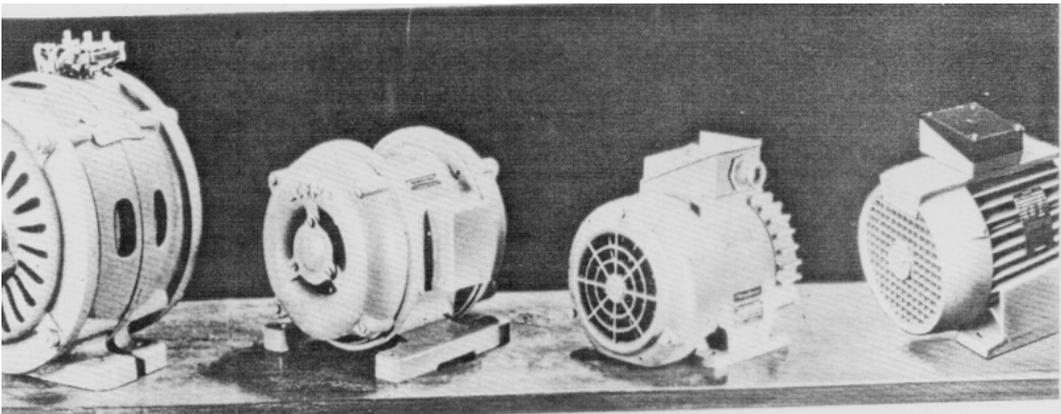


# **Cours d'électrotechnique**

## **MACHINE TOURNANTE A COURANT ALTERNATIF**



## **LES MACHINES ASYNCHRONES**

**TABLE DES MATIERES**

**PARTIE N°1 :**

**Description d'une machine asynchrone**

**PARTIE N°2 :**

**Le moteur asynchrone**

## Nomenclature

Symbole	Description	unité	
CTR	Champ tournant rotorique		
CTS	Champ tournant statorique		
$E'_s$	Force contre électro motrice statorique	Volts	V
$g$	Glissement		
$I_s$	Courant statorique ou absorbé	Ampère	A
$I_r$	Courant rotorique	Ampère	A
$E_r$	Force électro motrice induite au rotor	Volts	V
C	Couple développé par le moteur	Newton/mètre	N/m
Pt	Puissance transmise	Watt	W
Pab	Puissance absorbée	Watt	W
$\omega_r$	Vitesse du champ tournant rotorique	Radian/seconde	Rad/s
$\omega_s$	Vitesse du champ tournant statorique	Radian/seconde	Rad/s
$p_{jr}$	Perte joule au rotor	Watt	W
$X_r$	Réactance du rotor	Ohm	$\Omega$
$L_r$	Inductance du bobinage du rotor	Henry	H
Fr	Fréquence de la FEM au rotor	Hertz	Hz
Fs	Fréquence de la tension d'alimentation	Hertz	Hz
$Z_r$	Impédance du rotor	Ohm	$\Omega$
$R_r$	Résistance du rotor ohm	Ohm	$\Omega$
$E'_r$	Force contre électro motrice au rotor	Volts	V
U	Tension d'alimentation	Volts	V
$X_s$	Réactance synchrone du stator	Ohm	$\Omega$
m	Rapport de transformation		
Cmax	Couple moteur maximum	Newton/mètre	N/m
Cdém	Couple moteur au démarrage	Newton/mètre	N/m
Nr	Nombre de spire au rotor	Spires	Sp
Ns	Nombre de spire au stator	Spires	Sp
$\Phi_s$	Flux statorique devant créer le CTS	Wéber	Wb
Nr	Nombre de spire au rotor	Spires	Sp
$\Phi_r$	Flux rotorique devant créer le CTR	Wéber	Wb
$\cos\varphi$	Facteur de puissance		

