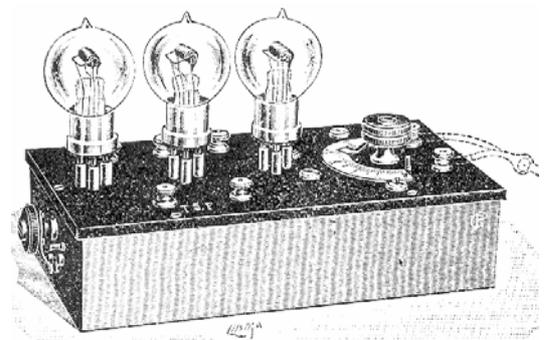
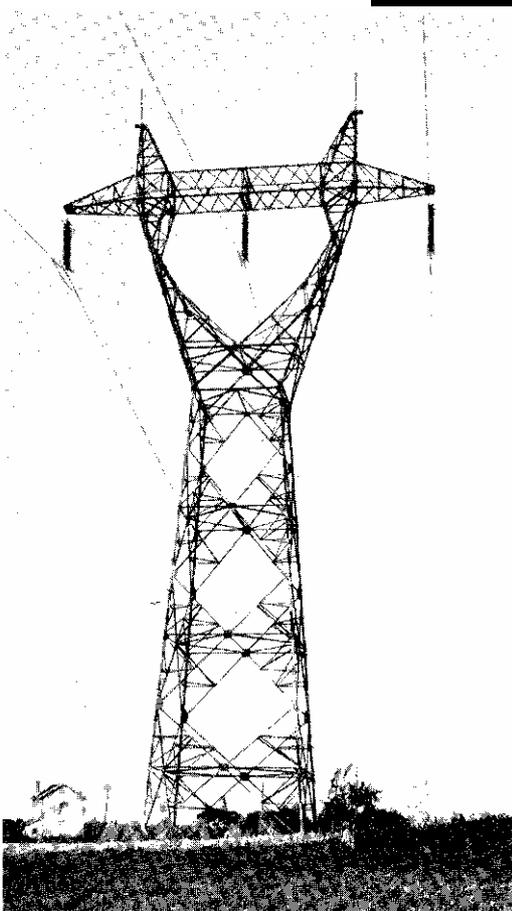




# Production et distribution de l'énergie électrique.



# Sommaire.

<b>CHAPITRE I : L'ALTERNATEUR.....</b>	<b>4</b>
I . Description d'un alternateur élémentaire bipolaire.....	4
II . Enroulement triphasé.....	5
III . Alternateurs multipolaires.....	5
IV . Mise en charge. ....	6
V . Conclusion, terminologie. ....	6
VI . Description des alternateurs industriels. ....	6
<b>CHAPITRE II : FONCTIONNEMENT DE L'ALTERNATEUR EN AUTONOMIE. ....</b>	<b>9</b>
I . Définition. ....	9
II . Conséquences de la mise en charge d'un alternateur.....	9
III . Analyse des courants. ....	9
IV . La chute de vitesse.....	12
V . La chute de tension.....	14
VI . Fonctionnement automatique de l'alternateur. ....	20
<b>CHAPITRE III : FONCTIONNEMENT DES ALTERNATEURS EN RESEAU.....</b>	<b>21</b>
I . Principe. ....	21
II . Le couplage. ....	22
III . Fonctionnement juste après le couplage (à vide). ....	28
IV . Mise en charge de l'alternateur.....	29
V . Répartition des puissances actives entre les alternateurs du réseau. ....	31
VI . Répartition des puissances réactives entre les alternateurs.....	37
<b>CHAPITRE IV : DISTRIBUTION DE L'ENERGIE ELECTRIQUE.....</b>	<b>43</b>
I . Schéma d'implantation générale.....	43
II . La distribution hiérarchisée. ....	45
III . Les batteries de secours. Charge et mise en service.....	47
IV . Schémas unifilaires types. ....	47
<b>CHAPITRE V : APPAREILLAGES ET EQUIPEMENTS. ....</b>	<b>50</b>
I . Les câbles. ....	50

<b>II .</b>	<b>Ouverture et fermeture des circuits.....</b>	<b>51</b>
<b>III .</b>	<b>Les éléments de contrôle.....</b>	<b>53</b>
<b>CHAPITRE VI : DEMONSTRATIONS.....</b>		<b>54</b>
<b>I .</b>	<b>Répartition du champ magnétique dans l'entrefer.....</b>	<b>54</b>
<b>II .</b>	<b>Flux d'induction magnétique.....</b>	<b>56</b>
<b>III .</b>	<b>Théorèmes de Leblanc et Ferraris.....</b>	<b>57</b>

# Chapitre I : L'alternateur.

## I. Description d'un alternateur élémentaire bipolaire.

Un alternateur élémentaire bipolaire comporte :

- Un rotor tournant à la vitesse angulaire  $\Omega$ , muni d'un enroulement parcouru par un courant continu  $j$ , dit courant inducteur ou d'excitation.

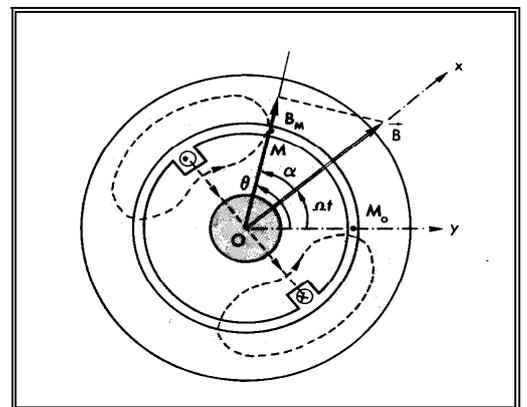
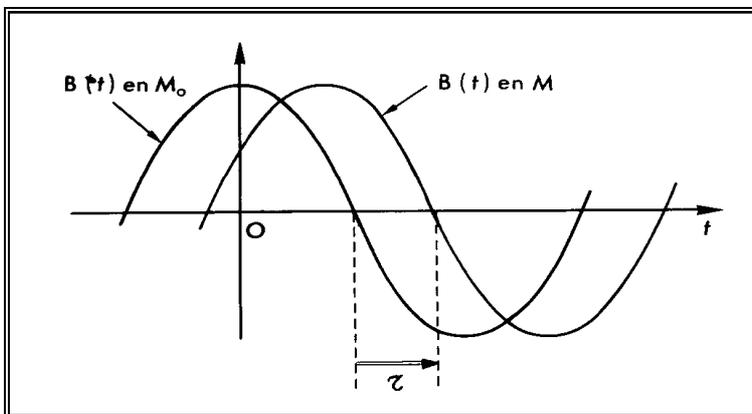
- Un stator présentant deux encoches diamétralement opposées dans lesquelles on a disposé des fils conducteurs. Il existe  $N$  conducteurs actifs, chaque encoche contient un faisceau de  $N/2$  conducteurs.

L'inducteur (c'est-à-dire le rotor) crée dans la machine un champ magnétique à 2 pôles qu'il entraîne avec lui dans sa rotation.

Le long de l'entrefer, le champ magnétique aura une répartition particulière dans l'espace mais aussi dans le temps du fait de la rotation du circuit inducteur.

On démontre donc qu'un observateur situé au bord de l'entrefer, à cause de cette répartition, voit le champ magnétique tournant défilé comme un train d'ondes sinusoïdales de fréquence  $f = n$  ( $n$ , vitesse de rotation du rotor). C'est l'onde de champ.

*La démonstration se trouve au Chapitre VI : I.*



L'induit (c'est à dire le stator) va avoir un mouvement relatif par rapport au champ magnétique, ses conducteurs vont donc être le siège de forces électromotrices.

La f.e.m. a pour expression :  $e = N.l.r.\Omega.B.\cos(\omega.t - \pi/2)$

Ses caractéristiques sont les suivantes :

- C'est une f.é.m. sinusoïdale.
- Sa pulsation  $\omega$  est égale à la vitesse angulaire  $\Omega$  du rotor.
- Sa fréquence  $f$  (en Hz) est telle que  $\omega = 2.\pi.f$ .

Comme la fréquence de rotation  $n$  (en tr/s) du rotor est telle que  $\Omega = 2.\pi.n$

**On obtient  $f = n$ .**

- Sa phase est de  $-\pi/2$ , le vecteur tournant  $\vec{E}$  représentant la f.é.m. est donc en quadrature arrière par rapport au vecteur tournant  $\vec{B}$  qui lui donne naissance.

- Sa valeur efficace E se met sous la forme suivante :

$$E = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot N \cdot l \cdot r \cdot \Omega \cdot B = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot N \cdot l \cdot r \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \cdot B \quad \underline{\underline{E = \pi \cdot \sqrt{2} \cdot N \cdot l \cdot r \cdot n \cdot B}}$$

L'alternateur que nous venons de réaliser va donc nous fournir une tension sinusoïdale entre deux fils conducteurs appelés phase et neutre. On dit que l'alternateur est monophasé.

## II .Enroulement triphasé.

Afin d'utiliser toute la place disponible dans le stator, on dispose désormais trois bobines, identiques à la précédente, et régulièrement décalées de  $2 \cdot \pi / 3$ .

Elles sont numérotées (1, 1') (2, 2') et (3, 3'), et couplées en étoile.

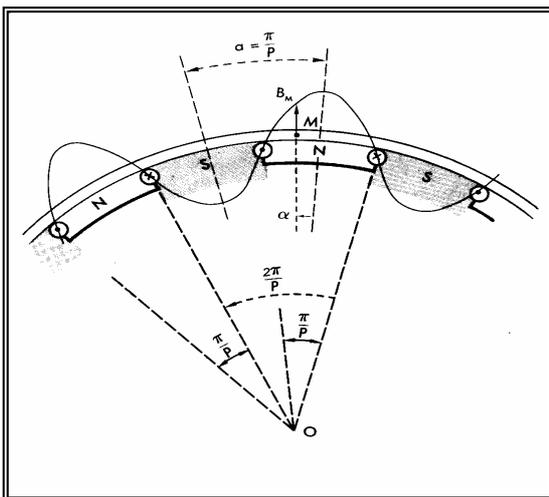
Dans chaque bobines va naître une f.é.m. sinusoïdales  $e_1, e_2,$  et  $e_3$  de même pulsation  $\omega = \Omega = 2 \cdot \pi \cdot n$  et de même valeur efficace E.

Par contre  $e_2$  va présenter par rapport à  $e_1$ , un retard égal au temps  $\tau$ , que met le champ pour tourner de  $2 \cdot \pi / 3$  (angle de décalage entre deux phases successives).

Si la f.e.m.  $e_1$  s'écrit :  $e_1 = E \cdot \sqrt{2} \cdot \cos (\omega \cdot t - \pi / 2) = E \cdot \sqrt{2} \cdot \sin \omega \cdot t$

Alors  $e_2$  a pour expression :  $e_2 = E \cdot \sqrt{2} \cdot \sin (\omega \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{3})$  et  $e_3 = E \cdot \sqrt{2} \cdot \sin (\omega \cdot t - \frac{4 \cdot \pi}{3})$

## III .Alternateurs multipolaires.



On a vu que dans le cas d'une machine bipolaire, la fréquence  $f$  (en Hz) des f.é.m. induites est égale à la fréquence de rotation  $n$  (en tr/s).

Pour que  $f = 50$  Hz, il faut que  $n = 50$  tr/s soit 3 000 tr/min.

Cette fréquence de rotation est réalisable si l'alternateur est entraîné par une turbine à vapeur, mais beaucoup trop élevée s'il s'agit de turbines hydrauliques ou de moteurs diesels semi rapides.

Il a donc fallu construire des alternateurs dont les f.é.m. sont en 50 Hz alors que le rotor tourne à une fréquence très inférieure à 3 000 tr/min : c'est l'origine des alternateurs multipolaires.

L'inducteur comporte  $p$  bobines connectées en série, il crée ainsi le long de l'entrefer une onde de champ magnétique présentant  $p$  pôles Nord et  $p$  pôles Sud, soit  $2 \cdot p$  pôles.

## **IV .Mise en charge.**

Le rotor étant en rotation ( $n$  tr/s), lorsque l'on ferme les 3 phases du stator sur un récepteur triphasé, les f.é.m.  $e_1$   $e_2$  et  $e_3$  donnent alors naissance à un système triphasé de courants  $I_1$   $I_2$ ,  $I_3$ .

Il faut alors exercer sur l'arbre de la machine un couple moteur, autrement dit fournir à l'alternateur une puissance mécanique. Cette puissance est transmise sous forme électrique, aux pertes près de l'alternateur, au récepteur triphasé.

## **V .Conclusion, terminologie.**

Un alternateur est un générateur électrique transformant de la puissance mécanique en puissance électrique sous forme de courants sinusoïdaux. Il est essentiellement caractérisé par :

- La valeur nominale  $U_n$  des tensions composées.
- La valeur nominale  $S_n = \sqrt{3}.U_n I_n$  de sa puissance apparente.

### **Terminologie.**

**Bipolaire** : On dit d'une machine qu'elle est bipolaire quand elle crée un champ magnétique à 2 pôles (un nord et un sud).

**Multipolaire** : Le champ créé a un nombre de pôles supérieur à 2. On dit qu'il comporte  $2p$  pôles,  $p$  étant le nombre de paires de pôles.

**Rotor** : C'est la partie tournante d'une machine.

**Stator** : C'est la partie fixe d'une machine.

**Inducteur** : ou excitation, c'est la partie électrique qui crée le champ magnétique.

**Induit** : C'est la partie électrique où naissent les courants induits par les phénomènes électromagnétiques.

**Circuit magnétique** : Ce sont les parties métalliques de la machine où se répartissent les lignes de champ.

**Entrefer** : Endroit dans un circuit magnétique qui n'est pas constitué de fer mais plutôt d'air (exemple : espace entre la partie fixe et la partie tournante d'un moteur).

**F.e.m.** : Force électromotrice exprimée en Volts. C'est la tension créée aux bornes d'un conducteur par électromagnétisme. C'est cette f.e.m. qui donne naissance aux courants induits.

## **VI .Description des alternateurs industriels.**

### **1 .Alternateurs à pôles lisses.**

Lorsque le moteur est une turbine à vapeur, la fréquence de rotation est nécessairement élevée, supérieure à 1 000 tr/min, ce qui ne laisse que deux possibilités :

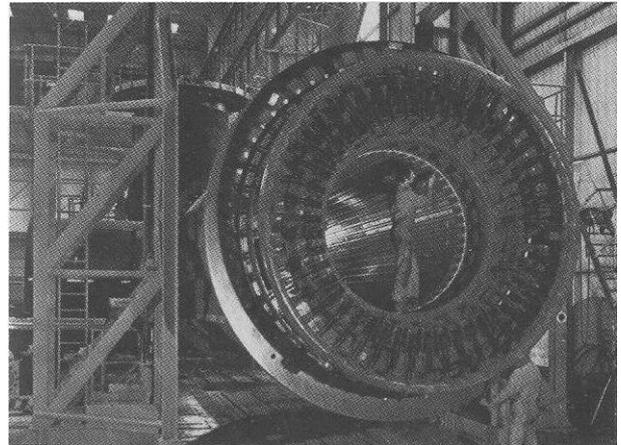
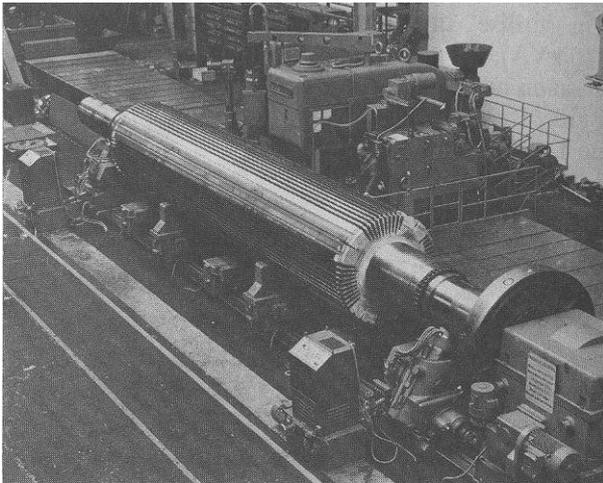
- $p = 1$  :  $n_s = 3\,000$  tr/min.
- $p = 2$  :  $n_s = 1\,500$  tr/min.

La fréquence de rotation élevée exige, afin de réduire les effets centrifuges à la périphérie du rotor, que le diamètre de l'entrefer soit limité. D'autre part, le champ magnétique étant fixe par rapport au rotor, celui-ci n'a pas besoin d'être feuilleté.

En conséquence le rotor se présente comme un cylindre d'acier massif solidaire de l'arbre, dont le diamètre est de l'ordre du mètre. Sur la surface cylindrique, des encoches ont été fraisées, parallèlement à l'axe, afin de recevoir l'enroulement inducteur.

L'alternateur est alors dit à pôles lisses ou à entrefer constant.

Le diamètre étant réduit il faut, pour obtenir des f.é.m. induites notables dans l'enroulement statorique, ( $E = \pi \cdot \sqrt{2} \cdot N \cdot l \cdot r \cdot n \cdot B$ ) donner à la longueur axiale de la machine une valeur importante. Dans les alternateurs de grande puissance, elle est comprise entre 15 et 20 mètres, ce qui pose des problèmes mécaniques délicats.



Le stator étant soumis à un champ magnétique tournant, il est le siège de courants de Foucault et du phénomène d'hystérésis, il est donc constitué d'un empilage de tôles d'acier au silicium, ayant la forme de couronnes et perpendiculaires à l'axe de la machine.

Sur sa surface cylindrique interne, le stator porte des encoches, parallèles à l'axe, régulièrement distribuées, dans lesquelles sont logés les conducteurs de l'enroulement d'induit.

L'alternateur à pôles lisses, entraîné par une turbine à vapeur, équipe les centrales thermiques, classiques (fuel ou charbon) et nucléaires.

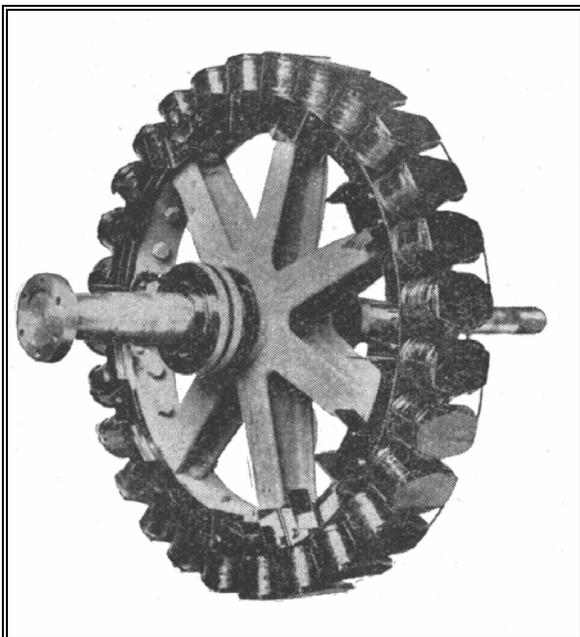
## 2 .Alternateurs à pôles saillants.





Lorsque la turbine est hydraulique, ou dans le cas d'un moteur diesel, la fréquence de rotation est toujours très inférieure à 1 000 tr/min. L'alternateur doit donc présenter un nombre de pôles d'autant plus grand que  $n$  sera faible.

Dès que le nombre de pôles est supérieur à quatre, le rotor est constitué d'un volant portant à sa périphérie  $2.p$  électro-aimants de polarités successives Nord et Sud, d'où le nom de pôles saillants.



Avec cette disposition le nombre de pôles peut être élevé mais le diamètre de l'ensemble (appelé roue polaire) augmente avec  $2.p$  et peut atteindre 7 à 8 mètres lorsque  $2.p$  est de l'ordre de 40 à 60.

Comme le rotor est fixe par rapport au champ, il peut être massif, cependant par suite de leur passage devant les encoches du stator, les épanouissements polaires (et parfois même les noyaux polaires) sont feuilletés.

## **Chapitre II : Fonctionnement de l'alternateur en autonomie.**

### **I. Définition.**

Un alternateur fonctionne en autonomie quand il est seul à assurer l'alimentation d'une installation électrique.

Cela peut aller du récepteur unique à un ensemble complet de récepteurs de toute nature comme par exemple : un navire.

### **II. Conséquences de la mise en charge d'un alternateur.**

Quand l'alternateur fonctionne à vide :

- l'inducteur est alimenté en courant continu (courant inducteur  $j$ ).
- le rotor tourne à la vitesse  $n$  réglée par l'opérateur au moyen du cran de pétrole.
- un champ magnétique rotorique est créé, on le note  $B_r$ , ce dernier crée un flux rotorique nommé  $\Phi$ .
- une f.e.m. est présente aux 3 bornes de l'alternateur. Cette f.e.m. est alternative sinusoïdale, et peut s'exprimer indifféremment :  $e = N.l.r.\Omega.B \cos(\omega.t - \pi/2)$  ou  $e = -d\Phi/dt$ .

*Flux électromagnétique : voir Chapitre VI :II .*

Lorsque l'on ferme le disjoncteur de l'alternateur vers les récepteurs, on constate 3 choses :

- Apparition de courants alternatifs vers les récepteurs.
- Chute de vitesse de l'alternateur et de sa machine d'entraînement.
- Chute de tension aux bornes de l'alternateur.

### **III. Analyse des courants.**

#### **1. Rappels sur les récepteurs.**

##### **a) Nature des récepteurs.**

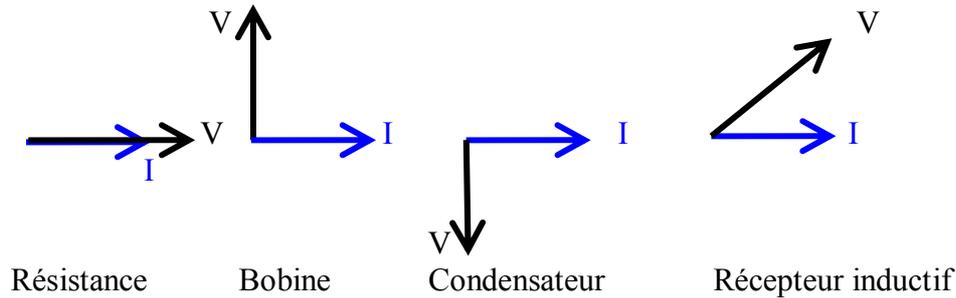
Lorsque l'on ferme le disjoncteur d'alimentation du récepteur, il s'établit dans la ligne un courant  $I$ . La valeur efficace de ce courant dépend de la puissance du récepteur. Si on visualise (à l'aide d'un oscilloscope) le courant et la tension en fonction du temps, on constate qu'ils ne sont pas forcément « calés » ensemble.

On dit qu'il existe un déphasage appelé  $\varphi$  entre la tension et le courant. Ce déphasage dépend de la nature du récepteur. On résume trois catégories de récepteurs :

- Les résistances : Le courant et la tension sont en phase,  $\varphi = 0$ .
- Les bobines ou inductances ou self : Le courant est en retard sur la tension de  $90^\circ$ ,  $\varphi = 90$  inductif.
- Les condensateurs ou capacités : Le courant est en avance sur la tension de  $90^\circ$ ,  $\varphi = 90$  capacitif.

Un récepteur pouvant être composé d'un mélange des trois, le déphasage peut prendre n'importe quelle valeur.

Rappel : Représentation de Fresnel du courant et de la tension.



### b ) Puissance active et $\cos \phi$ .

Dans les circuits à courant continu, l'expression de la puissance électrique est très simple :  
Puissance = Tension x Courant,  $P = U \times I$  (1 watt = 1 volt x 1 ampère).

Exemple :

Une machine à café qui demande 3 ampères sous 220 volts développe une puissance de :  
 $P = U \times I = 220 \times 3 = 660$  watts. Sa consommation énergétique, si elle chauffe en continu durant 2 heures, sera de :  $660 \times 2 = 1320$  Wh = 1,32 kWh.

**Rappel :** Le kW (kilo Watt) est une unité de puissance, le kWh (kilo Watt heure) est une unité de travail ou d'énergie. On traduit là l'énergie consommée pendant un temps donné.

Exemple :

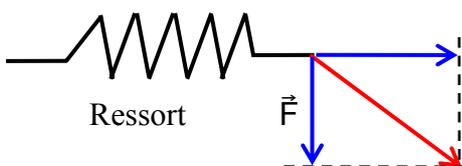
Chauffer 100 litres d'eau de 0 à 100 °C demande 11,6 kWh d'énergie calorifique. Cette quantité est indépendante du temps. Mais chauffer cette eau en 1 heure demandera moins de puissance que si le chauffage doit être réalisé dans un préparateur d'eau chaude en 6 minutes :

Dans le 1er cas : Puissance = 11,6 kWh / 1 h = 11,6 kW.

Dans le 2ème cas : Puissance = 11,6 kWh / 0,1 h = 116 kW.

Dans les circuits à courant alternatif, le calcul est un peu plus complexe. En alternatif, seule la résistance va effectivement développer de la puissance.

En moyenne, une inductance pure (un bobinage de moteur) ou un condensateur pur ne produisent aucune puissance. Et pourtant ils appellent du courant.



On pourrait comparer cette situation à celle d'un ressort qui doit être tendu par une force oblique.

La composante perpendiculaire au chemin de déplacement " $\vec{F}$ " ne produit aucun effet, aucun travail. Et pourtant, la force est bien réelle.

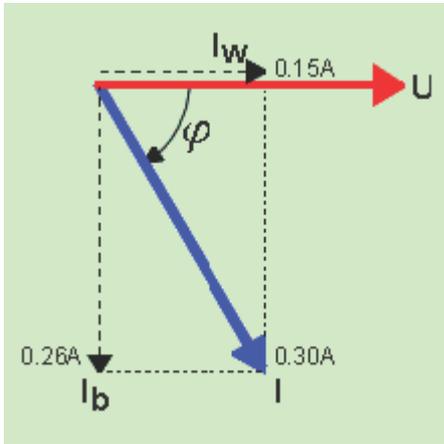
Lorsque qu'une installation appelle 10 ampères au réseau, il ne faudra considérer dans ce courant que la composante qui est en phase avec la tension, qui agit en synchronisme avec le réseau.

On parle de composante active ou de courant actif. C'est ce courant qui va développer de la puissance appelée puissance "active". De là, la formule de la puissance en alternatif :

Puissance = Tension x Courant actif soit :  $P = U \times I \times \cos \varphi$ .

