensions et est donnée par la fig. 6-6 : elle est donc relativement constante.

On pourrait encore améliorer l'uniformité de la tension en augmentant le nombre de spires et en divisant plus le collecteur.

Fig. 6.4  
à 6.6



Il faut toutefois noter que le courant d'une dynamo n'est jamais tout à fait constant; pour cela il faut avoir recours à des machines spéciales ou à des batteries d'accumulateur.

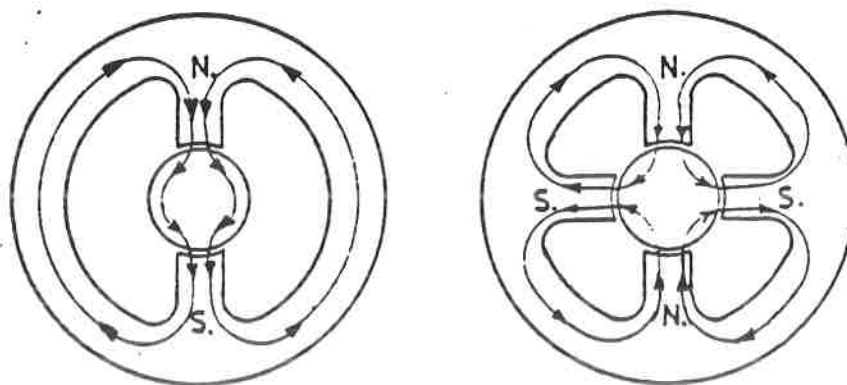
### Pôles.

Un pôle est formé d'un moyen métallique sur lequel est enroulé une bobine.

On distingue le pôle Nord et le pôle Sud.

Le pôle Nord crée un champ qui pénètre dans l'induit, tandis que le pôle Sud crée un champ qui sort de l'induit.

Fig. 6.7  
et 6.8



Le fonctionnement simultané du pôle Nord et du pôle Sud produit un champ total qui traverse l'induit, les pôles et le bâti de la dynamo. La fig. 6-7 représente donc le champ magnétique dans une dynamo bipolaire, et la fig. 6-8 le champ dans une dynamo quadripolaire.

Le sens de l'enroulement et celui du courant doivent être tels que chaque enroulement produit un champ dans la direction indiquée.

La règle du tire-bouchon permet toutefois facilement d'inverser le sens du champ dans un enroulement : il suffit en effet pour cela d'inverser le sens du courant.

Tous les pôles Nord et Sud d'une dynamo seront donc identiques; seul le sens du courant permettra de distinguer les pôles Nord des pôles Sud.

- On pourrait naturellement aussi s'imaginer une dynamo avec un seul enroulement inducteur : de telles dynamos "unipolaires" ne sont pratiquement pas utilisées; il est beaucoup plus facile de produire un champ très important au moyen de plusieurs, pôles différents qu'au moyen d'un seul grand pôle avec beaucoup de spires.

4.

- Le bâti de la dynamo, qui sert à relier les pôles entre eux, doit être constitué d'un métal magnétique (acier coulé par exemple).

Les enroulements qui produisent le champ sont répartis en 4 catégories :

a) Excitation indépendante.

Le courant d'excitation est fourni par une autre dynamo, mécaniquement accouplée ou non à la dynamo.

b) Enroulement série.

Cet enroulement consiste de quelques spires de gros fil parcouru par le courant total de la dynamo.

c) Enroulement shunt.

Cet enroulement est parcouru par un courant qui dépend seulement de la tension aux bornes de la dynamo et qui est donc indépendant du courant débité, pour autant que la tension de la dynamo reste constante. Cet enroulement est constitué d'un grand nombre de spires de fil fin.

d) Enroulement compound

Il se compose d'un enroulement série et d'un enroulement shunt.

Ces 4 méthodes d'excitation permettent d'obtenir des caractéristiques très divergentes.

Induit - enroulement.

L'induit est constitué d'un paquet de tôles, dont celles-ci sont isolées les unes des autres, et qui présente des encoches parallèles à l'axe de rotation et réparties également sur tout le pourtour de l'induit.

L'enroulement de l'induit consiste en des barres placées dans les encoches de l'induit et reliées entre elles de façon à former un circuit fermé.

Parfois les barres sont reliées de telle façon qu'elles forment plusieurs circuits fermés.

Les liaisons entre les barres sont généralement effectuées de la manière suivante : partant d'une barre qui est supposée située dans l'axe d'un pôle (par ex. le pôle Nord), cette barre est reliée à une autre située sous un pôle de nom contraire (dans ce cas un pôle Sud ).

La distance entre les 2 barres s'appelle le "pas magnétique".

On distingue 3 sortes d'enroulement :

a) L'enroulement spirale.

C'est l'enroulement de la dynamo gramme, qui n'est plus utilisé. Les barres sont disposées sur l'induit et reviennent à l'intérieur de l'anneau magnétique.

L'induit se compose donc d'un tube sur lequel les conducteurs actifs sont situés du côté extérieur et les liaisons du côté intérieur.

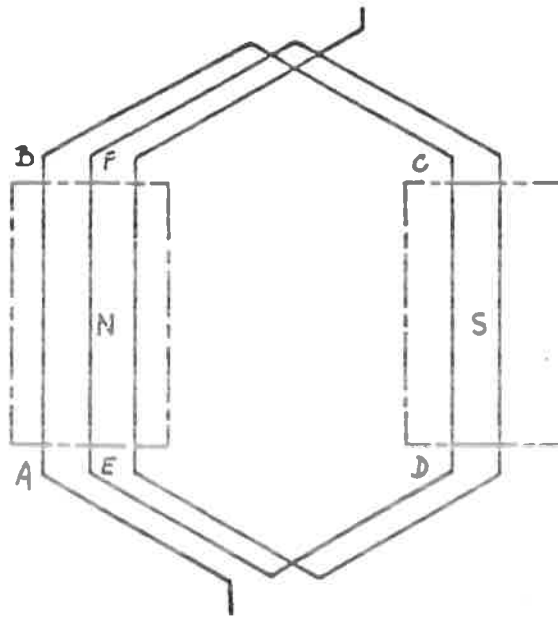
Cet enroulement a comme inconvénient que, pour un conducteur actif, il faut utiliser deux barres en cuivre de même section, ce qui est très désavantageux.

b) L'enroulement imbriqué (fig. 6-9)

Comme représenté sur la figure, un conducteur actif AB est relié, au retour, avec le conducteur actif CD situé sous le pôle suivant de non différent.

Ce deuxième conducteur CD est relié avec le conducteur EF situé à nouveau sous le même pôle que le conducteur AB. Cet enroulement est "imbriqué".

Fig. 6.9



c) L'enroulement ondulé (Fig.6-10)

La différence avec l'enroulement imbriqué est qu'il ne revient pas toujours sous le même pôle, mais bien sous le pôle suivant. Cet enroulement présente la forme d'une ondulation.

6.

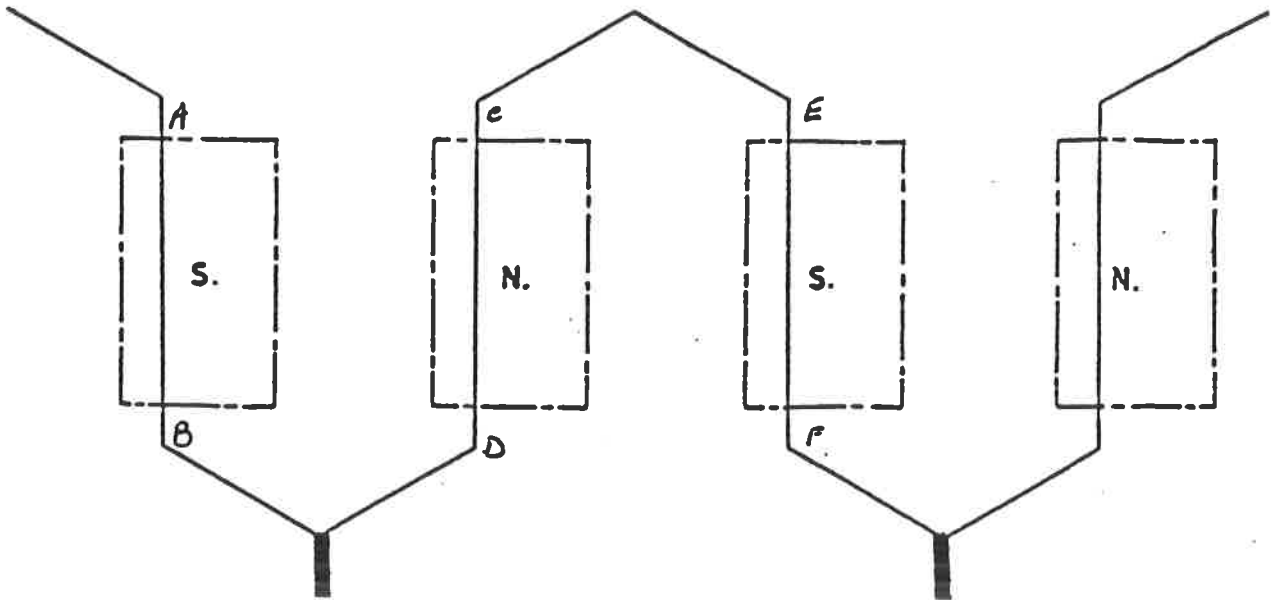


Fig. 6.10

2. Production de la force électro-motrice (f.é.m)

a) Calcul de la f.é.m induite.

Un conducteur qui se déplace dans un champ magnétique donne naissance à une f.é.m.

Recherchons la valeur moyenne de cette f.é.m. pendant le passage du conducteur devant un pôle.

soit  $N$  le nombre de tours par minute  
 $p$  le nombre de paires de pôles.

Le temps nécessaire pour passer devant un pôle est :

$$T = \frac{1}{2p \frac{N}{60}}$$

La f.é.m. dans un conducteur est  $e = Blv$ .

La valeur moyenne de la f.é.m dans ce conducteur est

$$\frac{1}{T} \times Blv \times \Delta t = \frac{1}{T} \times Bl \frac{\Delta x}{\Delta t} \times \Delta t = \frac{1}{T} \times Bl \times \Delta x = \frac{\emptyset}{T}$$

$$l \times \Delta x = s$$

$$\frac{\emptyset}{T} = 2p \cdot \frac{N}{60} \cdot \emptyset$$

Vu que dans chaque branche il y a  $\frac{n}{2b}$  conducteur (b étant le nombre de paires de voies d'enroulement). la f.é.m totale sera

$$E = \frac{n}{2b} \cdot 2p \cdot \frac{N}{60} \cdot \emptyset = \boxed{n \cdot \frac{p}{b} \cdot \frac{N}{60} \cdot \emptyset \text{ (Volt)}}$$

Cette formule est la formule fondamentale qui est indépendante du type d'excitation. Elle est valable aussi bien pour les dynamos que pour les moteurs à courant continu.

b) Réaction d'induit.

Quand l'induit de la dynamo tourne dans un champ magnétique, une f.é.m est induite dans les conducteurs et est disponible aux bornes.

Raccordons maintenant ces bornes à une résistance; un courant y circulera.

Ce même courant traversera les conducteurs de l'induit; ce courant donnera également naissance à un champ magnétique autour de ces conducteurs.

Le sens des lignes de force est donné par la règle du tire-bouchon.

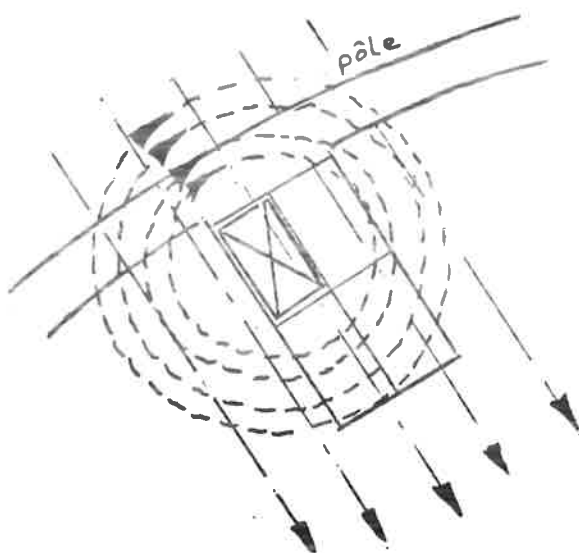


Fig. 6.11

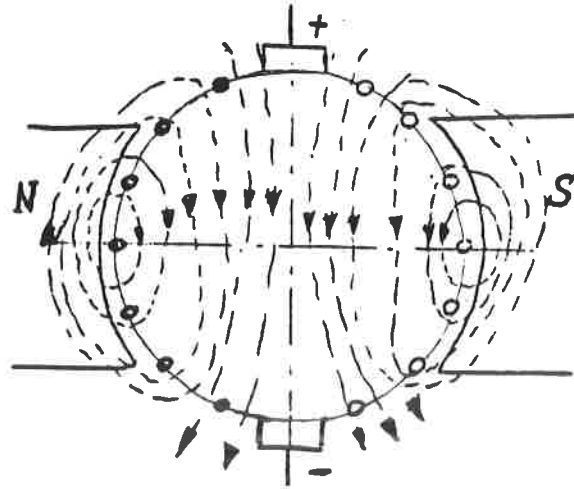
Etant donné que ces lignes de force décrivent des cercles autour des conducteurs (fig. 6-11) ce flux supplémentaire s'additionnera une fois et se soustraira une fois au flux principal.

A première vue, on pourrait penser que le flux total est inchangé. Ce serait en effet vrai si la machine n'était pas saturée.

Cependant, la dynamo est pratiquement toujours saturée et, dans ce cas, une diminution de flux s'obtient plus facilement qu'une augmentation; l'effet global du courant se traduira donc par une diminution du flux et donc de la f.é.m.

Cet effet se produira pour les différents conducteurs situés sous un pôle, comme représenté à la fig. 6-12. Les conducteurs noirs représentent un courant rentrant et les blancs un courant sortant.

Fig. 6.12



Par suite du flux provoqué par le courant au travers des conducteurs, la représentation totale du flux change.

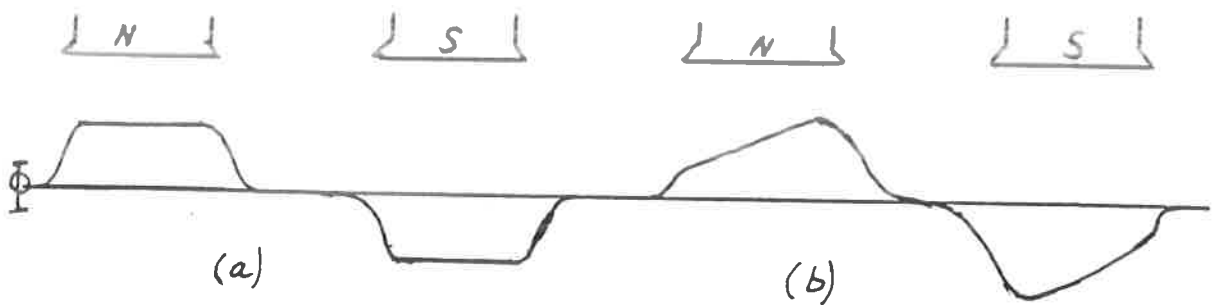


Fig. 6.13

En effet, la fig. 6.13. a

- montre la répartition du flux sur le pourtour lorsque la charge est nulle  
tandis que la fig. 6.13. b

- donne la répartition du flux lorsque la même dynamo débite sur une charge.

Moyens de diminuer la réaction d'induit.

- a) Le principal moyen pour diminuer la réaction d'induit consiste à placer un enroulement de compensation à l'intérieur des pôles.

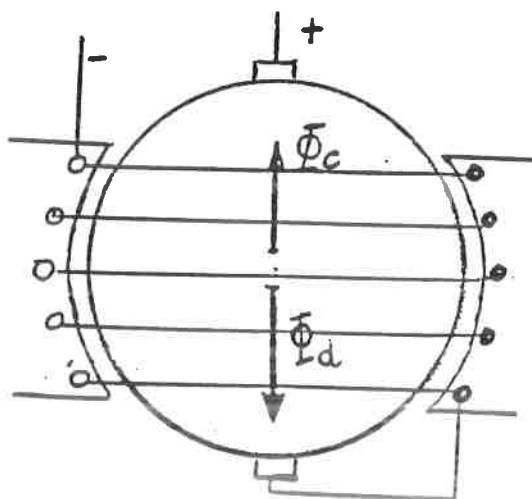


Fig. 6.14

La fig. 6 14 montre cet enroulement pour une machine bipolaire.

Cet enroulement est parcouru par le courant d'induit et est tel qu'il crée un flux  $\Phi_c$  opposé au flux transversal  $\Phi_d$

- b) On rendra le flux polaire aussi élevé que possible, de sorte que la f.e.m. sera obtenue avec un nombre minimum de conducteurs.  
Le flux de l'induit sera relativement faible.  
Cela a cependant comme inconvénient de rendre le courant d'excitation trop élevé si la saturation est exagérée.
- c) Nous avons vu que la réaction d'induit provoque une déformation de la répartition du flux sur le pourtour.  
Les lignes de force se concentrent aux extrémités des cornes polaires.  
Afin d'éviter ce phénomène, on peut augmenter l'entrefer à ces endroits, ce qui augmente la réactance et rend la densité de flux plus ou moins constante.



COURS 1204

3. Caractéristiques des différents types de dynamo

Pour mieux comprendre le fonctionnement des dynamos, on peut dessiner les différentes courbes caractéristiques; on peut en distinguer trois.

a) Caractéristique magnétique

C'est le diagramme de la f.é.m. induite en fonction du courant d'excitation, lorsque la dynamo ne débite pas; celle-ci doit donc être excitée par une source indépendante. Cette caractéristique représente l'état magnétique de la dynamo.

b) Caractéristique interne

C'est le diagramme de la f.é.m. induite en fonction du courant de charge. La f.é.m. peut être calculée par la formule de la leçon précédente. Le flux n'a cependant plus la même valeur par suite de la réaction d'induit.

c) Caractéristique externe

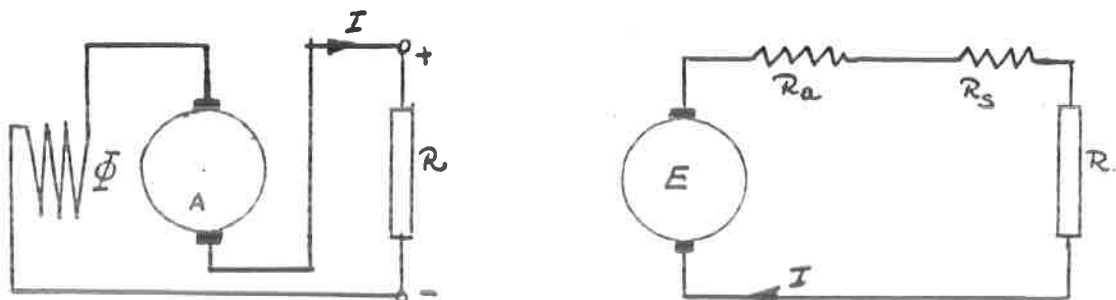
C'est le diagramme de la tension aux bornes de la dynamo en fonction du courant de charge. Nous devons ici tenir compte de la chute de tension dans la résistance interne de la machine.

Etant donné que les caractéristiques diffèrent fortement suivant le type de dynamo, nous les étudierons séparément.

A) Dynamo série

Le schéma de principe est représenté à la fig. 7.1.

Fig. 7.1 et 7.2



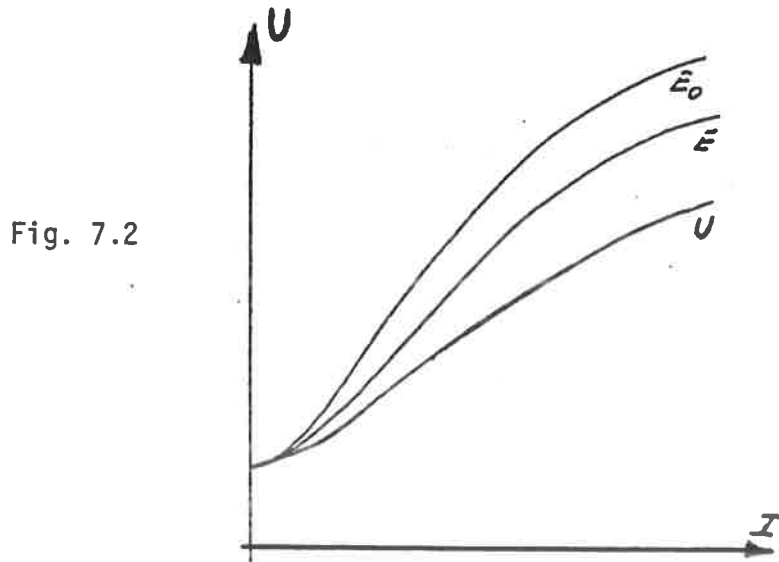
Le schéma équivalent est représenté à la fig. 7.2.

$R_s$  = résistance ohmique de l'excitation série.

$R_a$  = résistance ohmique de l'induit.

Dans le cas d'une dynamo série, nous pouvons représenter les 3 caractéristiques sur un même diagramme, étant donné que le courant de charge est égal au courant d'excitation.

La fig. 7.3. représente les caractéristiques.



$E_0$  = caractéristique magnétique

$E$  = caractéristique interne

$U$  = caractéristique externe.

La différence entre  $E_u$  et  $E$  est due à la réaction d'induit.

La différence entre  $E$  et  $U$  est due à la chute de tension dans l'induit et l'inducteur.

$$U = E - I (R_a + R_s).$$

Autres propriétés de la dynamo série.

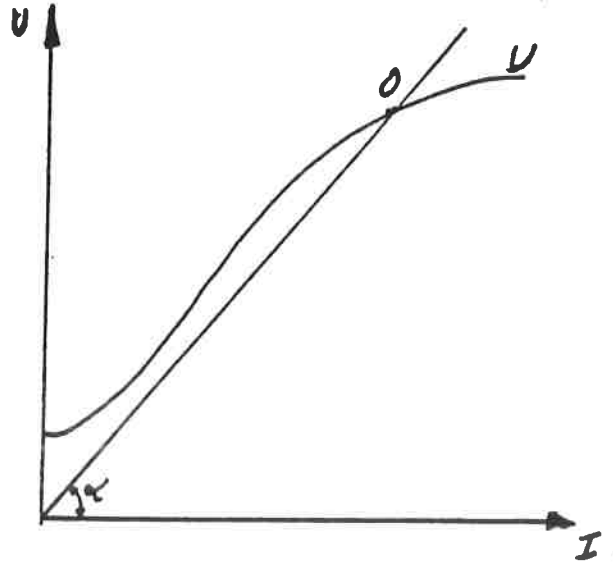
Augmentation de la tension

Quand la dynamo n'est pas chargée ( $I = 0$ ), il y a une faible tension aux bornes.

Si on ferme le circuit extérieur, le faible courant qui y circulera produira un flux qui, s'il est bien dirigé renforcera le magnétisme rémanent; la tension aux bornes augmentera; le courant de charge augmentera donc.

La tension et le courant augmentent progressivement jusqu'à un point d'équilibre situé à l'intersection  $O$  de la caractéristique externe et de la droite issue de l'origine et dont la pente est déterminée par la grandeur de la résistance de charge  $R$  (fig. 7.4).

Fig. 7.4



Quand la résistance de charge varie, le point de fonctionnement se déplacera sur la courbe, par le fait que la pente (angle  $\alpha$ ) de la droite issue de l'origine varie.

#### Court\_circuit\_d'une\_dynamo\_série

Si la résistance de charge est très petite ( $R \rightarrow 0$ ), on obtient une très grande intensité (intersection de la caractéristique avec la droite).

On obtiendra alors des intensités inadmissibles qui endommageront la dynamo.