## **Bibliographie**

Les machines électriques

Edition NATHAN TECHNIQUE

J. NIARD

Machines électriques

Edition DELAGRAVE

M. BELLIER et A. GALICHON

Génie électriques

Les machines électriques F3

Edition DELAGRAVE

F. LUCAS et P. CHARRUAULT

Electronique et machines électriques

Edition NATHAN

J. NIARD et R. MOREAU

Machines électriques

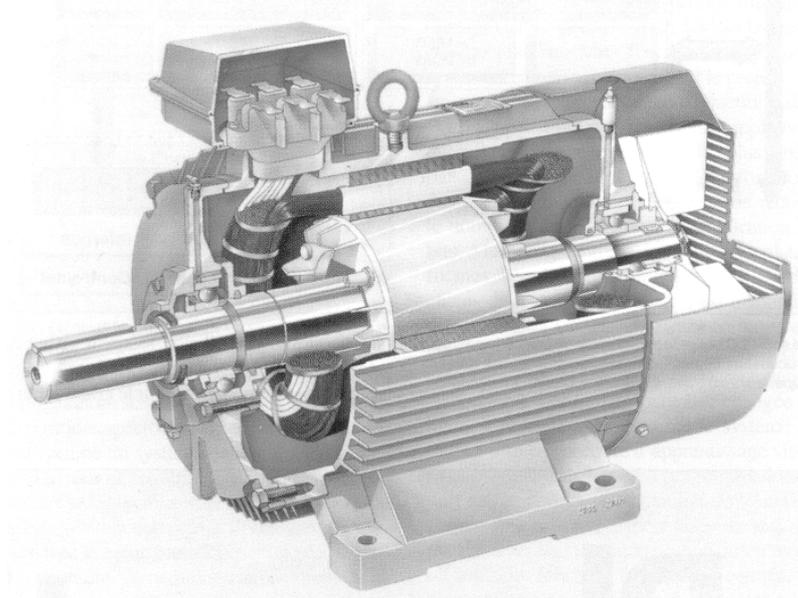
Edition NATHAN

J. NIARD, R. MOREAU et J. BATTUT

# Cours d'électrotechnique

**MACHINE TOURNANTE A COURANT ALTERNATIF**

**LES MACHINES ASYNCHRONES**



PARTIE N°1 :

**LA DESCRIPTION**

**TABLE DES MATIERES**

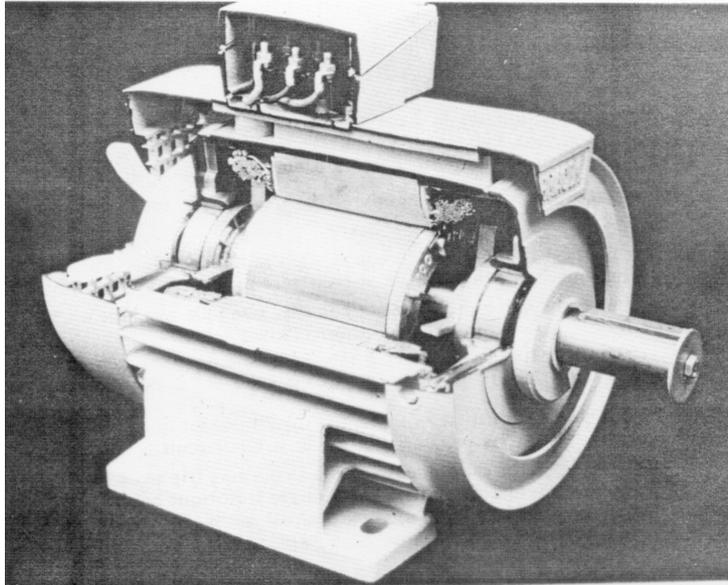
1.	Description de la machine .....	2
1.1.	Généralités .....	2
1.2.	L'inducteur .....	2
1.2.1.	Le circuit magnétique .....	3
1.2.2.	Les bobines .....	3
1.2.3.	Les encoches .....	4
1.2.4.	Le frettage .....	4
1.3.	L'induit .....	4
1.3.1.	L'induit à cage d'écureuil .....	4
1.3.2.	L'induit à rotor bobiné .....	5
1.3.3.	Les bobinages .....	5
	Le frettage .....	5
1.3.4.	Les bagues .....	6
1.3.5.	Les balais .....	6
1.3.6.	L' entrefer .....	7
1.4.	Plaques à bornes .....	7
1.5.	Vues éclatées .....	7
2.	Les phénomènes au sein de la machine .....	10
2.1.	La génération des flux statoriques .....	10
2.2.	Le champs tournant statorique .....	10
2.3.	La FEM rotorique .....	12
2.4.	La génération des flux rotoriques .....	13
2.5.	Le champs tournant rotorique .....	13
2.6.	La FCEM statorique .....	13
2.7.	La FCEM d'auto induction statorique .....	16

## 1. Description de la machine

### 1.1. Généralités

La machine comporte deux parties principales :

- L'une fixe : appelée **STATOR** et qui jouera le rôle d'**INDUCTEUR**
- L'une mobile : appelée **ROTOR** et qui jouera le rôle d'**INDUIT**



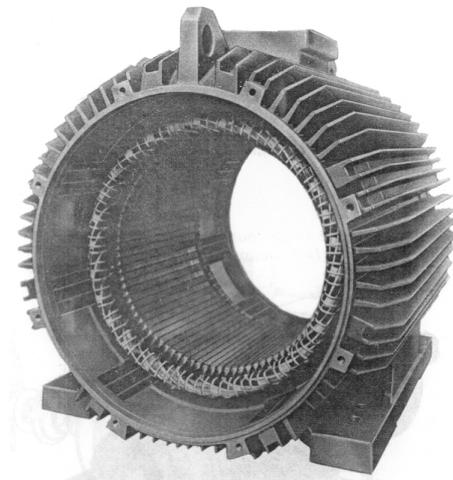
### 1.2. L'inducteur

Cette partie de la machine est sans aucun doute la partie principale de notre machine. Elle reprend de bâti de notre machine et la carcasse. On trouve encore les éléments dit électrique de notre machine.