#### Exemple :

Une lampe fluorescente est alimentée sous 220 volts alternatif. Un courant total de 0,3 ampère est mesuré. La lampe comporte un récepteur résistif, le tube lumineux, et un récepteur inductif, le ballast.



Le courant total sera déphasé de  $\varphi = 60^\circ$ . Il est constitué par la somme de la composante en phase avec la tension pour le tube ( $I_w$ ) et de la composante déphasée de  $90^\circ$  pour le ballast ( $I_b$ ).

La puissance est donnée  $P = 220 \times 0,3 \times \cos 60$   $P = 33$  watts

C'est la puissance "active" développée par la lampe.

Le facteur " $\cos \varphi$ " s'appelle "facteur de puissance". Il est indiqué sur la plaquette électrique de la plupart des machines électriques.

#### c ) Puissance réactive.

La puissance réactive n'a de puissance que le nom. En fait, la seule puissance au sens mécanique du terme (l'expression d'un travail réalisé dans un temps donné), c'est la puissance active qui la fournit.

La puissance réactive  $Q$  est définie par analogie à la puissance active  $P$  :  $Q = U \times I \times \sin \varphi$ . Elle s'exprime en Var, abréviation de "volt ampère réactif".

Son intérêt provient du fait qu'elle permet d'évaluer l'importance des récepteurs inductifs (moteurs, lampes fluorescentes, ...) et des récepteurs capacitifs (condensateurs, ...) dans l'installation.

Dans l'exemple de la lampe fluorescente, la puissance réactive vaut  $Q = 57$  Vars. De même, l'énergie réactive est exprimée par le produit de la puissance réactive et du temps. Ainsi, le fonctionnement de la lampe durant 3 heures entraînera une consommation d'énergie réactive =  $Q \times T = 171$  Varh.

#### d ) Puissance apparente.

Le produit de la tension par le courant s'appelle puissance apparente. Puissance apparente =  $S = U \times I$ . Elle est exprimée en VA (volt ampère).

Cette grandeur a peu de signification physique. Elle n'exprime en aucune façon la puissance développée par un circuit alternatif (c'est la puissance active). Elle a la même expression que celle de la puissance développée par un circuit continu, de là, le terme de puissance "apparente".

La puissance apparente est utilisée pour quantifier la capacité de puissance d'un alternateur, par exemple 220 kVA.

Il se peut que cet alternateur débite 220 kW, si le  $\cos \varphi$  de l'installation vaut 1, si l'installation est globalement purement résistive. Mais si l'installation présente un facteur de puissance de 0,8, la puissance développée par l'alternateur sera de  $220 \times 1\,000 \times 0,8 = 176$  kW.

Le fournisseur ne peut présager des caractéristiques de l'installation de son client : il annoncera donc un alternateur de 220 kVA.

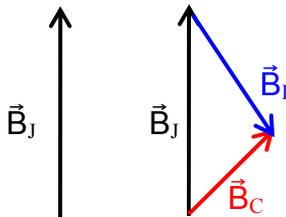
## 2 Réaction magnétique d'induit.

Quand l'alternateur est en charge, les enroulements d'induit sont parcourus par les courants induits. Ceux ci créent un champ magnétique statorique  $\vec{B}_1$  qui tourne à la vitesse  $n$ . Les vecteurs  $\vec{B}_1$  et  $\vec{B}_J$  ont donc la même vitesse et gardent donc une position relative constante lorsque le temps s'écoule.

On peut donc dire qu'en charge, l'alternateur est le siège de deux champs magnétiques tournant à  $\omega$  :

- le champ  $\vec{B}_J$  dû au rotor parcouru par le courant  $j$ ,
- le champ  $\vec{B}_1$  dû au stator parcouru par les courants  $I_1, I_2$  et  $I_3$ .

A vide      En charge



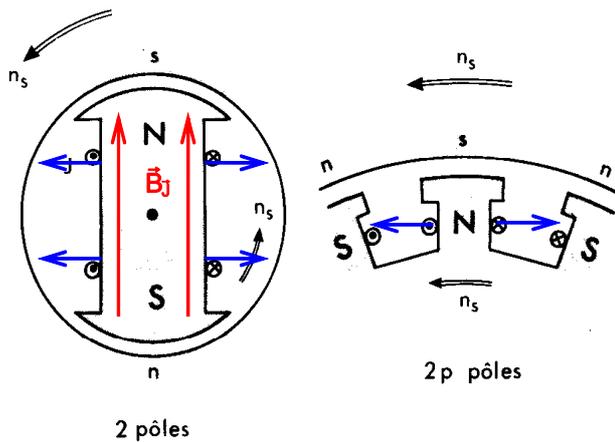
Tout se passe comme si la machine en charge, était le siège du champ magnétique :

$$\vec{B}_C = \vec{B}_J + \vec{B}_1$$

Ce phénomène s'appelle réaction magnétique de l'induit.

## IV La chute de vitesse.

### 1 Origine.

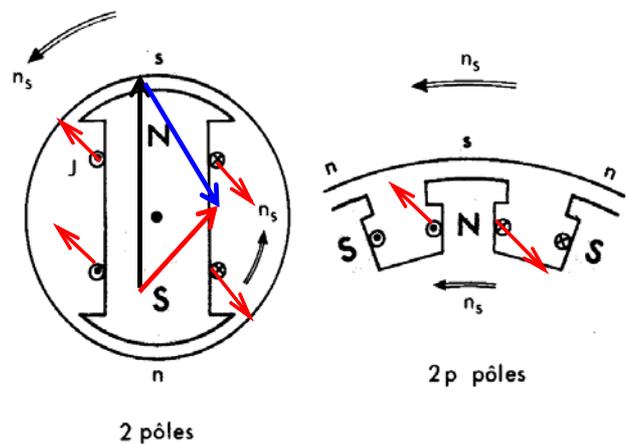


A vide, les conducteurs du rotor, parcourus par un courant et plongés dans un champ magnétique, subissent des forces de Laplace.

Compte tenu de la position de  $\vec{B}_J$ , ces forces s'annulent et aucun couple ne s'exerce sur le rotor.

En charge, les conducteurs du rotor sont toujours dans la même situation mais cette fois le champ est  $\vec{B}_C$  et sa position change l'orientation des forces de Laplace.

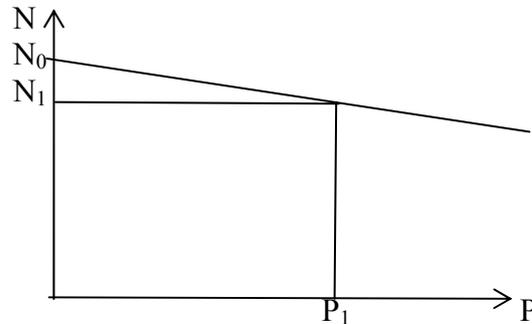
Elles ne se compensent alors plus et un couple résistant apparaît (dans le sens inverse de la rotation) provoquant une chute de vitesse.



## 2 .Le couple moteur.

Le couple d'un moteur diesel est proportionnel à la masse de combustible injectée, autrement dit au cran de pétrole. Comme celui-ci n'a pas été modifié, le couple développé est resté le même qu'à vide soit presque nul.

Il est alors logique que la vitesse de l'ensemble moteur et alternateur chute et celle-ci peut aller jusqu'à l'arrêt complet. On peut résumer cette situation par la caractéristique puissance vitesse du moteur diesel qui a l'allure suivante.



## 3 .Conséquences sur l'alimentation électrique.

On peut résumer la situation de la façon suivante :

A la fermeture du disjoncteur, les récepteurs appellent un courant. Ce courant appelle une puissance active qui dépend directement de la puissance réelle des récepteurs.

Comme la puissance active consommée par les récepteurs est supérieure à celle produite par l'alternateur, la vitesse et par conséquent la fréquence des tensions et des courants chute.

Ce phénomène se produira chaque fois que nous serons dans cette situation.

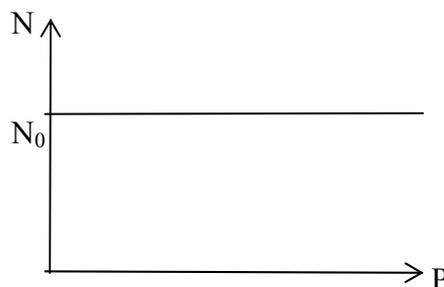
## 4 .Solution.

Pour garder une fréquence constante, la puissance active fournie par l'alternateur (et le moteur d'entraînement) doit toujours être égale à la puissance demandée par les consommateurs.

**Demande = production.**

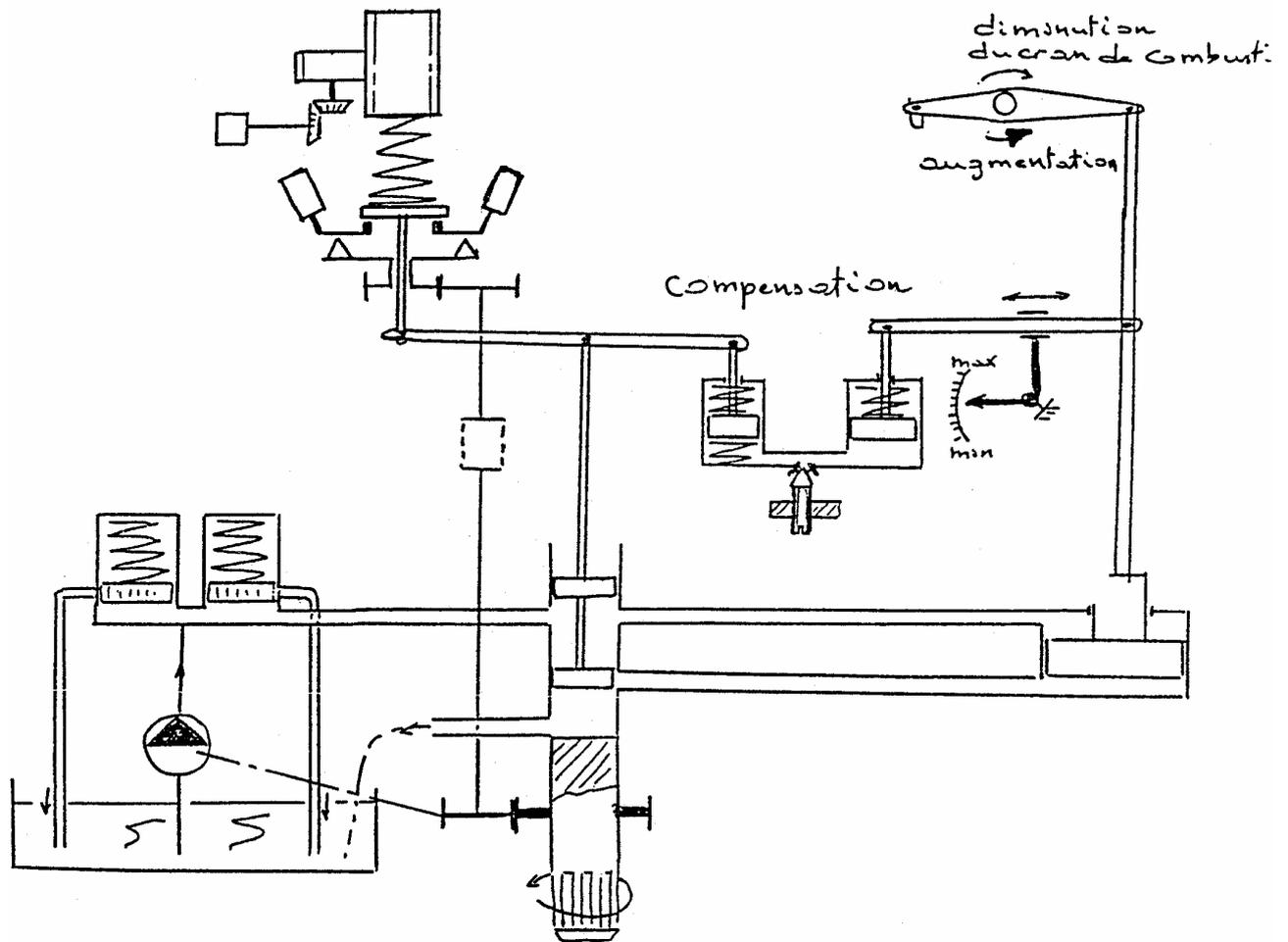
Pour se faire, on installe sur la machine d'entraînement, un régulateur de vitesse. Celui-ci augmente le cran de pétrole chaque fois qu'il détecte une baisse de fréquence et inversement.

Ainsi la caractéristique de l'ensemble moteur et régulateur prend l'allure suivante.



## 5 .Le régulateur de vitesse.

Il est mécanique, basé sur le régulateur à boules de Watt. La consigne de vitesse et donc de fréquence peut se faire en local ou bien en commande à distance par l'intermédiaire d'un moteur électrique pas à pas appelé « moteur + vite, - vite ».



**V .La chute de tension.**

**1 .Origine.**

Comme on l'a déjà vu, en charge la machine est le siège du champ magnétique  $\vec{B}_C = \vec{B}_J + \vec{B}_I$

Exemple à travers la phase 1 :  $\vec{B}_J$  crée le flux  $\Phi_J$   
 $\vec{B}_I$  crée le flux  $L_C.I_1$

$$\vec{B}_C = \vec{B}_J + \vec{B}_I \text{ crée le flux } \Phi_C = \Phi_J + L_C.I_1$$

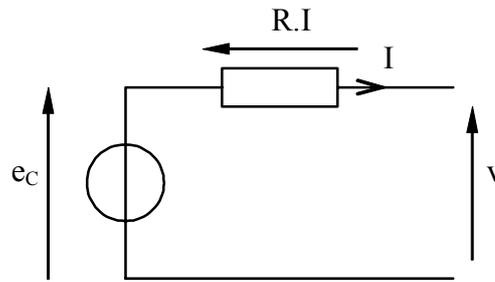
Attention : Cette somme vectorielle de flux est possible car le circuit magnétique n'est pas saturé.

Les flux en charge à travers les phases 2 et 3 sont les mêmes que pour la phase 1, mais respectivement déphasés par rapport à lui de  $-2.\pi/3$  et  $-4.\pi/3$ . L'expression de flux valable pour les trois phases est donc :  $\Phi_C = \Phi + L_C.I$ .  $\Phi$  étant le flux inducteur.

Considérons une des trois phases, celle ci est le siège d'une f.é.m.

$$e_C = - \frac{d\Phi_C}{dt} = - \frac{d\Phi}{dt} - L_C. \frac{dI}{dt} \qquad e_C = e - L_C. \frac{dI}{dt} \qquad e \text{ étant la f.é.m. à vide.}$$

Si on adopte la convention générateur pour chaque phase statorique (de résistance R), on a le schéma équivalent suivant avec v, tension simple aux bornes d'une phase.



$$v = e_c - R.I = e - L_C \frac{dI}{dt} - R.I$$

$$e = v + R.I + L_C \frac{dI}{dt}$$

Toutes les grandeurs variables étant sinusoïdales, cette relation peut être traitée en représentation de Fresnel.

$$\vec{E} = \vec{V} + R.\vec{I} + X.\vec{I}$$

$X = L_C.\omega$  : réactance synchrone de l'alternateur.

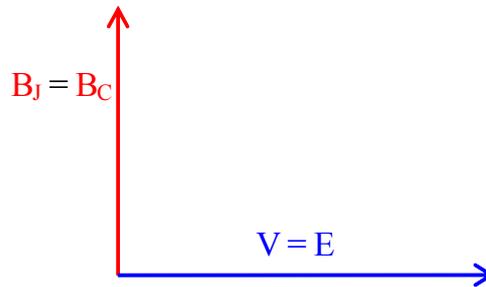
$$-\vec{E}_{ch} = \vec{V} + R.\vec{I}$$

Autrement dit :  $\vec{E}_{ch} = \vec{E} - X.\vec{I}$

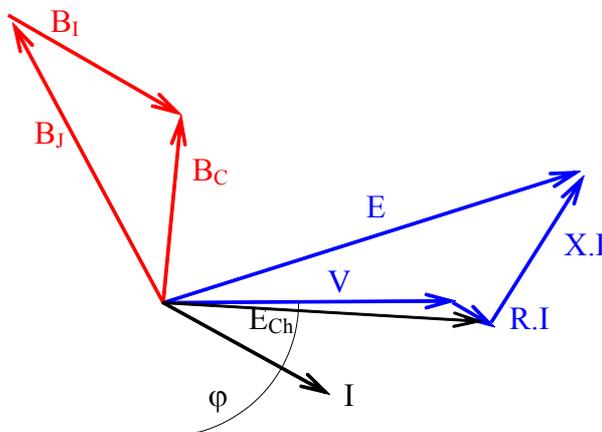
Il y a bien une chute de tension en charge.

## 2 .Représentation graphique : diagramme de Behn-Eschenburg.

### a ) A vide.



### b ) En charge.



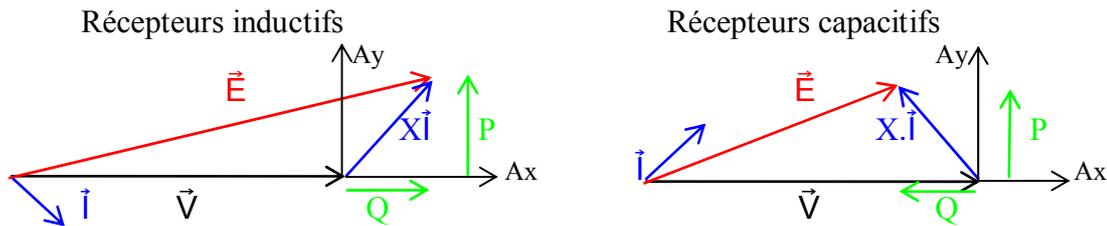
L'angle  $\varphi$  est imposé à l'alternateur par les récepteurs (facteur de puissance  $\cos \varphi$ ).

- $\vec{B}_J$  est en quadrature avance par rapport à  $\vec{E}$
- $\vec{B}_I$  est parallèle à  $\vec{I}$ .
- $\vec{B}_C$  est en quadrature avance par rapport à la f.é.m. en charge  $\vec{E}_{ch}$

Chute de tension : On constate que la tension en charge  $V$  aux bornes des phases est inférieure à la tension à vide  $E$  ( $I = 0$ ). Il existe une chute de tension  $\Delta V = E - V$ .

### c) Diagramme en charge simplifié.

On peut négliger R et donc R.I afin d'obtenir un diagramme simplifié.



Le vecteur  $L.\omega.\vec{I}$  ou  $X.\vec{I}$  nous renseigne complètement sur le courant statorique I ( $L.\omega$  étant connu).

Ses projections sur les axes  $Ay$  et  $Ax$  sont respectivement proportionnelles à :

la composante active  $X.I_A = X.I \cos \varphi$

$I_A = I \cos \varphi$  est parallèle à  $\vec{V}$ .

la composante réactive  $X.I_R = X.I \sin \varphi$

$I_R = I \sin \varphi$  est perpendiculaire à  $\vec{V}$ .

Comme on l'a déjà vu, la composante active est directement liée à la puissance active. Dans ce cas, il s'agit de la puissance active fournie par l'alternateur aux récepteurs.

Remarque : Si P est positive, l'alternateur produit de l'énergie active sur le réseau de récepteurs. Si P est négative, il en consomme (moteur).

De même, la composante réactive est directement liée à la puissance réactive. Dans ce cas, il s'agit également de la puissance réactive fournie par l'alternateur aux récepteurs.

Si Q est positive, l'alternateur fournit de l'énergie réactive aux récepteurs (inductifs). Si Q est négative, l'alternateur consomme de l'énergie réactive fournie par les récepteurs (capacitifs).

### 3. Conséquences sur l'alimentation électrique.

On peut résumer la situation de la façon suivante :

A la fermeture du disjoncteur, les récepteurs appellent un courant. Ce courant, comme on l'a vu appelle une puissance active mais aussi une puissance réactive. Cette puissance réactive dépend directement de la nature des récepteurs.

En règle générale dans l'industrie, la présence de beaucoup de moteurs, de lampes et de résistances fait que la puissance réactive est plutôt positive.

A la fermeture du disjoncteur, comme la puissance réactive consommée par les récepteurs est supérieure à celle produite par l'alternateur, la tension chute (voir diagramme).

Ce phénomène se produira chaque fois que nous serons dans cette situation.

### 4. Solution.

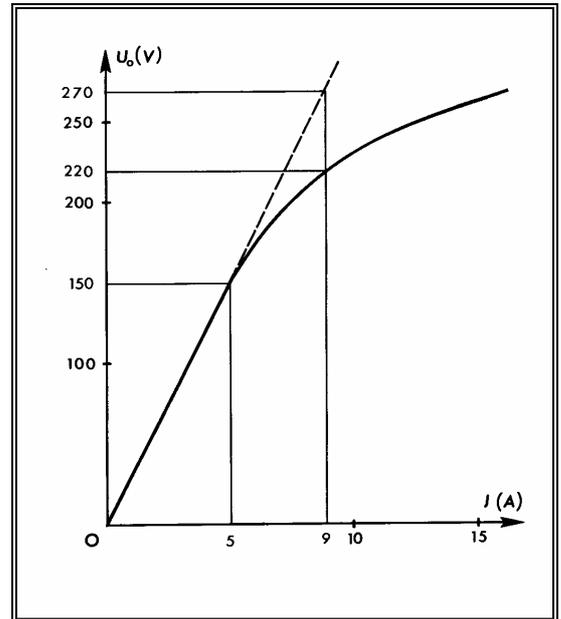
Pour garder une tension constante, la puissance réactive fournie par l'alternateur doit toujours être égale à la puissance demandée par les consommateurs (cas de récepteurs inductifs).

**Demande = production.**

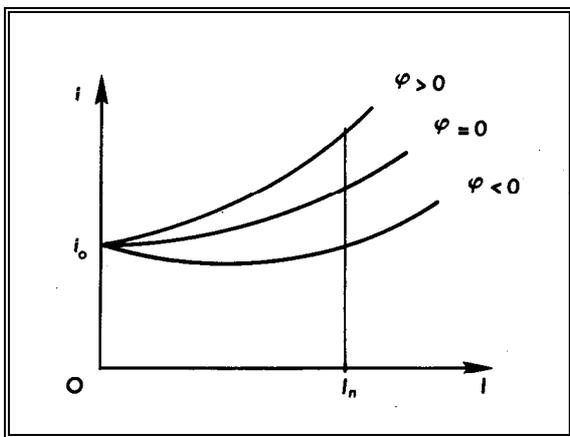
Remarque : Si les récepteurs sont capacitifs, une augmentation de leur puissance réactive provoque le phénomène inverse. La tension augmente car cette fois l'alternateur doit absorber le surplus de puissance réactive (voir diagramme).

Ainsi pour éviter que la valeur de  $V$  ne diminue, il suffit d'augmenter  $E$  au fur et à mesure que  $I$  croit. Pour augmenter la valeur de  $E$ , il faut agir sur le flux (le champ) et par conséquent sur le courant d'excitation.

Pour connaître la valeur du courant inducteur à régler, on dispose de la caractéristique à vide de l'alternateur qui est le graphe de la fonction  $E = f(j)$ . La courbe a l'allure suivante :



On peut également utiliser la caractéristique de réglage qui donne directement  $j$  en fonction de  $I$  et  $\varphi$ .



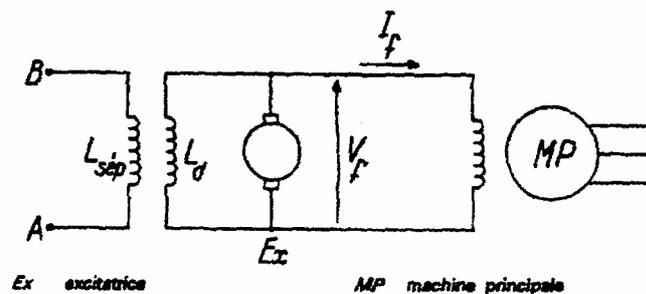
L'ordonnée à l'origine de toutes les courbes est le courant  $j_0$  tel que  $V = E$ . Pour maintenir constante la valeur de  $V$  lorsque le courant  $I$  augmente, il faut :

- Faire croître  $j$  d'autant plus rapidement que le circuit est inductif.
- Réduire  $j$  si le circuit est suffisamment capacitif ( $\varphi < \varphi_0$ ).

Pour se faire, le système d'excitation de l'alternateur doit être équipé d'une régulation autonome qui augmente le courant d'excitation  $J$  en même temps que le courant de charge  $I$  et inversement. Une autre solution consiste à mesurer la tension et agir en conséquence.

## 5 .Les systèmes d'excitation des alternateurs.

### a ) L'excitatrice à courant continu.



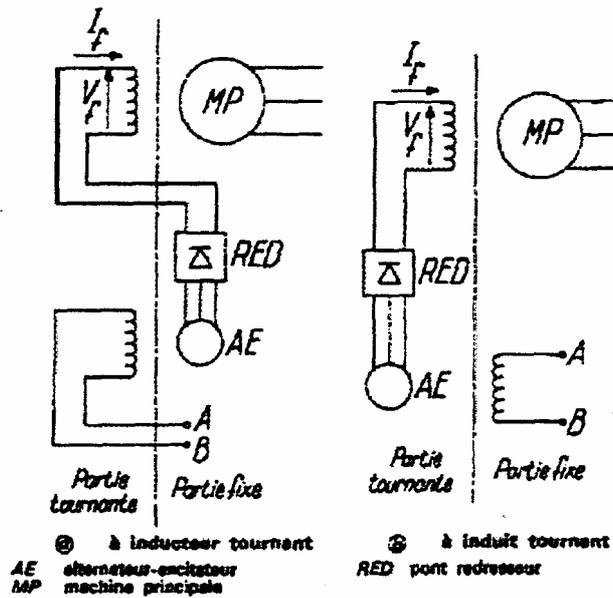
Principe de l'excitation par machine à courant continu

L'inducteur à excitation séparée  $L_{sep}$  est alimenté par une source indépendante variable qui permet de faire varier le flux inducteur et donc la tension d'alimentation  $V_f$  de l'inducteur de l'alternateur. L'inducteur shunt  $L_d$  participe à la création du flux inducteur, ce qui limite la taille du premier. Il est capable de fournir la tension  $V_f$  à lui seul quand l'alternateur est à vide.

Ce système impose des bagues et balais pour transférer  $V_f$  au rotor de l'alternateur et la construction et l'entretien d'une génératrice à courant continu est élevé.