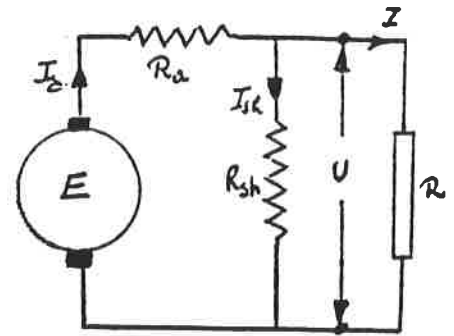
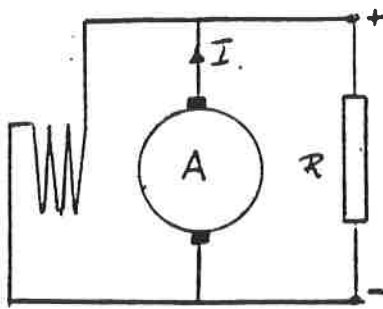
Une dynamo série doit toujours être équipée d'une protection à courant maximum.

#### B) Dynamo shunt

La dynamo shunt possède un inducteur placé en parallèle avec le circuit externe, et qui est donc soumis à la tension totale.

Le schéma de principe et le schéma équivalent sont représentés aux fig. 7.5. et 7.6.

Fig. 7.5 et 7.6



La résistance de l'inducteur  $R_{sh}$  est suffisamment élevée pour obtenir une faible intensité (1 à 3 % du courant d'induit).

Par application des lois de KIRCHOFF, nous savons que :

$$I_a = I + I_{sh}$$

$$U = E - R_a \cdot I_a$$

$$I_a = \frac{E}{R_a + \frac{R \times R_{sh}}{R + R_{sh}}}$$

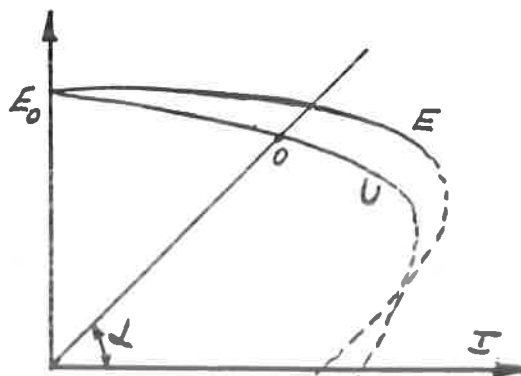
Dans le cas d'une dynamo shunt, nous ne pouvons pas représenter les différentes caractéristiques sur le même graphique, vu que le courant de charge et le courant d'excitation ne sont pas les mêmes.

Pour la détermination de la caractéristique magnétique, l'excitation shunt est alimentée par une source indépendante, tandis qu'aucun courant de charge ne doit circuler.

La caractéristique magnétique a la même forme que pour la dynamo série (courbe  $E_0$ ).

Les caractéristiques de charge (interne et externe) se présentent sous la forme de la fig. 7.7.

Fig. 7.7



A charge nulle, la tension aux bornes E est pratiquement égale à la f.é.m.  $E_0$  parce que la réaction d'induit provoquée par le faible courant d'excitation est négligeable. La tension à charge nulle est déterminée par la résistance du circuit d'excitation.

Si on augmente régulièrement la charge en diminuant la résistance externe, la tension aux bornes variera en fonction de trois phénomènes qui vont dans le même sens :

- a) la réaction d'induit abaissera la f.é.m. induite de  $E_0$  jusqu'à E;
- b) la chute de tension  $RaI$ , par laquelle la tension aux bornes U est plus petite que la f.é.m.;
- c) enfin, la diminution de la tension aux bornes aura pour conséquence une diminution de la f.é.m. E, ce qui provoquera une baisse plus importante de E.

Le dernier phénomène est cumulatif et est très important pour une charge élevée.

Au début, une diminution de R produit une augmentation du courant et une diminution de U; à partir d'une certaine valeur, la diminution de la tension U est si grande que le courant n'augmente plus, mais diminue en même temps que U, pour atteindre une faible valeur lorsque la dynamo est en court-circuit ( $U = 0$ ).

De cette caractéristique, on peut conclure qu'une dynamo shunt peut être court circuitée sans danger si on le fait progressivement; l'induit ne peut en effet être court circuité brutalement, car la réaction d'induit n'aurait pas le temps de modifier le flux dans la machine; le courant atteindrait une valeur exagérée, ce qui produirait de fortes étincelles et même des flammes.

C'est très dangereux pour la préservation du collecteur.

Nous avons vu qu'une dynamo série peut seulement produire la pleine tension lorsque le circuit externe est fermé.

Dans une dynamo shunt par contre, la pleine tension peut être obtenue sans que le circuit externe soit fermé.

En effet, la fermeture de l'induit sur l'inducteur suffit pour faire monter la tension.

Pour obtenir la tension normale, on démarre avec le circuit d'excitation ouvert. Dans cette position, la dynamo produit une petite partie de la tension, correspondant avec le magnétisme rémanent. On ferme alors le circuit excitation. Si on voit la tension baisser, cela signifie que le courant d'excitation s'oppose au magnétisme rémanent.

Il suffit alors d'inverser les connexions relatives de l'induit et de l'inducteur, ce qui peut se faire très facilement en inversant les bornes du circuit d'excitation.

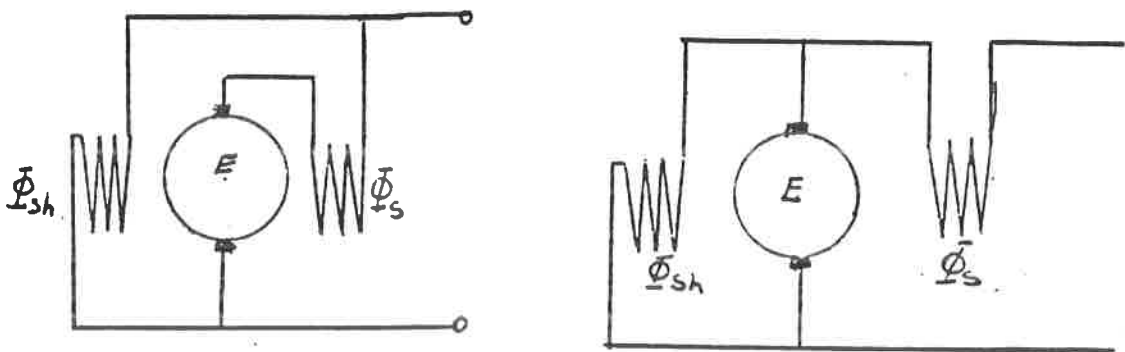
Si les connexions sont correctes, la tension augmentera progressivement jusqu'à la tension  $E_0$  de charge nulle.

### C) Dynamo compound

Dans la dynamo compound, l'excitation se compose d'un enroulement shunt et d'un enroulement série. En pratique, l'enroulement shunt est le plus important, tandis que l'enroulement série fournit seulement un supplément limité de flux.

En principe, il existe 2 variantes de raccordement, le raccordement shunt long (fig. 7.8. a) et le raccordement shunt court (fig. 7.8. b).

Fig. 7.8 a et b



Dans la dynamo compound, le flux shunt est toujours prépondérant.

L'enroulement série sert seulement à obtenir pour la dynamo une caractéristique déterminée. L'enroulement série peut en effet être utilisé pour annuler la diminution de flux due à la réaction d'induit, ce qui maintient le flux et la f.é.m. constants en charge.

La fig. 7.9. montre les différentes caractéristiques externes des différents types de dynamo compound, en comparaison avec la dynamo shunt ordinaire.

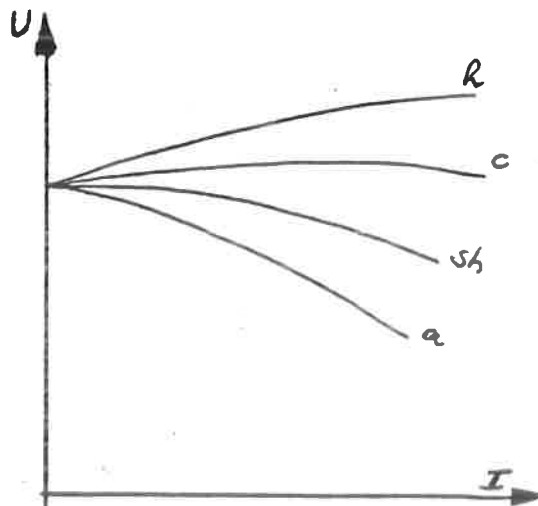


Fig. 7.9

- Courbe Sh : dynamo shunt ordinaire.
- Courbe C : dynamo compound à tension aux bornes constantes.
- Courbe h : dynamo hyper compound, dont la tension aux bornes augmente lorsque la charge augmente. C'est utile lorsque la dynamo doit alimenter de longues lignes avec des chutes de tension relativement importantes.
- Courbe a : dynamo anticomound; le flux série s'oppose ici au flux shunt, de sorte que la tension aux bornes baissera plus fortement pour un courant croissant.

#### 4. Entretien de la dynamo

Le bon entretien de la dynamo est un des moyens les plus importants pour permettre la commutation d'une machine dans de bonnes conditions.

En effet, après un certain temps, différents phénomènes se produiront; ceux-ci doivent être décelés à temps, sans peine de s'aggraver.

Un examen périodique est indispensable.

Nous donnons ici quelques exemples des phénomènes de vieillissement, qui nécessitent un entretien :

- usure du collecteur, de sorte que le mica arrive au niveau de la surface extérieure en cuivre;
- bavures aux lamelles du collecteur;
- ovalité du collecteur;
- diminution de la pression des ressorts des porte-balais;
- usure et bris des balais;
- pénétration d'huile, d'eau et de poussière dans la machine, de sorte qu'un nettoyage est nécessaire.

Si les opérations nécessaires ne sont pas effectuées lorsqu'on constate de telles irrégularités, il se produira des étincelles aux balais, qui s'aggraveront jusqu'à former des flammes tout autour, ce qui mettra rapidement la machine hors service.

#### 5. Rendement de la dynamo

Le rendement d'une dynamo quelconque est égale au rapport entre la puissance fournie et la puissance absorbée.

$$\eta = \frac{P}{P + p} \quad \text{où } P = U \times I \quad \begin{array}{l} U = \text{tension aux bornes} \\ I = \text{courant fourni} \end{array}$$

p = pertes

8.

Les pertes d'une dynamo sont de nature différente :

- a) Les pertes mécaniques, causées par le frottement dans les paliers et sur le collecteur, ainsi que l'énergie mécanique nécessaire à la ventilation, généralement accouplée à l'arbre.  
Les pertes mécaniques augmentent avec la vitesse.
- b) Les pertes magnétiques, causées par l'hystérésis et les courants de Foucault dans le métal de l'induit; pour diminuer ces courants, l'induit est constitué de plaques assemblées les unes aux autres et placées sur un tambour.

La présence des encoches et des dents dans l'induit favorise également la circulation de courants de Foucault dans les pôles; ceux-ci sont également constitués de plaques.

- c) L'effet joule dans l'induit - qui se produit lorsque l'induit fournit un courant - est égal à  $R_a \times I_a$ .
- d) L'effet joule dans l'inducteur
- est égal à  $R_s \times I$  pour une dynamo série;
  - est égal à  $U \times I_{sh}$  ou  $\frac{U^2}{R_{sh}}$  pour une dynamo shunt.

Il ne suffit généralement pas de déterminer le rendement d'une machine à pleine charge.

Dans la plupart des cas, la charge est variable.

Il est donc souhaitable de connaître le rendement pour toutes les charges. Ci-après la courbe du rendement fig. 7.10.

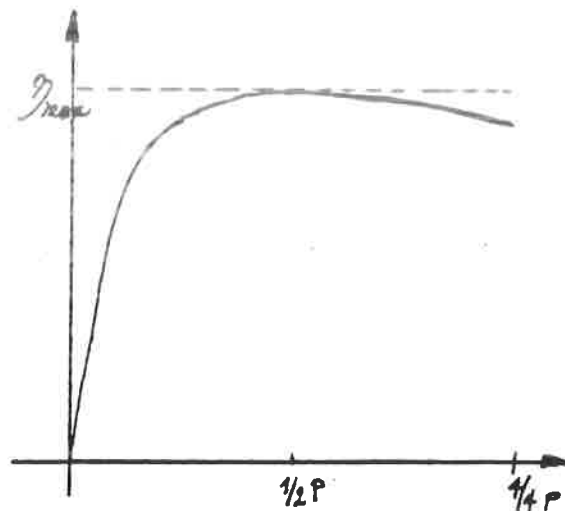


Fig. 7.10

COURS 1204

Chapitre VII - Moteurs à courant continu.

1) Principe.

Quand un conducteur électrique parcouru par un courant  $I$  est placé dans un champ magnétique perpendiculaire au conducteur, celui-ci est soumis à une force. La valeur de la force est proportionnelle à l'induction et à l'intensité.

$$F = B \times I \times l$$

considérons maintenant l'enroulement de la Fig. 8.1, qui peut tourner autour de l'axe  $OO'$ , dans un champ  $B$  ; le conducteur

"a" subit une force vers le bas, tandis que le conducteur "b" subit une force vers le haut. L'ensemble des 2 forces parallèles  $F$  et  $F'$  est un couple.

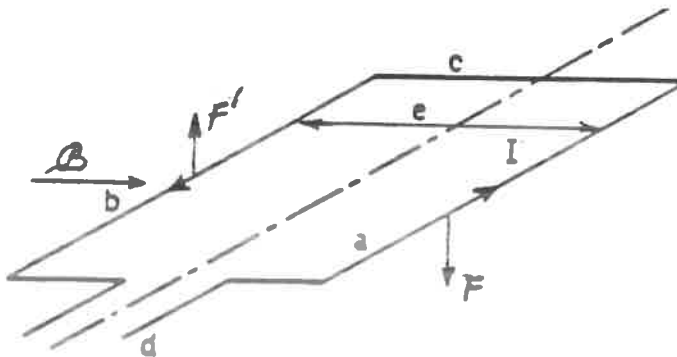


Fig. 8.1

2) Formules générales.

a) Couple d'un moteur à courant continu.

Constructivement, un moteur à courant continu est identique à une dynamo. L'induit consiste également en un enroulement placé sur un tambour, dans un champ magnétique fourni par des pôles situés autour de l'induit. Les principes d'enroulement d'une dynamo sont également applicables à un moteur à courant continu.

L'induit se compose donc d'un certain nombre de conducteurs sur chacun desquels s'exerce une force (Fig. 8.2)

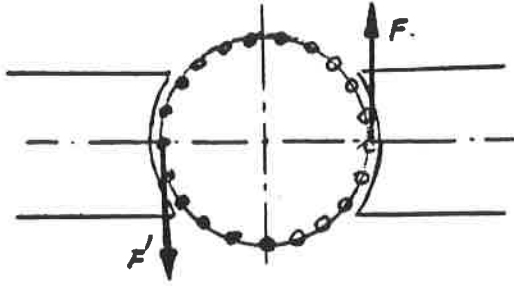


Fig. 8.2

Pour calculer le couple total que développe le moteur, nous devons faire la somme de tous les moments autour de l'axe du moteurs ;

donc :

$$C = \sum (F \cdot r) = r (\sum F) = r \cdot \sum (B \times I \times l)$$

Quand ce couple sera plus grand que le couple résistant, le moteur accélérera.

Le couple d'entraînement peut être calculé en considérant que la puissance électrique absorbée par le moteur, diminuée de l'effet joule dans la machine, est égale à la puissance mécanique :

$$UI - R \cdot I^2 = E \cdot I$$

$$E \cdot I = 2\pi \frac{N}{60} \times C$$

$$2\pi \frac{N}{60} \times C = n \cdot \frac{p}{b} \cdot \emptyset \cdot \frac{N}{60} \times I$$

$$C = \frac{n}{2\pi} \cdot \frac{p}{b} \cdot \emptyset \cdot I \text{ (Nm)}$$

$\frac{n}{2\pi} \times \frac{p}{b}$  est une valeur constante (k) pour un moteur déterminé.

$$C = k \cdot \emptyset \cdot I \text{ (Nm)}$$

#### b) Influence de la rotation sur l'intensité

Lorsque l'induit se déplace sous l'influence du couple, chaque conducteur sera le siège d'une f.é.m. induite, étant donné qu'il se déplace dans un champ magnétique.

Un moteur est donc en même temps une dynamo. La f.é.m; totale est donc, comme nous l'avons déjà vu :

$$E = n \cdot \frac{p}{b} \cdot \emptyset \cdot \frac{N}{60} \text{ (Volts)}$$

Cette f.é.m. est de sens opposé à la tension appliquée ; nous l'appellerons donc "force contre-électromotrice" (f.c.é.m.)

Si U est la tension, nous avons

$$I = \frac{U - E}{R_b} \text{ où } R_b \text{ représente la résistance du circuit.}$$

Si nous appliquerions la tension  $U$  à un moteur à l'arrêt ( $E = 0$ ), nous obtiendrions une intensité  $I = \frac{U}{R_b}$ .

Puisque  $R_b$  est très petit, le courant atteindrait une valeur inadmissible, et les sécurités fonctionneraient. Il est donc nécessaire, lors de la mise sous tension des moteurs :

- soit de placer une résistance en série avec l'induit, afin de limiter le courant lors du démarrage.;
- soit d'abaisser fortement la tension.

La valeur de cette résistance de démarrage " $R$ " est choisie de telle sorte que le courant de démarrage  $I = \frac{U}{R_b + R}$  n'est pas exagéré.

Cette résistance est réglable. Si le moteur tourne plus vite et que  $E$  augmente, la résistance peut être progressivement diminuée, jusqu'à être totalement éliminée pour la vitesse de rotation nominale.

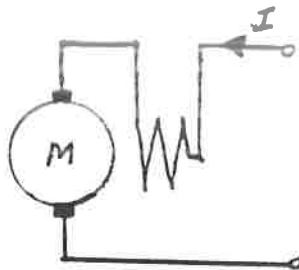
Puisque  $R_b \cdot I = U - E$  et que  $R_b$  est très petit, la f.c.é.m. approchera la valeur de la tension.

### 3) Sortes de moteurs à courant continu.

Comme dans l'étude des dynamos, les moteurs à courant continu peuvent être distingués suivant le type d'excitation du moteur.

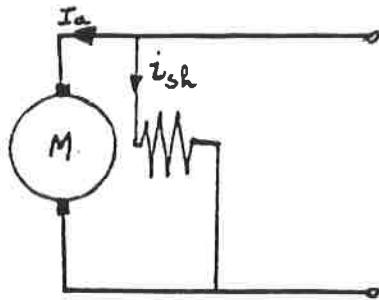
- Moteur\_série : l'enroulement d'excitation est en série avec l'induit et est parcouru par le courant total d'induit (Fig. 8.3)

Fig. 8.3



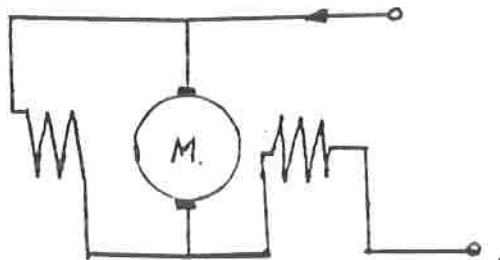
- Moteur\_shunt : l'enroulement inducteur est en parallèle avec l'induit (Fig. 8.4)

Fig. 8.4



- Moteur compound : une partie de l'excitation est fournie par un enroulement shunt, l'autre partie par un enroulement série. (Fig. 8.5)

Fig. 8.5



#### 4) Caractéristiques des moteurs à courant continu.

Le fonctionnement des moteurs à courant continu peut être représenté par les courbes caractéristiques suivantes :

- caractéristiques de la vitesse en fonction du courant d'induit ;
- caractéristiques du couple en fonction du courant d'induit
- caractéristiques du couple en fonction de la vitesse.

Ces caractéristiques seront traitées séparément par type de moteur, ainsi que d'autres propriétés qui sont importantes pour l'étude du type de moteur (réglage de la vitesse - inversion - accélération - ...).

##### A. Propriétés du moteur série.

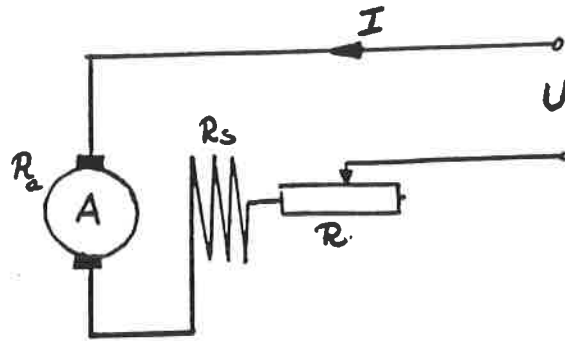
Le schéma d'un moteur série est donné à la Fig. 8.6.

Soit :  $R_a$  : résistance de l'induit  
 $R_s$  : résistance de l'inducteur  
 $U$  : tension aux bornes  
 $e$  : f.c.é.m.  
 $I$  : courant absorbé.

$$I = \frac{U - e}{R_a + R_s} \text{ lorsque le moteur tourne à vitesse nominale}$$

$$I = \frac{U}{R + R_a + R_s} \text{ lors du démarrage}$$

Fig. 8.6

a) Caractéristiques.

Comme nous l'avons vu, le couple d'un moteur à courant continu est égal à :

$$C = \frac{n}{2\pi} \times \frac{p}{b} \times \emptyset \times I \text{ (Nm)}$$

Il s'en suit que, si la machine n'était pas saturée ( $\emptyset$  proportionnel à  $I$ ), le couple serait proportionnel au carré du courant.

Cette relation n'est valable que pour des courant relativement faibles. Pour des intensités plus importantes, la saturation a pour conséquence que le couple augmente moins vite que le carré du courant, mais augmente tout de même sensiblement.

A faible vitesse, le courant est très important et le couple sera donc également très grand.

On peut dire que le moteur série a un couple élevé au démarrage. La Fig. 8.7 (a) représente la caractéristique "Couple-Intensité"

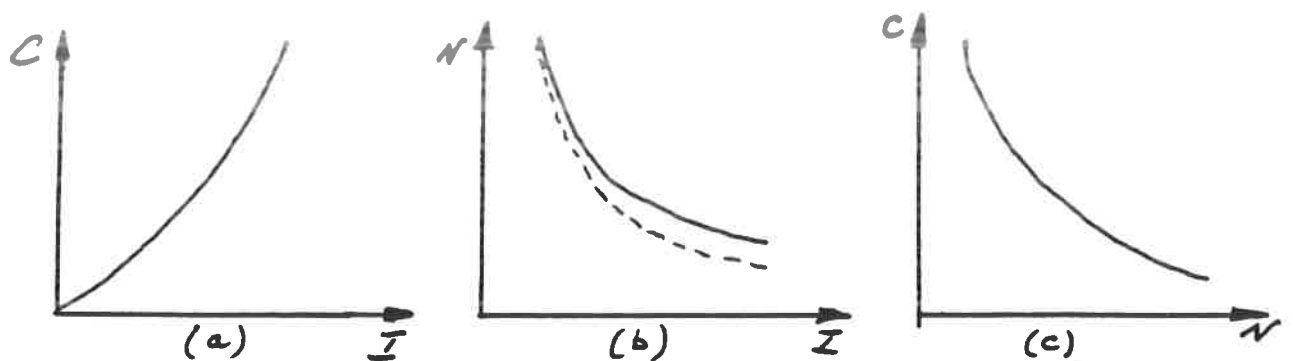


Fig. 8.7

Au démarrage, le courant  $I$  est limité à une valeur raisonnable par la résistance de démarrage  $R$ . Après le démarrage, lorsque nous éliminons la résistance de démarrage, le moteur tournera à une vitesse telle que le couple moteur est égal au couple résistant. Le courant absorbé sera fonction du couple moteur comme représenté à la Fig. 8.7. (a).

Si maintenant le couple résistant augmente, le moteur ralentira (Fig. 8.7 (c)) et l'intensité augmentera jusqu'à ce que le couple moteur soit de nouveau en équilibre avec la charge. Si la charge diminue, le courant diminuera et le moteur accélérera (Fig. 8.7 (b)).

Si maintenant la charge du moteur disparaît brutalement, le couple résistant sera très faible et le courant le sera également. D'autre part, le flux dans les pôles dépend du courant, vu qu'il s'agit d'un moteur série.