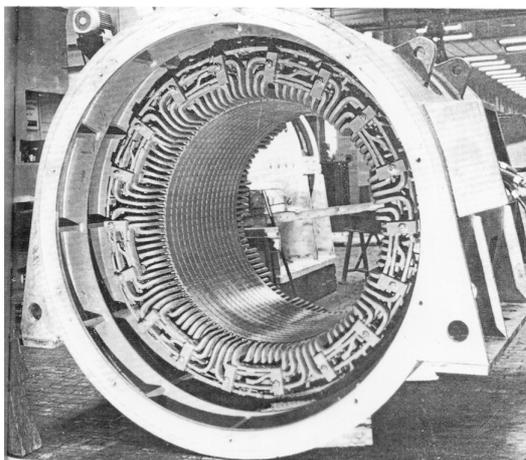
### 1.2.1. Le circuit magnétique

Il est constitué par une couronne de tôles empilées. Chaque tôle est isolée des tôles adjacentes par un vernis. Ces tôles ont une épaisseur de l'ordre de 0.5mm. Pourquoi réaliser un circuit magnétique en tôle feuilletées ? Nous savons que notre machine est du type alternative ce qui sous entend que la tension d'alimentation sera du type alternative sinusoïdale. Je peux dès lors déduire que les flux développés au sein de notre inducteur seront variables et que dès lors notre circuit magnétique sera soumis à des variations de flux. On peut donc déduire que le circuit magnétique sera le siège de courants de Foucault. Nous limiterons donc ce phénomène en feuilletant notre circuit magnétique. Cette couronne ainsi formée et serrée dans la carcasse afin de ne plus faire qu'une seule masse.



### 1.2.2. Les bobines

Nous savons que notre machine est du type triphasée, ce qui sous entend que nous posséderons au minimum trois enroulements statoriques. Nous pouvons trouver des machines qui possèdent un multiple de trois enroulements statoriques. Notre étude sera faite sur un moteur bipolaire soit deux pôles soit trois bobines statoriques. Afin de réaliser notre réseau triphasé, nous placerons nos trois bobines avec un décalage de  $120^\circ$  entre-elles. Ce décalage est lié au déphasage électrique entre les tensions d'un réseau triphasé. Précisons encore que au vu des courants qui vont circuler dans notre stator, les conducteurs seront d'une certaine section.



### 1.2.3. Les encoches

Sur la périphérie de la couronne on a découpé des encoches (ou rainures), dans lesquelles viendront se loger les conducteurs de l'induit. Les morceaux de tôle restant entre deux encoches s'appelle une dent.

### 1.2.4. Le frettage

Lors du passage du courant dans les conducteurs, des champs sont créés ce qui entraîne l'apparition de forces qui ont tendance à écarter les conducteurs les uns des autres. Pour éviter que ces derniers ne sortent de leur encoches, on réalise d'une part la pose de cale trapézoïdale sur la tête des encoches et d'autre part un frettage lorsque les conducteurs se retrouvent en dehors des encoches. Il s'agit d'un cerclage à l'aide de frette ou de ruban d'acier.

## 1.3. L'induit

Cette partie peut être de deux types, soit sous forme d'une cage d'écureuil soit sous la forme d'un réseau triphasé bobiné.

### 1.3.1. L'induit à cage d'écureuil

Le rotor est ici réalisé par l'assemblage de tôle en forme de disques qui seront clavetées sur l'arbre moteur. Les tôles seront isolées entre elles à l'aide d'un vernis. Ces tôles seront également percées afin de permettre d'une part la réalisation de l'assemblage et d'autre part pour le placement des barres qui formeront les barreaux de notre cage. Ces barres ou conducteurs seront le siège de la FEM au rotor. Afin de réaliser la fermeture du circuit électrique qu'ils vont former, l'extrémité des conducteurs sera relié à une couronne qui aura pour rôle de court-circuiter les conducteurs. Il y a donc une couronne aux deux extrémités. Noter encore que les conducteurs sont isolés de leur support (circuit magnétique du rotor) par un vernis. Je précise encore que ce type de rotor est dit polyphasé, ce qui sous-entend qu'il s'adaptera automatiquement au type de stator (bipolaire, tétrapolaire,...).