**b ) Alternateur exciteur.**

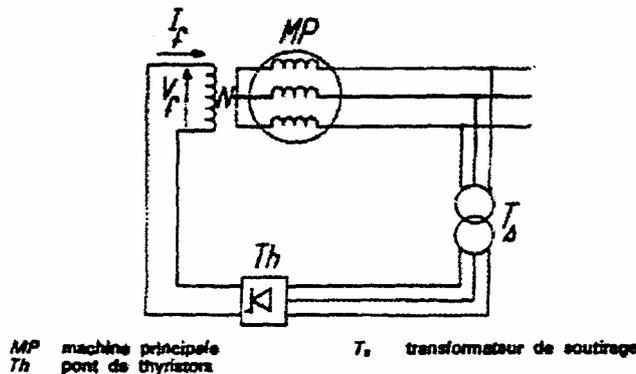
Bien que l'alternateur classique soit à inducteur tournant (à gauche), on peut trouver dans ce cas des alternateurs à inducteur fixe (à droite) plus pratique car il élimine les bagues et balais. Dans les deux cas, il est nécessaire de redresser la tension fournie.



**Principe de l'excitation par alternateur-exciteur**

**c ) Excitation statique à dérivation pure.**

Le pont redresseur qui alimente l'inducteur est alimenté directement par l'alternateur lui-même via un transformateur de tension. Il est nécessaire que les redresseurs soient des thyristors (et non des diodes) car on doit pouvoir régler le courant d'excitation.

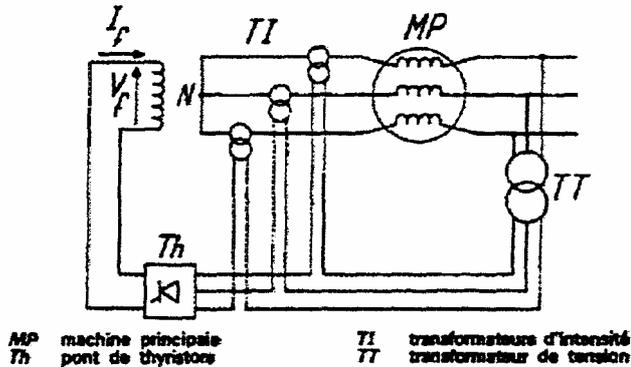


**Principe de l'excitation par auto-alimentation à dérivation**

Au démarrage, le flux n'existe pas et si le flux rémanent de l'alternateur est insuffisant, il faut ajouter un système d'amorçage.

**d ) Excitation statique compound (E.S.C.) à compoundage série.**

Le courant d'excitation  $I_f$  est toujours fourni par l'alternateur principal mais la tension d'alimentation de l'inducteur  $V_f$  est fonction de la tension aux bornes de l'alternateur et d'une tension supplémentaire qui est l'image du courant débité par cet alternateur (image de la charge).



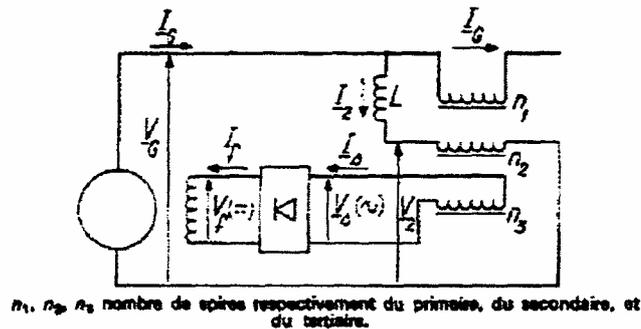
Avec ce système, l'intensité d'excitation croit en même temps que le courant induit, ce qui correspond justement à ce que l'on cherche pour réguler la puissance réactive.

Par contre, le courant d'excitation ne s'ajustant pas exactement à la bonne valeur, on a conservé quand même les thyristors pour un ajustement plus précis.

**Principe de l'excitation par auto-alimentation avec compoundage série. Mise en série des tensions alternatives.**

**e ) Excitation statique compound (E.S.C.) à compoundage parallèle.**

Schéma de principe pour une phase de l'alternateur.



**Schéma monophasé équivalent de l'auto-alimentation avec compoundage parallèle.**

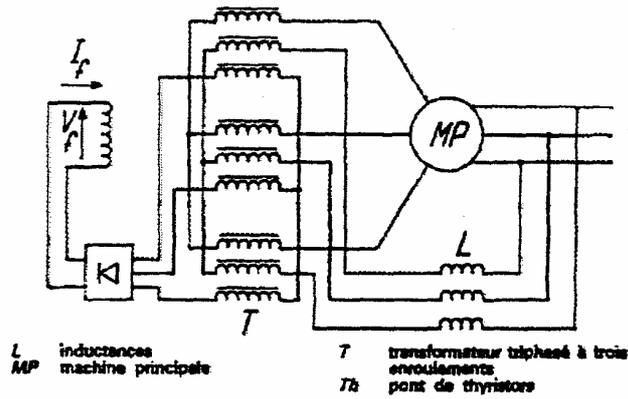
Cette fois, on ne prend en compte que des intensités. L'intensité débitée par l'alternateur  $I_G$  et l'intensité  $I_2$  au travers de l'inductance  $L$ . Ceci est réalisé en utilisant un transformateur d'intensité à trois enroulements, deux primaires ( $n_1$  et  $n_2$ ) et un secondaire ( $n_3$ ) débitant  $I_S$  dans le pont redresseur.

En charge, le courant  $I_G$  est transformé en  $I_S$  qui, après redressement ( $I_f$ ) alimente l'inducteur. Le rapport de transformation a été choisit pour satisfaire à la caractéristique de réglage de l'alternateur.

A vide, le courant  $I_G$  est nul, le courant  $I_2$  est imposé par l'inductance  $L$ . Ce dernier circule dans le primaire  $n_2$  afin d'obtenir un courant  $I_S$  minimum permettant d'assurer le flux nécessaire à la création de  $\vec{E}$ .

La valeur de l'inductance  $L$  alimentée sous la tension  $V_G$  (tension aux bornes de l'alternateur) est telle que le courant qui circule  $I_2 = V_G / jL\omega$  donne une valeur de  $E$  égale à  $1,1 U_{nominal}$ .

Dans ce cas, un pont de diodes suffit alors pour redresser  $I_S$  car la précision est meilleure. Le procédé s'effectue bien entendu sur les trois phases.



Principe de l'excitation par auto-alimentation avec compoundage parallèle.

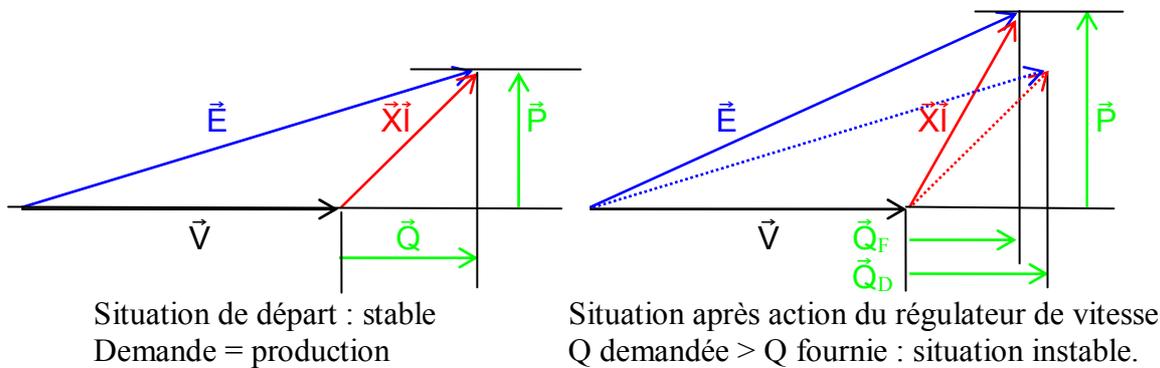
## VI .Fonctionnement automatique de l'alternateur.

### 1 .Situation de départ : Régime établi.

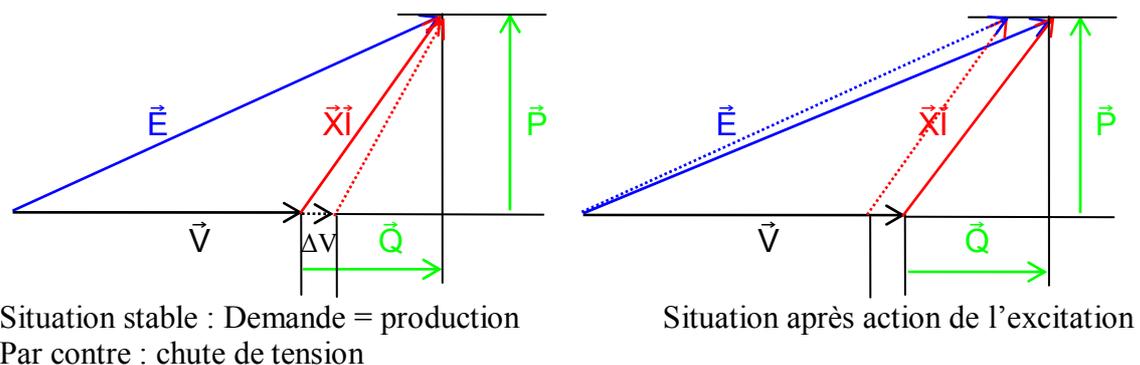
Le réseau (les récepteurs) consomment une puissance active et réactive, l'alternateur fournit ces mêmes puissances ainsi la tension et la fréquence sont constantes et conformes aux conditions d'exploitation.

### 2 .Réponse à une augmentation de la demande en puissance active.

Comme on l'a vu, le couple résistant de l'alternateur augmente faisant ralentir le moteur. Le régulateur de vitesse augmente le cran jusqu'à un nouvel équilibre de puissances actives.



Si l'alternateur est à excitation constante, la puissance réactive fournie diminue provoquant ainsi une chute de tension.



Si l'excitation est régulée (ESC) elle agit en augmentant le courant inducteur en même temps que le régulateur de vitesse.

# Chapitre III : Fonctionnement des alternateurs en réseau.

## I. Principe.

Quand la demande d'énergie électrique est très grande et dépasse ainsi la capacité de production d'un alternateur, on utilise plusieurs alternateurs qui vont distribuer chacun leur énergie à l'ensemble de l'installation appelé Réseau (exemple : EDF).

Ces alternateurs étant tous couplés sur le même réseau, chacun d'eux doit respecter certaines règles :

- **Avoir les mêmes caractéristiques de distribution. Ceci revient à travailler à une même fréquence et une même tension.**

- **Répartir le travail de façon équitable entre chaque machine selon sa puissance nominale. Cela revient à égaliser les puissances actives (pour des machines de même puissance) ainsi que les puissances réactives.**

Pour le distributeur d'énergie, la circulation des puissances active et réactive provoque des pertes et des chutes de tension dans les conducteurs. Les pertes réduisent le rendement global des réseaux et les chutes de tension sont néfastes au maintien d'une bonne tension que doit le distributeur à ses clients.

Sur le plan technique, il est donc préférable de les produire le plus près possible des lieux de consommation. Pour la puissance active, il est plus économique de la produire d'une manière centralisée et de la distribuer ensuite aux clients. Le coût du transport est bien moins élevé que le surcoût d'une production réalisée localement.

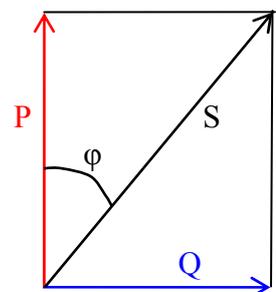
En revanche, pour la puissance réactive, il est économiquement plus intéressant de la produire, en tout ou partie, localement par des générateurs d'énergie réactive autonomes comme les condensateurs par exemple. Cette pratique est appelée compensation.

En effet, pour le client comme pour le distributeur, le transport de la puissance réactive sur le réseau intérieur entraîne les inconvénients suivants :

- Surcharge ou surdimensionnement des installations (transfo, câbles, etc...).

- Pertes actives plus importantes dans ces ouvrages.

- Augmentation de la facture EDF car le courant facturé est celui qui passe effectivement dans le compteur soit le courant apparent. Celui qui fait tourner la machine lui n'est que la partie active.



On a donc tout intérêt à avoir un angle  $\varphi$  le plus petit possible.

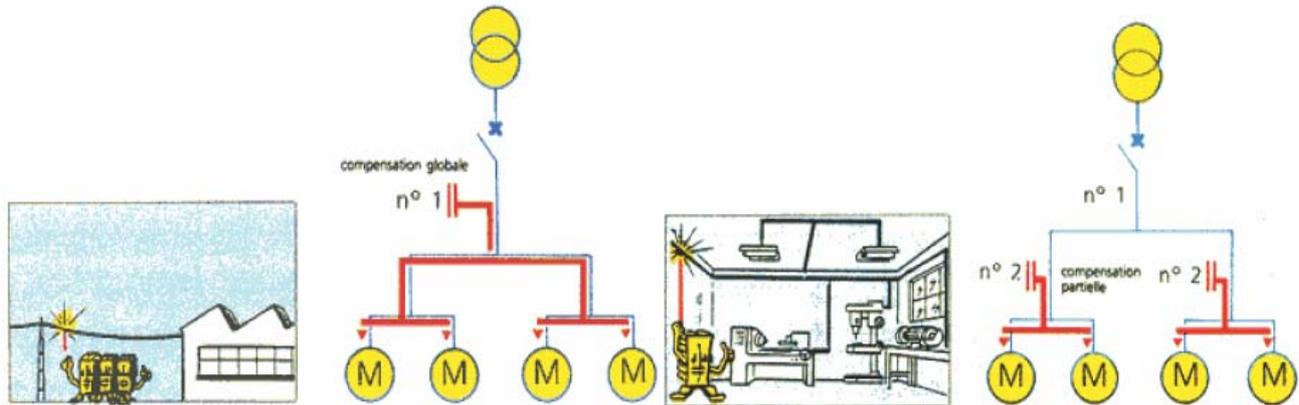
On peut définir le facteur de puissance ( $\cos\varphi$ ) comme étant la proportion de puissance active dans la puissance apparente.

### Inconvénients d'un mauvais $\cos \varphi$ .

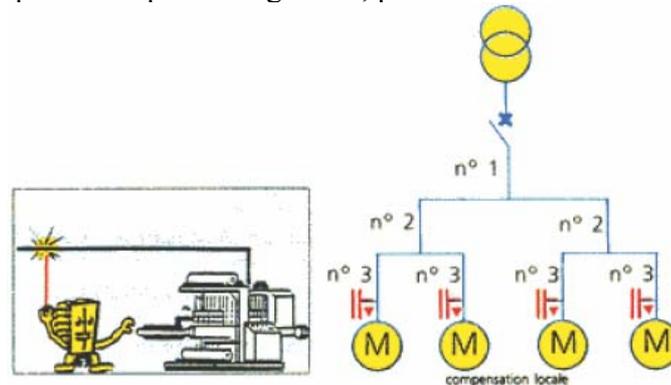
Comme nous venons de le voir précédemment, pour une même puissance utile fournie par un appareil électrique, il faut transporter dans tous les circuits électriques une intensité d'autant plus grande que le  $\cos \varphi$  est faible.

Cela entraîne une augmentation du montant de la facture mais aussi une majoration sous forme de pénalité du montant de la facture EDF à cause de la difficulté qu'à EDF à prévoir la quantité d'énergie réactive à produire.

L'amélioration du Cosinus  $\varphi$  se fait par l'installation d'un moyen de compensation : très généralement une ou plusieurs batteries de condensateurs (Véritable générateur d'énergie réactive).



La compensation peut être globale, partielle ou voire même locale.



Ce problème reste purement terrestre car à bord d'un navire, le producteur et le consommateur sont très proches l'un de l'autre.

Un  $\cos \varphi$  de 0,8 inductif adopté par l'EDF est un bon compromis pour une production raisonnable de puissance réactive.

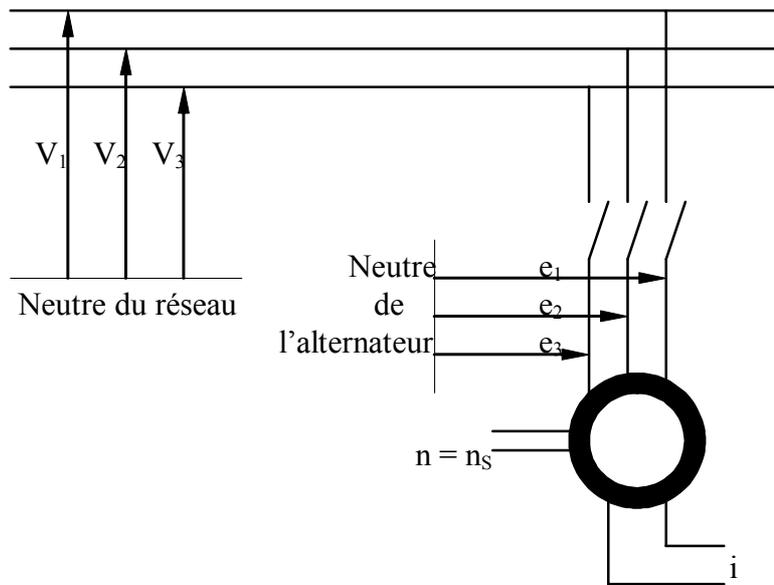
## **II .Le couplage.**

### **1 .Conditions et réalisation d'un bon couplage.**

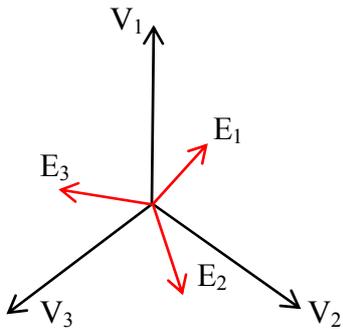
Problème : On dispose d'une machine en fonctionnement autonome, à vide qu'il faut coupler sur un réseau triphasé déjà en fonctionnement.

Pour que le couplage n'entraîne, au moment de la fermeture du disjoncteur tripolaire disposé entre l'alternateur et le réseau, aucun échange brutal de courant et donc aucun choc mécanique sur le rotor, il faut que les 3 f.é.m. à vide  $e_1$   $e_2$  et  $e_3$  de l'alternateur soient respectivement égales aux 3 tensions simples  $v_1$   $v_2$  et  $v_3$  du réseau.

Remarque : les neutres de l'alternateur et du réseau sont supposés reliés entre eux.



Après le lancement de la machine, la situation peut être la suivante.



Pour pouvoir réaliser cette opération, il faut que l'ordre de succession des f.e.m. soit le même que celui des tensions du réseau.

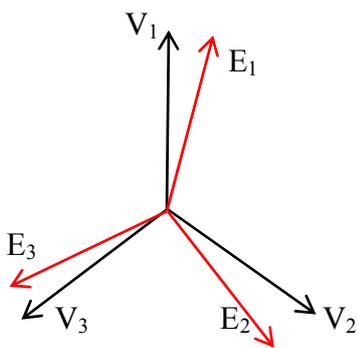
Cette condition est réalisée lors du branchement de l'alternateur et ne concerne à priori, pas un alternateur déjà installé.

A présent, il faut égaliser les valeurs efficaces des tensions en agissant sur le courant inducteur j.

On peut faire cette opération en commande manuelle en agissant sur l'excitation et en observant le résultat à l'aide d'un voltmètre. Mais l'alternateur étant équipé d'un système d'auto excitation (ESC), la valeur efficace de ses tensions s'ajuste automatiquement à celle du réseau.

Il faut ensuite égaliser les fréquences en agissant sur la consigne du régulateur de vitesse qui agit lui-même sur le cran de la machine d'entraînement. On amène ainsi à l'aide d'un tachymètre, la fréquence de rotation n de l'alternateur à une valeur aussi voisine que possible de  $n_s$ .

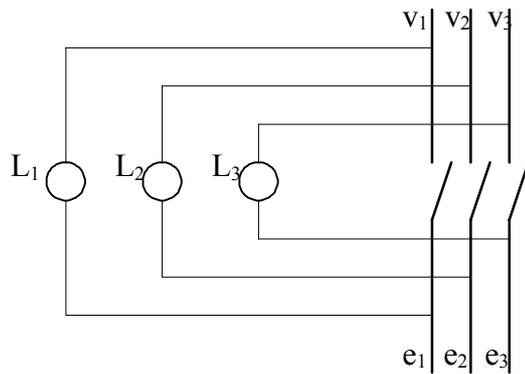
On obtient la représentation suivante :



Même si le réglage a été fait avec un tachymètre précis, les vecteurs  $\vec{E}_1$ ,  $\vec{E}_2$ ,  $\vec{E}_3$  tournent lentement par rapport à  $\vec{V}_1$ ,  $\vec{V}_2$ , et  $\vec{V}_3$ , il existe un glissement de l'alternateur par rapport au réseau.

Il faudra impérativement effectuer le couplage au moment où les vecteurs se superposent.

Pour repérer l'instant où le disjoncteur doit être fermé on peut connecter à ses bornes, trois lampes  $L_1$ ,  $L_2$  et  $L_3$  de la façon suivante :



Les 3 lampes battent simultanément, elles sont effectivement soumises aux tensions  $l_1$   $l_2$  et  $l_3$  et elles s'éteignent ou passent par leur éclairage maximal en même temps.

Lorsque les 3 lampes battent, on fait varier la période de battement en agissant sur la vitesse de rotation de la machine.

Quand la durée de chaque extinction est suffisamment longue (quelques secondes), on ferme le disjoncteur au moment de l'une de ces extinctions. C'est l'instant où la condition cherchée est réalisée.

Remarque : Si l'alternateur n'était pas correctement branché, les lampes clignoteraient en feu tournant.

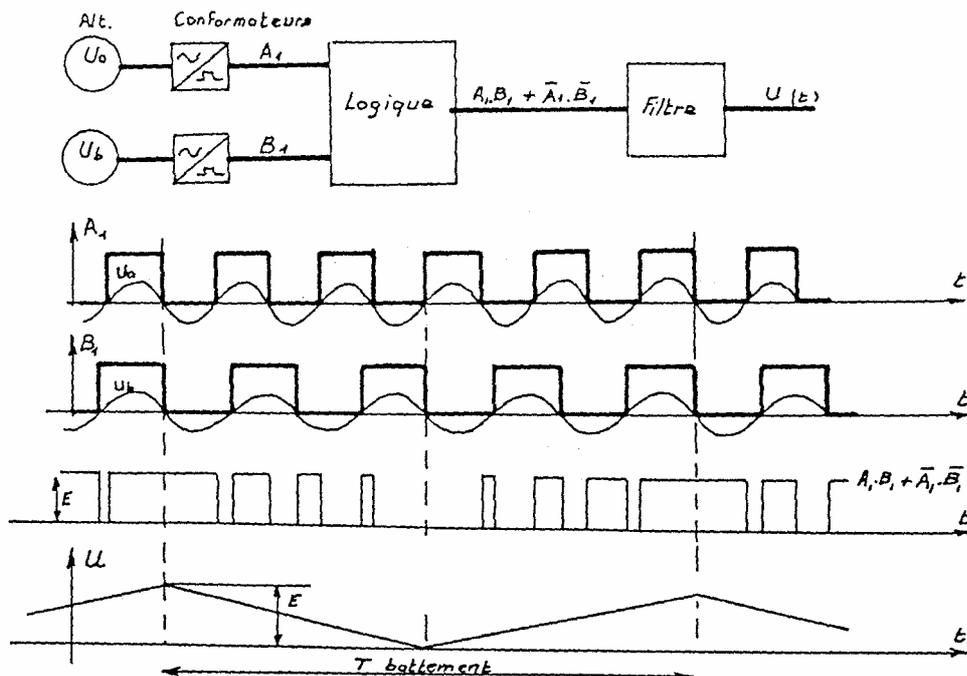
Actuellement, même si le principe des lampes est conservé, on utilise un synchronoscope qui indique à l'aide d'une aiguille en rotation la position relative des vecteurs  $\vec{E}$  et  $\vec{V}$  ainsi que le sens et la vitesse de glissement.

De plus des systèmes automatiques permettent la réalisation des opérations de couplage et découplage sans intervention humaine.

## 2 .Dispositif de couplage automatique : le synchro-coupleur.

On peut séparer le synchro-coupleur en deux parties distinctes, le synchroniseur (partie supérieure de la feuille), dont le rôle est d'amener le groupe à coupler aux conditions de couplage (fréquence et phase) et le coupleur (partie inférieure de la feuille) qui lui va donner l'ordre de couplage.

### Description et explications.



**Tensions  $U_a$  et  $U_b$ .**

Elles sont délivrées par des transformateurs,  $U_a$  représente la tension de l'alternateur à coupler et  $U_b$  représente la tension des barres.

**Conformateurs.**

Ils transforment les tensions sinusoïdales en créneaux de même fréquence.

**Logique.**

Elle donne un signal (en B) qui répond à l'équation  $B = A_1 B_1 + \bar{A}_1 \bar{B}_1$ . Il s'agit d'un ou exclusif complémenté appelé fonction coïncidence. La sortie B est à 1 quand les deux entrées coïncident donc en phase.

**Filtre.**

Il filtre le signal en créneaux B qui devient une tension triangulaire  $u(t)$  d'amplitude E constante égale à 12 V. On l'appelle tension de battement.

La période de cette tension de battement est le temps que met l'aiguille du synchronoscope à faire un tour. Plus les barres et l'alternateur sont en phase, et plus la période de battement est grande.

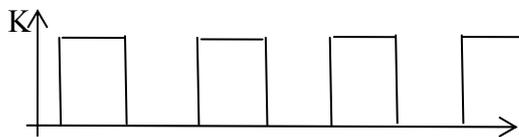
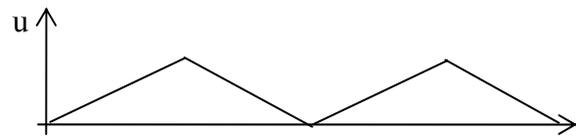
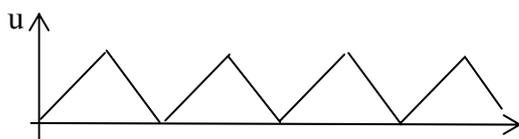
**Partie synchroniseur :****Mémoire avance, retard de phase.**

Elle compte les signaux en sortie des conformateurs et délivre un signal : 0 si  $f_{alt.} > f_{barres}$   
1 si  $f_{alt.} < f_{barres}$ .