Le flux  $\Phi$  diminuera donc également, de sorte que la vitesse de rotation devra augmenter considérablement afin que la valeur de la f.c.é.m. puisse augmenter.

Si le moteur accélère, le courant diminuera encore, de sorte que la vitesse augmentera encore plus. Le moteur s'emballera, pouvant aussi provoquer de graves dommages.

Quand le moteur tourne à vide, il faudra immédiatement interrompre l'alimentation pour mettre fin à cette situation dangereuse. Un moyen pour éviter qu'un moteur série ne tourne à vide consiste à rendre la charge inséparable du moteur (ex. : véhicules de traction, pompes, ventilateurs, ...).

#### b) Réglage de la vitesse d'un moteur série.

Un moteur série a comme principale caractéristique une vitesse auto-réglable. Quand le couple résistant augmente, le moteur ralentit, de telle sorte que la f.c.é.m. diminue et que le terme  $(R_a + R_s) I$  doit augmenter. Cela signifie que  $I$  doit augmenter. Le couple ( $C = k \Phi I$ ) augmentera donc pour deux raisons :

- $I$  augmente
- $\Phi$  augmente

Le couple moteur augmentera donc jusqu'à un nouvel équilibre avec le couple résistant.

La courbe de la vitesse est, par suite de la saturation magnétique, aplatie à basse vitesse. En effet, à partir d'une certaine valeur d'intensité, le flux dans les pôles n'augmentera plus, de sorte que la valeur de  $e$  ne dépendra plus que de la vitesse ; la courbe de vitesse sera plus haute que la courbe théorique sans saturation ; la vitesse diminue donc moins que théoriquement (Fig. 8.7. (b)).

Pour certaines applications, il est cependant nécessaire que le moteur tourne à une vitesse déterminée, indépendamment de la charge.

Pour cela, on devra intervenir sur les différentes grandeurs du moteur.

- Modification de la tension d'alimentation.  
.....

Quand on modifie la tension d'alimentation du moteur, la courbe de la vitesse se déplace pratiquement parallèlement.

Partons de la formule  $U - e = (R_a + R_s) I$  et supposons que nous augmentions la tension aux bornes, de  $U$  jusqu'à  $U'$ .

Vu que, pour une même intensité  $I$ , le terme  $(R_a + R_s) I$  reste constant,  $U' - e'' = U - e$  ; c'est-à-dire que  $e$  devra augmenter dans la même proportion que  $U$ . Cela signifie que la vitesse du moteur devra augmenter.

On peut réaliser cela en alimentant le moteur au moyen d'une dynamo à excitation indépendante ; on peut également accoupler les moteurs (en traction électrique par ex.) en série-parallèle, de façon à alimenter chaque moteur à la tension  $\underline{U}$  ; quand les moteurs ont atteint leur vitesse de régime,  $\underline{2}$  on les raccorde en parallèle, donc sous la pleine tension, ce qui permet d'obtenir une vitesse plus grande.

- Résistance externe en série avec le moteur.  
.....

Si, sous tension constante  $U$ , on raccorde une résistance en série avec le moteur, la résistance totale du circuit augmente, ce qui diminue la vitesse. Cette diminution de vitesse dépend fortement de la charge, du fait que la chute de tension dans la résistance dépend de l'intensité.

Cette méthode n'empêchera pas le moteur de s'emballer, sauf lorsque la résistance est très grande.

En charge, cette méthode rend le réglage de la vitesse très simple et, pour cette raison, était autrefois fréquemment utilisé en traction électrique.

On remarque immédiatement que l'insertion d'une résistance augmentera considérablement l'effet joule et diminuera par conséquent fortement le rendement. La progression rapide des série-conducteurs, qui ne possèdent pas cet inconvénient, a pratiquement fait disparaître cette méthode de réglage. Nous y reviendrons dans les chapitres relatifs aux semi-conducteurs.

- Diminution du flux  $\emptyset$ .  
.....

Cela peut se réaliser de deux manières :

- shuntage des enroulements inducteurs par une résistance, de sorte qu'une partie du courant est déviée des inducteurs ;
- mise en série-parallèle des inducteurs qui sont toujours en nombre pair.

C'est surtout le premier moyen qui est le plus utilisé en traction.

Un réglage fin de la vitesse est possible quand on utilise un rhéostat avec beaucoup de plots, de sorte que la résistance varie peu à chaque plot. Dans la plupart des cas, nous n'avons pas cette possibilité. Généralement, les inducteurs sont shuntés par une résistance en une ou deux fois, suivant l'importance du courant à dévier. Nous constatons que le shuntage du moteur a comme effet d'augmenter le nombre de tours. En effet, du fait de la diminution de flux, le moteur doit tourner plus vite pour obtenir une même f.c.é.m.

c) Inversion du sens de rotation.

Quand on inverse la tension aux bornes du moteur, on change simultanément le sens du courant dans l'induit et celui dans l'inducteur. La force qui s'exerce donc sur chaque conducteur ne changera pas ( $C = k \Phi' I$ ) et le moteur continuera à tourner dans le même sens.

Pour changer le sens de rotation du moteur, il faut inverser le sens du courant soit dans l'induit, soit dans l'inducteur.

Pour un moteur avec pôles de commutation, la liaison entre l'induit et ces pôles doit rester inchangée. Dans la plupart des cas, on inversera le sens du courant dans l'inducteur. Cela peut s'effectuer au moyen d'un tambour à contact sur lequel sont fixés des secteurs placés de telle façon qu'ils réalisent un autre raccordement lors de la rotation du tambours.

Une autre manière pour réaliser cette inversion consiste à utiliser des contacteurs électromagnétiques.

d) Freinage du moteur série.

Une manière pratique de freiner un moteur série est le freinage rhéostatique.

On déconnecte le moteur de sa source et on ferme le circuit sur une résistance de façon à le faire fonctionner comme dynamo.

On remarque qu'il est absolument nécessaire, au cours de cette opération, de modifier le raccordement relatif de l'induit avec l'inducteur. En effet, le sens de rotation du moteur reste inchangé du fait de l'inertie du moteur (énergie cinétique). Le sens du flux n'a pas non plus changé, car il provient du flux rémanent ; la f.é.m. a donc le même sens que la f.c.é.m. du moteur ; le courant a donc changé de sens, ce qui démagnétiserait la machine.

Si au contraire on modifie le raccordement relatif de l'induit avec l'inducteur, le courant créé dans la machine renforcera le flux rémanent, et la machine se comportera comme une dynamo série.

La valeur de la résistance doit être assez petite pour que l'action de freinage soit suffisante ; par contre, si la résistance est trop petite, le freinage sera trop brutal.

On remarque que l'action de freinage s'affaiblit rapidement à basse vitesse, car le générateur ne produit plus assez.

Ce procédé de freinage est très dangereux s'il est utilisé avec des moteurs raccordés en parallèle. En effet, comme nous l'avons signalés, ces moteurs se comporteraient comme des dynamos raccordées en parallèle, où les tensions induites ne sont jamais identiques. Le moteur avec la plus grande tension induite fournirait un courant très important à l'autre moteur qui servirait de charge avec une très faible résistance

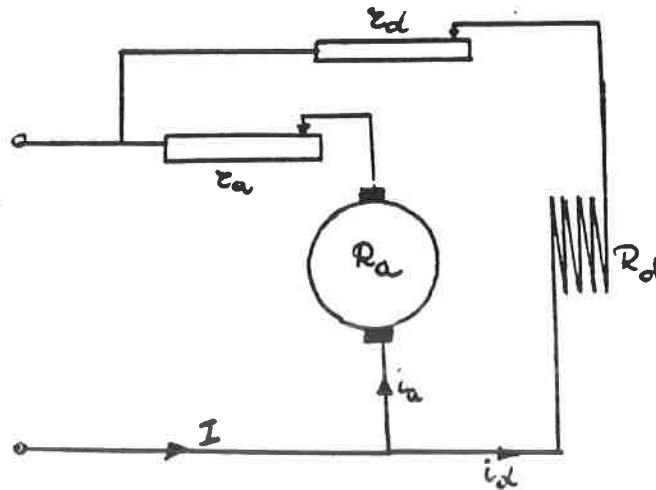
Dans le cas d'un véhicule de traction dont l'inertie est très grande, cela conduirait pratiquement toujours à la destruction des moteurs.



B. Propriétés du moteur shunt.

Le schéma du moteur shunt est représenté à la fig. 9.1.

Fig. 9.1



Soit  $U$  = tension d'alimentation  
 $e$  = f.c.é.m.  
 $I$  = courant total absorbé  
 $i_a$  = courant dans l'induit  
 $i_d$  = courant dans l'inducteur  
 $R_a$  = résistance ohmique de l'induit  
 $R_d$  = résistance ohmique de l'inducteur  
 $\phi$  = flux produit par l'inducteur.

Nous savons que  $i_a = \frac{U - e}{R_a}$  et  $i_d = \frac{U}{R_d}$

$$e = U - R_a \cdot i_a = n \cdot \frac{\pi}{60} \cdot \phi \cdot \frac{N}{60}$$

$$\text{d'où } \frac{N}{60} = \frac{U - R_a \cdot i_a}{n \cdot \frac{\pi}{60} \cdot \phi}$$

$$\text{De même } e = \frac{n}{2\pi} \cdot \frac{\pi}{60} \cdot \phi \cdot I = k \phi I$$

où  $\phi$  est supposé constant.

a) Vitesse en fonction du courant.

La vitesse d'un moteur shunt est pratiquement constante (fig. 9.2.a); elle diminue à charge croissante ( $i_a$  augmente) par suite de la chute de tension dans la faible résistance d'induit.

La vitesse  $N_0$  ou vitesse à charge nulle ( $i_a = 0$ ) est, pour un certain moteur, déterminée par la tension appliquée et le flux.

On peut donc, en plaçant une résistance réglable dans le circuit d'excitation, faire varier cette vitesse  $N_0$ . Pour une grande résistance,  $i_d$  et par conséquent  $\Phi$  également sont faibles; la vitesse sera donc grande.

De ce qui précède, il apparaît que lorsqu'on décharge le moteur shunt, il ne s'emballera pas comme le moteur série. Par contre, il pourra s'emballer lors d'une interruption accidentelle du circuit d'excitation;  $\Phi$  sera alors égal au magnétisme rémanent et la vitesse sera exagérée, ce qui pourra fortement endommager le moteur.

b) Le couple en fonction du courant.

Le couple du moteur shunt est directement proportionnel à l'intensité qui passe dans l'induit, vu que  $\Phi$  est constant (fig. 9.2.b).

C'est un inconvénient, vu que nous avons surtout besoin d'un grand couple lorsque l'intensité est élevée, c'est-à-dire au démarrage. Le moteur série répond mieux à cette exigence, étant donné que le couple est proportionnel au carré du courant.

c) Le couple en fonction de la vitesse.

Les formules du moteur shunt peuvent s'écrire sous la forme suivante :

$$i_a = \frac{U - e}{R_a} = \frac{U - n \cdot \frac{k}{\omega} \cdot \Phi \cdot \frac{N}{60}}{R_a} = \frac{U - k' N \Phi}{R_a}$$

$$C = k \cdot \Phi \cdot i_a = \frac{k \cdot \Phi}{R_a} (U - k' N \Phi)$$

Cette dernière formule donne le couple en fonction de la vitesse. C'est une ligne droite (fig. 9.2.c).

La vitesse  $N_0$  (c'est la vitesse lorsque  $C = 0$ ) est  $N_0 = \frac{U}{k' \Phi}$ .

La pente de la droite  $C$  en fonction de  $N$  dépend fortement du flux et de la résistance d'induit.

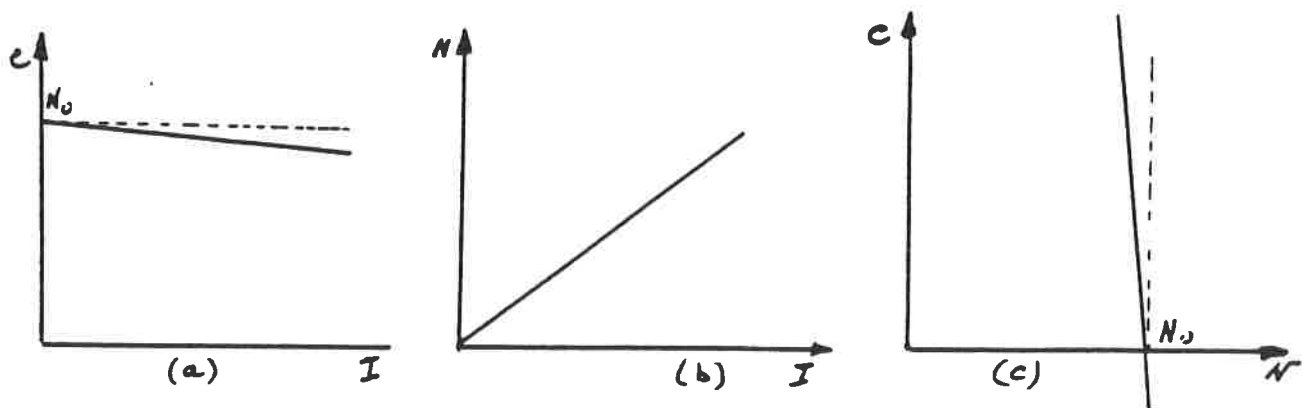


Fig. 9.2

d) Mise en marche du moteur shunt.

Comme il a été prouvé dans la rubrique précédente, le couple dépend fortement de la résistance du circuit d'induit.

Cette résistance limite le courant initial et donc aussi le couple au démarrage.

L'inclinaison de la droite  $C/N$  diminue lorsque la résistance augmente.

Considérons le raccordement de la fig.(9.3.a) où la résistance de démarrage a 5 positions.

Ces 5 positions correspondent à 5 droites qui représentent la caractéristique  $C - N$  (fig. 9.3.b).

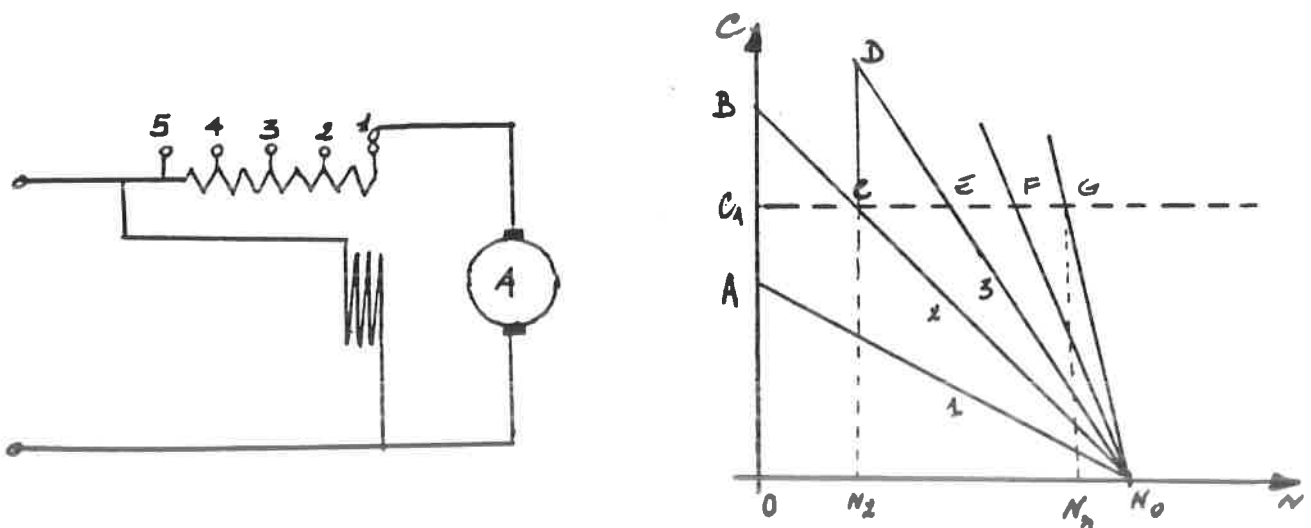


Fig. 9.3 a et b

Soit  $C_1$  le couple résistant de la charge. Nous voyons que lorsque le curseur est en position 1, la résistance complète est en série avec l'induit; à vitesse nulle, le couple (représenté par  $oA$ ) est plus petit que le couple résistant. Le moteur ne démarrera pas.

Plaçons maintenant le curseur en position 2. Nous voyons que le couple  $oB$  est plus grand que  $oel$ . Le moteur accélère. L'accélération continuera jusqu'à ce que le couple soit égale au couple résistant au point C.

Pour accélérer d'avantage, nous devons déplacer le curseur vers la position 3.

Si le moteur avait atteint une vitesse  $N_1$ , le couple moteur est alors situé au point D qui est de nouveau au-dessus de  $C_1$ .

Si nous voulons accélérer complètement le moteur, nous devons déplacer progressivement le curseur vers la position 5; la résistance est alors complètement éliminée, ce qui correspond à la vitesse de régime du moteur ( $N_u$ ) pour une charge déterminée  $C_1$ .

Il faut noter que la résistance de réglage doit être située seulement dans le circuit d'induit, et non dans les fils d'alimentation du moteur, ceci afin de pouvoir maintenir le couple d'accélération maximum.

#### e) Réglage de la vitesse.

Le moteur shunt offre le grand avantage de permettre un réglage précis de la vitesse dans une grande portée et avec un bon rendement, par modification de l'excitation. En effet,

$$\frac{N}{\omega} = \frac{U - R_a \cdot i_a}{n \cdot \frac{\pi}{\phi} \cdot \phi}$$

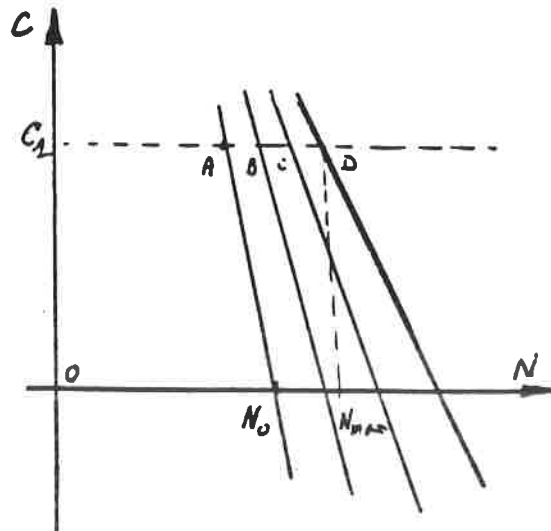
Si nous faisons baisser  $\phi$ , la vitesse du moteur augmentera, en supposant  $i_a$  constant.

La mise en marche du moteur shunt s'effectue toujours avec l'excitation maximum, afin d'obtenir un couple maximum.

Après élimination de la résistance de démarrage, la vitesse sera encore relativement faible. Celle-ci sera proche de la valeur  $N_0$  minimum correspondant au flux  $\phi$  maximum ( $N_0 = \frac{U}{k \cdot \phi}$ ) (fig. 9.4)

Si nous augmentons la résistance du rhéostat d'excitation, la caractéristique du moteur se déplacera dans le sens d'une vitesse  $N_0$  croissante. D'autre part, nous constatons que l'inclinaison de cette caractéristique diminue.

Fig. 9.4



Quand, après la mise en marche du moteur, nous modifions la position du rhéostat d'excitation, le point de fonctionnement se déplacera (à couple constant) de A vers B, jusqu'à D, vitesse maximum.

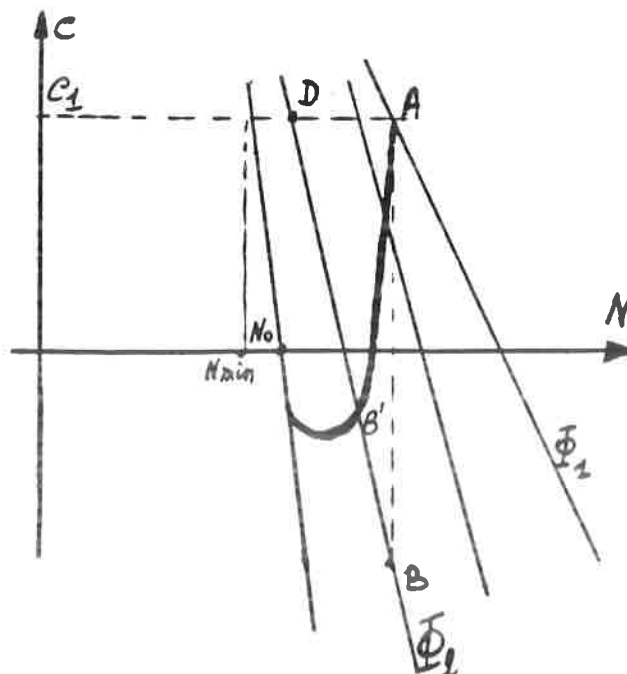
La perte d'énergie dans le rhéostat d'excitation est limitée ( 2 à 5%).

f) Freinage du moteur shunt.

Considérons un moteur shunt entraînant un couple résistant  $C_1$  (fig. 9.5) et qui tourne à une vitesse  $N_1$  (point A). Supposons que nous augmentions brusquement le flux de  $\Phi_1$  à  $\Phi_2$ .

Vu que la vitesse du moteur ne peut changer brutalement, le point de fonctionnement se déplacera de A vers B.

Fig. 9.5



Le moteur fonctionnera donc comme dynamo et renverra une certaine énergie qu'il prend de l'énergie cinétique (inertie) des parties tournantes.

Il se produira donc un freinage puissant. Si le flux reste alors constant, le ralentissement se fera suivant la droite de B vers D; le moteur tourne alors à la vitesse  $N_2$  avec le même couple  $C_1$ . En réalité, le point ne va pas de A vers B, vu que le flux également ne peut pas augmenter immédiatement.

La modification du flux et de la vitesse s'effectueront simultanément. Le point de fonctionnement se déplacera du point A vers B' sur la courbe, ensuite vers D sur la droite B'D. Nous remarquons que le freinage par récupération n'est pas possible jusqu'à l'arrêt, mais seulement jusqu'à la vitesse minimum correspondant au champ maximum.

Pour faire encore baisser la vitesse sous N minimum, on peut appliquer le freinage rhéostatique qui est analogue au freinage rhéostatique du moteur série.

g) Inversion du sens de rotation.

Dans le moteur shunt, il faut également inverser le raccordement relatif de l'induit et de l'inducteur.

- Quand le moteur est à l'arrêt, on peut inverser soit le courant dans l'induit, soit celui dans l'inducteur.
- Quand l'inversion doit se produire pendant la marche, l'inversion doit se faire dans le circuit d'induit. En effet l'inversion dans l'inducteur a comme inconvénients ce qui suit :
  - . le moteur s'emballerait vu qu l'inverseur interromprait le circuit d'excitation avant l'inversion;
  - . l'inductance élevée de l'inducteur provoquerait des arcs importants aux contacts de l'inverseur.

Il est indispensable, lors de l'inversion du sens de rotation par inversion du courant d'induit, de mettre l'entièreté de la résistance de démarrage en série avec le circuit d'induit. Du fait de l'inversion de la f.c.é.m., celle-ci serait de même sens que la tension appliquée, et le courant atteindrait une valeur inadmissible si on ne prenait pas cette précaution.

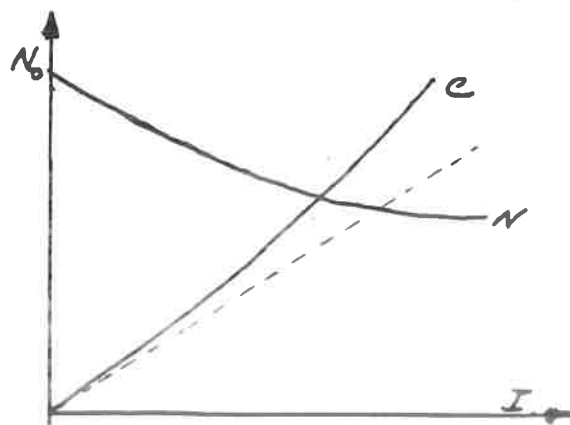
Même avec la résistance de démarrage en série, le courant sera encore élevé, mais cependant sans danger pour des avaries.