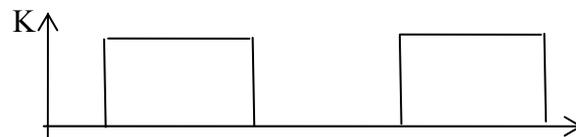
C'est elle qui décide si le signal envoyé au régulateur sera du + vite ou du - vite.

**Conformateur.**

Il transforme de nouveau la tension triangulaire en créneaux de même fréquence. En sortie du conformateur, le signal K est censé envoyer les impulsions vers le régulateur selon le choix de la mémoire avance retard de phase.



Signal K quand les tensions sont éloignées en fréquence

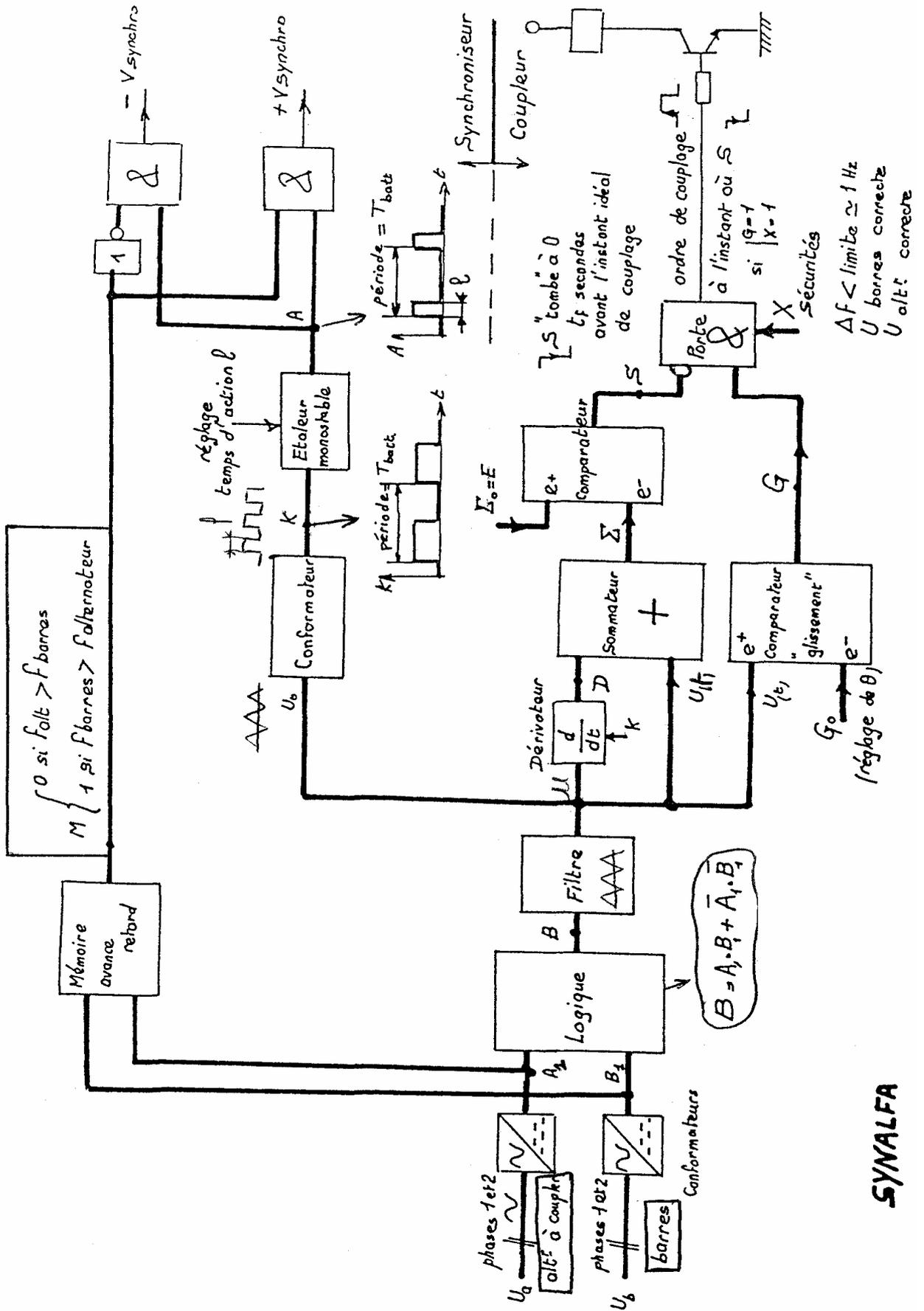


Signal K quand les tensions sont proches en fréquence

La durée de l'impulsion envoyée au régulateur augmente quand les fréquences sont proches, ce qui n'est pas logique.

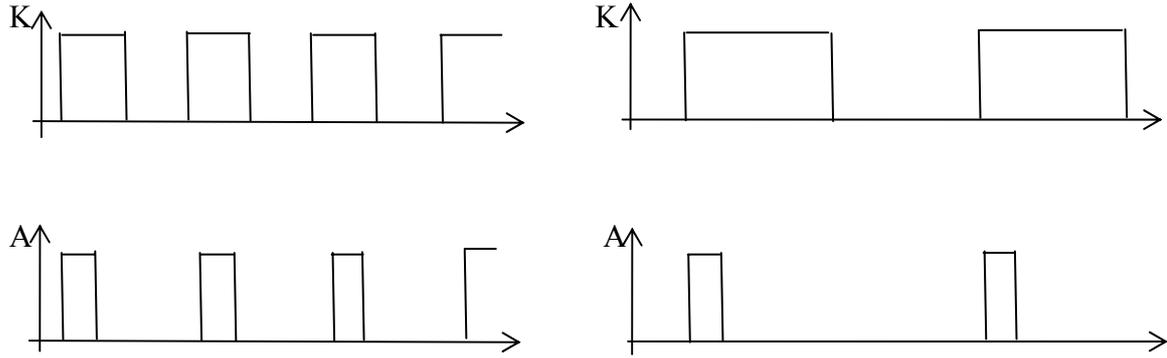
**Etaleur monostable.**

Il élabore le temps d'action du signal d'impulsion à envoyer. Ce temps peut être choisit par l'utilisateur. L'impulsion alors constante est envoyée à chaque front montant du signal K.



**SYNALFA**

**Étaleur monostable.**



Grâce à l'étaleur, on envoie des impulsions de durée constante mais de plus en plus espacées au fur et à mesure que les tensions arrivent à la même fréquence.

**Partie coupleur.**

Son rôle est d'élaborer le signal de couplage S. Celui-ci doit être envoyé en toute sécurité pour les alternateurs et un certain temps  $t_f$  avant la concordance des phases.

**Dérivateur.**

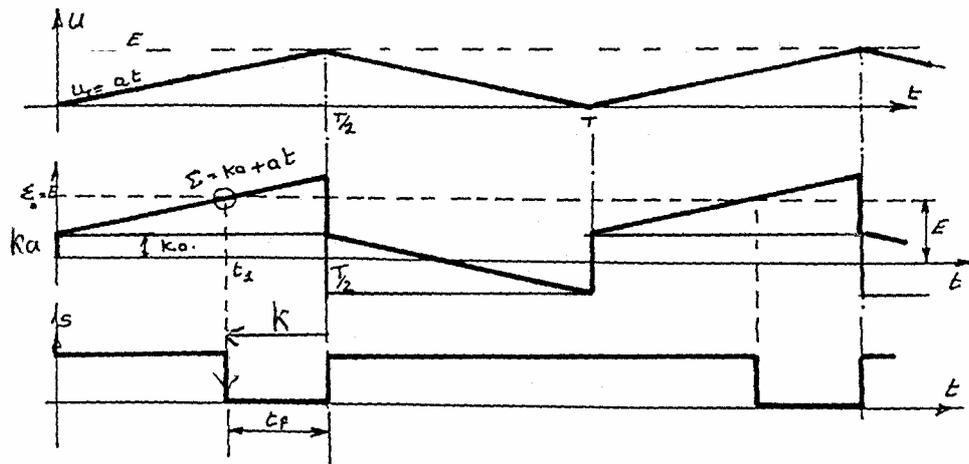
La fonction  $u(t)$  est linéaire,  $u(t) = a.t$ . La dérivée est donc  $a$  et si on ajoute un coefficient multiplicateur  $K$  (réglable), on obtient en D un signal  $K.a$ .

**Sommateur.**

Il fait l'addition de  $u(t)$  et du signal D.

**Comparateur.**

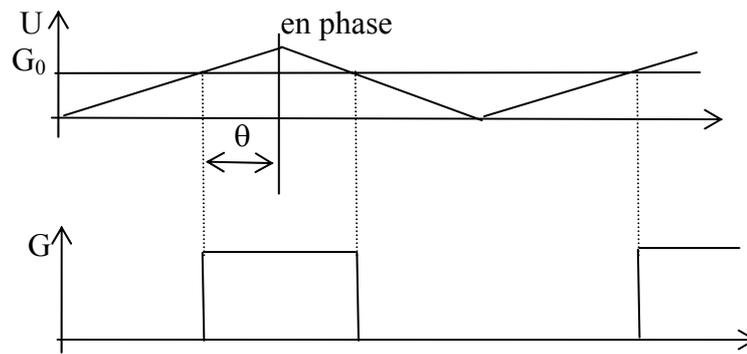
Il élabore S en comparant le signal  $\Sigma$  et l'amplitude  $E$  de la tension de battement. S est à 1 et passe à 0 uniquement quand l'alternateur et les barres sont en phase. Le passage à 0, autrement dit l'envoi de l'ordre de couplage se faisant  $t_f$  secondes avant cet instant.  $T_f$  est réglable par action sur la valeur de  $K$ .



**Comparateur de glissement.**

C'est une sécurité supplémentaire qui autorise le couplage uniquement quand le déphasage entre les barres et l'alternateur est inférieur à un angle  $\theta$  choisit par l'utilisateur. Le signal  $G$  est égal à 1 quand  $G_0$  (constante réglable) est inférieur à  $u(t)$ .

En plus, la durée du passage à 1 de  $G$  permet de connaître le glissement de l'alternateur par rapport au réseau et d'interdire un couplage si celui-ci est trop important.



**Sécurités X.**

Ce sont trois conditions supplémentaires de couplage, écart de fréquence inférieur à un hertz, tension barres et tension alternateur correctes.

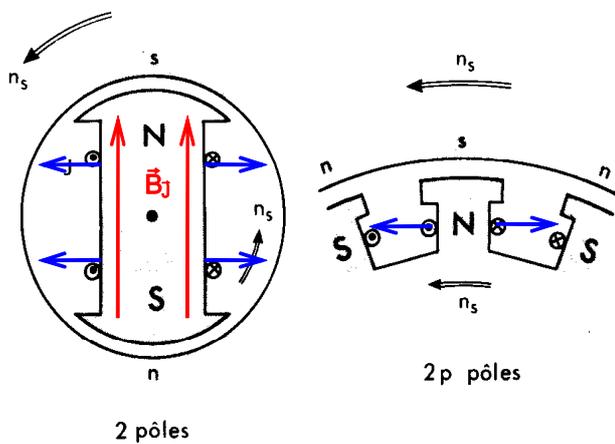
**Porte &.**

Elle réunit les trois conditions,  $G = 1$ ,  $X = 1$  et passage de S de 1 à 0 afin de d'envoyer un signal au transistor qui actionnera le disjoncteur.

**III .Fonctionnement juste après le couplage (à vide).**

Après le couplage, l'alternateur n'échange aucune énergie avec le réseau puisque la différence de potentiel entre  $\vec{V}$  et  $\vec{E}$  est nulle. L'alternateur fonctionne donc à vide.

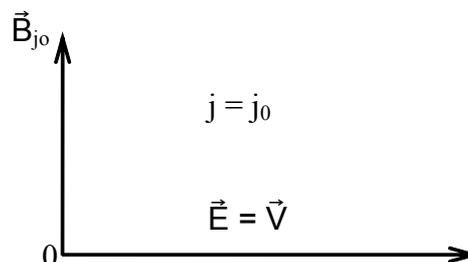
Par contre, il existe un champ magnétique statorique qui tourne à la fréquence  $f$  puisque les enroulements du stator sont connectés au réseau. Ce champ se confond avec  $\vec{B}_j$  et n'a donc aucun effet.



Les enroulements inducteurs subissent des forces de Laplace, mais ces forces s'annulent. Le couple électromagnétique, autrement dit le couple résistant est nul.

Si on néglige les pertes mécaniques et les pertes magnétiques, le couple exercé sur l'arbre par la machine d'entraînement est également nul : la vitesse de rotation reste constante.

Le diagramme de Behn-Eschenburg a l'allure suivante.



## IV . Mise en charge de l'alternateur.

### 1 .Problème global.

Avant le couplage, la puissance globale consommée est fournie par l'ensemble du réseau. Après le couplage, c'est toujours le cas puisque l'alternateur que nous venons de coupler est à vide. Pour permettre à ce dernier de prendre la charge, c'est-à-dire participer à la production, on augmente le cran (pétrole ou vanne d'admission vapeur) de la machine d'entraînement.

A ce moment la demande en énergie n'a pas forcément évolué, la production se retrouve donc supérieure à la consommation provoquant ainsi une augmentation de la fréquence du réseau. Pour éviter ce problème, il est nécessaire de diminuer la production des autres alternateurs en même temps que l'on augmente celle du dernier couplé.

### 2 .Côté alternateur.

#### a ) Mise en charge.

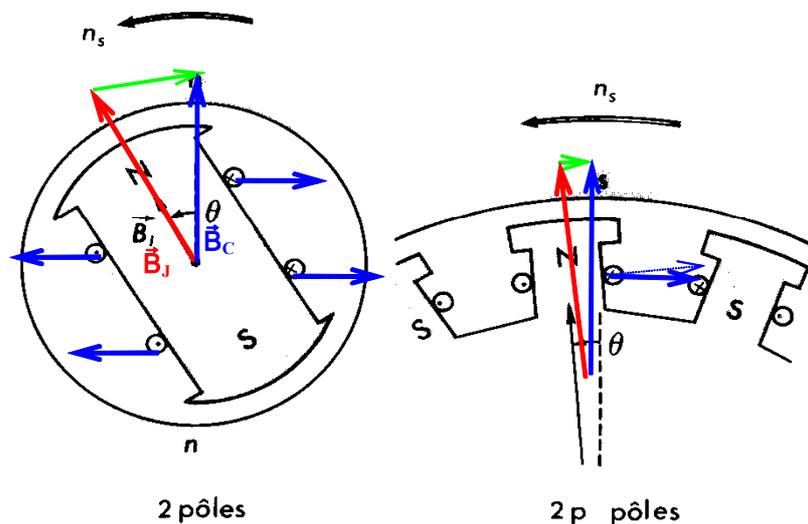
On suppose pour l'instant que le réseau sur lequel on couple notre alternateur est infiniment puissant et qu'il gère lui-même le surplus d'énergie que nous allons lui fournir. On considère donc uniquement l'alternateur.

On augmente donc le cran de la machine d'entraînement par l'intermédiaire de la consigne au régulateur (+vite, -vite). Le couple moteur en augmentation est appliqué sur l'arbre dans le sens de la rotation si bien que le rotor accélère momentanément.

Il se décale ainsi progressivement en avant du mouvement. Le champ tournant statorique qui tourne à la fréquence de synchronisme  $n_s$  se trouve décalé en arrière par rapport à  $\vec{B}_J$ .

Le champ statorique devient  $\vec{B}_C = \vec{B}_J + \vec{B}_I$

Naissance d'un courant induit I.

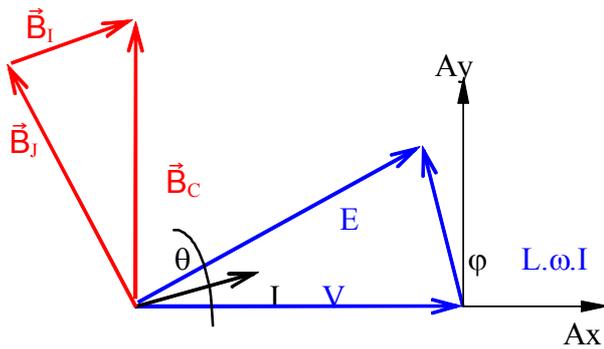


Les forces de Laplace qui s'exercent sur l'enroulement inducteur ne se compensent plus, il en résulte un couple électromagnétique résistant T. Ce couple croît avec l'angle de décalage.

Si le couple moteur n'est pas trop excessif, un nouveau régime permanent s'établit, toujours à la fréquence de synchronisme  $n_s$  mais avec un décalage  $\theta$  du rotor par rapport au champ (décalage en avant) tel que  $T_{mot} = T$  (le couple dû aux pertes mécaniques est négligé).

L'alternateur est désormais chargé. Si toutes les pertes sont négligées, on peut dire que la machine débite dans le réseau la puissance électrique :  $P = T.(2.\pi.n)$ .

Le diagramme de Behn-Eschenburg simplifié ( $R=0$ ) est le suivant :



-  $\vec{B}_j$  est toujours en quadrature avant par rapport à  $\vec{E}$ .

Le rotor s'est décalé en avant de l'angle  $\theta$ ,  $\vec{B}_j$  a donc tourné de l'angle  $\theta$  par rapport à sa position précédente.

- Le vecteur  $\vec{E}$ , dont la norme n'a pas changé puisque  $J$  est resté le même, fait désormais l'angle  $\theta$ , avec le vecteur  $\vec{V}$ .

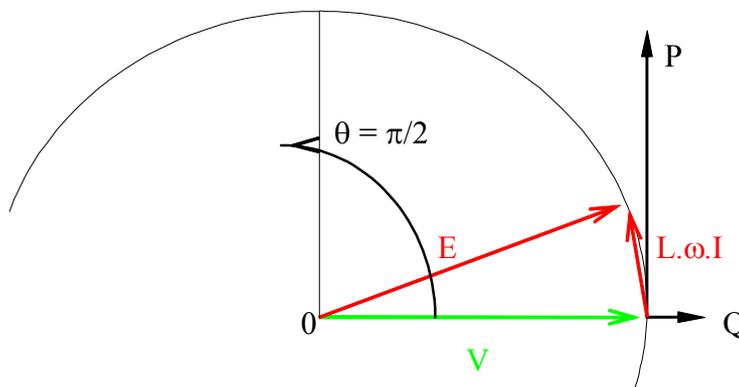
En fonctionnement autonome, la prise de charge provoquait une chute de tension  $V$  aux bornes de l'alternateur. En réseau, la tension est imposée par l'ensemble des autres alternateurs. Autrement dit ici,  $E$  reste égal à  $V$  ce qui donne la forme ci-dessus au diagramme de B.E.

On peut constater que le courant  $I$  est en avance sur la tension  $V$ , ce qui donne une puissance réactive négative. L'alternateur consomme de la puissance réactive ce qui n'est pas son rôle.

**b ) Problème de décrochage.**

En supposant que l'on continue à augmenter le cran de la machine d'entraînement sans toucher à l'excitation, que va t-il se passer ?

Au fur et à mesure que l'on augmente le cran, le couple  $T_{Mot}$  appliqué par la machine augmente. L'angle de décalage  $\theta$ , donné par l'équation  $T = T_{Mot} = T_{max} \sin \theta$  croît également. Le vecteur  $\vec{E}$  fait avec le vecteur  $\vec{V}$  un angle de plus en plus grand.



Lorsque  $T_{Mot}$  est égal à  $T_{max}$ ,  $\theta$  prend la valeur  $\pi/2$  ( $\sin \theta = 1$ ).  $\vec{E}$  est alors en quadrature avant par rapport à  $\vec{V}$ . Si le couple  $T_{Mot}$  devient supérieur à  $T_{max}$ , le décalage augmente encore, alors  $\sin \theta$  diminue et le couple électromagnétique résistant  $T$  diminue également.

Le groupe alternateur accélère, il s'écarte du synchronisme. Le couple résistant finit par s'annuler et la machine s'emballé : **c'est le phénomène de décrochage.**

Remarque : Pour une machine multipolaire, le décalage est d'autant moins grand qu'il y a de paires de pôles. On a  $T = T_{max} \sin p \theta$ . Quand  $T_{Mot}$  est égal à  $T_{max}$ ,  $\theta$  prend la valeur  $\pi/2.p$  ( $\sin p.\theta = 1$ ).

Solution :

Cet incident risque d'autant moins de se produire que le rapport couple maximum sur couple moteur est plus grand.

On écrit  $s = T_{\max} / T_{\text{mot}}$   $s$  est appelé facteur de stabilité.

$T_{\max}$  étant proportionnel à  $E$ , on a intérêt à augmenter  $E$  en même temps que la charge et maintenir toujours une puissance réactive positive.

**c ) Conclusion.**

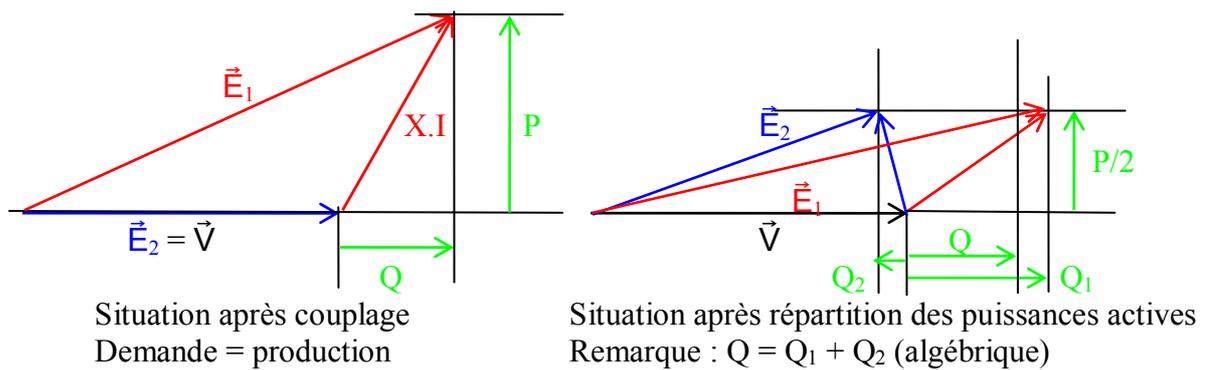
Après couplage, l'action sur le cran de la machine agit sur la puissance active et surtout pas sur la vitesse de rotation. L'action sur le courant d'excitation par le système d'excitation (ESC) agit sur la puissance réactive. On s'efforce pour des questions de rendement de distribution de maintenir un facteur de puissance  $\cos \varphi = 0,8$ .

**V .Répartition des puissances actives entre les alternateurs du réseau.**

**1 .Côté alternateurs.**

Rappelons que la puissance consommée est toujours égale à la puissance produite. L'augmentation de la puissance active d'un alternateur doit être obligatoirement accompagnée de la baisse de puissance active d'un autre alternateur.

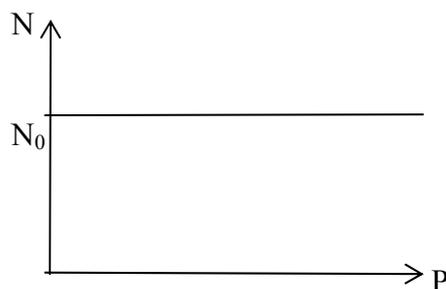
Cette situation peut se résumer par les diagrammes de BE suivants.



On constate que la consommation d'énergie réactive du groupe 2 est compensée par la production supplémentaire d'énergie réactive du groupe 1.

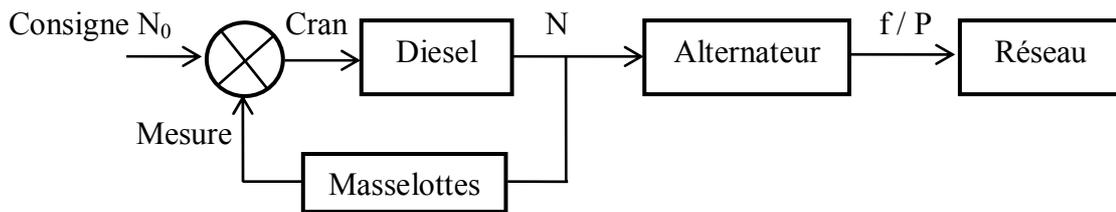
**2 .Côté machine d'entraînement : stabilité de couplage.**

Rappelons que les machines d'entraînement sont équipées d'un régulateur de vitesse afin de maintenir la fréquence constante, ce qui donne à la caractéristique de l'ensemble l'allure suivante.

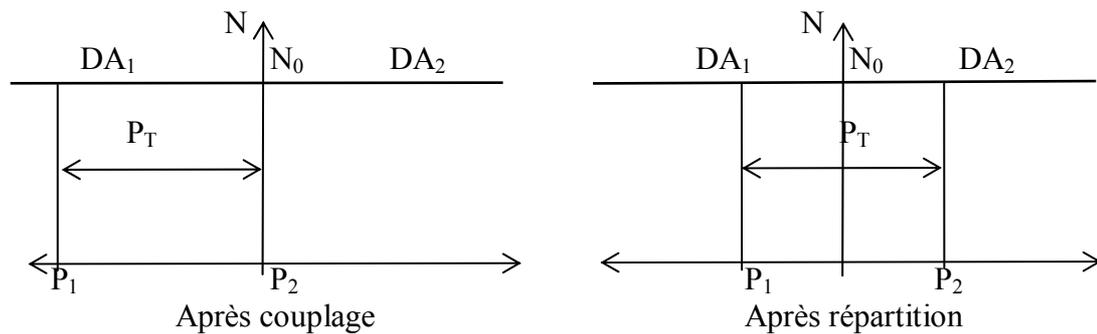


Un groupe qui a cette caractéristique est appelé isochrone ou astatique. La fréquence reste constante quelque soit la charge puisque le régulateur compense en agissant sur le cran.

Le schéma fonctionnel de l'ensemble peut être représenté de la façon suivante.



Juste après le couplage, toute la charge est encore encaissée par le premier groupe (le réseau). Il va falloir faire glisser une partie de cette charge vers le groupe nouveau venu. On peut représenter cette situation par le schéma suivant.

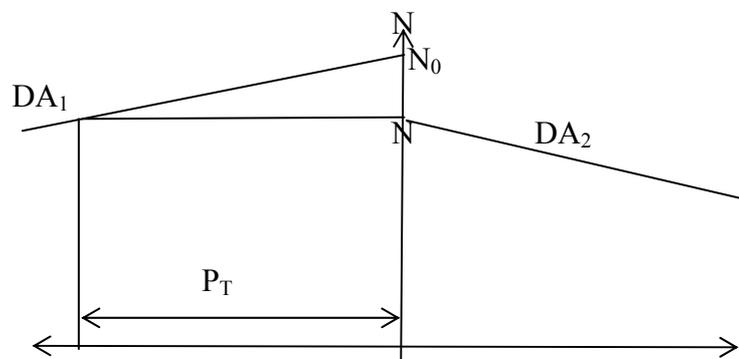


Pour cela, on agit sur les commandes des régulateurs (+vite -vite). Si on conserve ces caractéristiques, on voit que cette action provoque inévitablement des variations de fréquence d'une part et une répartition totalement aléatoire d'autre part.

On introduit donc dans la chaîne de régulation (sur le régulateur lui-même) une action appelée statisme. La méthode consistant à redonner de la pente aux caractéristiques des groupes, on retrouve ainsi la caractéristique en boucle ouverte (sans régulateur).

Autrement dit, le régulateur n'a plus une consigne constante mais une consigne qui dépend de la charge. De cette manière, la fréquence peut rester constante et la répartition des charges peut se faire sans risque d'instabilité.

Résumé de la situation : Après couplage.

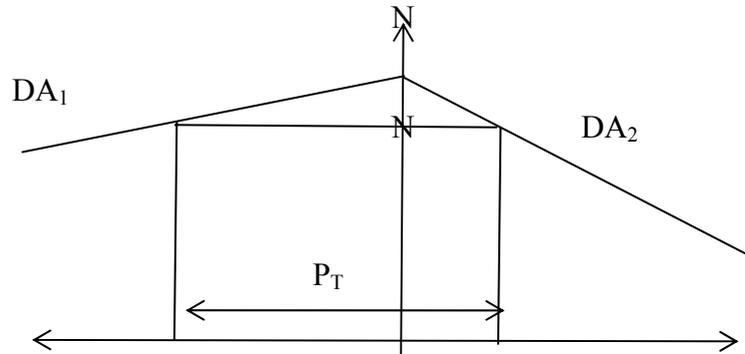


Le DA<sub>1</sub> encaisse toute la charge, sa consigne de vitesse est supérieure à N.  
 Le DA<sub>2</sub> ne fournit rien, sa consigne de vitesse est égale à N.  
 Les deux groupes tournent à N.



Remarques :

- Plus la pente est grande (donc le statisme), et plus la répartition de puissance sera stable.
- Dans le cas de groupes de puissances nominales différentes, les charges ne peuvent pas être réparties uniformément, il suffit alors de donner un statisme différent à chaque groupe pour que la répartition se fasse en fonction de ces puissances nominales.

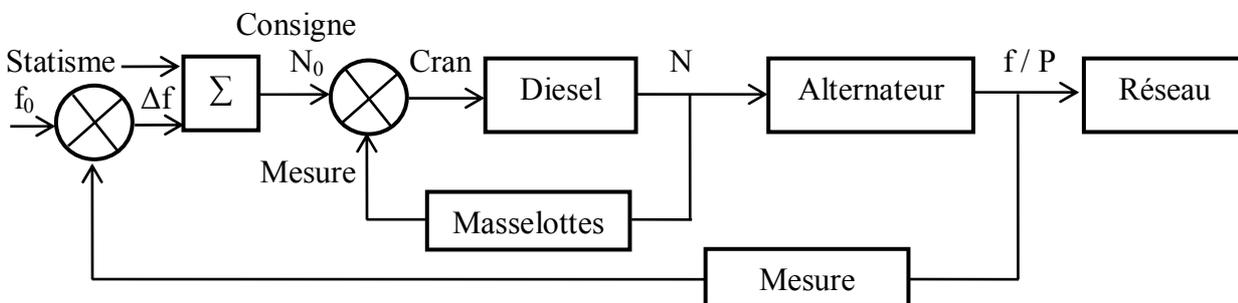


### 3 .Problème de la fréquence.

Lors du transfert de la charge, il faut veiller à ce que la fréquence reste constante et donc bien doser et répartir les actions sur les consignes +vite –vite de chaque groupe.

Le répartiteur de charges, en plus d'effectuer la répartition de puissance active contrôle donc en permanence la fréquence du réseau et agit en conséquence sur le ou les groupes couplés.

Le schéma fonctionnel est alors le suivant :



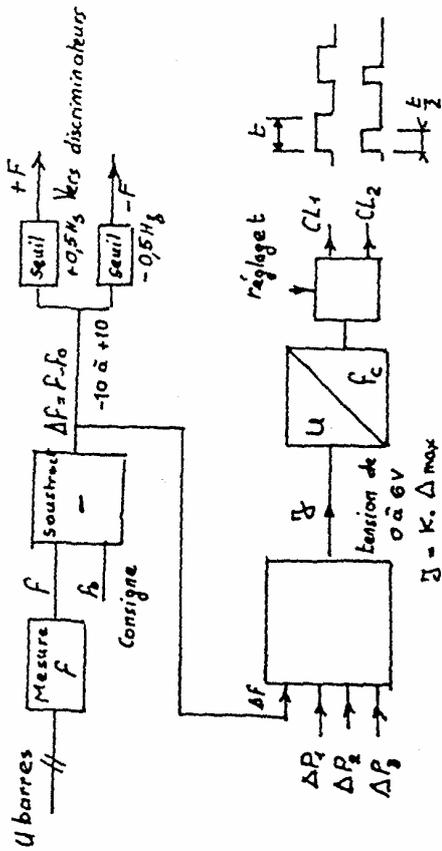
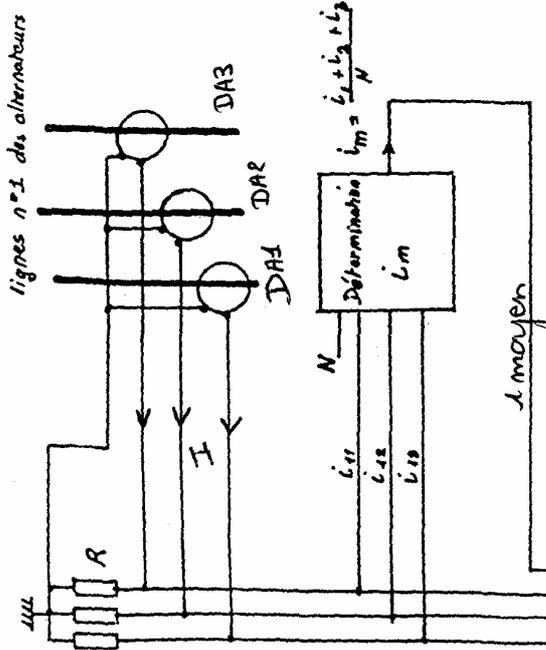
Par la suite, si une demande supplémentaire d'énergie apparaît, il faut agir (+ vite) en même temps sur tous les régulateurs. Cette action peut se faire manuellement mais compte tenu des variations fréquentes de consommation, il est nécessaire d'avoir un système automatisé. C'est encore le rôle du répartiteur de charges.

On trouve aujourd'hui des systèmes électromécaniques comme le 2407 de SYNALFA ou électroniques comme le Q 1000 d'ASEA ou encore le GMM 10 de Merlin Gérin. La technologie est différente mais le principe de fonctionnement reste sensiblement le même.

### 4 .Le dispositif automatique de répartition des charges de SYNALFA.

Il est composé de 4 ensembles :

- Le calculateur d'écarts de puissance active.
- Le calculateur d'écarts de fréquence.
- Le cadenseur.
- Le discriminateur.

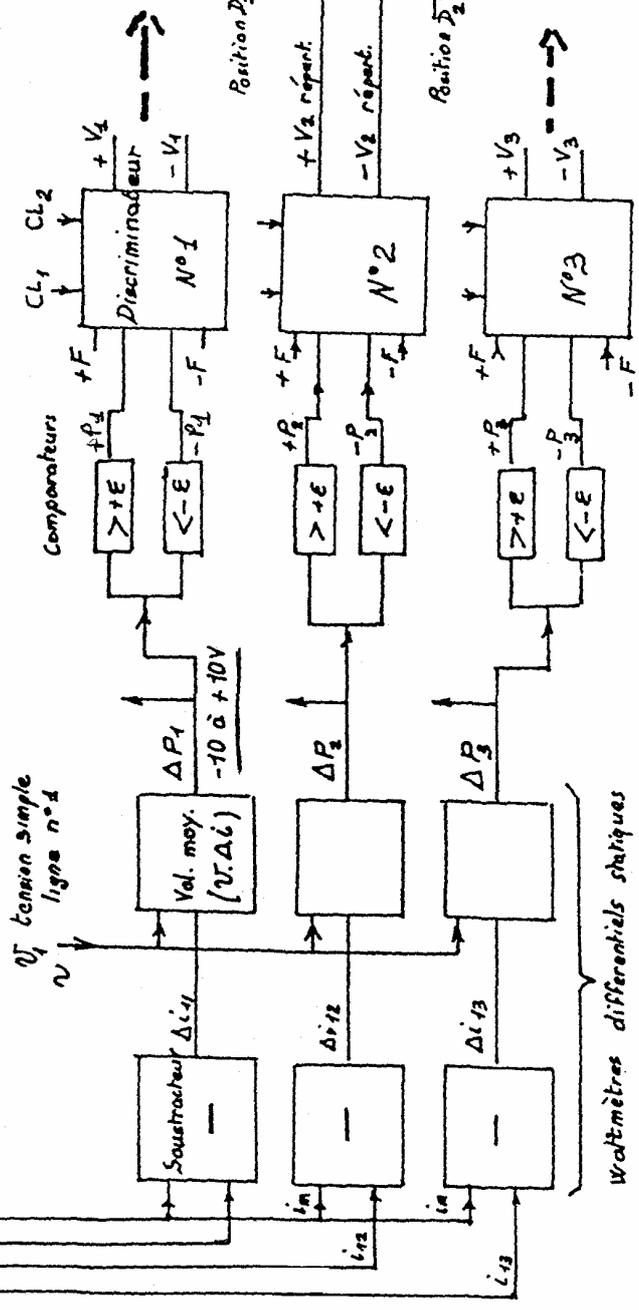


$\Delta_{max} = k \cdot \Delta_{max}$   
 $\Delta_{max} = \text{la plus forte des } |\Delta|$

$CL_1$  et  $CL_2$  = Signaux sortie du cadenceur.

Fréquence des signaux =  $f_c \cdot f_0$  proportionnelle à la plus forte des valeurs  $|\Delta f|, |\Delta P_1|, |\Delta P_2|, |\Delta P_3|$ .

$V_1$  tension simple ligne n°1



Wattmètres différentiels statiques

**Le calculateur d'écart de puissance active.**

Les intensités sont mesurées sur la ligne via des T.I. et transformées en tensions, ceci à cause de l'impédance d'entrée des composants électroniques trop grande ( $Z_e = \infty, i = 0$ ).

On compare les intensités (image) de chaque groupe à l'intensité moyenne, on obtient des  $\Delta i$  que l'on multiplie par V, la tension afin d'obtenir des écarts de puissance  $\Delta P$ . Ces écarts sont comparés à des seuils (un haut et un bas) et les résultats obtenus (+ P, - P) sont envoyés vers le discriminateur.

La logique des comparateurs est résumée par le tableau ci-dessous :

	- $\epsilon$	+ $\epsilon$	
$\Delta P$			
- P	1	0	0
+ P	0	0	1

**Le calculateur d'écart de fréquence.**

La fréquence du réseau est comparée à une consigne de fréquence  $f_0$  et comme pour les puissances, cet écart est comparé à deux seuils. Le résultat est envoyé vers le discriminateur.

La logique des comparateurs est résumée par le tableau ci-dessous :

	- $\epsilon$	+ $\epsilon$	
$\Delta f$			
- F	1	0	0
+ F	0	0	1

**Le cadenseur.**

Il décide de la cadence à laquelle le discriminateur enverra ses ordres + vite – vite au régulateur, il lui impose une fréquence de travail qui sera d'autant plus forte que les écarts  $\Delta P$  ou  $\Delta f$  sont grands. Pour se faire, il élabore une tension  $J = K \cdot \Delta_{max}$ ,  $\Delta_{max}$  étant le plus grand  $\Delta$  mesuré. Cette tension convertie en fréquence permet d'élaborer les signaux CL envoyés vers le discriminateur.

**Le discriminateur.**

Il définit l'ordre + vite ou – vite ainsi que la cadence à laquelle il faut l'envoyer aux relais. La logique des discriminateurs est résumée par le tableau ci-dessous :

F \ P	+ P = 1	+P=-P=0	- P = 1
+ F = 1	- vite	- vite	+ vite ½ cadence
+F=-F=0	- vite	Aucun ordre	+ vite
- F = 1	- vite ½ cadence	+ vite	+ vite

Quand les entrées sont contradictoires (+P = 1 et -F = 1 par exemple), on donne la priorité à la correction de puissance mais à demi cadence.

## VI .Répartition des puissances réactives entre les alternateurs.

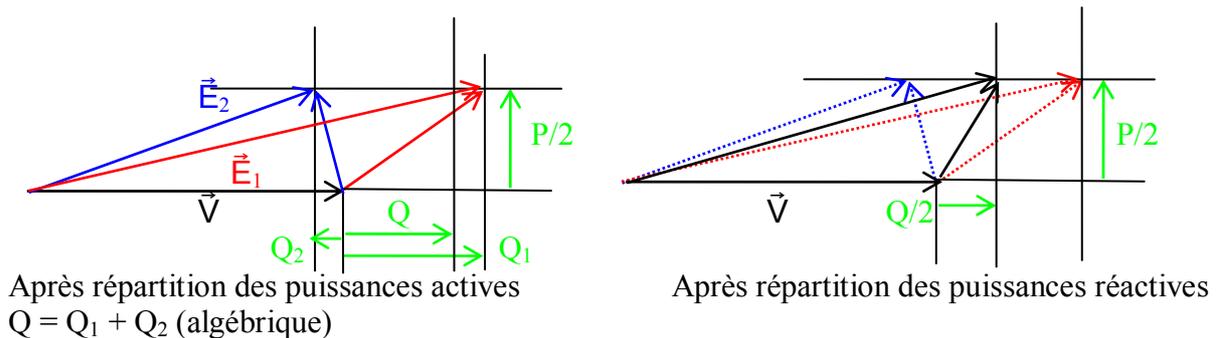
### 1 .Pourquoi répartir les puissances réactives ?

Rappel : la consommation est toujours égale à la production. Ceci est vrai pour les puissances actives mais aussi pour les puissances réactives.

Après l'action du répartiteur de charge (puissances actives), le groupe 2 consomme de la puissance réactive, cette consommation étant compensée par la production supplémentaire d'énergie réactive du groupe 1. On a donc bien consommation = production mais la répartition de puissance réactive n'est pas satisfaisante pour plusieurs raisons :

- Le groupe 1, en compensant l'énergie réactive du groupe 2 augmente la valeur de son intensité et ainsi les pertes par effet Joules lors du transport.
- En cas d'augmentation de la demande de puissance active, le groupe 2 risque d'atteindre la limite de décrochage très rapidement.
- L'angle  $\theta$  entre  $\vec{V}$  et  $\vec{E}$  qui est une image du couple résistant (et moteur) est plus important pour le groupe 2. Cela signifie que pour une même puissance active produite, le diesel 2 a un couple plus élevé, soit une consommation plus importante.

Pour ces raisons il est important d'égaliser les puissances réactives. La valeur choisie correspond à un facteur de puissance de 0,8 environ pour des critères déjà évoqués.



### 2 .Solution.

Pour répartir les puissances réactives, il faut agir sur l'excitation des alternateurs en même temps que l'on agit sur les consignes des régulateurs de vitesse.

Globalement, la puissance réactive doit augmenter en même temps que la puissance active, c'est-à-dire en même temps que l'intensité débitée par l'alternateur. Cette action, c'est l'E.S.C. ou tout autre système d'excitation qui la réalise.

### 3 .Problème de la tension.

Lors du transfert de la puissance réactive, il faut veiller à ce que la tension du réseau reste constante. Il faut donc doser et répartir correctement les actions sur les excitations de chaque groupe.

De même que pour la puissance active et la fréquence, une augmentation de la demande en puissance réactive non satisfaite provoque une chute de tension du réseau.

Tout ceci est le rôle de l'E.S.C. mais à l'usage on a pu constater qu'un tel système était très précis en

régime établi (marge de régulation de la tension : 1,5% autour de la consigne), par contre en régime transitoire la marge augmente jusqu'à 5%.

Sur une installation à bord, compte tenu de la puissance globale limitée, chaque démarrage et arrêt de machine provoquent un régime transitoire important. La répétition de ces régimes provoque une variation permanente des puissances réactives et de la tension entraînant des dysfonctionnements au niveau des machines et à long terme une perte de rendement de l'installation.

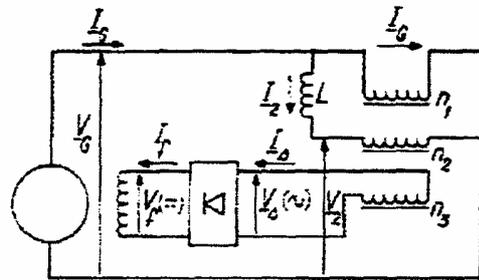
On utilise donc, en complément des E.S.C. des régulateurs de tension (R.T.) afin d'apporter la précision nécessaire à une bonne régulation.

**4 .Le régulateur de tension E.S.C.R.T. de Jeumont Schneider.**

**a ) Schéma de principe.**

L'ESCRT en une association de l'ESC excitation statique compound et d'un régulateur de tension.

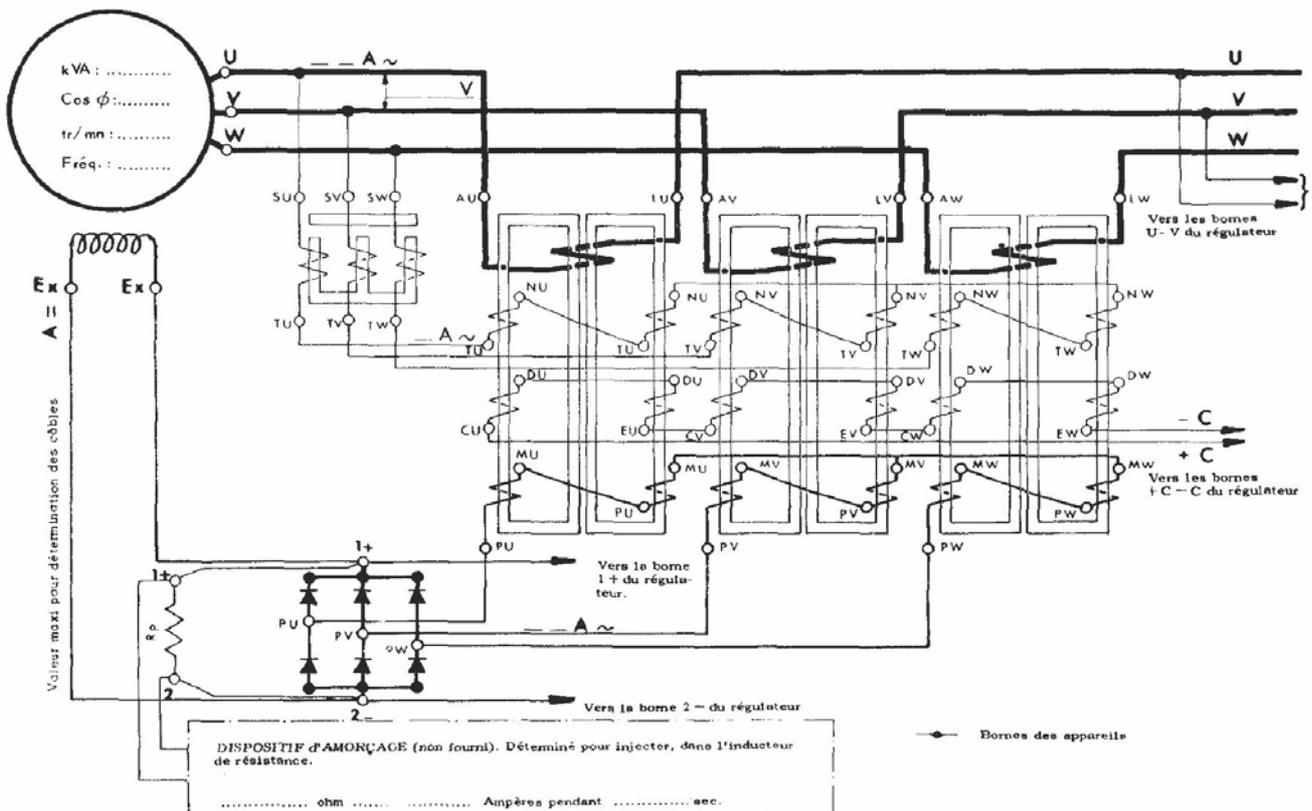
Rappel : schéma de principe de l'ESC.



*n<sub>1</sub>, n<sub>2</sub>, n<sub>3</sub> nombre de spires respectivement du primaire, du secondaire, et du tertiaire.*

**Schéma monophasé équivalent de l'auto-alimentation avec compoundage parallèle.**

Schéma de l'ESCRT : implantation générale.



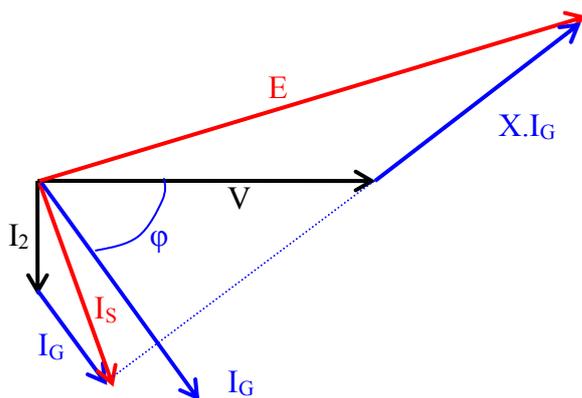
Le régulateur de tension agit sur l'ESC par l'intermédiaire d'un enroulement supplémentaire alimenté en courant continu par les bornes C+ et C-.

**b ) Fonctionnement de l'ESC seule.**

A vide, le courant  $I_2$  circulant dans l'inductance L et l'enroulement du TI assure la création de  $E = V$ . Ce courant est en quadrature avec V (inductance).

En charge, le courant qui produit E, appelé  $I_S$  est en quadrature avec E. Il est égal à la somme vectorielle :  $\vec{I}_S = \vec{I}_2 + \vec{I}_G$   $I_G$  étant le courant en charge (voir schéma de l'ESC).

Le diagramme est le suivant.



Les deux triangles (tension et intensité) étant semblables, chaque augmentation de  $I_G$  provoque une augmentation de  $I_T$  donc de E.

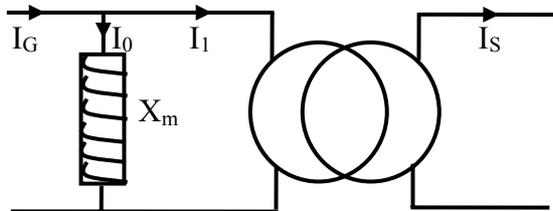
Ceci est valable tant que X reste constant. C'est le principe de l'ESC.

X, c'est la réactance de l'alternateur. Elle reste constante tant que l'alternateur n'est pas saturé mais dans le fonctionnement normal en charge, ce n'est pas le cas.

L'alternateur étant toujours saturé, il faut corriger  $I_S$  de façon plus précise. C'est le rôle du régulateur.

**c ) Action du régulateur sur l'ESC.**

Rappel : Un transformateur réel peut être représenté par le schéma équivalent suivant.



Un transformateur parfait dont le primaire est shunté par une inductance magnétisante  $X_m$  du primaire.

On a  $I_G = I_0 + I_1$  avec  $I_0$  étant le courant magnétisant, c'est-à-dire nécessaire pour vaincre la réluctance du circuit magnétique ( $I_0$  est faible puisque  $X_m$  est grand).

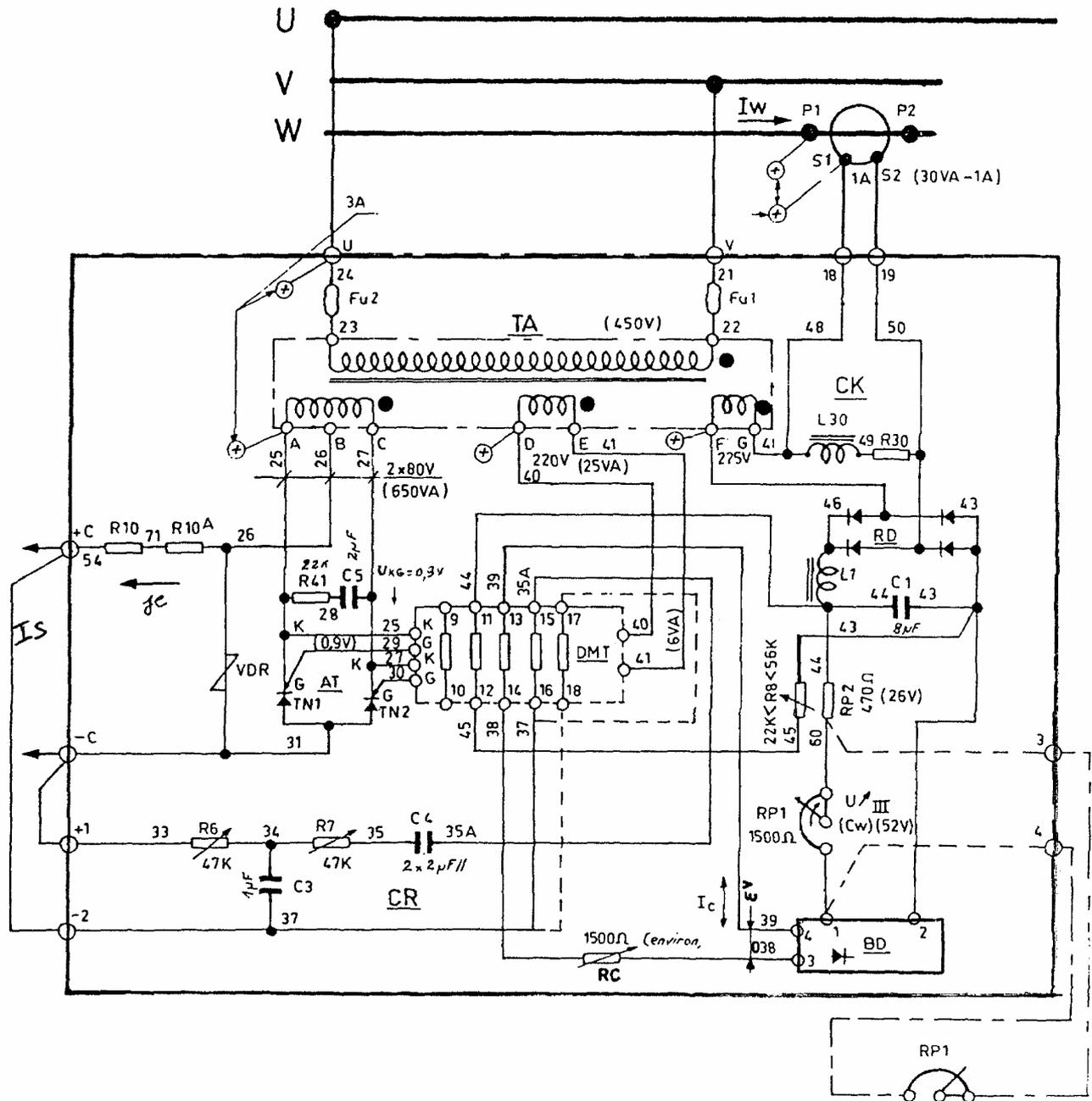
L'enroulement auxiliaire rajouté sur le TI est parcouru par un courant continu provenant du régulateur. Celui-ci sature plus ou moins le circuit magnétique du TI faisant ainsi varier sa réluctance ( $X_m$ ).