### C. Moteur compound.

Le moteur compound rassemble certaines propriétés du moteur shunt avec d'autres du moteur série. On peut généralement régler l'influence relative des 2 enroulements, mais dans chaque cas l'enroulement shunt est prépondérant. Le moteur compound a donc une vitesse à charge nulle  $N_0$ .

Quand on le charge, il ralentit plus que le moteur shunt vu que le flux total augmente par suite de l'enroulement série. Son couple augmente plus que proportionnellement avec le courant, sans toutefois atteindre les valeurs élevées du moteur série (fig. 9.6).

Fig. 9.6



Le moteur compound est indiqué lorsqu'on veut obtenir un couple ou démarrage élevé et qu'on veut cependant éviter le risque d'emballement. La diminution de la vitesse lors de l'augmentation de charge a comme avantage de limiter la puissance lors des fluctuations de charge, mais une grande variation de vitesse peut être préjudiciable pour le fonctionnement de la machine entraînée.

Il est possible dans un moteur compound que l'enroulement série combatte le flux shunt, la vitesse reste alors constante lorsque le couple varie : la vitesse est dans ce cas indépendante de la charge.

Il est également possible que nous rendions le champ série si important que le moteur accélère à charge croissante. Vu que ce fonctionnement provoque toutefois des vibrations de la charge, il n'est pratiquement jamais utilisé.



COURS 1204CHAPITRE VIII - ALTERNATEURS

Un alternateur est une machine électrique qui transforme de l'énergie mécanique en énergie électrique, sous la forme de courant alternatif

Il existe des alternateurs monophasés et triphasés.

Les monophasés sont utilisés pour des petites puissances et sont peu fréquents, tandis que les plus répandus, les alternateurs triphasés, sont utilisés pour les plus grandes puissances.

### 1. Parties constitutives de l'alternateur

Les organes principaux sont :

- a) Le stator : partie fixe qui contient les enroulements parcourus par le courant alternatif.
- b) Le rotor : partie mobile qui tourne dans le stator et qui contient une ou plusieurs paires de pôles.
- c) Une source qui produit le courant d'excitation.  
Elle peut éventuellement être une dynamo qui est accouplée à l'arbre, ou un redresseur qui transforme le courant alternatif de l'alternateur en courant continu à la tension désirée.

### 2. Principe de fonctionnement de l'alternateur monophasé

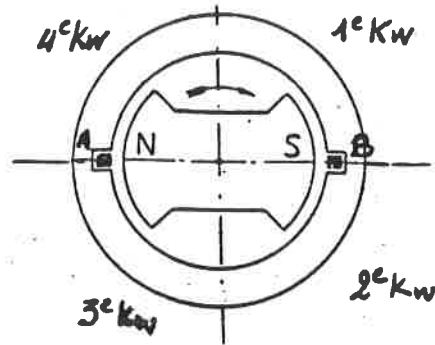
Il faut tout d'abord noter que les courants induits sont produits dans le stator, contrairement avec la dynamo où le courant est produit dans l'induit tournant.

L'alternateur ne possède donc pas de collecteur, de sorte que le problème de la commutation des balais n'existe pas.

La dynamo d'excitation alimente les pôles placés sur un tambour, au moyen d'anneaux sur lesquels frottent des balais.

A la fig. 10.1, les paires de pôle sont représentés comme des noyaux polaires, mais en pratique ces pôles sont formés par des bobines placés dans des encoches du tambour (rotor).

Fig. 10.1



L'alternateur peut posséder une ou plusieurs paires de pôles dont le flux coupe les enroulements du stator par la rotation du rotor.

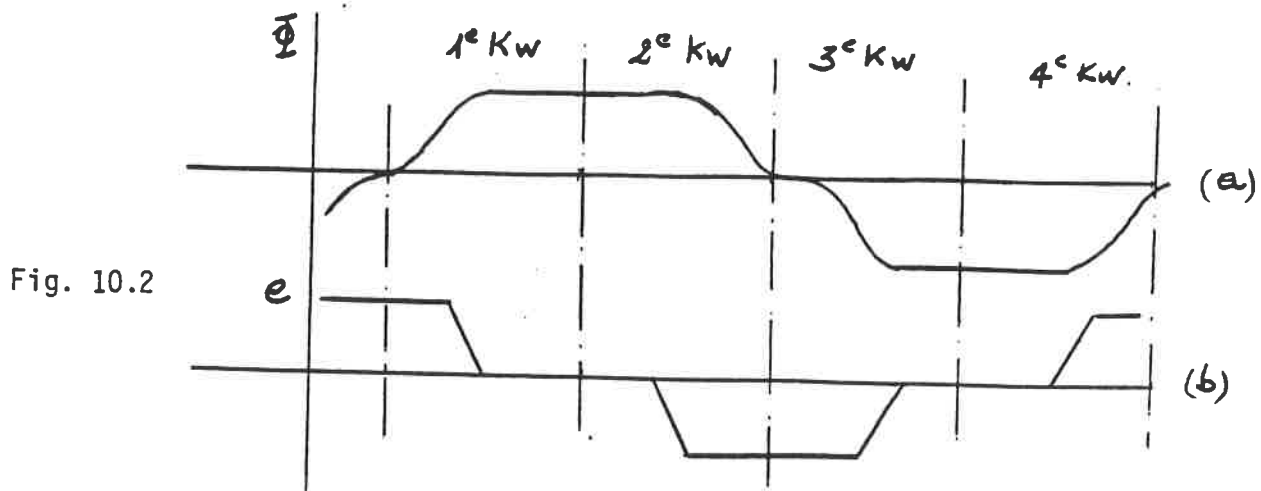
Considérons, pour simplifier, une seule paire de pôles dont le flux coupe la spire AB (Fig. 10.1.).

La grandeur du flux sortant d'un pôle dépend seulement de la grandeur du courant d'excitation, qui est constant, et de la réluctance du circuit, qui est également constante, vu que l'entrefer est constant ( $\Phi = \frac{nI}{\mathcal{R}}$ ).

Le flux  $\Phi'$  qui coupe l'enroulement dépend de la position des pôles. Si maintenant ces pôles tournent, le flux qui coupe la surface AB variera.

- Si l'axe des pôles coïncide avec l'axe horizontal, le flux est nul.
- Si le pôle N se déplace maintenant vers le premier quadrant, le flux augmentera jusqu'à ce qu'il ait atteint une certaine valeur correspondant au flux engendré. Cette valeur maximale, constante, sera atteinte lorsque le pôle nord quitte le conducteur AB.
- Si le pôle continue à tourner vers le 2<sup>ème</sup> quadrant, il atteindra à un certain moment le conducteur A. A partir de ce moment, le flux tombe à zéro lorsque l'axe des pôles coïncide avec l'axe horizontal.
- Dans le 3<sup>ème</sup> quadrant, le flux devient négatif jusqu'à un certain minimum et remonte jusqu'à zéro lorsque le tour complet est terminé.

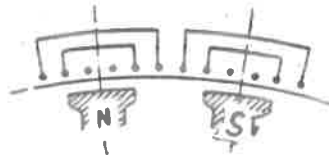
La valeur du flux sur un tour est représenté à la fig. 10.2. (a).



La f.é.m., qui dépend de la variation du flux, aura la forme de la fig. 10.2. (b) c'est-à-dire pratiquement une forme trapézoïdale.

Pour obtenir une forme sinusoïdale de la f.é.m., on répartit l'enroulement sur plusieurs encoches (fig. 10.3).

Fig. 10.3



Si nous répartissons les conducteurs de part et d'autre des pôles, la même f.é.m. sera induite, mais elle sera décalée d'un certain temps dépendant de la distance entre les encoches et de la vitesse du rotor.

Si nous additionnons les f.é.m. dans ces 4 conducteurs, nous obtenons une représentation de la tension qui approche la fonction sinusoïdale (fig. 10.4).

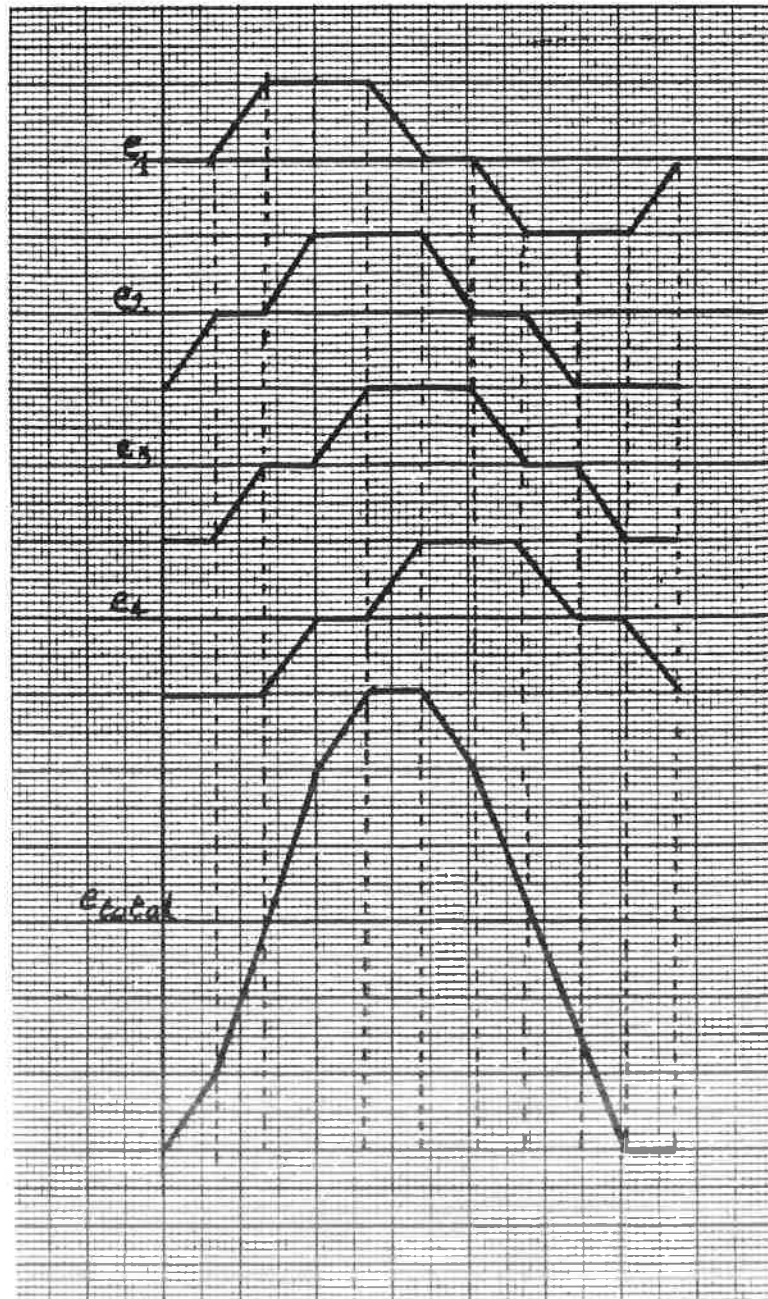


Fig. 10.4

### 3. Influence de la vitesse du rotor

La vitesse de rotation du rotor a une double influence :

- a) La fréquence de la tension alternative est proportionnelle à la vitesse.
- b) La valeur de la f.é.m. est également proportionnelle à la vitesse. En effet, la f.é.m. dans chaque conducteur est déterminé par  $e = Blv$ .

Si la vitesse augmente, la f.é.m. augmentera également dans chaque conducteur.

#### 4. Influence de la charge sur la tension aux bornes

Lorsque l'alternateur travaille à charge nulle, la tension aux bornes est égale à la f.é.m. induite dans les bobines.

Lorsque l'alternateur fournit maintenant du courant, la tension aux bornes variera.

Trois phénomènes ont une influence sur la tension aux bornes.

- a) Etant donné que les conducteurs d'induit sont parcourus par un flux  $\phi_r$  dont la plus grande partie des lignes de force se ferme par les pôles (fig. 10.5.).

Le flux produit par la force magnéto-motrice de l'inducteur sera influencé par le flux  $\phi$  en charge. Ce phénomène est connu sous le nom de réaction d'induit.

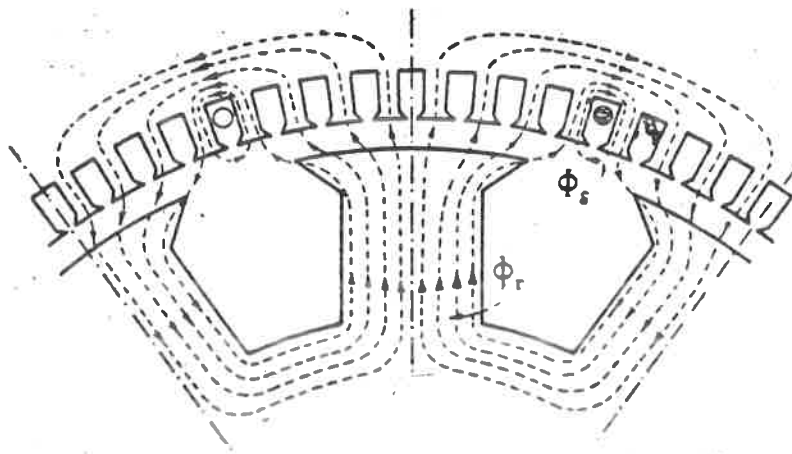


Fig. 10.5

- b) Le passage du courant dans l'enroulement d'induit provoque une chute de tension ohmique  $R_a \times I$  comme dans une dynamo.
- c) Certaines lignes de force produites par le courant d'induit ne traversent pas le circuit magnétique des pôles mais entourent seulement les conducteurs (fig. 10.6.). Ils constituent un flux de fuite auquel correspond une réactance de fuite; celle-ci provoque une chute de tension inductive.

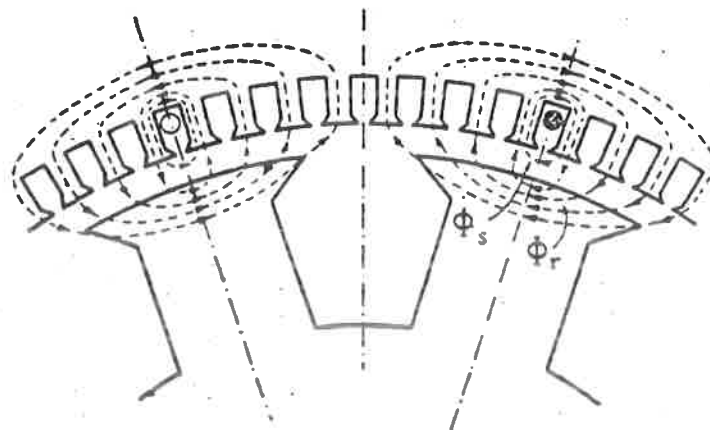


Fig. 10.6

6.

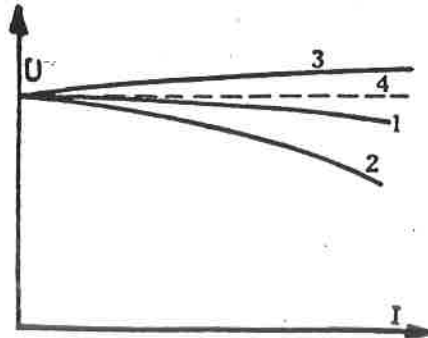
Il faut remarquer que la réaction d'induit d'un alternateur n'est pas toujours négative comme c'est le cas dans une dynamo.

En effet, lorsque le courant de charge est en retard sur la tension (charge inductive), la machine est démagnétisée.

D'autre part, un courant en avance aura une action magnétisante et provoquera une augmentation de la f.é.m.

5. Caractéristique externe (fig. 10.7).

Fig. 10.7



De ce qui précède, il s'ensuit que :

- pour une charge ohmique, c'est-à-dire I en phase avec U, le courant sera légèrement en retard sur la f.é.m. à cause de l'inducteur; la machine est légèrement démagnétisée (courbe 1);
- pour une charge inductive, la machine est fortement démagnétisée, et la tension aux bornes baisse rapidement (courbe 2);
- pour une charge capacitive, comme I est en avance sur U, la tension aux bornes augmentera avec l'augmentation du courant de charge.

6. Puissance de l'alternateur

La puissance fournie par un alternateur est :  $P = U \times I \times \cos \varphi$

La puissance apparente d'un alternateur est  $P = U \times I$  et est la puissance qui peut être fournie à une résistance ohmique; c'est aussi la plus grande puissance qui peut être fournie avec une intensité bien déterminée.

Cette puissance apparente détermine les dimensions de la machine.

La puissance réelle  $P = U \times I \times \cos \varphi$  est toujours plus petite que la puissance apparente et est déterminée par la nature de la charge.

## 7. Alternateurs triphasés

Les alternateurs utilisés pratiquement sont généralement triphasés.

Leur stator est constitué de 3 enroulements identiques décalés de  $120^\circ$  comme représenté schématiquement à la fig. 10.8.

On pourrait utiliser chaque enroulement séparément, mais on ne le fait jamais.

On raccorde les trois phases ou bien en triangle ou bien en étoile. Le montage étoile a cependant généralement la préférence parce que de légers déséquilibres ne donnent pas naissance à des courants de circulation.

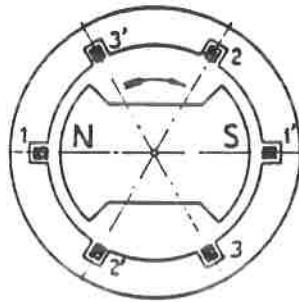


Fig. 10.8

## 8. Types spéciaux d'alternateurs

a) Alternateur homopolaire (statodyne). Fig. 10.9.

L'alternateur précédemment décrit se compose d'un stator et d'un rotor sur lequel est placé un enroulement qui, pour l'excitation, est alimenté via des anneaux. Les enroulements du stator sont soumis alternativement à un pôle nord et à un pôle sud, par suite de la rotation du rotor.

Dans le type homopolaire, le stator se compose d'une part d'un enroulement triphasé et d'autre part d'un enroulement à courant continu qui est utilisé comme enroulement à courant continu qui est utilisé comme enroulement d'excitation.

Le rotor se compose d'un tambour avec des encoches dans le sens longitudinal.

Le flux produit a toujours le même sens mais, suivant la position du rotor, il a une valeur maximale ou minimale.

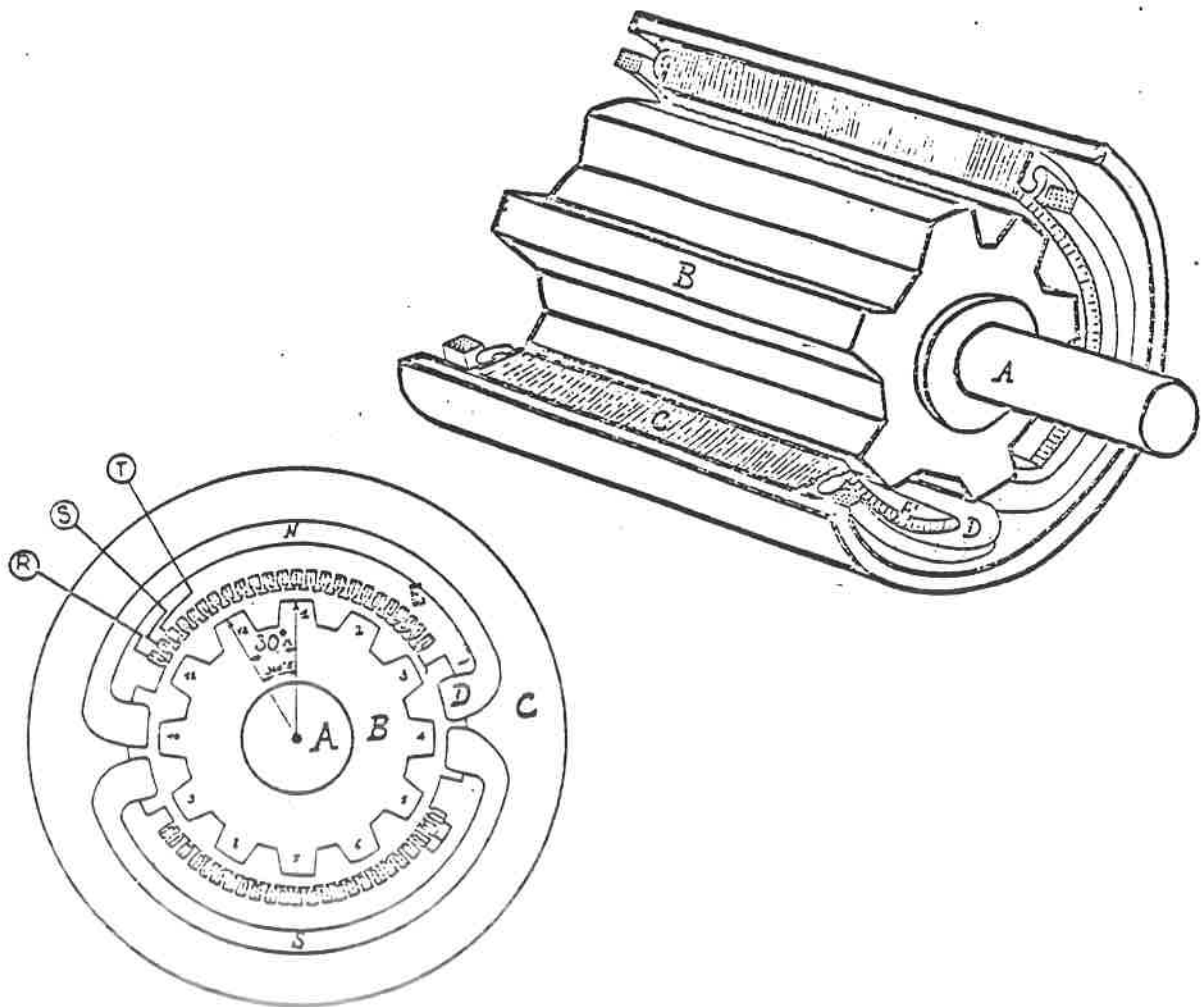


Fig. 10.9

En effet, quand une dent se trouve vis-à-vis du pôle, l'entrefer et la réluctance du circuit magnétique sont petits; le flux sera grand.

Quand maintenant une encoche se trouve en face du pôle, l'entrefer et la réluctance du circuit magnétique sont grands, d'où le flux sera petit.

Le flux varie donc entre les deux extrêmes. Les enroulements du stator sont donc soumis à un flux continuellement variable, ce qui donne naissance à un courant alternatif. Le statodyne peut être exécuté en monophasé, mais on préfère généralement une exécution triphasée.

Cet alternateur a l'avantage de posséder un rotor qui ne contient pas d'enroulement.

Il n'a pas non plus d'anneaux.

De ce fait, la vitesse peut être fortement augmentée.

L'alternateur homopolaire est utilisé pour des puissances relativement petites (quelques k VA).

b) Alternateur inverse

Le fonctionnement de ce type d'alternateur est l'inverse de celui détaillé précédemment. (voir fig. 10.10.).

Dans un alternateur inverse, le stator est alimenté par un courant continu qui produit le flux. Le stator est composé d'un enroulement triphasé.

La tension alternative est captée par trois anneaux.

Il convient de noter que la tension induite dans une dynamo est également une tension alternative, mais celle-ci est redressée par le collecteur.

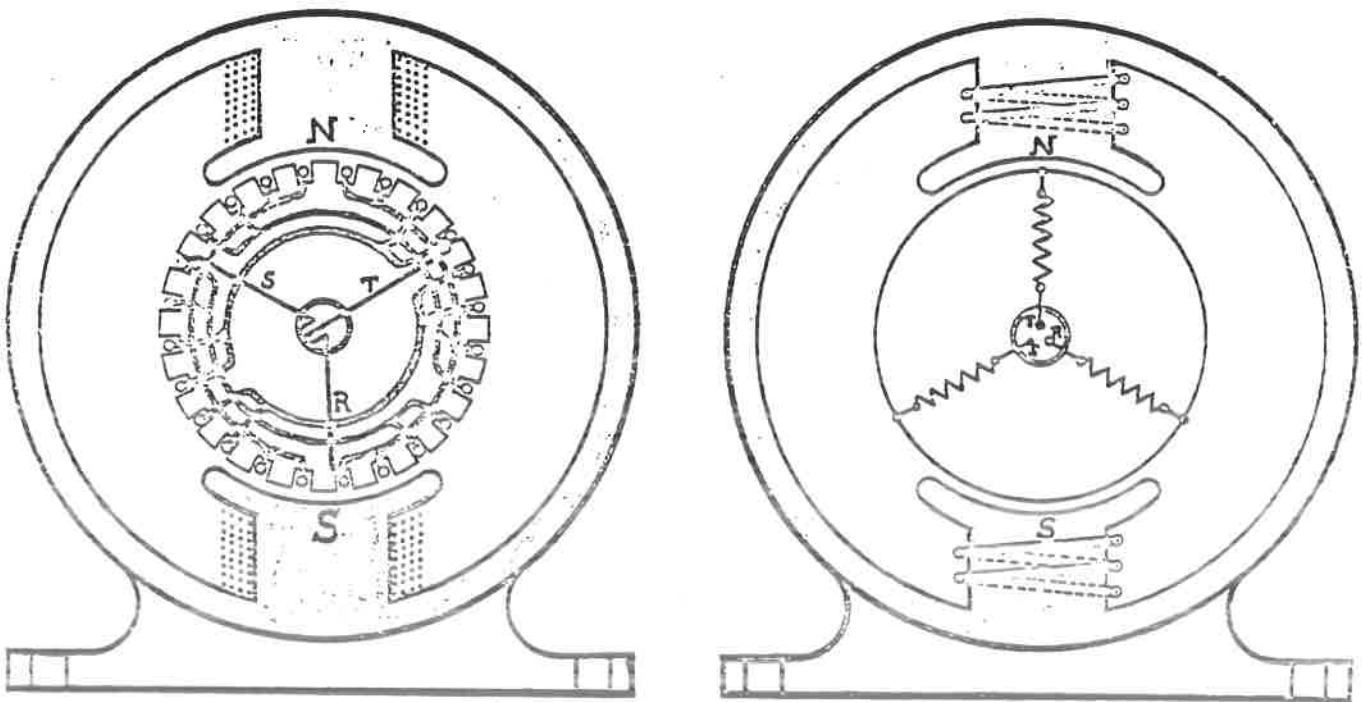


Fig. 10.10

c) Alternateur "brushless" (avec diodes tournantes)

La disposition des organes de ce type d'alternateur est représenté à la fig 10.11

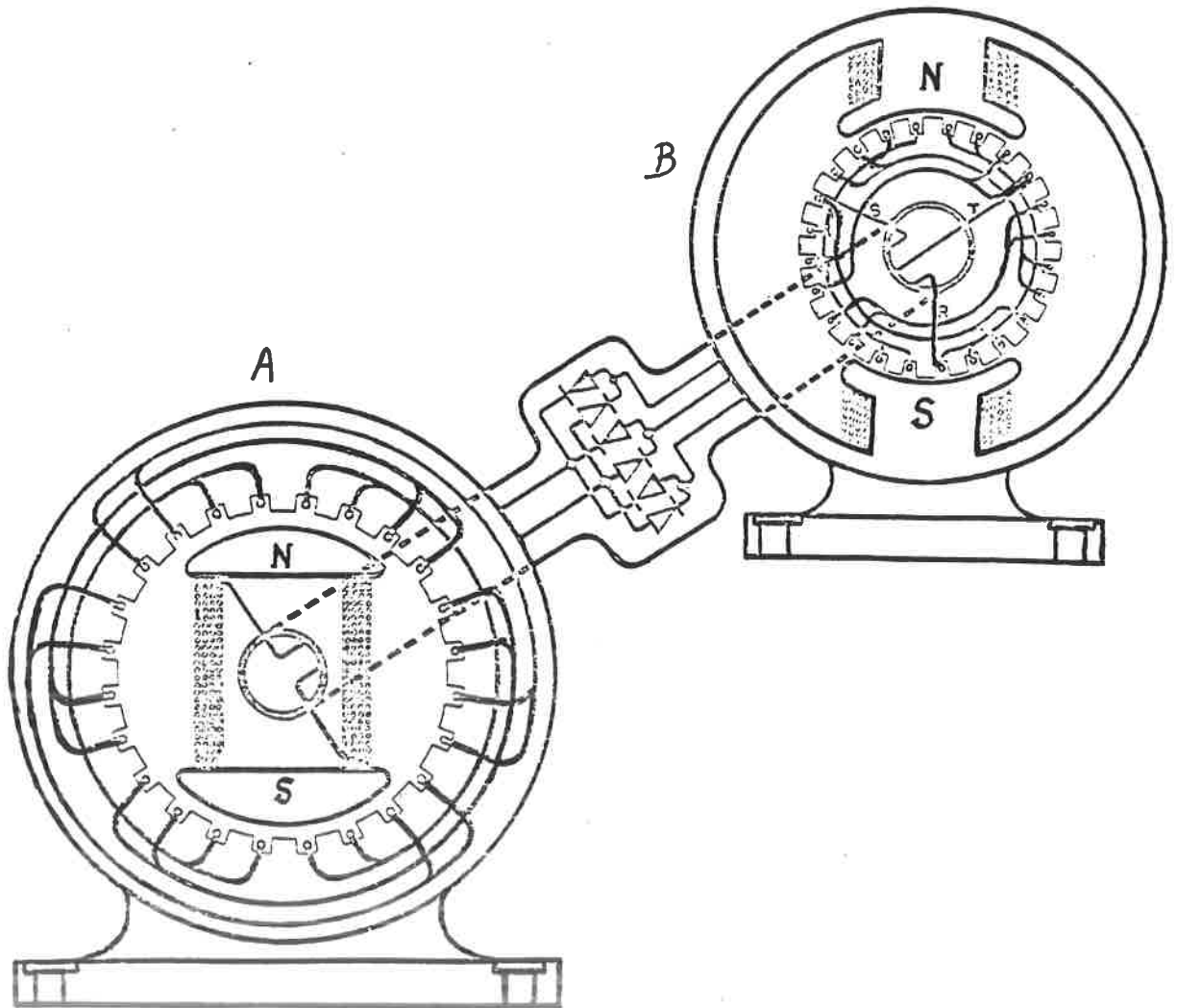


Fig. 10.11

La machine A est l'alternateur de puissance qui, à ses bornes, fournit une tension triphasée.

L'excitation dans le rotor est fournie par un alternateur inverse qui fournit une tension triphasée aux bornes du rotor.

La tension alternative de l'alternateur d'excitation est redressée en tension continue au moyen de diodes.

Etant donné que le rotor A et le rotor B sont couplés mécaniquement, on peut également faire tourner les redresseurs, de telle sorte qu'il ne faut pas d'anneaux.

Ces alternateurs sont conçus pour des puissances relativement importantes, et sont surtout utilisés sur des locomotives diesel électriques.

Cours 1204

Chapitre IX - Transformateurs statiques.

1. Définition.

On appelle transformateur statique un appareil qui permet d'élever ou d'abaisser la tension d'un réseau alternatif sans faire usage de machines rotatives.

2. Principe de fonctionnement.

Sous sa forme la plus simple, le transformateur statique comprend un circuit magnétique en plaques métalliques et deux bobines indépendantes, avec un nombre différent de spires ( Fig. 11.1)

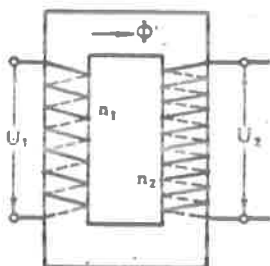


Fig. 11.1

Le premier enroulement, avec  $n_1$  spires, est appelé le primaire. On applique à ses bornes une tension alternative  $U_1$ . Le courant alternatif dans cette bobine donne naissance à un flux alternatif  $\phi$  dans le circuit magnétique. Ce flux alternatif traverse la deuxième bobine avec  $n_2$  spires, que nous appelons le secondaire.

Du fait que le flux alternatif traverse le secondaire, une tension alternative  $U_2$  est induite dans le secondaire.

La tension  $U_2$  a la même fréquence que la tension d'alimentation  $U_1$  et est en opposition avec elle, c'est-à-dire qu'elle est décalée de  $180^\circ$  par rapport à  $U_1$ .

2.

Considérons maintenant le transformateur à charge nulle, ce qui veut dire que le primaire est alimenté, tandis qu'aucun courant ne circule dans le secondaire. Il y aura seulement dans le primaire un très faible courant  $I_0$ , vu que le flux dans le primaire n'est pas influencé par le secondaire qui ne produit aucun flux en opposition ( $I_2 = 0$ ).

Les spires  $n_2$  n'ont aucune influence sur le courant de charge nulle  $I_0$ .

Dans le secondaire est induite une tension dont la valeur est déterminée par son nombre de spires.

Les f.é.m. du primaire et du secondaire sont directement proportionnelles au nombre de spires de ces enroulements respectifs.

La f.é.m. du secondaire peut être déterminée comme suit :

$$E_2 = \frac{n_2}{n_1} \times E_1 \quad \text{ou} \quad \frac{E_2}{E_1} = \frac{n_2}{n_1}$$

Le rapport  $\frac{n_2}{n_1} = k$  est appelé le rapport de transformation.

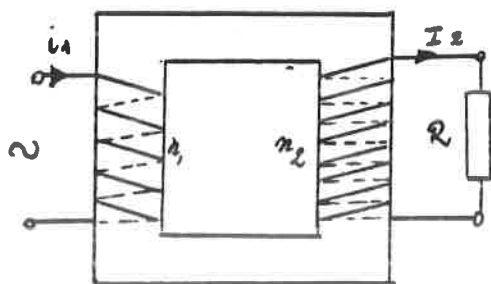
Cette propriété est à la base de l'usage fréquent des transformateurs en électrotechnique, tant dans la technique des courants forts qu'en électronique.

### 3. Charge du transformateur.

Fermons maintenant le secondaire sur une résistance  $R$  (Fig.11.2); le circuit secondaire sera alors parcouru par un courant  $I_2$  en phase avec  $E_2$ . Ce courant  $I_2$  provoque dans le circuit magnétique

un flux qui s'opposera au flux primaire et qui aura donc un effet démagnétisant sur le noyau.

Fig. 11.2



Le primaire par contre s'opposera à la diminution de flux due au secondaire. Le primaire sera alors parcouru par un courant supplémentaire  $I_1$  qui maintiendra le flux à son niveau.

Les ampère-tours ( $n_2 I_2$ ) du secondaire doivent être compensés par les ampère-tours du primaire, soit :

$$n_2 I_2 = n_1 I_1$$

Le négatif signifie qu'ils sont en opposition.

Donc,  $\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1} = k$  (rapport de transformation).

Dans le primaire circule donc  $I_1$ , composé :

- du courant magnétisant  $I_0$ ;
- de la composante de charge  $I_1$ .

Dans le secondaire circule le courant  $I_2$ .

Le diagramme vectoriel simplifié est représenté à la Fig. 11.3 à charge nulle (a) et en charge (b) pour  $k = 1$ .

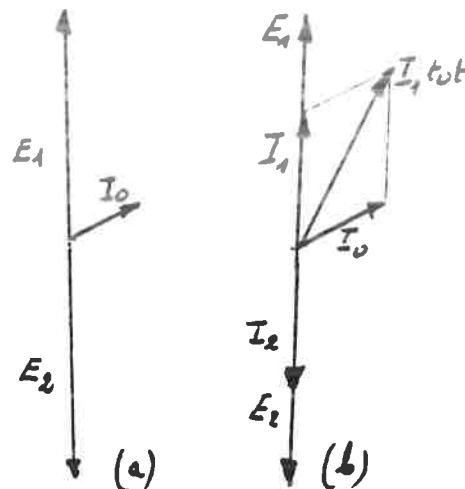


Fig. 11.3

4.

#### 4. Puissance du transformateur.

La puissance fournie par un transformateur est :

$$P = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi$$

La puissance réellement fournie dépend du  $\cos \varphi$  du secondaire.

La puissance maximale peut être fournie lorsque  $\cos \varphi = 1$ .

Le constructeur d'un transformateur, qui ne sait naturellement pas sous quel  $\cos \varphi$  celui-ci sera utilisé, doit tenir compte de l'intensité nominale. Il construit le transformateur pour une puissance apparente  $P = U_2 \cdot I_2$  (Volt Ampère).

La puissance réelle, exprimée en Watts, sera plus petite que la puissance apparente installée ( $\cos \varphi < 1$ ).

#### 5. Pertes dans le transformateur.

##### a) Effet joule ou pertes dans le cuivre

Les pertes par effet joule dans le primaire et le secondaire sont proportionnelles au carré des courants respectifs.

$$(R_1 \cdot I_1^2 \text{ et } R_2 \cdot I_2^2)$$

##### b) Pertes magnétiques

Ces pertes sont dues aux pertes par hystérésis dans le noyau magnétique.

Celles-ci sont fournies par le courant  $I_0$ , et ne varient pas lors de la charge.

On peut donc dire que les pertes dans le fer sont égales à  $E_1 \times I_0$

#### 6. Transformateur triphasé.

Les transformateurs monophasés sont relativement peu utilisés, sauf pour des appareils de puissance limitée.

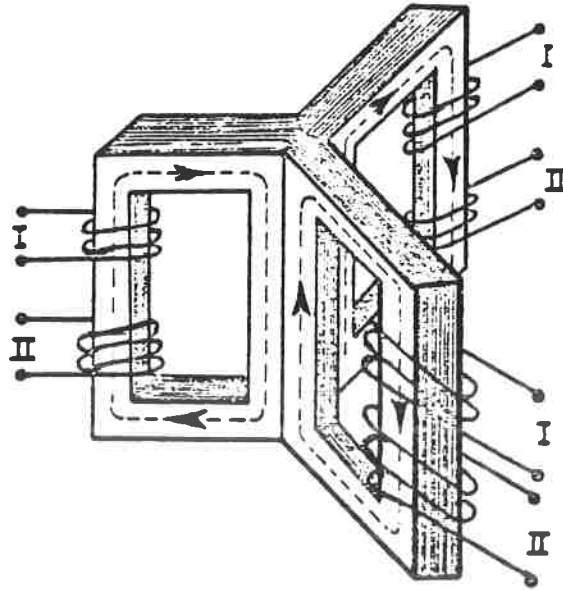
Le transformateur triphasé consiste en trois transformateurs monophasés qui, chacun, comprennent un circuit magnétique, un primaire et un secondaire.

Les enroulements primaires peuvent être raccordés soit en étoile, soit en triangle.

La même possibilité existe pour le secondaire. Les enroulements du primaire et du secondaire peuvent être différents.

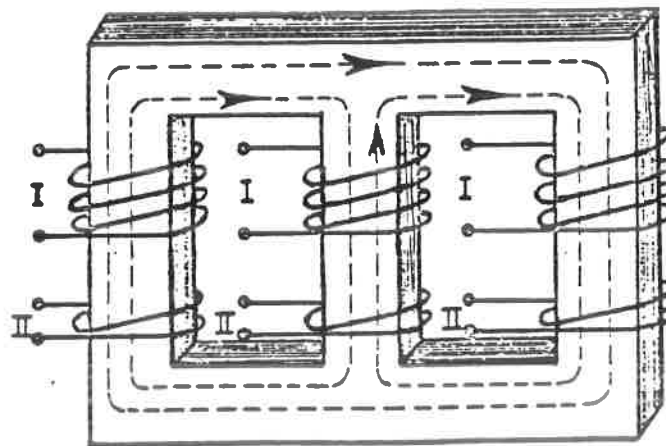
Considérons trois transformateurs monophasés, placés de telle façon que leurs noyaux ont une branche commune (Fig. 11.4)

Fig. 11.4



Chaque phase fournit dans la branche commune un flux proportionnel au courant (noyau non saturé). Nous avons prouvé précédemment que la somme des courants des 3 phases est nulle à tout moment; il en sera de même avec la somme des flux. Le circuit magnétique commun n'est donc parcouru par aucun flux et est donc superflu. Le schéma du transformateur est alors celui de la Fig. 11.5.

Fig. 11.5

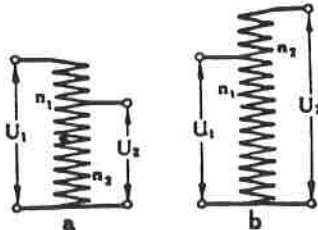


6.

### 7. Autotransformateur.

Un même enroulement peut en même temps jouer le rôle de primaire et de secondaire. On peut par exemple appliquer la tension du réseau à un enroulement de  $n_1$  spires et capter la tension secondaire sur  $n_2$  spires de ce même enroulement (Fig. 11.6).

Fig. 11.6



On peut sans plus appliquer la théorie du transformateur ordinaire sur l'autotransformateur.

A charge nulle, le primaire absorbe un courant  $I_0$ .

Si nous raccordons une charge aux bornes de secondaire, qui débite alors un courant  $I_2$ , les ampère-tours démagnétisants seront compensés par un courant supplémentaire  $I_1$ , de valeur telle que  $n_1 I_1 = n_2 I_2$ .

Le courant total dans le primaire est la somme vectorielle de  $I_0$  et  $I_1$ .

#### Avantages de l'autotransformateur.

- Ce type est plus simple et meilleur marché à la construction.
- Ce transformateur présente moins de pertes.

#### Inconvénients de l'autotransformateur.

Lorsqu'on veut transformer une haute tension en basse tension, le potentiel absolu du circuit basse tension par rapport à la terre reste au niveau de la haute tension, de sorte que l'isolation du circuit doit être exécutée au niveau de la haute tension. Pour cette raison, ce transformateur n'est utilisé que dans des applications très spéciales. Dans la technique des courants faibles, où le problème d'isolation ne se pose pas, ce type trouve plus d'application.

### 8. Transformateurs de mesure.

Il est impossible de raccorder directement sur la haute tension les appareils de mesure ordinaires (voltmètre, ampèremètre, watt-heure-mètre, etc...) sans prendre des précautions spéciales et coûteuses de protection des appareils.

D'autre part, de fortes intensités, en haute ou basse tension, ne peuvent sans plus traverser un ampèremètre ou un watt-heuremètre, sans qu'il y ait des complications exceptionnelles des appareils de mesure pour éviter les pertes par effet joule et par hystérésis.

Les transformateurs de mesure sont destinés à isoler le réseau haute tension des appareils de mesure, qui sont donc du type à basse tension; la forte intensité à mesurer est donc diminuée d'un rapport constant.

Exemple : Un courant de 500 A ne traversera pas la bobine d'un ampèremètre, mais sera transformé en un courant de valeur limitée (par ex. 2,5 A.) au moyen d'un transformateur réducteur de courant de rapport  $\frac{200}{1}$  ou  $\frac{1.000}{1}$ .

Ces appareils doivent posséder 3 propriétés essentielles :

- a) rapport de transformation constant;
- b) décalage le plus proche possible de  $180^\circ$ ;
- c) sécurité suffisante dans le domaine du fonctionnement et de l'isolation des enroulements.

## Chapitre X - Moteurs à courant alternatif.

### 1. Champ tournant.

Nous considérons le cas simple d'un stator qui comprend 3 bobines placées dans 2 encoches par côté de bobine.

Les bobines sont décalées les unes par rapport aux autres de  $120^\circ$  (Fig. 11.7)

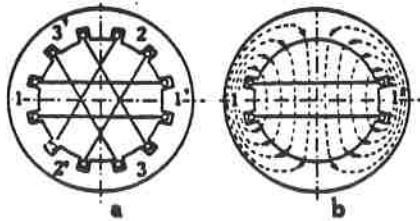


Fig. 11.7

Une bobine (par ex. 1'1) produira un flux.

Entre les 2 encoches, il n'y a pas de flux, tandis qu'on suppose que le flux est réparti uniformément sur le reste de la circonférence.

Chaque bobine produit un flux qui est directement proportionnel à la valeur instantanée du courant. La Fig. 11.8 a-b-c donne pour les 3 bobines la répartition du flux sur la circonférence, à un moment déterminé.

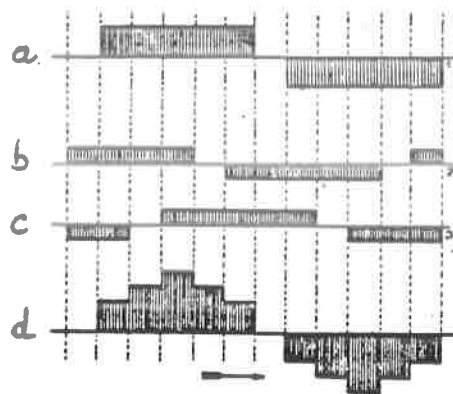


Fig. 11.8

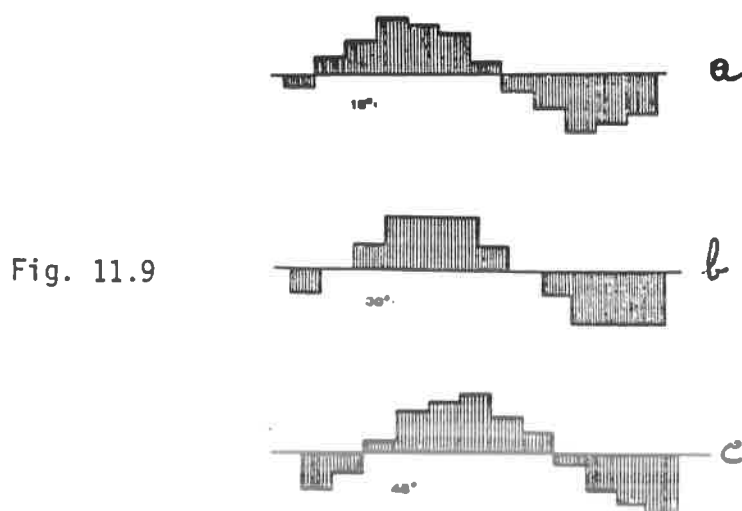
Pour connaître maintenant le flux total qui règne en un point déterminé, on doit faire la somme du flux qui est produit par chaque bobine séparément.

Cette somme est représentée à la Fig. 11.8 d.

La distribution du flux dans l'espace a la forme d'une courbe en escalier qui approche la sinusoïde.

Si nous faisons maintenant le même dessin  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  et  $45^\circ$  après l'instant de la Fig. 11.7, nous constatons que (Fig.11.9)

- la forme des escaliers est quelque peu modifiée;
- la surface des escaliers reste la même, donc également le flux total;
- le maximum de l'escalier se déplace vers la droite; ce maximum aura effectué un tour complet en une période.



Ces phénomènes prouvent que 3 bobines placées dans l'espace à  $120^\circ$  les unes par rapport aux autres et alimentées par une tension triphasée provoquent un champ tournant.

Ce champ tournant est à la base du fonctionnement du moteur à courant alternatif.

Dans un système avec trois bobines, la vitesse du champ tournant est telle que, par période, le champ parcourt  $360$  degrés magnétiques.

Si nous disposons sur le stator plusieurs séries de trois bobines, la vitesse du champ tournant variera;  $360$  degrés magnétiques seront parcourus par paire de pôle.

10.

On parle dans ce cas aussi d'une paire de pôle, puisque l'effet des 3 bobines est le même que celui de deux pôles.

La vitesse du champ tournant est :

$$N_s = \frac{60 \cdot f}{p}$$

$N_s$  = vitesse de synchronisme.

$f$  = fréquence de la tension d'alimentation.

$p$  = nombre de paires de pôle du moteur.

Cours 1204

Moteurs à courant alternatif (suite)

2. Influence d'un champ tournant sur un rotor.

Le moteur à courant alternatif comprend essentiellement (fig. 12.1)

- un stator exécuté comme décrit précédemment :  
3 bobines décalées de  $120^\circ$  et alimentées par une tension triphasée;
- un rotor qui contient un enroulement que nous considérerons provisoirement comme identique à celui du stator.
- les bobines du rotor sont reliées à des résistances réglables au moyen de bagues de frottement.

Supposons que le circuit du rotor soit ouvert, c'est-à-dire qu'il n'est pas raccordé aux résistances.

Soit  $U$ , la tension triphasée qui est appliquée au stator. Comme exposé dans la leçon précédente, un champ tournant naît donc dans ce stator. Le rotor est donc soumis à ce champ tournant. En d'autres termes, le rotor est donc soumis à un champ variable (le rotor restant immobile).