Pour une valeur de  $I_G$ , débitée par l'alternateur, une augmentation du courant continu par le RT augmente la saturation, donc la réluctance.  $I_0$  doit augmenter à son tour (pour vaincre  $X_m$ ) faisant chuter  $I_1$  et donc  $I_2$  et par la suite le courant d'excitation J.

Le rôle du régulateur est de commander la valeur du courant continu en fonction de la tension mesuré sur le réseau et la répartition des puissances réactives.

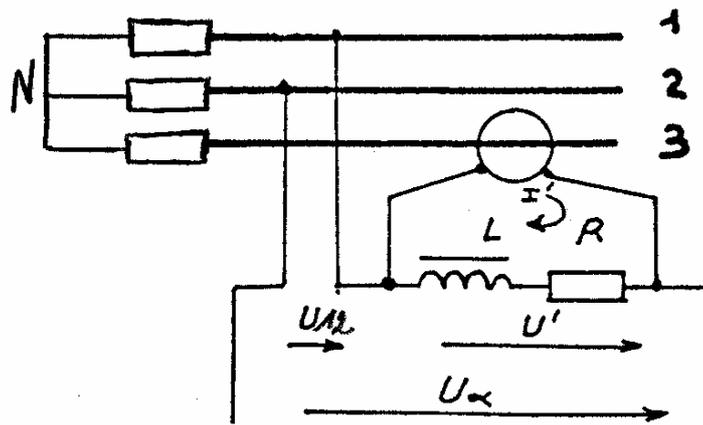
**d ) Le régulateur.**

Comme dans tout régulateur, on va trouver une prise de mesure, une consigne, un comparateur ainsi qu'un actionneur et sa contre réaction.

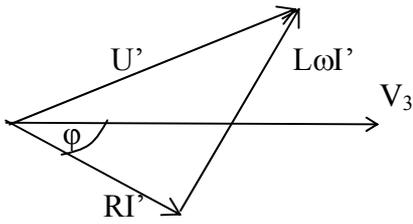


**La mesure de tension : CK.**

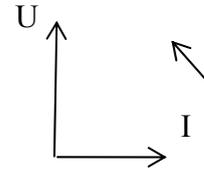
Le montage utilisé est le suivant.



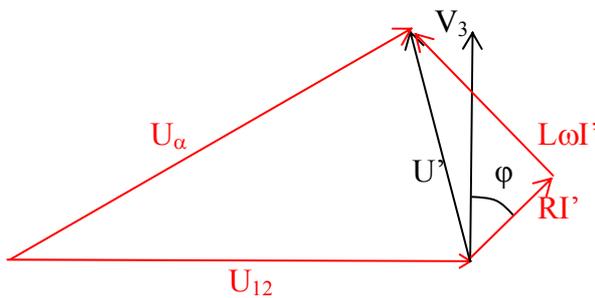
Le montage L,R est alimenté sous une tension simple (la tension  $V_3$ ). Comme ce montage est inductif,  $V_3$  est en avance sur  $I'$ , on a le diagramme suivant :



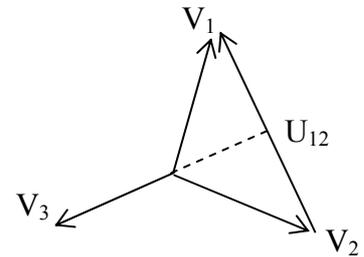
Rappel : inductance pure  
U en avance sur I



La tension composée  $U_{12}$  est perpendiculaire à  $V_3$ , de plus on a  $\vec{U}_\alpha = \vec{U}_{12} + \vec{U}'$ , le diagramme du montage aura donc la forme suivante :



Rappel : courants triphasés



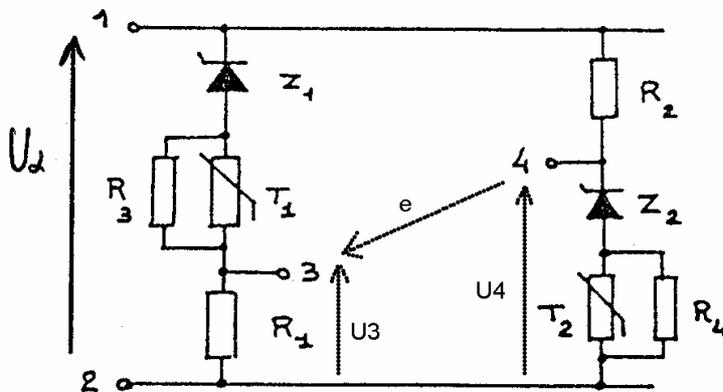
Les valeurs de  $R_{30}$  et  $L_{30}$  sont choisies de telle façon que pour un  $\cos \phi$  nominal de 0,8 on ait  $U_\alpha = U_{12}$ . Chaque variation de la tension du réseau ( $U_{12}$ ) fait varier  $U_\alpha$  dans les mêmes proportions. De plus, chaque variation de la puissance réactive du groupe provoque une variation du  $\cos \phi$  et donc de  $U_\alpha$ .

Connaître la valeur de  $U_\alpha$  permet de définir l'action du régulateur.

**Le pont redresseur : RD.**

Il sert à redresser et filtrer la tension de mesure  $U_\alpha$  afin de pouvoir la comparer à la consigne.

**Le comparateur : BD.**



La tension à vérifier  $U_\alpha$  est appliquée entre les bornes 1 et 2 et est comparée à une tension fixe de référence obtenue par deux diodes Zener stabilisées en température par deux thermistances.

Quand la température augmente, la chute de tension aux bornes des thermistances diminue, ce qui compense l'augmentation de celle de la Zener. Les résistances  $R_3$  et  $R_4$  permettent l'ajustement de cette compensation.

La tension  $U_4$  est constante, par contre  $U_3$  varie avec  $U_\alpha$ .

Si  $U_\alpha =$  valeur désirée, alors le montage est calculé pour avoir  $U_3 = U_4$ .

Si  $U_\alpha >$  valeur désirée alors  $U_3 > U_4$ .  $e = U_3 - U_4 > 0$  le courant envoyé vers le DMT  $> 0$   
 Si  $U_\alpha <$  valeur désirée alors  $U_3 < U_4$ .  $e = U_3 - U_4 < 0$  le courant envoyé vers le DMT  $< 0$

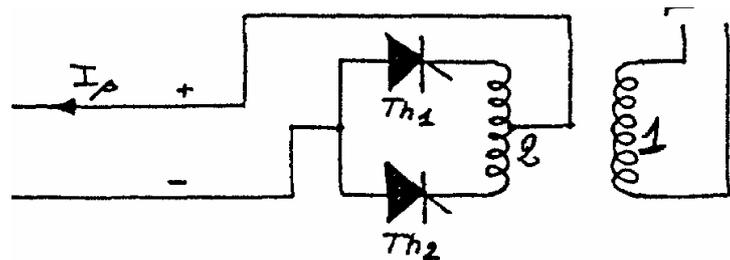
**La consigne : RP1.**

Le changement de la valeur de consigne ne s'effectue pas sur  $U_4$  qui est fixe mais simplement sur la mesure de  $U_\alpha$  elle-même à l'aide d'un potentiomètre placé avant l'entrée dans le comparateur.

**Le déclencheur magnétique pour thyristors : DMT.**

Selon le signe du courant envoyé par le comparateur au DMT, ce dernier commande la valeur de l'angle d'amorçage des thyristors TN1 et TN2.

Quand  $e > 0$  ( $U_\alpha$  trop grande), le DMT commande une augmentation du courant de saturation du TI provoquant une diminution du courant d'excitation.

**L'amplificateur à thyristors : AT.**

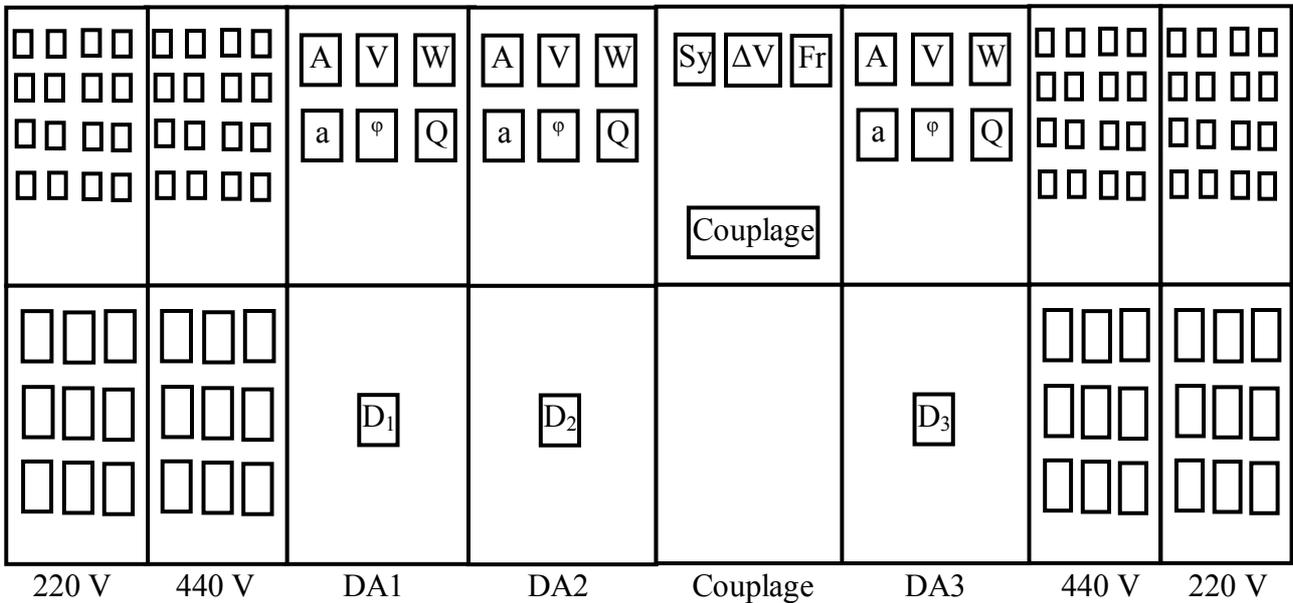
Le temps de conduction des thyristors permet de faire varier la valeur moyenne du courant de saturation  $I_s$  qui est envoyé vers le TI (bornes C+ et C-).

**La contre réaction : CR.**

Elle permet de contrôler la tension d'excitation de l'alternateur à la source et corrige l'action du DMT en conséquence. Ceci permet d'éviter de trop grandes oscillations de la tension du réseau et des puissances réactives. C'est une action dérivée.

# Chapitre IV : Distribution de l'énergie électrique.

## I. Schéma d'implantation générale.

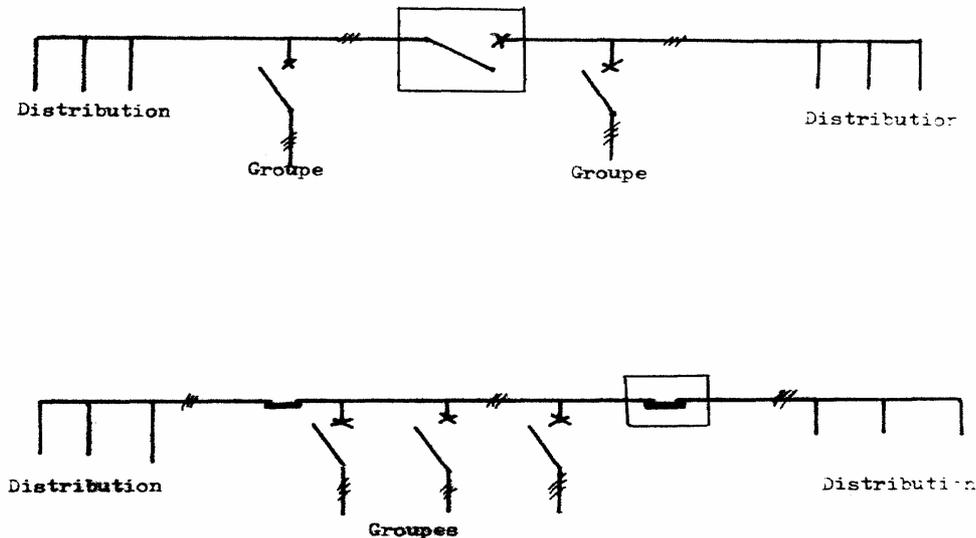


### 1. Le tableau principal.

Ce tableau est celui qui reçoit la production d'énergie électrique des groupes principaux et qui permet de la redistribuer vers les appareils utilisateurs soit directement, soit via d'autres tableaux (secondaires). Placé dans un endroit accessible et bien ventilé, le tableau principal doit être à l'abri des projections de liquides.

Il comprend un jeu de barres, plusieurs cellules avec les départs et arrivées correspondantes, les appareils de coupure et de détection, ainsi que les appareils de mesure

#### a) Les barres.

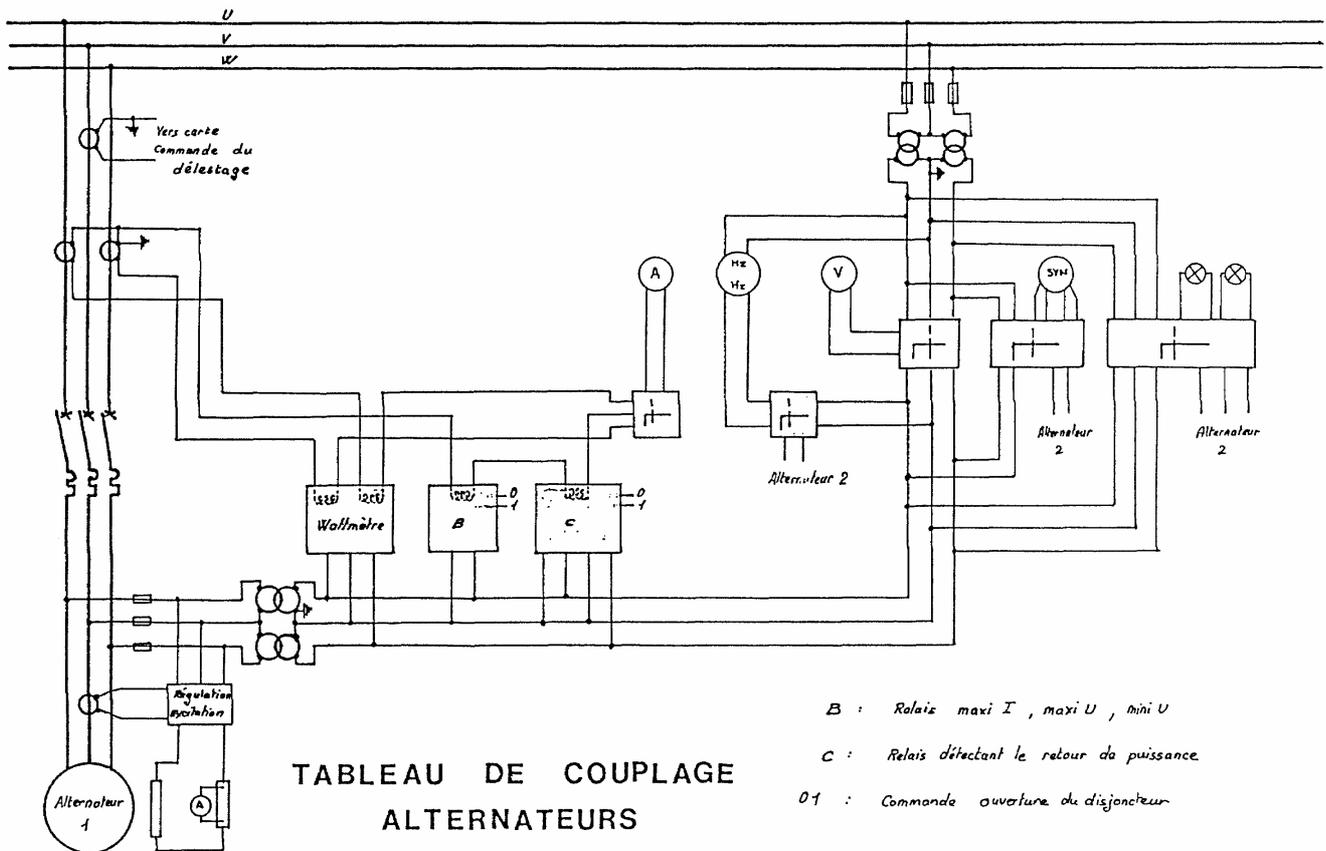


Les barres sont en cuivre de faible impédance. Elles sont fixées rigidement sur des isolants dans la partie haute du tableau, et ont une section suffisante pour éviter les échauffements et résister aux effets électrodynamiques dus aux courants de court-circuit.

Elles sont suffisamment éloignées les unes des autres pour éviter l'amorçage d'arcs et sont peintes ou reçoivent un revêtement aux couleurs conventionnelles (U : vert, V : Jaune, W : Brun).

Sur les paquebots, un ou plusieurs disjoncteurs permettent de fractionner en charge les tableaux principaux en deux parties indépendantes. Sur les autres navires, on se contente le plus souvent d'éclisses qui permettent grâce à leur démontage d'éliminer la partie du tableau qui serait endommagée ou détruite. Le démontage des éclisses nécessite la mise hors tension du tableau.

### b ) Le tableau de couplage et de répartition de charge.



### c ) L'alimentation par la terre.

La prise de courant terre est en général munie de deux dispositifs de coupure en série, l'un sur le tableau principal, et l'autre sur le coffret où sont connectés les câbles de terre. Le couplage bord / terre est protégé par des sécurités électriques :

- La fermeture du disjoncteur terre au tableau principal n'est possible que si tous les disjoncteurs des groupes principaux sont ouverts.
- La fermeture du disjoncteur d'un groupe principal n'est possible que si le disjoncteur terre sur le tableau principal est ouvert.

Le tableau principal possède un voltmètre et un ampèremètre relatif à l'alimentation terre tandis que le coffret de connexion est muni d'un voltmètre et d'un indicateur d'ordre de succession des phases.

### d ) Le circuit 220 V.

Chaque côté du tableau principal possède un départ permettant l'alimentation d'un transformateur pour le réseau 220 V. L'éclairage des compartiments machine est réparti sur deux départs distincts (au minimum) du tableau principal.

### 2 .Le tableau de secours.

Ce tableau en dehors du local de l'appareil propulsif et au dessus du pont continu le plus élevé permet la distribution de l'énergie aux matériels vitaux. Il peut être alimenté soit par la source de secours soit par le tableau principal.

Sur les navires à passagers sauf accord de l'administration, on ne peut coupler les sources de secours et les groupes électrogènes principaux. Cette mesure est souvent appliquée aux navires de charge.

### 3 .Les tableaux secondaires (ou divisionnaires).

Ces tableaux assurent la répartition et la protection des alimentations de tous les auxiliaires qui ne sont pas alimentés directement par le tableau principal. Ils distribuent l'énergie à l'aide de disjoncteurs ou d'intercepteurs à fusibles et possèdent parfois à leur entrée un sectionneur (disposition obligatoire sur les navires à passagers).

## II .La distribution hiérarchisée.

Les matériels alimentés à partir du tableau sont classés deux catégories :

- Les services essentiels ou services vitaux (nécessaires à la sécurité, la propulsion et la navigation).
- Les services non essentiels ou délestables.

### 1 .Les essentiels.

Les services essentiels doivent être alimentés soit directement à partir du tableau principal, soit par l'intermédiaire d'un tableau divisionnaire alimenté lui même directement à partir du tableau principal. Par sécurité ces services sont placés en double d'une manière symétrique dans le tableau.

Les disjoncteurs des départs vers ces essentiels ne sont pas munis d'un dispositif à ouverture par manque de tension. Lorsqu'ils sont en doubles, chacun des côtés du tableau principal permet l'alimentation de l'un de ces matériels.

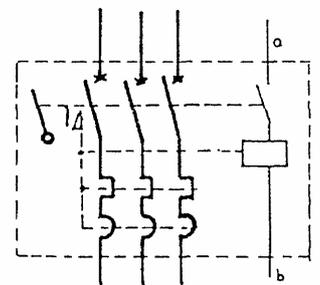
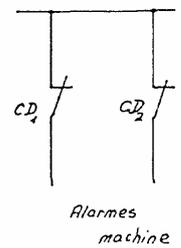
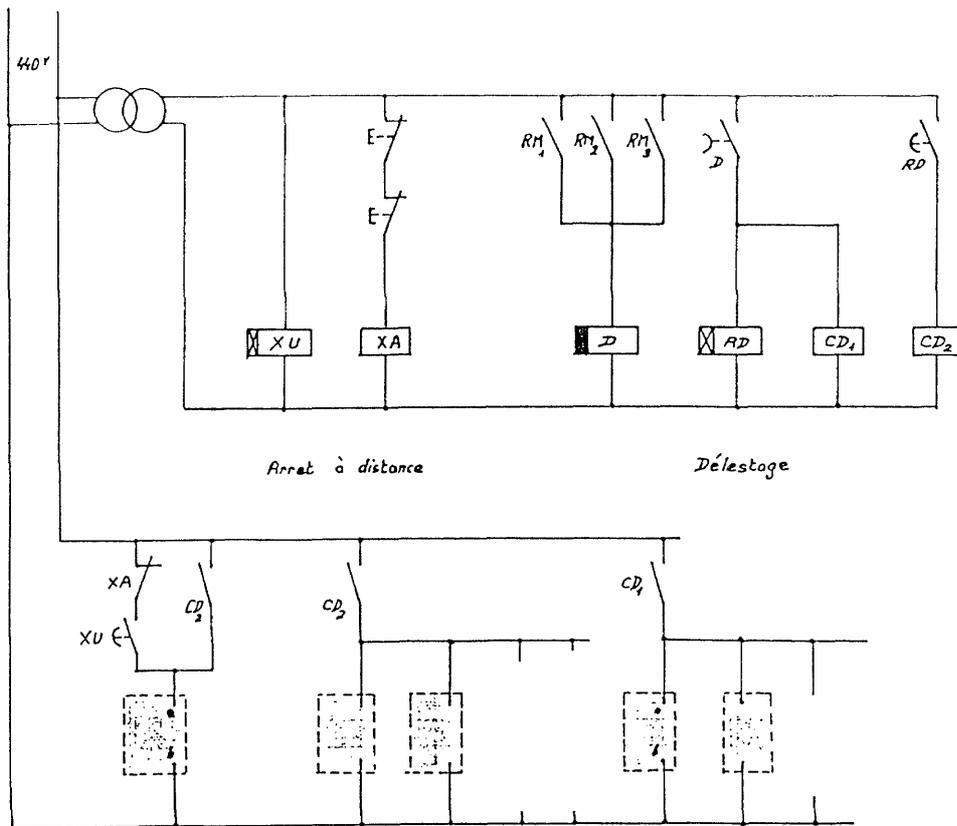
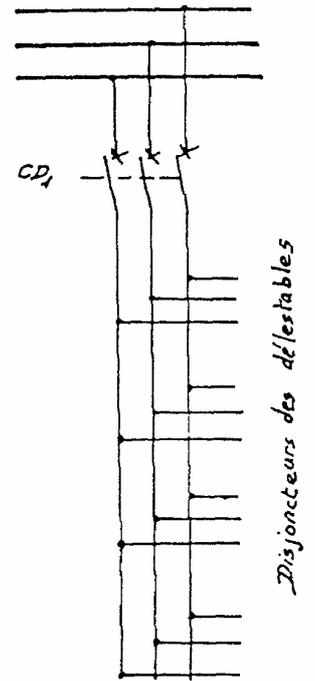
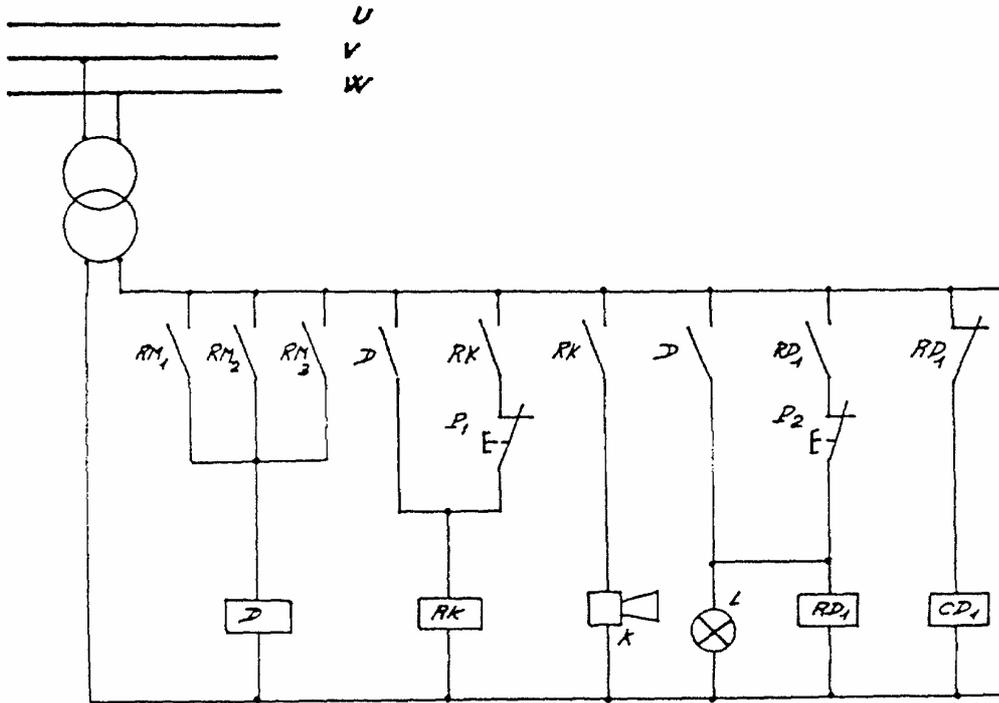
### 2 .Les délestables.

Lorsque la charge sur un alternateur augmente, pour éviter de dépasser le courant  $I$  nominal et d'entraîner la disjonction de cet alternateur, une détection de maxi intensité (RMI) génère une procédure d'élimination de services non essentiels afin de conserver l'énergie pour l'alimentation des services vitaux. Le fonctionnement des RMI de n'importe quel alternateur entraîne donc la procédure de délestage.

Pour éviter l'élimination brutale d'un grand nombre de récepteurs cette procédure peut être effectuée en plusieurs temps :

- Soit en disposant sur chaque alternateur plusieurs détecteurs de maximum d'intensité réglés à des seuils différents, par exemple 90% et 95% de  $I_n$  (les RMI réglés à 90 % éliminent un certain nombre de récepteurs et les RMI réglés à 95 % éliminent un deuxième groupe de récepteurs délestables).
- Soit en disposant d'une détection agissant avec des effets temporisés.

Schémas de principe.



Délestage 2<sup>ème</sup> Stade

Délestage 1<sup>er</sup> Stade

Ventilation  
emmenagements

Grues - Treuils - Ateliers

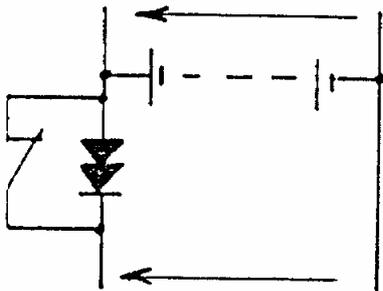
Frigo vivres - Cuisine ...

### III .Les batteries de secours. Charge et mise en service.

Appelées source de sauvegarde, elles alimentent le tableau de secours en cas de défaillance du groupe de secours via un onduleur autonome. La puissance est très limitée.

Très souvent, en temps normal, le dispositif de charge permet à la fois la charge des batteries et l'alimentation des matériels sur le tableau de secours.

Durant la charge il est nécessaire d'avoir aux bornes des batteries une tension supérieure à celle du tableau de secours. Pour cela on place entre les batteries et le tableau de secours des diodes à l'origine d'une chute de tension.

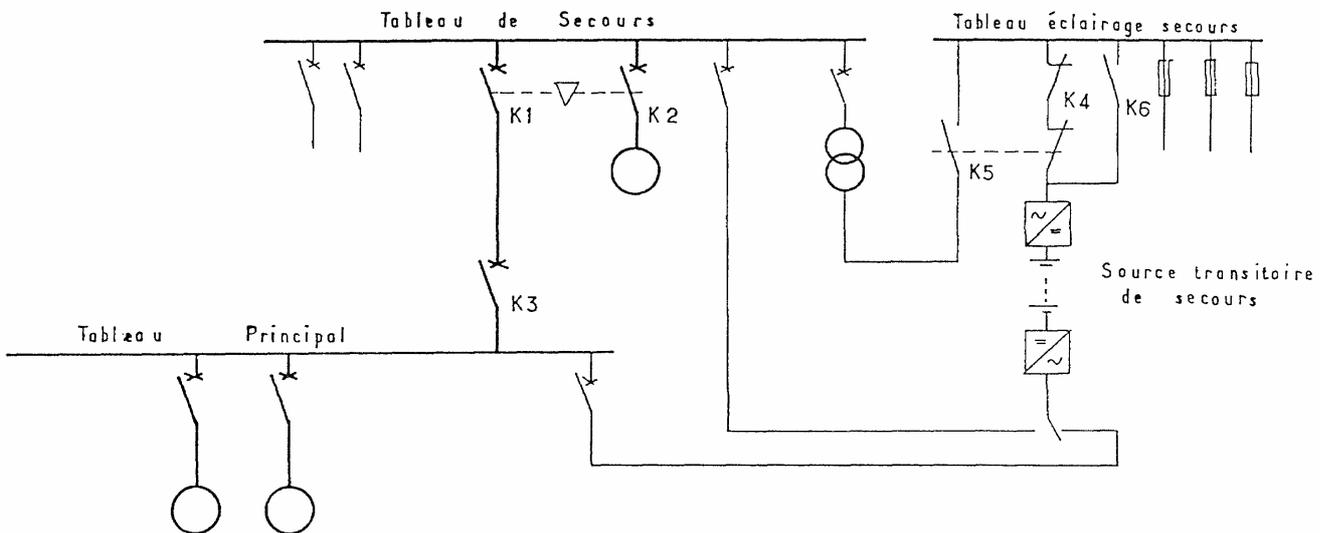


Pour permettre d'obtenir une tension correcte sur le tableau de secours les diodes sont shuntées lorsque les batteries sont en décharge.

Attention : L'installation radio possède ses propres batteries et son chargeur, de même que le groupe de secours possède sa batterie de démarrage rechargée par un alternateur attelé.

### IV .Schémas unifilaires types.

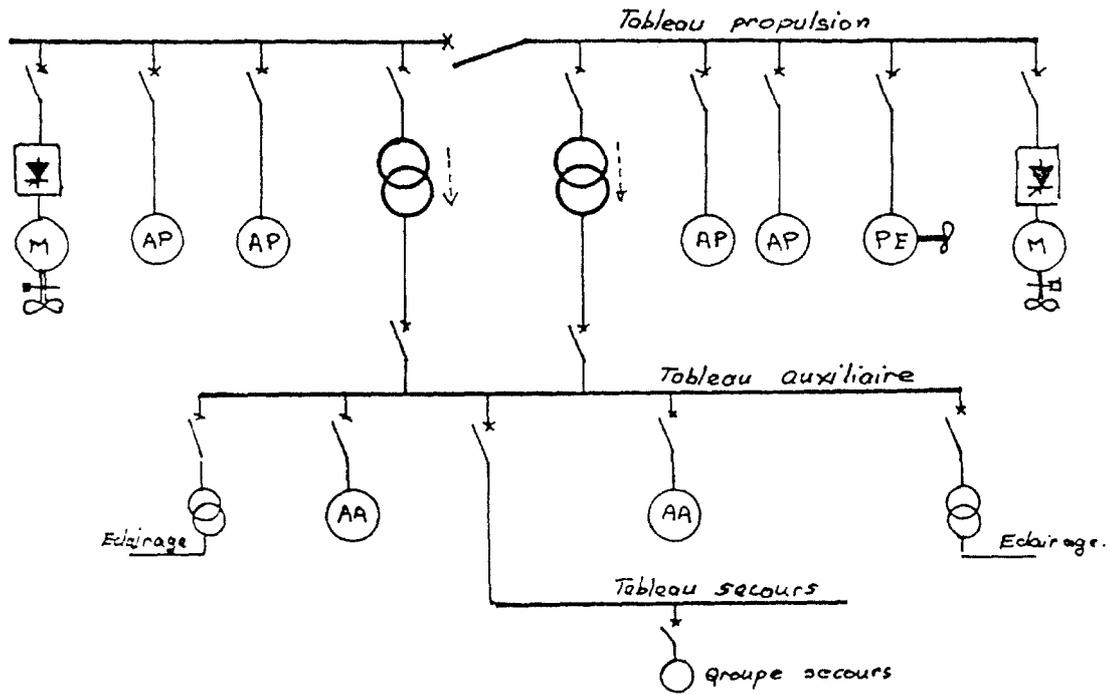
#### 1 .Cas du navire avec groupe de secours et source transitoire.



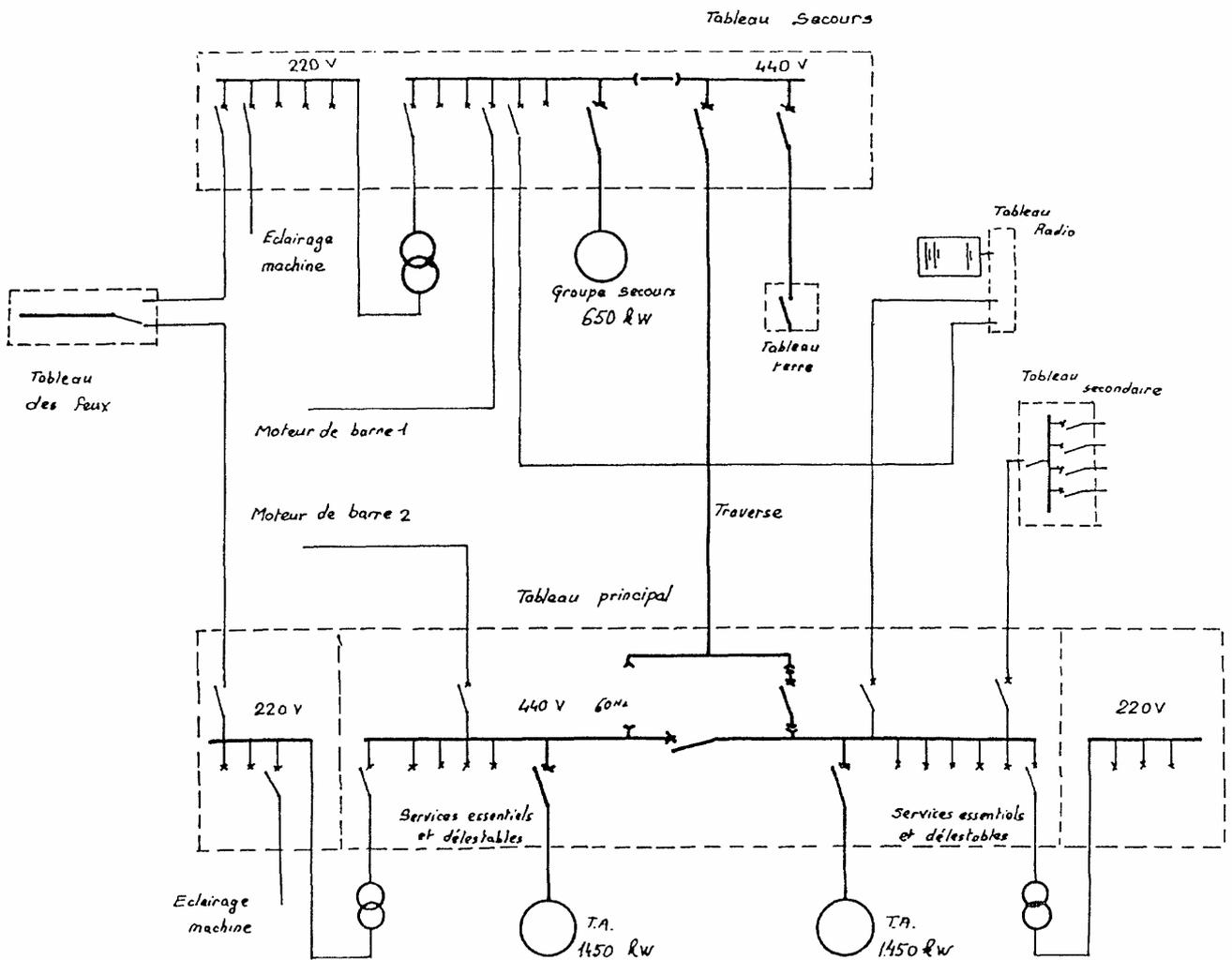
#### 2 .Cas particulier du navire à propulsion électrique.

La tension d'alimentation des moteurs est souvent en 6000 ou 6600 V. Généralement les groupes de propulsion alimentent les barres de propulsion en directe et les barres de distribution par des transformateurs abaisseurs.

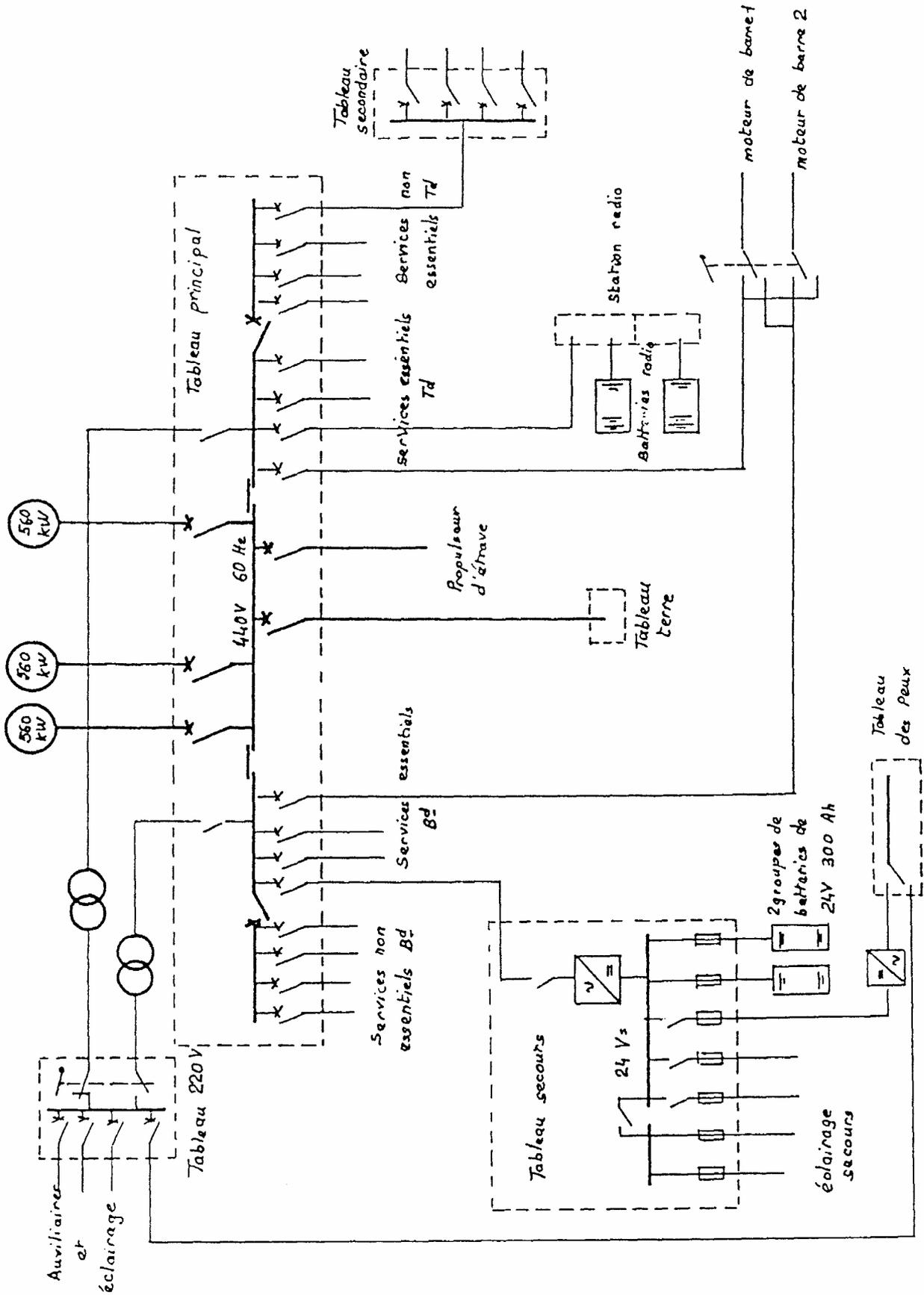
Dans certains cas au mouillage par exemple, ce sont des groupes "auxiliaires" qui alimentent les barres de distribution.



3. Cas du navire de charge avec groupe de secours.



4 .Cas du navire de charge avec batterie de secours.



# Chapitre V : Appareillages et équipements.

## I .Les câbles.

### 1 .Constitution.

#### a ) L'âme.

La nature du métal peut être du cuivre nu, cuivre étamé ou aluminium. L'âme est dite massive si le fil est unique, câblée si le conducteur compte plusieurs brins ou toron.

#### b ) L'enveloppe isolante.

C'est la matière destinée à isoler l'âme, elle est généralement en caoutchouc, néoprène ou PVC.

#### c ) Gaine.

C'est l'enveloppe continue qui assure l'étanchéité et la protection de l'enveloppe isolante. Cette gaine est faite de polychlorure de vinyle ou parfois d'un tube de cuivre.

#### d ) Revêtement ou blindage.

Il est constitué des couches externes assurant la protection mécanique de l'ensemble et est constitué de tresses métalliques ou textiles.

Remarques : Dans certains cas le même matériau assure plusieurs fonctions.

Le terme "blindage " est souvent employé à tort avec la signification d'écran. Un écran est un dispositif électrique destiné à réduire la pénétration d'un champ dans une zone déterminée.

### 2 .Qualité.

La durée de vie des câbles devra être celle prévue pour le navire. Ils devront résister à l'ambiance environnante, présenter une bonne endurance mécanique. Leur rayon de courbure minimal doit permettre tous les câblages demandés.

Ils sont classés en fonction de leur résistance au feu en trois catégories : Incombustible, résistant à la flamme, non propagateur de la flamme.

### 3 .Montage.

Le nombre des boîtes de jonction pour les câbles de distribution doit être minimal. Lorsque des boîtes de jonction sont employées, elles doivent pouvoir contenir des connecteurs boulonnés et doivent être étanches (l'étanchéité peut être éventuellement obtenue par un compound en plastique).

Les câbles sont fixés par nappes ventilées sur des étriers à une distance suffisante du bordé et avec un parcours le plus rectiligne possible. La mise à la masse des armatures doit être soignée. Les câbles ne doivent pas être exposés aux chocs et doivent être à l'abri des projections et ruissellements.

Le passage des cloisons étanches et des ponts se fait au travers de presse étoupes groupés appelés traversées.

### 4 .Les essais.

Les principaux essais que subissent les câbles sont les suivants :

- Vérification des qualités électriques, de la résistance aux courts-circuits.
- Vérification des qualités isolantes.

- Essais de pliage à température normale.
- Essais de pliage à froid.
- Essais de résistance à l'huile, aux hydrocarbures, de résistance aux chocs, à l'humidité, au sel, etc...

## 5 .Classification des câbles.

Ils sont classés d'après :

- la tension nominale (250, 500, 750 ou 1000 V),
- la nature du conducteur,
- la section du conducteur,
- la protection électrique,
- la protection mécanique.

## 6 .Choix des câbles destinés aux navires.

On utilise des câbles non propagateurs de la flamme appartenant en général à la classe 660 - 750 V. La section des âmes conductrices est déterminée en tenant compte de l'intensité maximale  $I_m$  en régime permanent. A cet effet, il existe des tableaux qui indiquent  $I_m$  en fonction de la section, de la classe de l'isolant utilisé, du nombre de conducteurs et pour une température ambiante de 45 °C (sinon on multiplie le résultat trouvé par un coefficient de correction).

## II .Ouverture et fermeture des circuits.

**Pouvoir de coupure :** C'est la valeur du courant qu'un dispositif de protection est capable d'interrompre sous une tension spécifiée et dans des conditions prescrites d'emploi et de fonctionnement.

**Pouvoir, de fermeture :** c'est la valeur du courant que le dispositif de protection est capable d'établir sous une tension spécifiée et dans des conditions prescrites d'emploi et de fonctionnement.

### 1 .Problème des arcs électriques.

Entre deux contacts électriques en position fermée permettant le passage d'une intensité, on peut admettre que la d.d.p. est nulle.

Si un processus de séparation entre les contacts fixe et mobile commence, il y a une diminution progressive de la surface d'écrasement d'où augmentation de la résistance et échauffement local entre les deux électrodes avec micro fusion au point de contact.

De plus à l'instant de la séparation la d.d.p. devient importante entre les deux contacts, un jet d'électron part du contact négatif et ionise l'espace inter électrodes permettant ainsi la propagation de l'arc dans ce milieu.

Cet arc :

- permet la circulation du courant,
- a une section variable selon  $I$ ,
- est à l'origine d'un effet joule et d'une dégradation de la surface des contacts,
- est très mobile et sensible aux courants d'air et aux champs électriques ou magnétiques,
- sa déformation étant facile, il présente un risque d'amorçage entre phase et coque ou phase et phase.

Pour éviter les arcs, la tension aux bornes du contact doit être inférieure à la tension d'arc (c'est la tension nécessaire à l'établissement de l'arc). Pour cela, il faut :

- imposer à l'arc un trajet sinueux pour disposer d'un grand allongement sous un faible volume.
- dé-ioniser le milieu inter électrodes par réfrigération ou ventilation.

## 2 .Les sectionneurs.

Ce matériel ne possède aucun dispositif de coupure d'arc et doit donc être manoeuvré lorsque  $I = 0$ . Il doit être calculé pour supporter des surintensités. Il peut être unipolaire, bipolaire... La commande du sectionneur se fait manuellement ou à l'aide de dispositifs électro magnétiques.

## 3 .Les interrupteurs.

C'est un sectionneur possédant un certain pouvoir de coupure lui permettant de couper  $I$  nominal sous  $U$  nominal. L'interrupteur n'assure aucune protection en cas de court-circuit. L'ouverture et la fermeture doivent être brusques. Ces mouvements sont obtenus par passage d'un point mort.

## 4 .Les disjoncteurs.

La liaison alternateur barres s'effectue en général par l'intermédiaire d'un disjoncteur tripolaire. Son pouvoir de coupure est élevé (ordre de grandeur 20 à 50 fois le courant nominal  $I_N$ ). Les règlements prévoient un certain nombre de protections.

## 5 .Les contacteurs.

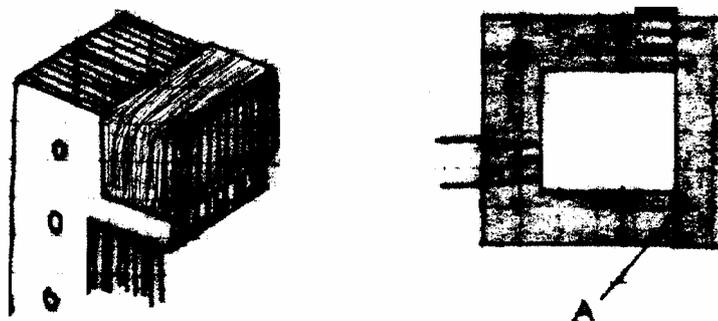
C'est un appareil mécanique ayant une seule position de repos, commandé autrement qu'à la main, capable d'établir, de supporter et d'interrompre des courants dans les conditions normales d'utilisation y compris les conditions de surcharge en service. Le contacteur comprend les contacts principaux (ou de puissance), le dispositif de coupure d'arc, des contacts auxiliaires et le dispositif de commande.

Le plus souvent, le mouvement de fermeture est obtenu par l'alimentation d'un électro aimant, l'ouverture par la coupure du circuit de ce même électro combinée à la détente d'un ressort. L'électro aimant peut être alimenté en courant continu ou alternatif.

- En continu, pour une même valeur de l'induction, la force portante sera deux fois plus importante que celle obtenue avec une alimentation en alternatif.

Au fur et à mesure que le noyau se ferme la réluctance du circuit diminue d'où la possibilité de limiter le courant tout en ayant assez de force portante développée par l'électro. Ceci est obtenu en insérant une résistance d'économie en série avec la bobine une fois l'armature fermée.

- En alternatif, l'intensité absorbée par la bobine se trouve automatiquement réduite par l'augmentation de l'inductance, par contre le flux est alternatif. Au moment où il est nul, le circuit magnétique pourrait, un bref instant, avoir tendance à s'ouvrir. Ce phénomène de coupure de l'attraction serait à l'origine d'un ronflement. Pour l'éviter, on emploie une spire de Frager.



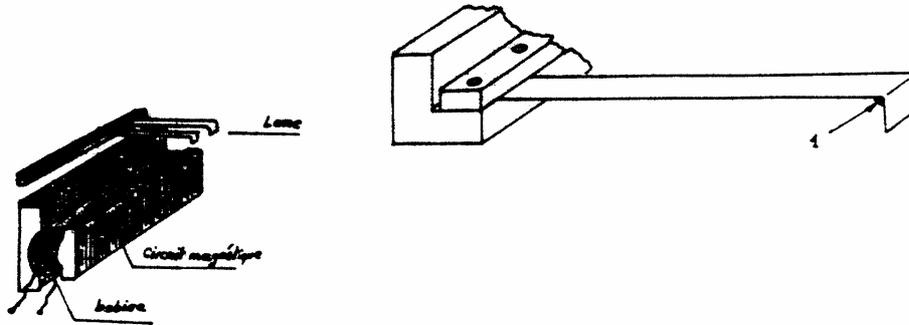
Spire de Frager : en cuivre, cette spire embrasse approximativement les 2/3 du flux dans une branche du circuit magnétique et se comporte donc comme le secondaire d'un transformateur. Le courant qui circule dans cette spire est l'origine d'un flux décalé sur le flux principal de sorte que, lorsque le flux est nul dans la section principale, il ne l'est pas dans la section baguée.

### III .Les éléments de contrôle.

#### 1 .Le fréquencemètre.

##### A lames.

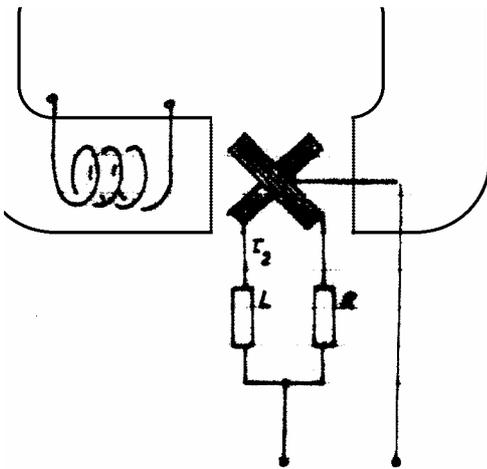
La bobine est alimentée par la tension dont on veut mesurer la fréquence. La fréquence de résonance des lames est réglée pour chaque lame différemment avec un écart de 0,5 hertz afin de voir la progression du réglage.