On peut donc comparer ce moteur à un transformateur dont le stator serait considéré comme le primaire, et le rotor le secondaire.

Le courant de charge nulle qui est absorbé par ce stator est beaucoup plus grand par suite de la présence d'un entrefer, ce qui augmente considérablement la réluctance. Supposons que nous fermions le circuit du rotor sur une résistance (fig. 12.1)

Fig. 12.1



2.

Le rotor est bloqué de sorte qu'il ne peut tourner. La f.é.m. induite dans le rotor provoque un courant dans celui-ci. Vu que le rotor se compose également de 3 bobines parcourues par un courant triphasé, ce rotor à l'arrêt produira également un champ tournant. Ce champ tournant tourne à la même vitesse, dans ce même sens de rotation, mais essaie de s'opposer au champ du stator, c'est-à-dire que le champ du rotor est décalé d'un pôle par rapport au champ du stator. Vis-à-vis d'un pôle nord du stator se trouve un pôle sud du rotor.

Vu que le flux total reste inchangé, le stator absorbe un courant supplémentaire pour maintenir le flux total à son niveau initial.

Par suite du courant qui passe dans le rotor, il s'exercera un couple sur ce rotor.

Si nous lâchons maintenant le rotor, il démarrera sous l'influence de ce couple moteur, dans la direction du champ tournant.

Suivant que le rotor tourne plus vite, la vitesse relative du champ tournant par rapport aux conducteurs du rotor diminue.

La fréquence de la f.é.m. E2 dans le rotor diminuera donc également. Si le moteur atteignait la même vitesse que la vitesse du champ tournant, les conducteurs du rotor ne seraient plus coupés par le champ tournant, et il n'y aurait plus de f.é.m. induite, et donc plus de courant rotorique. Si celui-ci est nul, il n'y a plus de couple. Ceci est cependant impossible, car il faut toujours un couple minimum pour, par exemple, vaincre les pertes mécaniques à charge nulle. Le moteur à induction ne peut donc atteindre de lui-même, la vitesse synchrone (vitesse du champ tournant) C'est pourquoi on appelle ce moteur "moteur asynchrone )

### 3. Glissement.

On appelle glissement la différence relative de la vitesse de rotation d'un moteur à induction par rapport à la vitesse de synchronisme.

$$y = \frac{N_s - N_r}{N_s}, \text{ d'où } N_r = N_s (1-y)$$

A l'arrêt,  $y = 1$

A la vitesse de synchronisme  $y = 0$

Dans le stator, la f.é.m. a la fréquence  $f_1$ .

Dans le rotor, la f.é.m. a la fréquence  $f_2 = yf_1$ .

Nous avons vu qu'à l'arrêt, le champ tournant du stator est combattu par le rotor.

Lorsque le rotor tourne à la vitesse  $N_r$ , la vitesse absolue du champ tournant du rotor est la somme de la vitesse du rotor,  $N_s$ , et de la vitesse du champ tournant provoqué par  $f_2$ , soit :

$$N_r + y N_s = N_s (1 - y) + y N_s = N_s.$$

Nous pouvons en conclure que les 2 flux continuent à se combattre, indépendamment de la vitesse du rotor (ou de  $y$ )

#### 4. Caractéristique couple-glissement.

On peut déterminer une relation mathématique pour exprimer le couple d'un moteur à induction en fonction du glissement.

Cette relation peut être représentée par une courbe (fig. 12.2).

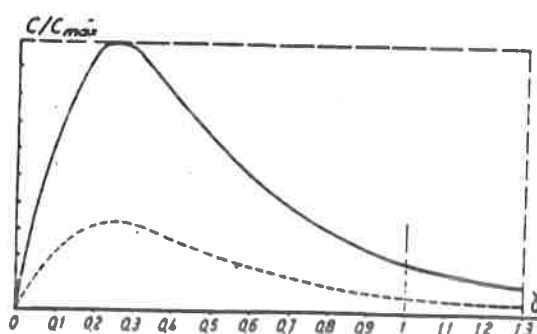


Fig. 12.2

La valeur du couple pour  $y = 1$  est le couple de démarrage. On constate que ce couple initial est nettement plus petit que le couple maximum, bien que le moteur ait généralement besoin du couple le plus grand pour accélérer la charge.

Lorsque la vitesse augmente ( $y$  diminue), le couple augmente jusqu'à un certain maximum, pour ensuite devenir nul à la vitesse de synchronisme.

Nous remarquons que la partie AB de la courbe n'est pas stable, puisque, lorsque la charge augmente et que la vitesse baisse, le couple diminue; de ce fait, le moteur ralentira encore plus, décrochera et s'arrêtera.

Dans la partie OA, lorsque le moteur ralentit, le couple augmente, et le moteur accélérera de nouveau.

On peut donc conclure que, dans cette partie de la courbe, le moteur sera stable.

4.

5. Applications de la caractéristique couple-glissement.

a) Démarrage du moteur à induction.

Nous avons vu que le couple du moteur au démarrage est faible. On peut cependant, en raccordant une résistance dans le circuit-rotorique (Fig. 12.1), déplacer le maximum de la caractéristique C-y, de telle sorte que ce maximum se situe à l'arrêt ( $y = 1$ ).

A la fig. 12.3 sont représentées 4 caractéristiques qui correspondent chacune à une résistance dans le circuit rotorique :

- courbe 1 : résistance débranchée
- 2 : résistance en position 1
- 3 : résistance en position 2
- 4 : résistance maximum.

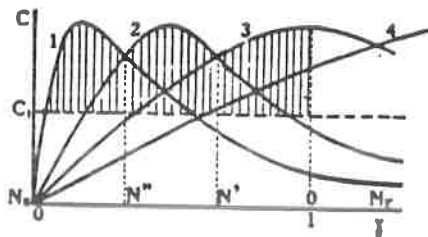


Fig. 12.3

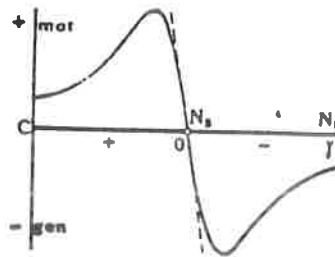


Fig. 12.4

C'est la courbe 3 qui convient le mieux au démarrage, vu que le couple est maximum à l'arrêt. La courbe 4 est moins appropriée, car le couple est plus petit à l'arrêt.

b) Vitesse en fonction de la charge.

Il est important de connaître la variation de la vitesse lorsque la charge varie.

Nous pouvons la déduire de la fig. 12.4 qui donne la variation du couple lorsque y varie. C'est une double caractéristique couple-glissement. La partie OA est la partie utilisable comme moteur; la vitesse varie très peu suivant que la charge varie; la caractéristique est pratiquement en ligne droite.

Cette caractéristique ressemble à celle d'un moteur shunt. La vitesse de synchronisme ne peut cependant pas être atteinte.

Dans la partie OA, le moteur se comporte comme génératrice et absorbe un couple.

Les autres parties sont inutilisables et instables.

c) Réglage de la vitesse.

Nous avons vu que le domaine dans lequel la vitesse peut varier est très limité (3 à 5 % de  $N_s$ ). C'est la grandeur de la vitesse de synchronisme qui sera déterminant pour la vitesse obtenue. Cette vitesse  $N_s$  dépend toutefois de la construction (nombre de paires de pôles) du moteur :

$p = 1$	2	3	4	5	6
$N_s = 3000$	1 500	1000	750	600	500

En raccordant une résistance au circuit rotorique, on peut cependant obtenir une game de réglage plus importante. Il se produira alors des pertes par effet joule plus importantes, ce qui diminuera fortement le rendement du moteur.

d) Influence de la tension aux bornes.

Si nous faisons varier la tension appliquée au moteur, nous obtiendrons différentes caractéristiques couple-glisserment (Fig.12.5).

Nous constatons que, pour une charge donnée, le point de fonctionnement se déplacera vers un glissement plus faible lorsque la tension augmente.

Fig. 12.5

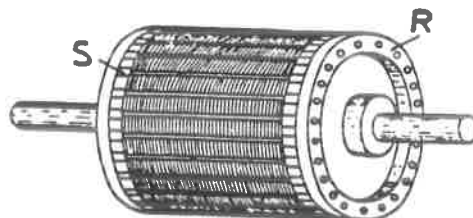


Si la tension baisse à ce point que la caractéristique se trouve sous la charge, le moteur décrochera et s'arrêtera.

6. Moteur à cage d'écureuil.

Au lieu d'appliquer sur le rotor un enroulement semblable à celui du stator, l'enroulement du rotor peut être constitué d'une série de barres  $S$  placées dans les encoches, parallèlement à l'axe, et reliées à leurs extrémités par deux bagues  $R$  en cuivre (Fig 12.6)

Fig. 12.6



6.

Le rotor ne possède pas, de lui-même, un nombre de pôles mais on peut démontrer qu'il s'adapte automatiquement au nombre de pôles du stator. Ces conducteurs rotoriques se comporteront d'eux-mêmes comme s'ils constituaient un enroulement d'un nombre de bobines triphasées.

Les propriétés du moteur sont les suivantes :

- Une construction très simple, vu qu'il n'y a ni bagues ni balais. L'enroulement du rotor est très simple.
- Du fait de la simplicité, le prix est très bas.
- Ce moteur est robuste de construction.
- Du fait de la suppression des bagues, les frais d'entretien et de réparation sont limités.
- Le démarrage de ces moteurs est difficile, car on ne peut raccorder de résistance dans le circuit du rotor. Théoriquement, ce moteur est seulement apte à démarrer à vide. La charge peut seulement être appliquée lorsque le moteur a atteint sa vitesse normale.

#### 7. Propriétés complémentaires du moteur à induction.

- Le moteur asynchrone triphasé est le plus important moteur pour les applications industrielles, par suite de ses avantages tels que :
  - construction simple;
  - prix d'achat peu élevé;
  - facilité d'utilisation et d'entretien;
  - fonctionnement stable.
- L'inversion du sens de marche peut être facilement obtenue en inversant deux fils de ligne, ce qui modifie le sens de rotation du champ tournant.
- Le courant magnétisant est important (entrefer) de telle sorte que le  $\cos \varphi$  est faible; pour améliorer celui-ci, on peut placer des condensateurs aux bornes (voir théorie des courants alternatifs).
- Le rendement des moteurs à induction est de l'ordre de 85 % pour les plus gros moteurs. La suppression des bagues pour les moteurs à cage d'écureuil diminue les pertes mécaniques dans le rotor.

#### 8. Moteur synchrone.

Nous avons vu que, dans un moteur asynchrone, le courant rotorique diminue lorsque la vitesse approche de la vitesse de synchronisme. Si la vitesse de synchronisme était atteinte,  $N_r = N_s$ , le courant rotorique serait nul et le couple également.

Cependant, si, par une source extérieure, nous fournissons au rotor un courant continu, cela donnera naissance à un couple, même à la vitesse de synchronisme.

Le moteur synchrone consistera donc en un enroulement triphasé et un rotor qui produit un flux dû au courant continu. On peut obtenir le courant continu au moyen d'une dynamo accouplée sur l'axe ou au moyen d'un redresseur triphasé.

Le moteur synchrone est donc, du point de vue constructif, identique à un alternateur. Le rotor est généralement exécuté avec des pôles saillants. Le démarrage du moteur synchrone peut être effectué comme suit :

On applique au stator une tension triphasée réduite. Le moteur, supposé sans charge, démarrera par suite des courants circulant dans les pôles du rotor et qui provoquent un couple. Le moteur accélère rapidement et se rapprochera doucement de la vitesse de synchronisme. Les pôles saillants du rotor ont la propriété, à charge nulle, de s'accrocher au champ tournant. Ce phénomène s'explique par le fait que les pôles magnétiques sont attirés par les pôles supposés tournant du stator.

Une fois le moteur "accroché", on applique l'excitation et on en règle la valeur. Alors seulement, on amène la tension d'alimentation du stator à sa valeur maximum et on peut accoupler la charge.

Le rotor tournera donc à la même vitesse que le champ tournant. Il n'est cependant pas en phase avec le champ tournant.

En effet, le déphasage augmentera en fonction de la charge. Cependant, si le déphasage dépasse  $90^\circ$ , le moteur quittera le synchronisme.

#### 9. Moteur à courant alternatif monophasé.

Considérons un stator qui porte un enroulement monophasé. Le courant alternatif qui passe dans le stator provoque dans celui-ci un champ alternatif  $\Phi$  (pas de champ tournant), dont l'axe correspond avec celui de l'enroulement (fig.12.7).

On peut démontrer mathématiquement que ce flux alternatif est égal à deux flux  $\frac{\Phi}{2}$  qui tournent en sens opposé (voir fig. 12.7)

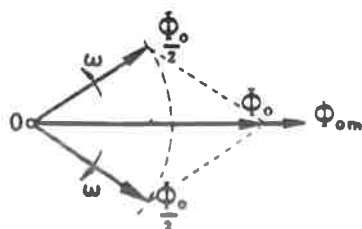


Fig. 12.7

8.

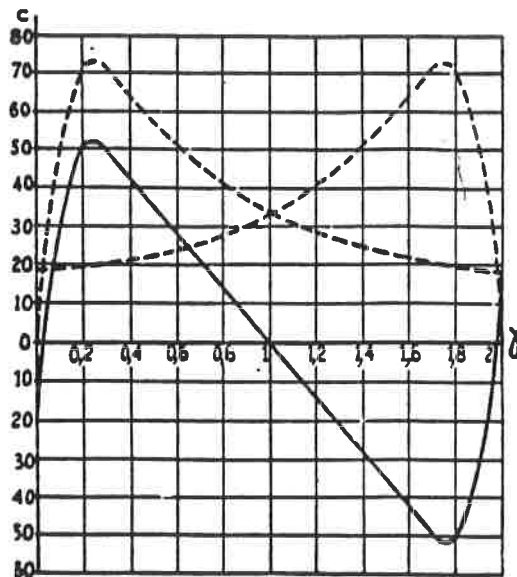


Fig. 12.8

Chacun de ces flux provoque un couple. Ces couples sont égaux, mais de sens opposé.

Le rotor ne démarrera pas.

La fig.12.8 montre que, pour  $\gamma = 1$ , le couple est nul.

Si nous lançons maintenant le moteur à la main, en rendant ainsi  $\gamma$  différent de 1, il y aura un déséquilibre entre les 2 couples et le moteur démarrera.

Ces moteurs, qui ne conviennent que pour de petites puissances, ne sont pratiquement plus utilisés.

On peut aussi faire démarrer le moteur automatiquement en ajoutant une phase auxiliaire, et en provoquant aussi une sorte de champ tournant, et donc le démarrage du moteur.

#### 10. Moteur universel.

Quand on inverse les deux fils d'alimentation d'un moteur à courant continu, il continue à tourner dans le même sens, vu que  $\Phi$  et  $I$  changent de sens en même temps.

On peut en conclure que le moteur à courant continu peut être alimenté par une tension alternative. Pratiquement, on ne peut réaliser cela qu'avec le moteur série, vu que l'inducteur du moteur shunt est trop inductif. Le moteur série doit cependant répondre à certaines conditions pour pouvoir être alimenté en courant alternatif :

- 1°) Le circuit magnétique doit être complètement exécuté en tôles métalliques (pertes par courant de Foucault dans le stator).

2°) Le collecteur et les balais doivent être largement dimensionnés parce que la commutation y est plus difficile.

Ces moteurs ont un large domaine d'application dans les appareils ménagers.

On ne construit cependant ces appareils que pour des puissances jusqu'à environ 2 kW.



COURS 1204Chapitre XI : Convertisseurs.

Les convertisseurs sont des machines destinées à transformer un courant d'une certaine nature en un courant d'une autre nature.

L'importance des convertisseurs augmente, vu la grande diversité des applications aussi bien du courant continu que du courant alternatif.

Le type de convertisseur qui est choisi dépend du courant électrique disponible (généralement mono ou triphasé) et de la tension nécessaire pour l'application. Les convertisseurs peuvent être répartis en deux grandes catégories, c-à-d :

- convertisseurs rotatifs ;
- convertisseurs statiques.

1. Convertisseurs rotatifs.

Les convertisseurs rotatifs se composent de deux (ou plusieurs) machines électriques accouplées les unes aux autres. Ces machines ont été détaillées dans les chapitres précédents. Il n'est donc pas nécessaire d'y revenir. Nous nous limiterons à mentionner les différentes variétés.

- Dispositif redresseur de courant.

Ce dispositif se compose d'un moteur à courant alternatif accouplé à une dynamo shunt ou compound. La dynamo doit posséder des propriétés très spéciales, comme par exemple pour un appareillage à souder. Par suite de l'apparition des redresseurs statiques, ce convertisseur est de moins en moins utilisé à cause de son coût élevé et de son faible rendement.

- Convertisseurs de fréquence.

Cet appareillage se compose d'un moteur synchrone avec un certain nombre de paires de pôles (p) et d'un alternateur avec un autre nombre de paires de pôles (kp).

Ainsi, un courant alternatif d'une certaine fréquence (généralement 50 Hz) est modifié en une autre fréquence.

Généralement aussi, la tension d'alimentation triphasée est convertie en une tension de sortie monophasée.

Il est évident que ces appareillages sont seulement indiqués dans des applications très spécifiques.

## 2. Convertisseurs statiques.

Les convertisseurs statiques sont des dispositifs qui transforment la tension d'alimentation en une tension de sortie d'une certaine nature sans utiliser de machines rotatives.

Les convertisseurs statiques les plus utilisés sont les redresseurs statiques. Le fonctionnement d'un redresseur statique est basé sur la propriété d'un appareil ou d'une matière de laisser passer le courant électrique seulement dans un sens et de le bloquer dans l'autre sens.

Ces appareils peuvent être les suivants :

- Redresseur à vapeur de mercure : il consiste en un tube en verre avec une électrode en charbon (anode) et une en mercure (cathode) ; on a fait le vide à l'intérieur du tube.

On constate qu'il est très facile de faire passer un courant du graphite vers le mercure, mais que le passage en sens inverse est impossible dans des conditions normales.

En raison de leur construction fragile et du faible rendement, ces redresseurs ne sont plus utilisés que sporadiquement ; ils sont pratiquement complètement remplacés par les semi-conducteurs.

- Redresseur à cathode chaude (diode)

Ce redresseur, qui était jadis utilisé principalement en radio-technique, est basé sur la propriété que possède un métal d'émettre des électrons lorsqu'on le chauffe. Dans un tube en verre dans lequel on a fait le vide, un fil à incandescence est chauffé par le passage d'un courant. Ce fil est amené à proximité d'une petite plaque en oxyde de barium qui a la propriété d'émettre facilement des électrons.

Dans cet appareil également, le courant peut passer dans un seul sens.

L'évolution des semi-conducteurs a pratiquement fait disparaître les tubes.

- Redresseurs secs

Les redresseurs secs sont actuellement exclusivement du type semi-conducteur. Un redresseur à semi-conducteur consiste en un cristal de germanium ou de silicium (ce qui est généralement le cas), qui est traité de telle sorte qu'il s'y produisent deux zones.

Dans l'une des zones, il y a un manque d'électrons (zone p), et dans l'autre zone il y en a un excédent (zone n). Ces zones sont provoquées par l'ajoute d'une petite quantité d'un métal étranger (impureté). Le courant passe facilement de la zone p vers la zone n, mais très difficilement dans le sens inverse.

Ces redresseurs ont les propriétés suivantes :

- permettre une très grande intensité ;
- le volume et le poids sont très faibles ;
- le rendement est très élevé, et la chute de tension est faible ;
- ils sont sensibles à la tension ; la tension dans le sens bloquant ne peut pas dépasser les limites fixées, sous peine de dommages irréparables ;
- vu leur faible volume, le refroidissement pose parfois un problème ;
- leur domaine d'application est très vaste ; ils ont la suprématie complète tant en courant faible qu'en courant fort ;
- les semi-conducteurs sont bon marché et ne nécessitent pas d'entretien ;
- des variantes déterminées de semi-conducteurs, tels les transistors et les thyristors, dominent le domaine des redresseurs réglables et des amplificateurs.

### 3. Types de redresseurs secs.

#### a) Redresseur monophasé simple

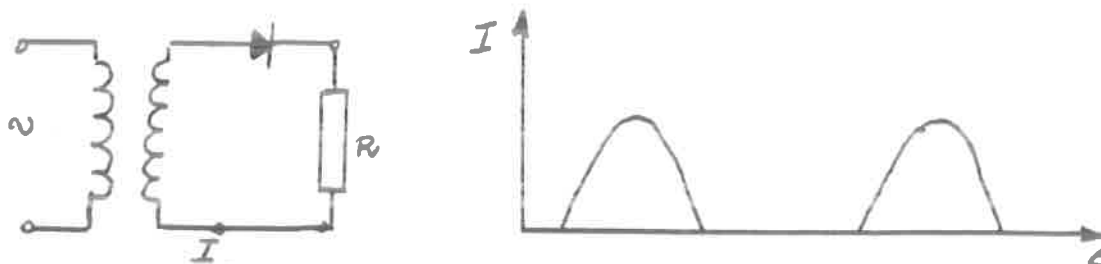


Fig. 13.1

Dans ce redresseur, seule l'alternance positive de la tension alternative passe.

Le courant traversant la résistance se présente sous la forme de la Fig. 13-1.

Ce type de redresseur a l'inconvénient de laisser passer un courant pulsif.

Cet inconvénient s'atténue en raccordant un condensateur en parallèle sur la résistance (Fig. 13-2).

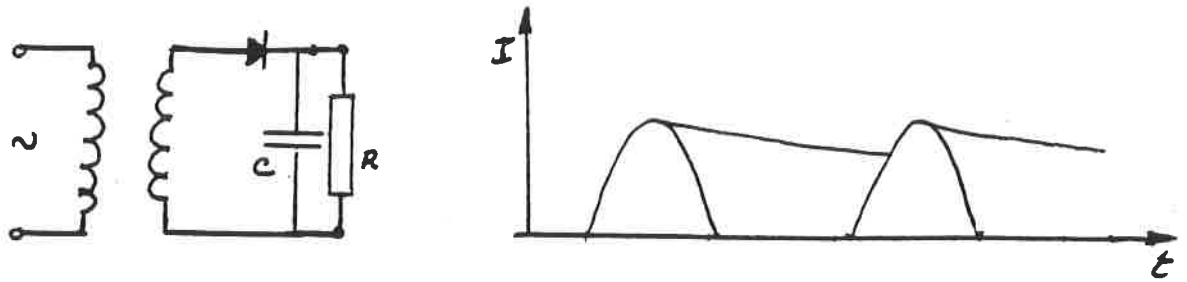


Fig. 13.2

Pendant le passage du courant, le condensateur se chargera. Pendant l'alternance de blocage, le condensateur se déchargera par la résistance.

De cette manière, ces fluctuations sont atténuées. Il faut cependant préciser que ce type de redresseur est rudimentaire et n'est pas utilisé lorsque la tension de sortie doit être stable.

b) Redresseur en pont.

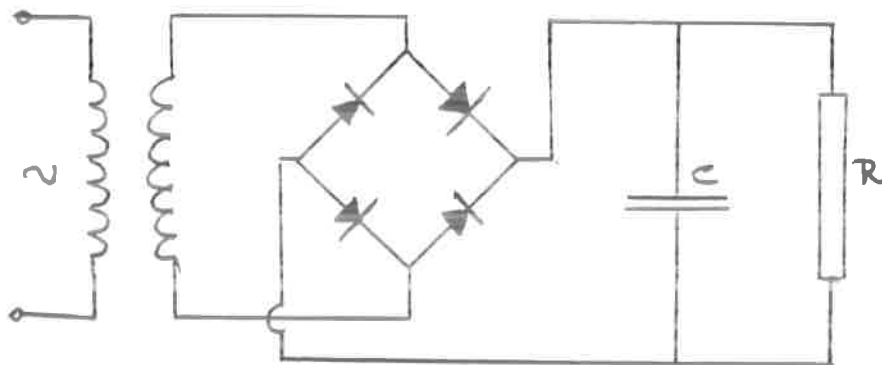


Fig. 13.3

Ce redresseur a la propriété de laisser passer toute l'alternance négative que l'alternance positive de la tension d'alimentation, mais de telle sorte que les deux alternances produisent un courant qui traverse la résistance dans le même sens (Fig. 13-3).

Nous remarquons que le courant redressé est très pulsif. La fréquence est double de celle du redresseur simple (Fig. 13-4 - a).

En ajoutant un condensateur, on obtient à nouveau un effet stabilisateur (Fig. 13-4 - b).

La tension finale obtenue est beaucoup plus plate que dans le redresseur simple.

Dans les applications monophasées, ce redresseur est le plus utilisé.

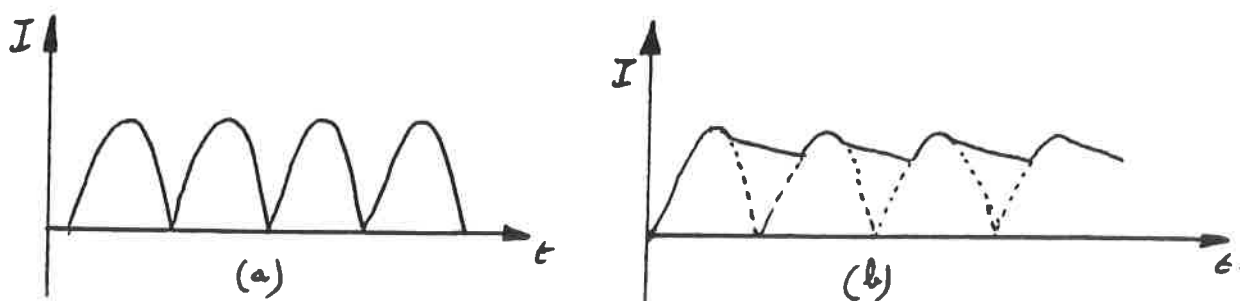


Fig. 13.4

c) Redresseur triphasé.

Dans ce type, les 3 phases sont redressées en même temps au moyen de 6 diodes (voir Fig. 13-5).

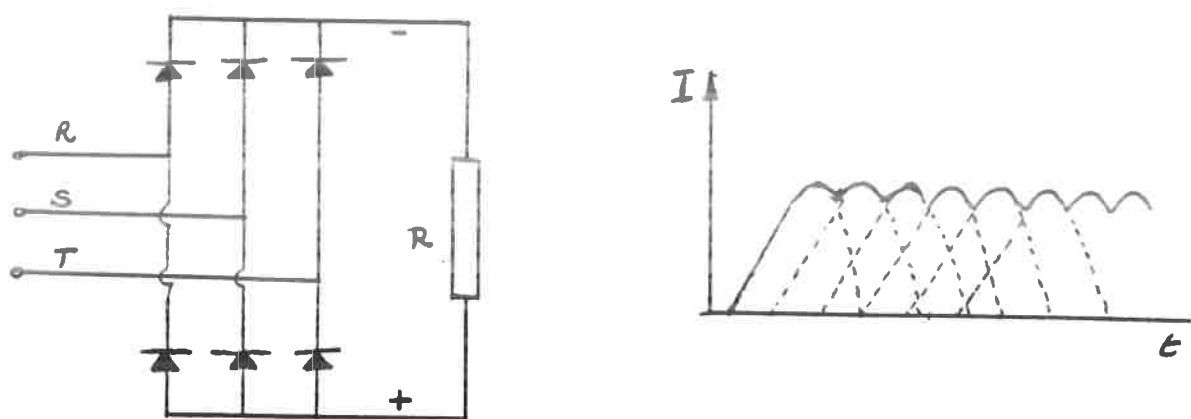


Fig. 13.5

Comme le montre la Fig. 13-5, la fluctuation de la tension redressée est très faible.

Ce raccordement donne la plus grande uniformité de la tension. La ride a cependant une grande fréquence, ce qui, dans des cas bien déterminés, nécessitera un filtre pour éviter les dérangements dus à des phénomènes de résonance.

## Châpitre XIII : Appareils de mesure.

### 1. Galvanomètre.

Le galvanomètre est la base des appareils de mesure classiques pour courant continu. La Fig. 13-6 montre la disposition théorique de cet appareil.

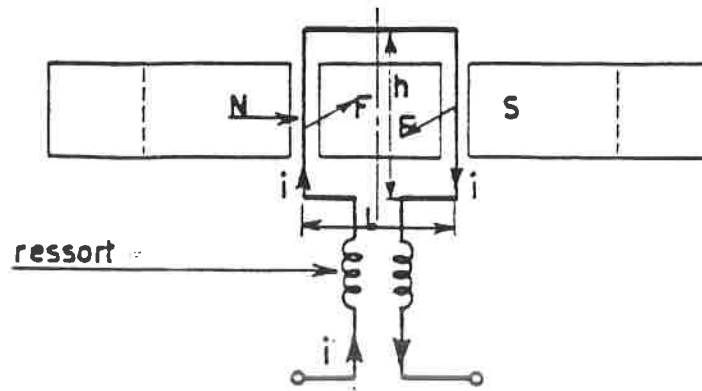


Fig. 13.6

Il consiste en un aimant permanent en forme de fer à cheval. Entre les pôles est placée une bobine qui peut tourner autour d'un axe. Dans la bobine est placée un noyau en fer doux pour diminuer la réluctance.

Soit  $B$  l'induction, et supposons que la bobine consiste en un cadre rectangulaire de largeur  $l$  et de hauteur  $h$ .

Quand un courant passe par la bobine, il s'exerce sur le conducteur une force donnée par la formule  $F = B \cdot I \cdot h$ .

En appliquant la règle de la main gauche, nous trouvons que les forces qui agissent sur le conducteur gauche et sur le droit s'opposent l'une à l'autre.

Ces deux forces forment un couple  $C = F \times l$ .

Le cadre est relié à un ressort de torsion qui se déforme lors de la rotation angulaire du cadre, par suite du couple.

Au plus le courant sera important, et par conséquent le couple également, au plus la rotation angulaire sera importante.

Si nous interrompons le courant, la bobine reviendra à sa position de repos par suite de l'action du ressort.

Conclusion : cet appareil peut servir pour la mesure d'un courant continu.

## 2. Shunt.

Si le courant que nous voulons mesurer est trop important, il ferait fondre la bobine. Pour éviter cela, on place un shunt. Pour mesurer de fortes intensités, une petite partie, connue, du courant est déviée dans l'appareil de mesure, tandis que la plus grande partie passe par le shunt (Fig. 13-7).

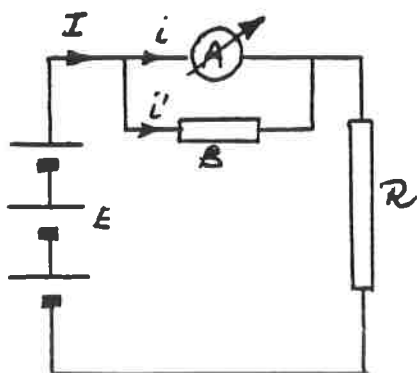


Fig. 13.7

$$\begin{aligned}
 I &= i + i' \\
 s &= \text{résistance du shunt} \\
 y &= \text{résistance de l'appareil} \\
 i \times y &= s \times i' \\
 i \times y &= s (I - i) \\
 \text{ou } i &= \frac{s}{s+y} \cdot I
 \end{aligned}$$

Un shunt n'est pas déterminé par sa résistance, mais par le courant que son utilisation permet de mesurer, et par la chute de tension que ce courant provoque (par ex. 500A - 100mV).

## 3. Courant alternatif - ampèremètres.

L'appareil décrit ci-dessus avec cadre mobile ne peut pas être utilisé pour la mesure d'un courant alternatif.

Un schéma de principe est représenté à la Fig. 13-8.

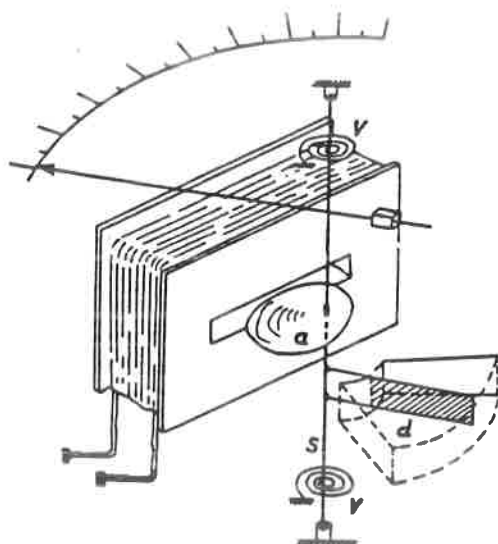


Fig. 13.8

Un disque rond en acier doux est fixé excentriquement sur le pivot vertical s. Ce disque est attiré par la bobine avec une force directement proportionnelle au carré du courant. Le disque est freiné par les ressorts de torsion, tandis que l'amortisseur amortit les vibrations du système en mouvement.

Au début, la division de l'échelle est quadratique, tandis que, pour des intensités plus importantes, l'angle augmente moins vite par rapport à l'intensité.

L'appareil peut être utilisé aussi bien pour le courant continu que pour le courant alternatif.

Ces appareils sont simples, résistants, bon marché, et ont une précision raisonnable.

Si le courant à mesurer est trop important, on donne la préférence à un transformateur de mesure plutôt qu'à un shunt.

En effet, l'appareil a une impédance relativement grande, ce qui pourrait influencer le courant à mesurer.

### 3. Appareil électro-dynamique.

L'appareil est en principe analogue au galvanomètre décrit ci-dessus, mais l'aimant permanent est remplacé par un enroulement fixe. Le courant à mesurer passe par les deux enroulements, de sorte que le couple est proportionnel au carré du courant.

L'appareil est utilisé aussi bien pour le courant continu que pour le courant alternatif et est assez précis.

### 4. Voltmètres.

La mesure de la tension entre deux points s'effectue pratiquement en raccordant une très grande résistance entre ces points et en mesurant l'intensité qui passe dans cette résistance.

Que cette résistance doit être grande va de soi, sinon le courant qui passerait dans l'appareil serait trop grand, et le raccordement du voltmètre modifierait les rapports entre les tensions et les intensités.

Un voltmètre n'est donc rien d'autre qu'un milliampèremètre avec une résistance placée en série. Cette résistance est généralement incorporée dans l'appareil.

Certains voltmètres ont une telle résistance qu'ils absorbent une intensité insignifiante et ne modifient en rien le circuit.

### 5. Mesure d'une puissance électrique (Wattmètre).

En courant continu,  $P = E \times I$ , et la puissance peut être mesurée en raccordant un voltmètre et un ampèremètre.

En courant alternatif,  $P = E \times I \times \cos \varphi$ , de sorte qu'un appareil spécial doit être utilisé.

Le waltmètre consiste en principe en un appareil électrodynamique dans lequel l'enroulement fixe B est placé en série avec le circuit. Il est donc parcouru par le courant principal (Fig. 13-9).

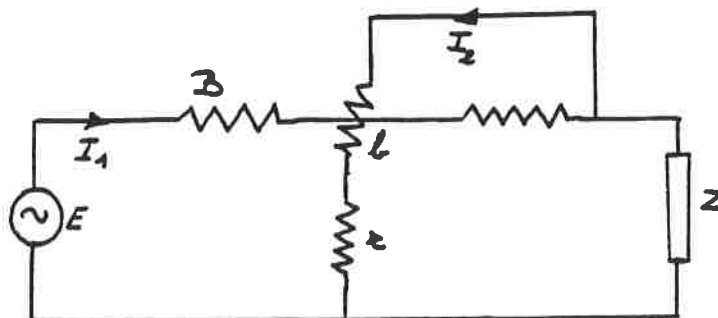


Fig. 13.9

L'enroulement mobile, en série avec une résistance  $r$ , est raccordé sur la pleine valeur de la tension.

Le couple qui s'exerce sur la bobine mobile, est directement proportionnel au courant  $I_1$ , à la tension  $E$  et au déphasage.

Le déplacement de l'aiguille est directement proportionnel à la puissance dans la résistance.

#### 6. Appareils de mesure spéciaux.

Par suite de l'évolution de l'électronique, on a mis au point des appareils où il est possible de lire directement l'intensité, la tension, la puissance, etc...

Ces appareils entièrement statiques ont des grands avantages :

- ils sont bon marché et ne nécessitent pas d'entretien ;
- ils sont résistants aux chocs ;
- il n'y a pas d'erreur de lecture possible.

D'autre part, la précision laisse à désirer lorsque les indications changent continuellement.



Cours 1204.

Chapitre XIII - ECLAIRAGE.

1. Définition.

Les ondes électromagnétiques dont la longueur d'onde est comprise entre 380 et 760  $\mu\text{m}$  possèdent la propriété d'être visibles par l'oeil humain.

La lumière est une forme d'énergie qui peut être produite par transformation de l'énergie électrique.

Avant de discuter des différentes sources de lumière, nous donnons ci-après certaines définitions de notions de photométrie.

- a) Le flux lumineux  $F$  est l'énergie totale qui est rayonnée par unité de temps dans le spectre visible.
- b) L'intensité lumineuse d'une source lumineuse dans une direction déterminée est le flux lumineux dans cette direction par unité d'angle solide.

$$I = \frac{\Delta F}{\Delta W}$$

- c) L'éclairement  $E$  en un point d'une surface est la densité de flux lumineux ou point considéré.

$$E = \frac{\Delta F}{\Delta S}$$

L'éclairement varie quadratiquement avec le carré de la distance entre le point et la source.

- d) La luminosité  $L$  d'une source lumineuse dans une direction déterminée est le rapport entre l'éclairement dans cette direction et la projection de la surface éclairante sur un plan perpendiculaire à la direction considérée (fig.14.1).

$$L = \frac{\Delta E}{\Delta S \cdot \cos \alpha}$$

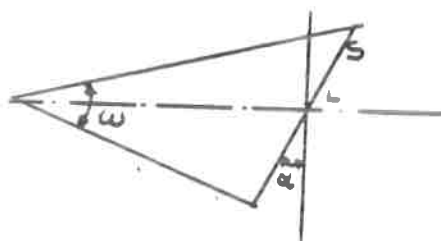


Fig. 14.1

## 2. Unités.

L'unité fondamentale d'intensité lumineuse est le "candela".  
Les autres unités peuvent en être déduites :

- lumen : unité de flux lumineux;
- lux : unité d'éclairement.

## 3. Sources de lumière.

### A. Lampes à incandescence.

Le fonctionnement d'une lampe à incandescence est basé sur le rayonnement lumineux d'un corps porté à haute température. Cette augmentation de température est provoquée par l'effet joule dû au passage d'un courant électrique dans un fil métallique.

Pour éviter que le fil ne s'oxyde, il est placé sans un espace sous air.

Pour diverses raisons, on a choisi un filament en Wolfram :

- la température d'incandescence brille à une température nettement inférieure à la température de fusion;
- la vitesse d'évaporation est très faible lorsque la température reste en-dessous de 2300°C;

Pour diminuer l'évaporation, on peut remplir l'ampoule avec un gaz inerte, mais celui-ci provoque une production de chaleur et une consommation plus élevée.

Du point de vue électrique, les lampes à incandescence ont les propriétés suivantes :

- le rendement des lampes à incandescence est d'environ 25 lumen par watt;
- le Wolfram a un coefficient de température positif ce qui signifie que la résistance est faible à l'enclenchement. L'intensité d'enclenchement est donc très élevée (10 à 15 fois le courant normal).  
La résistance augmente cependant vite, ce qui fait rapidement baisser l'intensité;
- les lampes à incandescence donnent une lumière chaude, ce qui est considéré comme favorable pour le confort ;
- les lampes à incandescence sont sensibles à la tension, ce qui signifie que la durée de vie diminuera pour une tension plus élevée ;
- la durée de vie des lampes à incandescence est également influencée défavorablement par les vibrations. Dans des circonstances normales, une durée de vie de 1 000 h est garantie. Sur le matériel de traction, elle est réduite de moitié.

## B. Lampes à décharge de gaz.

Le principe de fonctionnement des lampes à décharge de gaz est totalement différent de celui des lampes à incandescence.

Par le déplacement des électrons libres dans un gaz, on provoque des chocs avec les atomes du gaz.

L'électron cédera une partie de son énergie cinétique à l'atome. Cette augmentation d'énergie peut suffire pour placer un électron de l'atome sur une trajectoire plus élevée.

Ce n'est cependant pas une situation stable, de sorte que cet électron retombera sur son ancienne trajectoire (et donc son ancienne situation d'énergie).

Cela va de pair avec une libération d'énergie (énergie lumineuse).

### a) Tube néon

Le tube néon consiste en un tube en verre rempli de néon sous basse pression. Les électrodes sont placées aux deux extrémités et sont soumises à une haute tension (550 V par mètre).

La tension d'allumage est cependant supérieure de 50 % à la tension de fonctionnement normale.

Pour réaliser cela, les électrodes sont alimentées par un transformateur de caractéristique externe favorable (la tension baisse en fonction du courant). La courbe est ainsi stabilisée.

Les tubes néon sont, à cause de la lumière colorée, fortement utilisés à des fins publicitaires.

Pour obtenir diverses nuances de couleur, on peut utiliser d'autres gaz (par ex. à vapeur de mercure).

Le grand inconvénient de ces lampes est la haute tension nécessaire à l'allumage, ce qui peut poser des problèmes de sécurité.

### b) Lampes à tube fluorescent

La lumière émise par une lampe à mercure dépend de la pression de vapeur. A très basse pression (0,01 mm. de mercure), 96 % de la lumière est émise sur une longueur d'onde de 253  $\mu\text{m}$ . Ces lampes donnent un mauvais rendement lumineux. Il est cependant possible d'augmenter sen-

siblement ce rendement lumineux en recouvrant le côté intérieur du tube d'une mince couche de matière fluorescente. Cette matière possède la propriété d'absorber des rayons d'une longueur d'onde déterminée et de les restituer avec une longueur d'onde plus grande.

### Enclenchement des tubes fluorescents

Un système très utilisé est représenté à la fig. 14.2

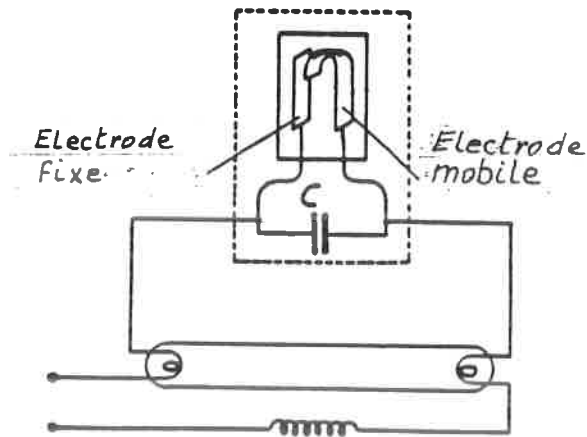


Fig. 14.2

Parallèlement au tube, on place un starter qui consiste en un petit tube en verre rempli de gaz et où se trouvent deux électrodes qui, en position de repos, ne sont pas en contact. Une de ces électrodes est un bimétal.

Quand on ferme le tube sur le réseau, il se produit une décharge de gaz dans le tube en verre, ce qui chauffe le bimétal ; celui-ci plie et vient en contact avec le contact fixe. A ce moment, il y aura une intensité importante qui passera dans la bobine d'inductance et les filaments de la lampe.

Le contact des deux électrodes fait disparaître la décharge de gaz et le développement de la chaleur. Le bimétal se refroidit et interrompt le contact. La présence d'une grande inductance dans le circuit provoque une surtension importante entre les bornes du tube. Vu que les filaments sont déjà chauds, cette tension suffit pour provoquer l'allumage.

### Propriétés des lampes fluorescentes

- 1) Par la nature même de l'enclenchement, ces lampes ont un très mauvais facteur de travail. Celui-ci peut être amélioré en plaçant un condensateur supplémentaire aux bornes.

- 2) Le rendement lumineux est très grand (50 lumen/watt).
- 3) La durée de vie est très grande (3 000 à 5 000 h.).
- 4) Ces tubes sont peu sensibles aux variations de tension.
- 5) Le domaine d'application augmente régulièrement, principalement à cause des frais d'énergie réduits. Les frais d'installation sont cependant un peu plus importants, mais leur influence est peu importante.

c) Lampe à vapeur de mercure

La lampe à vapeur de mercure consiste en un tube en verre dans lequel sont placées deux électrodes principales et une électrode auxiliaire.

L'espace intérieur est rempli de gaz (argon) et de mercure. L'électrode auxiliaire est placée près d'une des électrodes principales.

L'espace intermédiaire est vide, de sorte que la température extérieure ne peut pas en influencer le fonctionnement.

Si on applique la tension aux bornes, il se produira une décharge entre l'électrode auxiliaire et l'électrode principale la plus proche, étant donné leur faible écartement. Le gaz s'échauffera et le mercure s'évaporerá. La décharge se produira alors entre les deux électrodes principales, ce qui donnera une lumière claire bleuâtre.

Ces lampes ont surtout des applications industrielles, où des grandes surfaces doivent être éclairées (par ex. terrains de football, faisceaux de manoeuvre,...).

d) Lampe à vapeur de sodium

Le fonctionnement de la lampe au sodium est sensiblement le même que celui de la lampe à vapeur de mercure.

La couleur de l'éclairage est cependant jaune. C'est une couleur qui présente de grands avantages pour l'éclairage des autoroutes. C'est d'ailleurs pour cette raison que ces lampes ont été conçues.

Chapitre XIV - Appareils électriques auxiliaires.

De plus en plus, la technique fait appel à des appareils électriques pour la commande, le réglage et la sécurité des installations.

Dans ce chapitre, nous décrirons seulement quelques appareils très utilisés.

Cette technique est en pleine évolution ; il y a encore toujours de nouvelles découvertes ; de ce fait, le domaine d'application de l'électrotechnique prend continuellement de l'extension.

### 1. Appareils électriques de sécurité.

Les appareils électriques de sécurité décrits ci-dessous protègent les circuits électriques contre des intensités ou des tensions anormalement élevées lorsqu'il se produit un défaut interne ou externe.

#### 1.1. Sécurités à fusion.

Les sécurités à fusion protègent les appareils électriques contre une petite ou une grande surcharge, et contre les court-circuits.

La sécurité à fusion consiste en un conducteur calibré qui, par suite de l'effet Joule, fondra lorsque le courant qui le traverse sera trop grand. La sécurité à fusion peut être du type ouvert ou du type fermé.

Dans le type ouvert, l'utilisateur peut remplacer lui-même le fil calibré ; ce type possède le grand inconvénient de ne pas disposer de moyens d'extinction lorsqu'il se produit un arc lors de la fusion.

Pour cette raison, ce type est fort peu utilisé.

Par contre, la sécurité à fusion du type fermé est à remplacer complètement après fusion. D'autre part, elle offre l'avantage d'assurer une protection nettement plus efficace des circuits.

La fig. 14.3 donne la représentation de la construction d'une sécurité à fusion.