##### Electronique.

Réalisé avec un trigger, c'est un conformateur qui compte les impulsions du signal appliqué à son entrée. Il en détermine ainsi la fréquence.

#### 2 .Le synchronoscope.



Deux cadres semblables calés à 90° l'un de l'autre forment un mobile (rotor) plongé dans l'induction due à une bobine fixe (stator).

L'un des cadres a en série une résistance R et le second une inductance L, tous deux sont branchés en parallèle et alimentée par l'alternateur à coupler.

La résistance des cadres est négligeable devant R et on peut admettre que  $I_1$  est en phase avec  $U_1$  (résistance). Le courant dans le deuxième cadre est décalé de  $\pi/2$  sur  $U_1$  (inductance).

La valeur de L est telle que à la fréquence de distribution

$I_2 = U_1/L\omega = I_1$ . Les courants sont donc en quadrature.

Le mobile génère une répartition d'induction unique tournant par rapport à lui à la vitesse  $\omega_{Alt}$ . (théorème de Ferraris).

La bobine reliée aux bornes de couplage (réseau) crée dans l'entrefer un champ alternatif pouvant être considéré comme la superposition de deux champs qui tournent en sens inverse, l'un et l'autre à  $\omega_{Res}$  (théorème de Leblanc).

Le champ rotorique s'accroche sur l'un des champs statoriques (celui qui tourne dans le même sens) mais comme la pulsation n'est pas forcément identique, le rotor compense et tourne à  $(\omega_{Res} - \omega_{Alt})$  dans le sens + vite si  $\omega_{Res} > \omega_{Alt}$ , - vite si  $\omega_{Res} < \omega_{Alt}$  et reste immobile si  $\omega_{Res} = \omega_{Alt}$ .

L'aiguille portée par le rotor indique de plus la position relative des champs entre eux donc des machines à coupler.

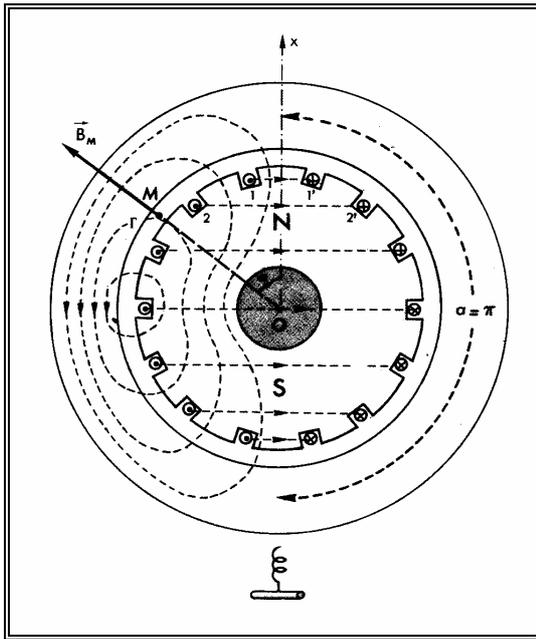
*Théorème de Ferraris et Leblanc, voir : Chapitre VI :III .*

## Chapitre VI : Démonstrations.

### I. Répartition du champ magnétique dans l'entrefer.

#### 1. Répartition dans l'espace.

On considère pour cette étude que l'enroulement est momentanément immobile.



L'enroulement est assimilable à un solénoïde d'axe Ox perpendiculaire à l'axe de rotation. Si on fait passer un courant constant  $i$  dans le bobinage, il crée un champ magnétique admettant Ox comme axe de symétrie.

Chaque ligne de champ traverse deux fois l'entrefer et ces traversées s'effectuent suivant le rayon de l'entrefer. Le vecteur  $\vec{B}$  est donc perpendiculaire à l'axe de rotation de la machine (radial) en chacun des points de l'entrefer.

Orientons les lignes de champ, à l'aide du tire bouchon, à partir du sens de  $i$ .

Dans la région supérieure, les lignes de champ quittent l'armature interne. C'est donc pour cette armature, la zone polaire Nord ou pôle Nord.

Dans la région inférieure, les lignes de champ rentrent dans l'armature interne. C'est donc la zone polaire Sud ou pôle Sud.

L'enroulement crée ainsi deux pôles, il est donc bien bipolaire. D'une façon générale, l'angle dont il faut tourner pour passer d'un pôle au suivant est appelé pas polaire; on le note  $a$ .

Dans le cas particulier de l'enroulement bipolaire, on a :  $a = \pi$ .

### Onde de champ magnétique.

On considère un point M de l'entrefer d'abscisse angulaire  $\alpha$ , comptée à partir de l'axe Ox.

Selon la position du point M, la ligne de champ qui passe par M enlace un nombre de spires variable avec la position de ce point le long de l'entrefer.

Rappel : La valeur de l'induction est directement liée au nombre d'ampères-tours :

$$B = 1,25 \cdot 10^{-6} \cdot n_1 \cdot i$$

Il en résulte, que le champ B voit sa valeur varier avec l'angle  $\alpha$ .

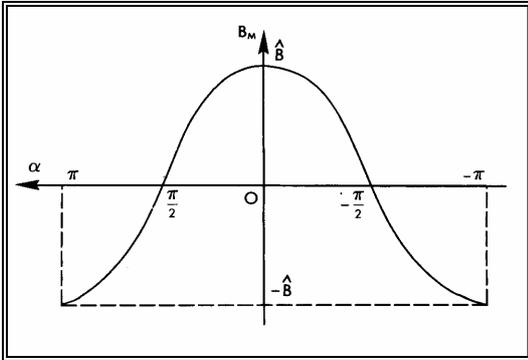
Quand  $\alpha$  est voisin de zéro (M entre les deux encoches supérieures), la ligne de champ enlace la totalité des spires de l'enroulement :  $\vec{B}$  prend sa plus grande valeur.

Quand  $\alpha$  augmente et se rapproche de  $\pi/2$ , la ligne de champ enlace de moins en moins de spires et  $\vec{B}$  diminue progressivement, jusqu'à s'annuler pour  $\alpha = \pi/2$ .

D'une façon générale, si  $B_M$  est la mesure du champ magnétique en M comptée sur l'axe Ox, on peut assimiler le graphe de la fonction  $B_M = f(\alpha)$  à une sinusoïde et écrire

$$B_M = B \cdot \cos \alpha.$$

Aux points particuliers M où :  $\alpha = \pi/2$  et  $-\pi/2$   $B_M$  est nul.  
 $\alpha = \pi$  et  $-\pi$   $B_M$  vaut -B.



Attention :  $B_M$  n'est pas une fonction du temps mais une fonction de l'angle  $\alpha$  qui précise la position du point M le long de l'entrefer, on dit qu'il s'agit d'une fonction d'espace.

L'ensemble des mesures des différents vecteurs  $\vec{B}$  le long de l'entrefer constitue une onde de champ magnétique que l'on peut finalement considérer comme l'ensemble des projections de  $\vec{B}$  sur tous les rayon OM.

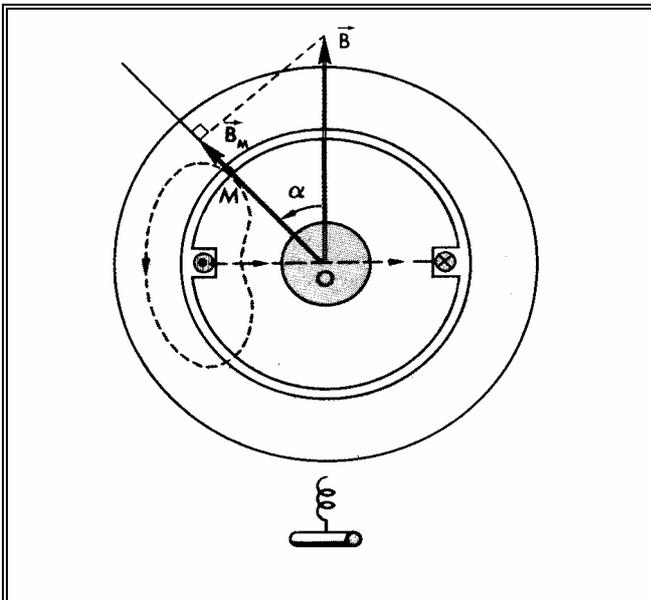
La valeur maximale de  $B_M$  est proportionnelle au nombre total N de spires de l'enroulement, et au courant inducteur i.

$$B_{max} = k \cdot N \cdot i$$

k est un coefficient qui dépend du circuit magnétique (essentiellement de l'épaisseur de l'entrefer) et du nombre de paires d'encoques dans lesquelles le bobinage est logé.

Remarques.

- Bien que l'enroulement soit toujours réparti dans plusieurs paires d'encoques, on le représente souvent pour simplifier, dans deux encoches seulement, c'est-à-dire constitué de deux faisceaux diamétralement opposés.



D'une façon générale, l'angle dont il faut tourner pour passer d'un faisceau à l'autre appartenant à la même bobine est appelé ouverture de la bobine. Dans le cas particulier de l'enroulement bipolaire, la bobine présente une ouverture égale à  $\pi$ .

**2 .Répartition dans le temps.**

A présent, l'enroulement tourne à vitesse angulaire constante  $\Omega$ , il entraîne ainsi avec lui le champ qu'il produit : on parle alors de champ magnétique tournant.

Pour repérer la position du rotor, on adopte un axe Oy fixe par rapport au stator.  
On prend comme origine du temps ( $t = 0$ ), l'instant où Ox passe sur Oy.

On a :

$$\theta = \Omega.t + \alpha$$

Rappel :  $B_M = B \cdot \cos \alpha$  Or  $\alpha = \theta - \Omega.t$

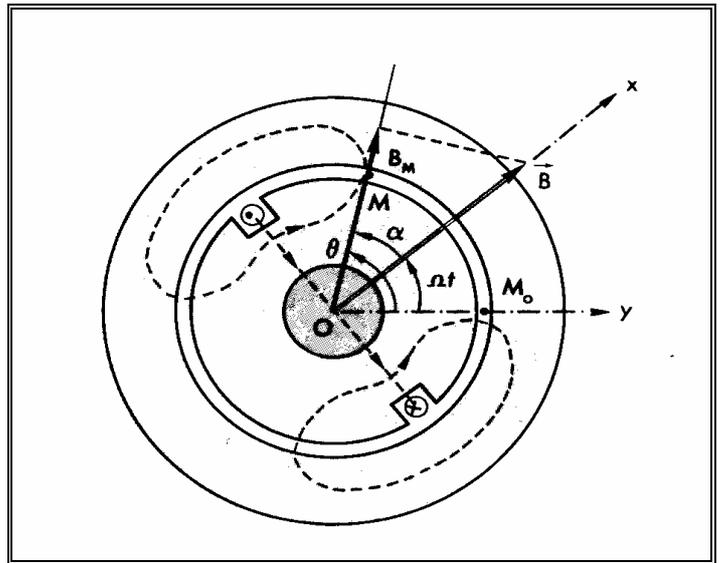
donc  $B_M = B \cdot \cos (\theta - \Omega.t)$

La variation de  $B_M$  est donc une fonction sinusoïdale que l'on peut écrire :

$$B_M = B \cdot \cos (\omega.t - \theta) \quad \cos a = \cos - a$$

Avec  $\omega$  : pulsation de la fonction égale à la vitesse de rotation  $\Omega$ .

$\theta$  : déphasage, de  $B_M$  par rapport à Oy.



B en M est en retard sur B en  $M_0$

Attention : cette fonction est une fonction du temps t et de l'angle  $\theta$ .

- A un instant donné (t fixé),  $B_M$  est une fonction sinusoïdale de  $\theta$ , admettant  $2 \cdot \pi$  comme période ( $\Omega.t = \text{cste}$ ).

- En un point M donné de l'entrefer ( $\theta$  fixé), B est une fonction sinusoïdale du temps dont la pulsation  $\omega$  est égale à la vitesse de rotation  $\Omega$  de l'armature.

On a  $B_M = B \cdot \cos (\omega.t - \theta)$

- Si  $\theta = 0$  (axe Oy), on a :  $B_M = B \cos \Omega.t$

- Si on se place au point M, on a  $B_M = B \cdot \cos (\Omega.t - \theta) = B \cdot \cos \Omega.(t - \theta/\Omega)$ .

La pulsation reste la même, mais l'onde arrive avec un retard égal à  $\theta/\Omega$ .

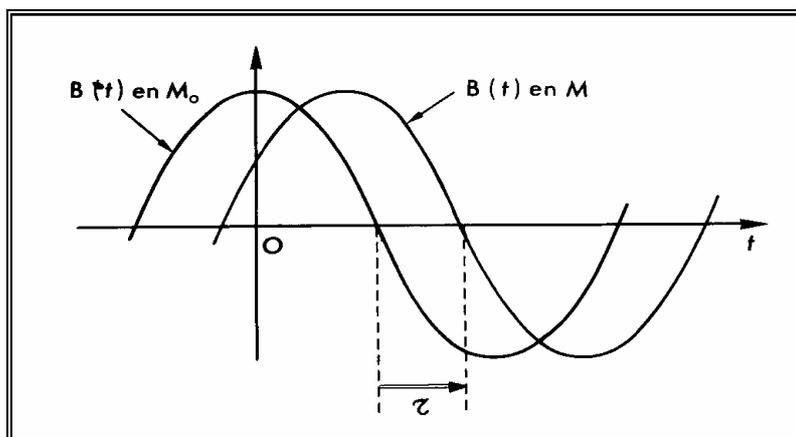
Si f est la fréquence (en Hz) de cette fonction et si n est la fréquence de rotation (en tr/s), on a :

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

et

$$\Omega = 2 \cdot \pi \cdot n$$

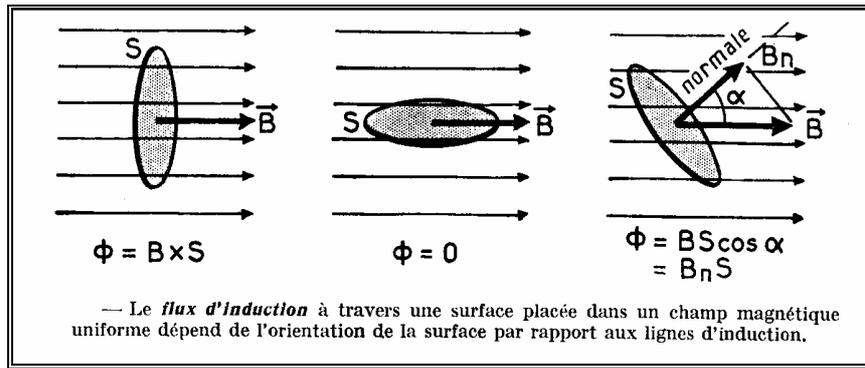
**Donc f = n.**



## **II .Flux d'induction magnétique.**

Soit une surface plane S, soumise à un champ magnétique uniforme, les lignes d'induction étant des droites parallèles et l'induction  $\vec{B}$  égale en tout point.

On dit que la surface embrasse un flux magnétique  $\Phi$  dont l'expression est :



$$\Phi = S \cdot \vec{B} \cdot \vec{n} \quad (\text{Produit scalaire}) \quad \Phi = S \cdot B \cdot n \cdot \cos \alpha \quad n = 1$$

L'unité de flux d'induction magnétique est le Weber.(Wb).

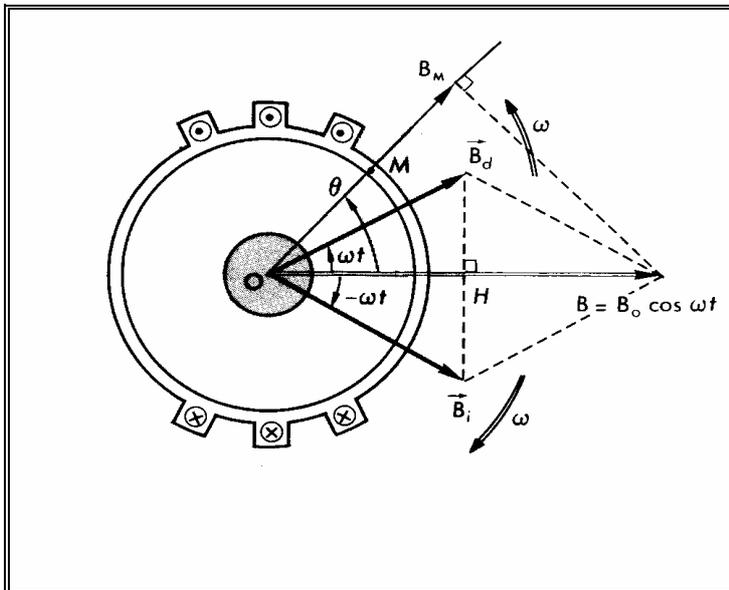
**Définition :** Le Weber est le flux magnétique qui traverse une surface plane de 1 m<sup>2</sup> normale à un champ uniforme où l'induction magnétique est de 1 tesla soit 1 weber par mètre carré.

### III .Théorèmes de Leblanc et Ferraris.

#### 1 .Théorème de Leblanc.

Un enroulement monophasé bipolaire alimenté par un courant sinusoïdal  $i = I \cdot \sqrt{2} \cdot \cos \omega \cdot t$  crée un champ magnétique tournant  $\vec{B}$ . Ce champ est une fonction sinusoïdale du temps de même pulsation  $\omega \cdot t$  que le courant  $i$ , dont l'amplitude  $B_0 \cdot \cos \theta$ , varie avec la position du point M.

Le théorème de Leblanc dit : A tout instant, le vecteur  $\vec{B}$  (voir figure) peut être considéré comme la somme de deux vecteurs  $\vec{B}_d$  et  $\vec{B}_i$  de normes constantes égales à  $B_0/2$ , et faisant respectivement, avec Oy , les angles  $\omega \cdot t$  et  $-\omega \cdot t$ .



Si à un instant t, on projette les vecteurs  $\vec{B}_d$  et  $\vec{B}_i$  sur Oy, ( $\theta = 0$ ), on obtient :

$$(B_0/2 \cdot \cos \omega \cdot t) + (B_0/2 \cdot \cos - \omega \cdot t) = 2 \cdot (B_0/2 \cdot \cos \omega \cdot t) = B_0 \cdot \cos \omega \cdot t = B$$

$$\text{Donc } \vec{B} = \vec{B}_i + \vec{B}_d$$

En un point M quelconque de l'entrefer, puisque le champ  $B_M$  est la projection de B sur OM, on peut dire que  $B_M$  est la somme des projections de  $B_d$  et  $B_i$  sur OM (la figure le confirme).

Pour un autre instant t, la valeur de B n'est plus la même. Pour conserver l'égalité  $\vec{B} = \vec{B}_i + \vec{B}_d$  (le théorème dit : à tout instant), les deux vecteurs ayant une norme constante, ils ont forcément tourné, dans le sens direct pour  $\vec{B}_d$  et dans le sens inverse pour  $\vec{B}_i$ .

Ainsi l'onde de champ magnétique le long de l'entrefer peut être considérée comme la somme de deux ondes progressives à répartition sinusoïdale.

- Celle représentée par le vecteur  $\vec{B}_d$  : elle tourne dans le sens direct (positif) à la vitesse  $\omega$ ,  
**c'est l'onde directe.**
- Celle représentée par le vecteur  $\vec{B}_i$  : elle tourne dans le sens inverse (négatif) à la vitesse  $\omega$ ,  
**c'est l'onde inverse.**

Les vecteurs tournants  $\vec{B}_d$  et  $\vec{B}_i$  ont deux propriétés intéressantes.

- La durée d'un tour complet,  $2.\pi / \omega$  est égale à la période T du courant i ( $T = 1 / f = 2.\pi / \omega$ )
- Les deux vecteurs passent sur l'axe Oy de l'enroulement (dans la direction positive) lorsque  $\omega.t = 0$  ou  $2.\pi$ , soit  $2.k.\pi$  (avec k entier), c'est-à-dire lorsque le courant i est maximal et  $B = B_0$ .

## 2 .Théorème de Ferraris.

Considérons à présent un enroulement triphasé. Chaque phase de cet enroulement triphasé est alimentée par un courant sinusoïdal tel que :

$$i_1 = I.\sqrt{2}.\cos \omega.t$$

$$i_2 = I.\sqrt{2}.\cos (\omega.t - 2.\pi / 3)$$

$$i_3 = I.\sqrt{2}.\cos (\omega.t - 4.\pi / 3)$$

respectivement dans les phases 1, 2 et 3.

Chaque phase crée dans son axe un vecteur champ, de mesure sinusoïdale, pouvant être considéré comme la somme d'un champ tournant direct et d'un champ tournant inverse (Leblanc).

$$1^{\text{re}} \text{ phase : } \vec{B}_1 = \vec{B}_{1d} + \vec{B}_{1i}$$

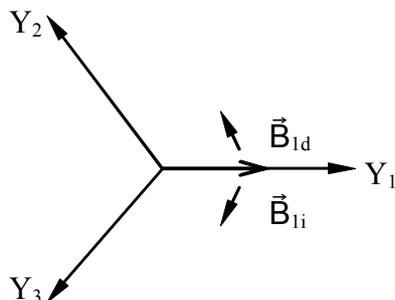
$$2^{\text{e}} \text{ phase : } \vec{B}_2 = \vec{B}_{2d} + \vec{B}_{2i}$$

$$3^{\text{e}} \text{ phase : } \vec{B}_3 = \vec{B}_{3d} + \vec{B}_{3i}$$

Les trois vecteurs  $\vec{B}_1$ ,  $\vec{B}_2$ , et  $\vec{B}_3$  ayant la même amplitude :  $B_0 = k.N.I.\sqrt{2}$ , les 6 vecteurs tournants ont la même norme  $B_0 / 2$ .

Les vecteurs  $\vec{B}_{1d}$ ,  $\vec{B}_{2d}$ , et  $\vec{B}_{3d}$  tournent dans le sens positif, à la même vitesse  $\omega$ . Ils conservent donc leurs positions relatives lorsque le temps s'écoule. Il en est de même pour  $\vec{B}_{1i}$ ,  $\vec{B}_{2i}$ , et  $\vec{B}_{3i}$  qui tournent dans le sens négatif à la vitesse  $\omega$ .

Positions des champs à l'instant  $t = 0$ .

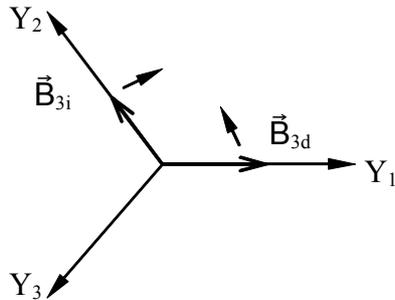
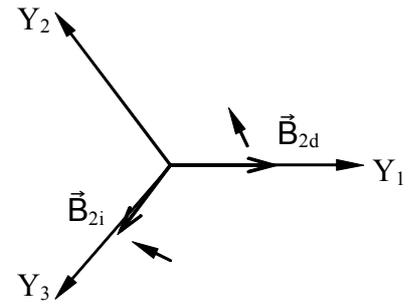


Lorsque  $t = 0$  ( $\omega.t = 0$ ), le courant  $i_1$  est maximal :  $\vec{B}_{1d}$  et  $\vec{B}_{1i}$  ont la direction et le sens de  $Oy_1$ .

Le courant  $i_2$  passe par son maximum lorsque :

$$\omega.t = 2.\pi / 3 \text{ soit } t = 2.\pi / 3.\omega = T/3.$$

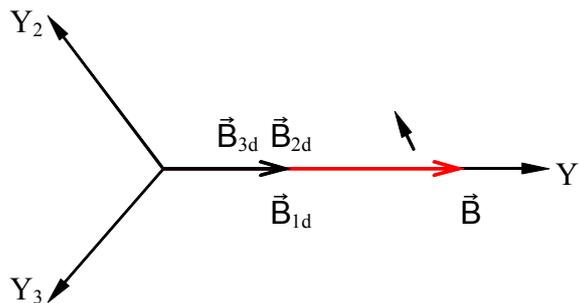
Donc lorsque  $t = 0$ , les vecteurs  $\vec{B}_{2d}$  et  $\vec{B}_{2i}$  ont encore à tourner d'un tiers de tour avant de venir se superposer sur  $Oy_2$ . En conséquence,  $\vec{B}_{2d}$  est sur  $Oy_1$  et  $\vec{B}_{2i}$  est sur  $Oy_3$ .



A l'instant  $t = 0$ , les vecteurs  $\vec{B}_{3d}$  et  $\vec{B}_{3i}$  ont encore à tourner de  $2/3$  de tour avant de venir se superposer sur  $Oy_3$ . En conséquence,  $\vec{B}_{3d}$  est sur  $Oy_1$  et  $\vec{B}_{3i}$  est sur  $Oy_2$ .

**Conclusion :**

Lorsque  $t = 0$ , les trois champs directs sont portés par  $Oy_1$ , leur résultante  $\vec{B} = \vec{B}_{1d} + \vec{B}_{2d} + \vec{B}_{3d}$  est telle que :  $\vec{B} = 3.\vec{B}_{1d}$ . Les trois champs inverses ont une résultante nulle.



Lorsque le temps s'écoule, les vecteurs  $\vec{B}_{1d}$ ,  $\vec{B}_{2d}$ , et  $\vec{B}_{3d}$  tournant dans le sens positif à la vitesse  $\omega$ , restent colinéaires et l'on a constamment  $\vec{B} = 3 \vec{B}_{1d}$ .

Les vecteurs  $\vec{B}_{1i}$ ,  $\vec{B}_{2i}$  et  $\vec{B}_{3i}$  tournant dans le sens négatif à la vitesse  $\omega$ , ont une résultante toujours égale à zéro.

**Comme  $\vec{B}_{1d}$ , le vecteur  $\vec{B}$  fait donc à tout instant avec  $Oy_1$  l'angle  $\omega.t$ .**

Théorème de Ferraris : Un enroulement triphasé, parcouru par un système triphasé de courants, crée un champ magnétique unique tournant dont la répartition le long de l'entrefer constitue une onde progressive représentée par le vecteur tournant  $\vec{B}$ .

Ou plus généralement :

Un enroulement polyphasé, parcouru par un système polyphasé de courants, crée un champ magnétique unique tournant dont la répartition le long de l'entrefer constitue une onde progressive représentée par le vecteur tournant  $\vec{B}$ .