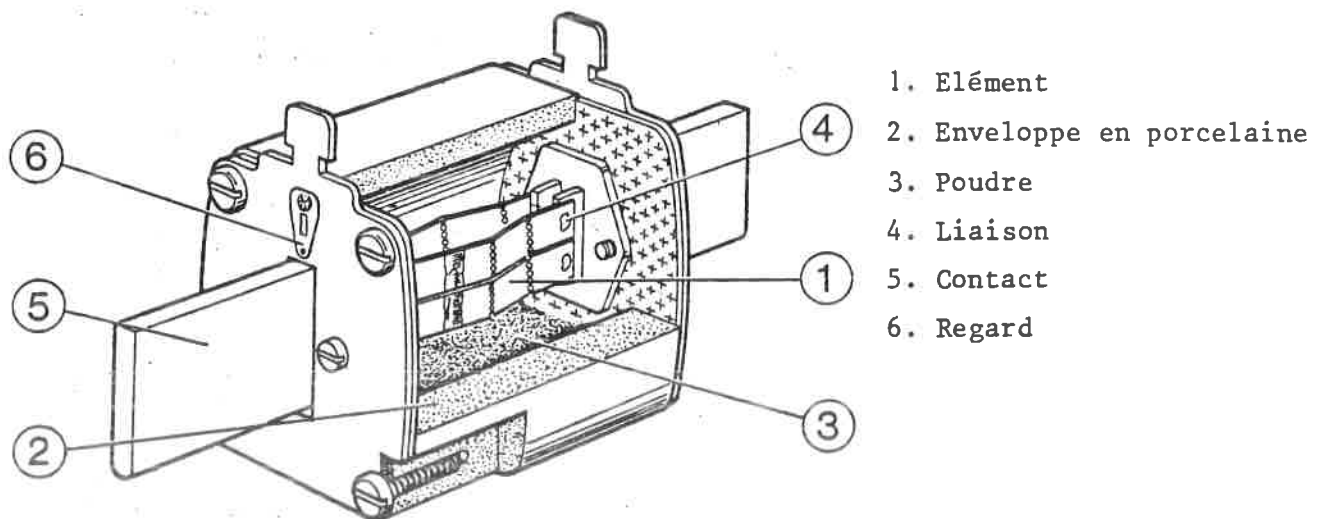


Fig. 14.3

### Caractéristiques d'une sécurité à fusion

- 1) L'intensité nominale. C'est l'intensité qui peut passer indéfiniment dans l'appareil sans fusion et sans échauffement anormal.
- 2) La tension nominale. C'est la tension maximum des circuits où cet appareil peut être utilisé.
- 3) La zone de fonctionnement. la zone de fonctionnement détermine le temps en fonction de l'intensité. Cette caractéristique importante permet de juger la sélectivité d'une intensité. C'est surtout important lorsque plusieurs sécurités à fusion sont en série.

Ex : Une sécurité à fusion d'une intensité nominale de 100 A fondra après 40 sec. si elle est parcourue par 300 A.

Ce temps diminue rapidement à intensité croissante.

- 4) Puissance de coupure. On désigne ici la plus grande intensité de court-circuit qui peut être interrompue sous une tension bien déterminée, par ex. 20 000 A sous 200 V en courant alternatif.

Les puissances de coupure en courant continu sont toujours sensiblement plus faibles que celles données en courant alternatif.

### 1.2. Interrupteurs magnéto-thermiques

Les interrupteurs magnéto-thermiques sont fort utilisés dans les installations fixes.

Un modèle est décrit à la figure 14.4.

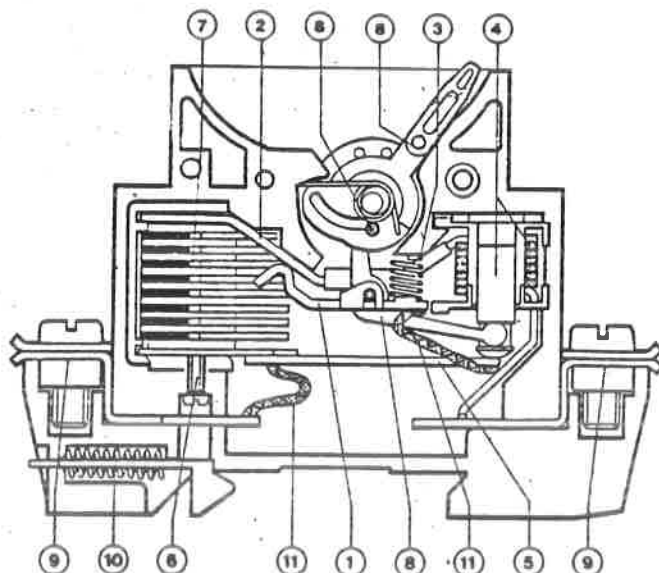


Fig. 14.4

L'interrupteur magnéto-thermique peut réagir à deux types d'anomalie.

- a) Lorsqu'il se produit un court-circuit dans l'appareil consommateur, il faut intervenir aussi rapidement que possible. Dans ce cas, cela se produit comme suit. La bobine (4) est parcourue par un courant de court-circuit et déverrouillera immédiatement la poignée (8). Sous l'influence du ressort (3), le contact mobile s'ouvre. L'arc qui prend naissance est alors étouffé dans la boîte à flamme.
- b) S'il se produit une surcharge qui fait que le courant augmente légèrement, l'interrupteur magnétique ne réagira pas.

Le courant passe cependant aussi par le bimétal (5). Après un certain temps, indépendant du réglage, le bimétal pliera par la chaleur et actionnera le mécanisme de déverrouillage (8). Le contact mobile s'ouvrira donc sous l'influence du ressort.

Les caractéristiques de ces interrupteurs correspondent en grande partie avec celles des sécurités à fusion.

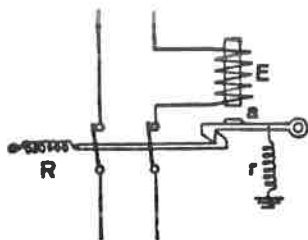
Ces appareils présentent le grand avantage qu'ils sont utilisables indéfiniment.

D'autre part, la présence d'organes mobiles les rendent sujets à usure ; la valeur de réglage peut donc se modifier avec le temps.

Il faut donc prévoir un réglage périodique.

### 1.3. Relais de courant et de tension

Fig. 14.5



Le schéma de principe d'un interrupteur avec relais de courant max est représenté à la fig. 14.5

Lorsque le courant, dans le circuit à protéger, dépasse une certaine limite, l'électroaimant E attire son armature a, ce qui, sous l'influence du ressort R, ouvre l'interrupteur.

Le mouvement de l'armature a est freiné par le ressort r, de sorte que l'interrupteur ne s'ouvre seulement que lorsque la force d'attraction de l'aimant est plus grande que la force du ressort.

La coupure intervient d'autant plus vite que le courant dans la bobine est plus grand. Il n'y a cependant aucun retard dans le fonctionnement.

Un fonctionnement retardé peut, dans certains cas, être nécessaire ; cette explication sort du cadre du cours.

Le schéma du relais à tension max. est représenté à la fig. 14.6. Le fonctionnement est identique à celui du relais de courant. Le courant dans la bobine augmentera en fonction de la tension.

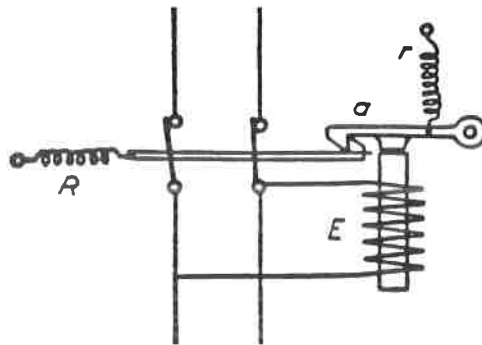


Fig. 14.6

#### 1.4. Relais différentiel

Le relais différentiel compare deux grandeurs de même sorte, par ex. deux courants ou deux tensions, qui, dans des circonstances normales, sont égales mais qui, par suite d'une situation anormale, sont différentes.

Ces relais contiennent des bobines à enroulements opposés, parcourues par les unités à comparer.

Si les deux courants, par ex., sont égaux, les deux flux s'opposent.

S'il se produit une différence, le flux total ne sera pas nul et, pour une certaine valeur, une armature sera attirée et actionnera l'interrupteur.

Une application typique est le relais anti-enrayage qui compare les courants de traction de deux moteurs de traction.

Si un moteur patine, il absorbe moins de courant, et le relais différentiel intervient.

Le relais différentiel est également beaucoup utilisé comme interrupteur en cas de perte de courant. Si les deux fils

d'alimentation d'une installation sont enroulés en sens opposé sur des bobines, les flux de ces deux bobines seront égaux.

S'il se produit une masse dans l'installation, le courant qui passe dans les 2 conducteurs sera différent et le relais interviendra.

COURS 1204

2. Appareils de commande

La grande extension du domaine d'application des appareils électriques de commande est la cause de la grande diversité en ce domaine.

Nous donnerons seulement dans ce cours un aperçu des différentes possibilités.

2.1. Appareils de commande manuels

Dans la plupart des cas, l'ordre de démarrer, d'arrêter ou de modifier le fonctionnement des circuits électriques est donné par l'homme.

Il est donc nécessaire de disposer de moyens qui permettent ces opérations de façon adéquate et sûre.

A ce groupe d'appareils appartiennent surtout les interrupteurs.

Différentes possibilités sont disponibles :

- Boutons poussoirs avec une ou deux positions.
- Interrupteurs rotatifs qui peuvent commander simultanément différents contacts.
- Interrupteurs à culbuteurs.

Un interrupteur est adapté à son usage de telle sorte que :

- le courant à interrompre ne dépasse pas les possibilités des contacts; ce courant est fortement indépendant de la tension de part et d'autre de ces contacts;
- la vitesse de déplacement des contacts est indépendante de celui qui actionne l'interrupteur; le mouvement des contacts doit être le plus rapide possible pour éviter leur échauffement par les phénomènes de self-induction.

2.2. Appareils de commande électrique

2.2.1. Contacteurs

Les contacteurs électromagnétiques consistent, en principe, en un cadre (Fig. 15.1) sur lequel est monté une bobine. Lorsque cette bobine est excitée, l'armature A sera attirée.

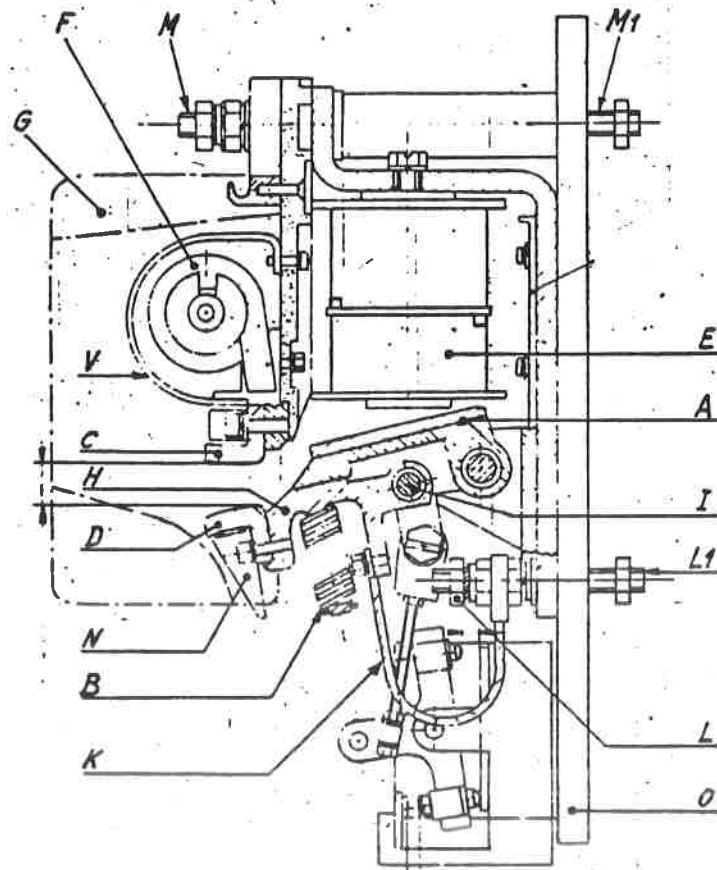


Fig. 15.1

Par conséquent, les contacts principaux C (fixe) et D (mobile) se ferment.

L'armature commande un levier ainsi que les contacts auxiliaires. Ceux-ci sont utilisés pour le contrôle de la position du contacteur et pour la commande des circuits secondaires.

Si l'alimentation de la bobine est interrompue, le contact mobile retombera à sa position de repos sous l'influence du poids de l'armature et du ressort B.

S'il se produit un arc entre les contacts, cet arc sera soufflé dans la boîte à flamme sous l'influence de la bobine de soufflage.

Les caractéristiques suivantes sont importantes :

- capacité de coupure du contact principal (courant sous une tension déterminée);
- tension d'alimentation de la bobine;
- nature et capacité des contacts auxiliaires.

Etant donné la puissance relativement importante absorbée par la bobine, ces contacteurs sont rarement utilisés directement. Il sera généralement nécessaire d'utiliser un relais auxiliaire qui, à son tour, commandera l'interrupteur.

### 2.2.2. Relais

Le fonctionnement du relais auxiliaire est analogue à celui des contacteurs de puissance.

Le relais actionne seulement des puissances limitées et a seulement un but de signalisation.

Si le contacteur possède généralement un contact principal avec plusieurs contacts auxiliaires plus petits, le relais est alors équipé de plusieurs contacts identiques (normalement fermés et normalement ouverts).

Selon l'objectif, il existe différents types de relais, par ex :

- relais pour montage sur rails;
- relais pour le placement de circuits imprimés;
- relais pour applications spéciales.

Etant donné les petites puissances, ces relais ne possèdent généralement pas d'installation de soufflage.

Les contacts consistent généralement en un alliage en argent ou en or pour diminuer l'influence des étincelles, et donc pour en augmenter la durée de vie.

### 2.2.3. Relais de temps

Le relais de temps est conçu de la même manière qu'un relais ordinaire, mais est équipé d'un mécanisme à retardement.

Cela a pour conséquence que les contacts ne s'enclenchent pas directement après l'alimentation de la bobine, mais après un temps bien déterminé, généralement réglable.

Le mécanisme à retardement peut-être :

- pneumatique : un volume d'air se remplit ou se vide au travers d'un orifice calibré;
- ou électronique : un condensateur se décharge sur une résistance.

La discussion de toutes les combinaisons possible sort du cadre du cours.

2.2.4. Electrovalve

L'électrovalve est l'appareil par excellence pour commander des installations pneumatiques d'une manière (électrique) simple.

Une électrovalve consiste, en principe, en une valve (Fig. 15.2) qui est commandée par un poussoir D soumis à l'attraction de la bobine B.

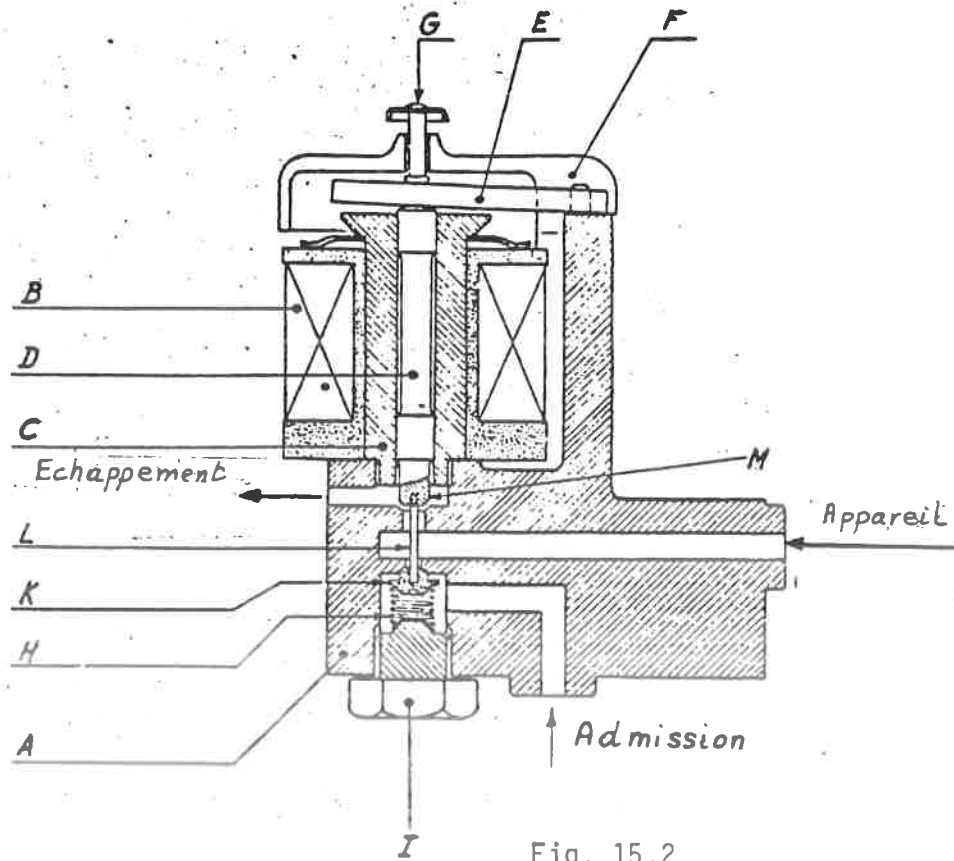


Fig. 15.2

Si la bobine est excitée, le poussoir D est attiré et ouvre la valve K.

L'air (ou autre gaz ou liquide) passe alors vers l'appareil à commander.

Quand l'alimentation de la bobine est interrompue, la valve K se referme sous l'action du ressort H et ouvre la valve M.

L'air s'échappe alors de l'appareil vers l'atmosphère. L'appareil à commander n'est plus alors sous pression.

Les électrovalves sont définies suivant :

- le type, c'est-à-dire normalement fermé (direct) ou normalement ouvert (inverse);
- la tension d'alimentation de la bobine;
- la nature du fluide;
- le débit nécessaire; la valve peut être parfois équipée d'un servomoteur qui augmente le débit;
- la pression maximum que la valve peut supporter en position fermée.

### 3. Appareils de régulation

De plus en plus on fait appel, pour certaines grandeurs physiques, à un appareillage d'enclenchement qui est utilisé soit comme appareil de sécurité, soit comme appareil de régulation.

Nous traiterons ci-après un exemple des appareils pour le réglage de :

- la température;
- la pression;
- la hauteur du niveau d'un liquide;
- la position.

#### 3.1. Thermostat

Les thermostats électriques ont, par leur construction simple et sûre, conquis presque l'entièreté du marché.

Nous donnons ci-après la description du fonctionnement d'un appareil type BARKSDALE (fig. 15.3).

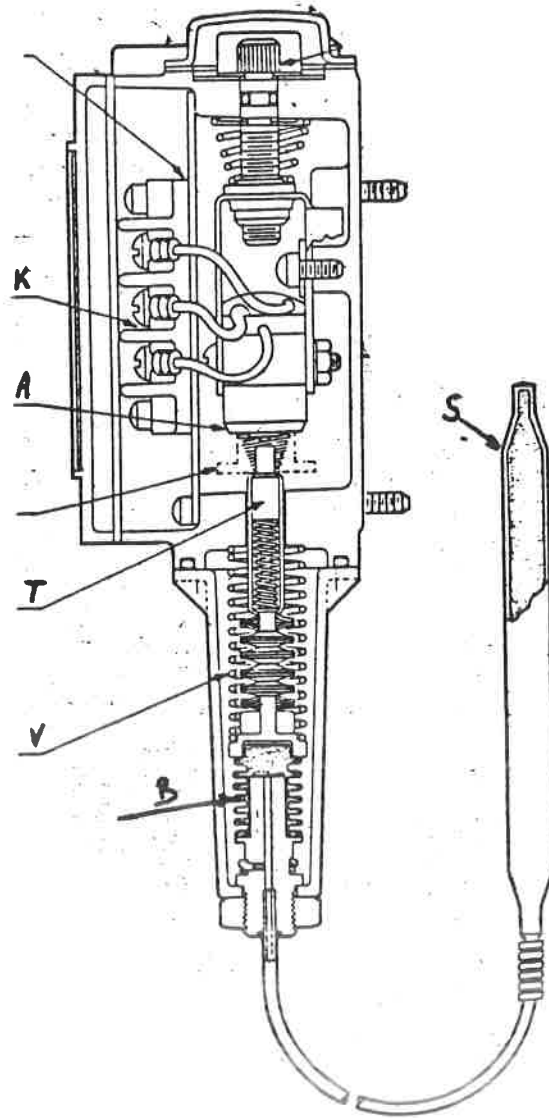


Fig. 15.3

Le fonctionnement de ce thermostat électrique est basé sur la dilatation d'une matière à température croissante.

Une sonde 5 remplie d'une matière glycérineuse est plongée dans le fluide à mesurer (par ex. de l'eau).

Si la température de ce fluide augmente, cette matière se dilatera. Cette sonde est reliée à l'appareil au moyen d'un fin tube (capillaire). Par la dilatation de la matière, le soufflet (B) se dilatera et poussera vers le haut le poussoir (T).

Ce poussoir s'appuie sur un interrupteur (A) qui, pour une certaine température  $t_1$ , commandera un contact.

Si la température baisse, la matière rentrera dans la sonde et le ressort (V) repoussera le poussoir, de sorte qu'à une température déterminée  $t_2$ , le contact se rouvrira.

La température montante ( $t_1$ ) et descendante ( $t_2$ ) ne sont pas les mêmes.

La différence entre les deux températures s'appelle le différentiel.

Si la température ne peut subir que de faibles variations, il est souhaitable que le thermostat possède un petit différentiel.

Si le différentiel est cependant trop faible, les variations seront trop fréquentes, ce qui peut dérégler l'appareillage.

Il existe des appareils à différentiel fixe et à différentiel variable.

Les caractéristiques suivantes sont importantes :

- la puissance de l'appareil qui doit être commandé (tension et courant);
- le fluide;
- la gamme de température;
- la pression dans le fluide.

Ces appareils sont souvent utilisés également comme appareils de sécurité, pour déclencher une installation lorsqu'une température maximum est atteinte.

### 3.2. Pressiostat

Un pressiostat (ou mancontact) possède généralement une membrane ou un soufflet qui se déforme sous l'influence de la pression.

Cette déformation est transformée par un mécanisme en un mouvement rectiligne pour asservir un contact.

Lorsque la pression baisse, la membrane (ou soufflet) est repoussée par un ressort, et le contact s'ouvre (fig. 15.4).

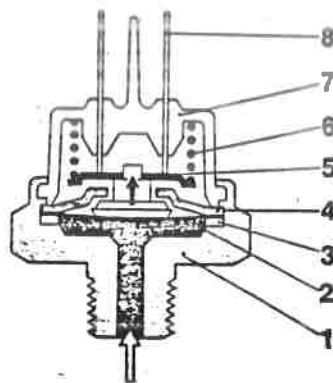


Fig. 15.4

Les monocontacts également possèdent un différentiel (pression différentes à la montée et à la descente).

### 3.3. Réglage de niveau

La fig. 15.5 montre un exemple d'interrupteur de niveau. L'appareil consiste en un flotteur (V) sur lequel est monté un aimant.

Cet aimant (M) se déplace devant la paroi de séparation derrière laquelle se trouve un deuxième aimant permanent (N).

L'aimant intérieur est relié à un interrupteur. Suivant la position de l'aimant, le contact est ouvert ou fermé.

Ces appareils possèdent également un différentiel.

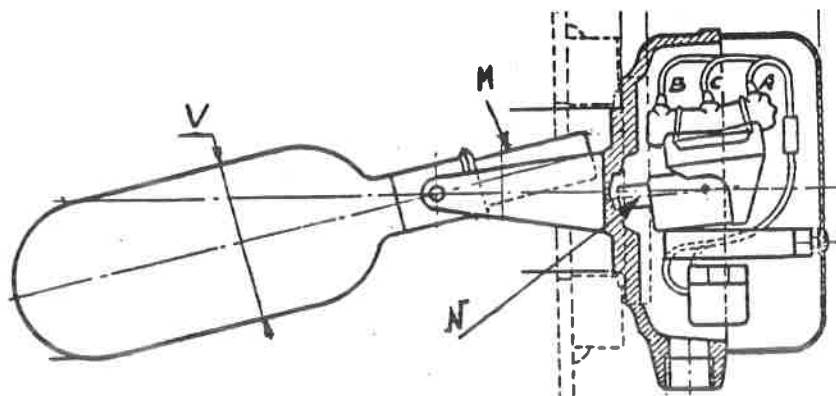


Fig. 15.5

### 3.4. Contacts de fin de course

Des contacts de fin de course sont des interrupteurs qui s'ouvrent ou se ferment suivant qu'un organe ou une pièce de fabrication déterminé se trouve en un endroit déterminé.

Ces contacts sont utilisés comme sécurité des chariots des machines outils, en procédés automatiques, ainsi que comme contrôle de fermeture des portes, etc...

Le fonctionnement de ces contacts peut être mécanique, mais aussi magnétique.

Les contacts magnétiques ont l'avantage qu'il n'y a aucun contact ou liaison entre le contact et l'organe commandé.