### 1.3.2. L'induit à rotor bobiné

Le rotor est ici réalisé par l'assemblage de tôles en forme de disques qui seront clavetées sur l'arbre moteur. Les tôles seront isolées entre elles à l'aide d'un vernis. Ces tôles seront également percées afin de permettre leur assemblage. Tout comme pour le stator, les tôles seront complétées par des encoches et ce afin de recevoir les bobinages. Pour la même raison que le stator, le rotor allant être soumis à des variations de flux il va être le siège de courant de Foucault.



### 1.3.3. Les bobinages

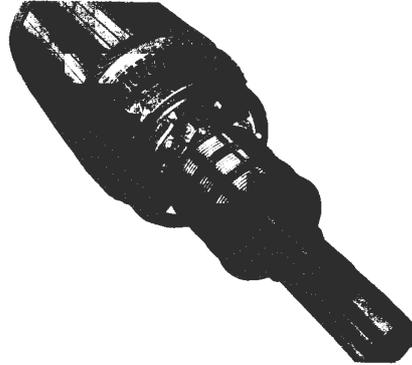
Elles seront du même type que pour le stator, nous aurons autant de bobines au rotor que nous en aurons au stator. Notre étude sera faite sur un moteur bipolaire soit deux pôles soit trois bobines rotoriques. Afin de réaliser notre réseau triphasé, nous placerons nos trois bobines avec un décalage de  $120^\circ$  entre-elles. Ce décalage est lié aux déphasages électriques entre les tensions d'un réseau triphasé. Précisons encore que au vu des courants qui vont circuler dans notre stator, les conducteurs seront d'une certaine section.

### Le frettage

Lors du passage du courant dans les conducteurs, des champs sont créés ce qui entraîne l'apparition de forces qui ont tendance à écarter les conducteurs les uns des autres. Pour éviter que ces derniers ne sortent de leur encoches, on réalise d'une part la pose de cale trapézoïdale sur la tête des encoches et d'autre part un frettage lorsque les conducteurs se retrouvent en dehors des encoches. Il s'agit d'un cerclage à l'aide de frette ou de ruban d'acier. Je précise encore que le câblage des bobines sera toujours en étoile au sein du rotor.

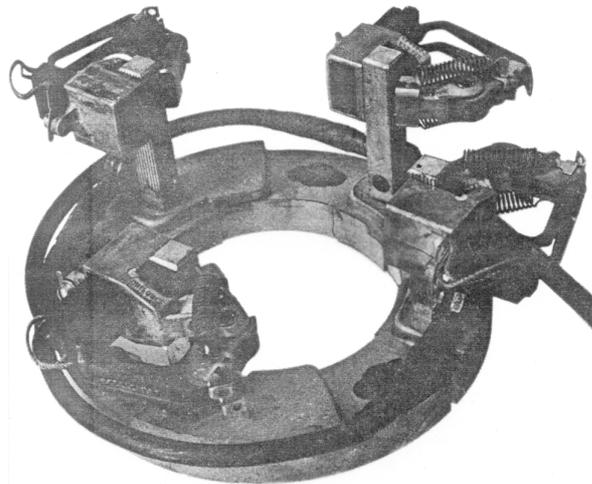
#### 1.3.4. Les bagues

Etant donné que notre rotor est en mouvement et qu'il faut ramener l'extrémité des bobines rotoriques sur le bornier. Nous n'avons pour parvenir à cela par d'autre solution que de placer un système à contact à savoir des bagues et des balais.



#### 1.3.5. Les balais

Ils sont fixés sur la carcasse par l'intermédiaire de porte balais, ils sont en carbone et frottent sur les bagues. Grâce à des ressorts, une pression de contact est maintenue. Puisque les bagues tournent, le contact avec les balais est glissant et la densité de courant admise est relativement faible ( $10\text{A}/\text{cm}^2$ ). Les balais sont ici placés n'importe où sur le périmètre de nos bagues. Le choix sera le plus souvent en vue de limiter l'encombrement.

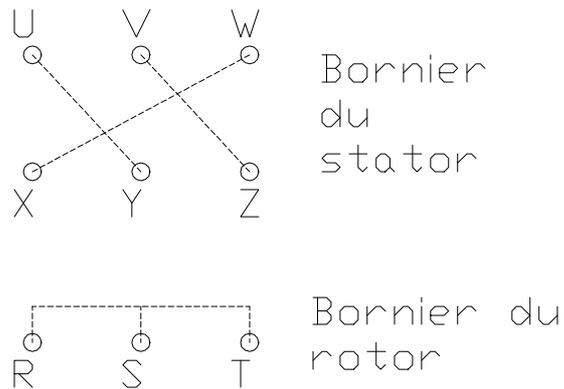


### 1.3.6. L'entrefer

Le diamètre extérieur de l'induit est à peine inférieur au diamètre intérieur de l'inducteur : quelques millimètres seulement qui constituent l'entrefer.

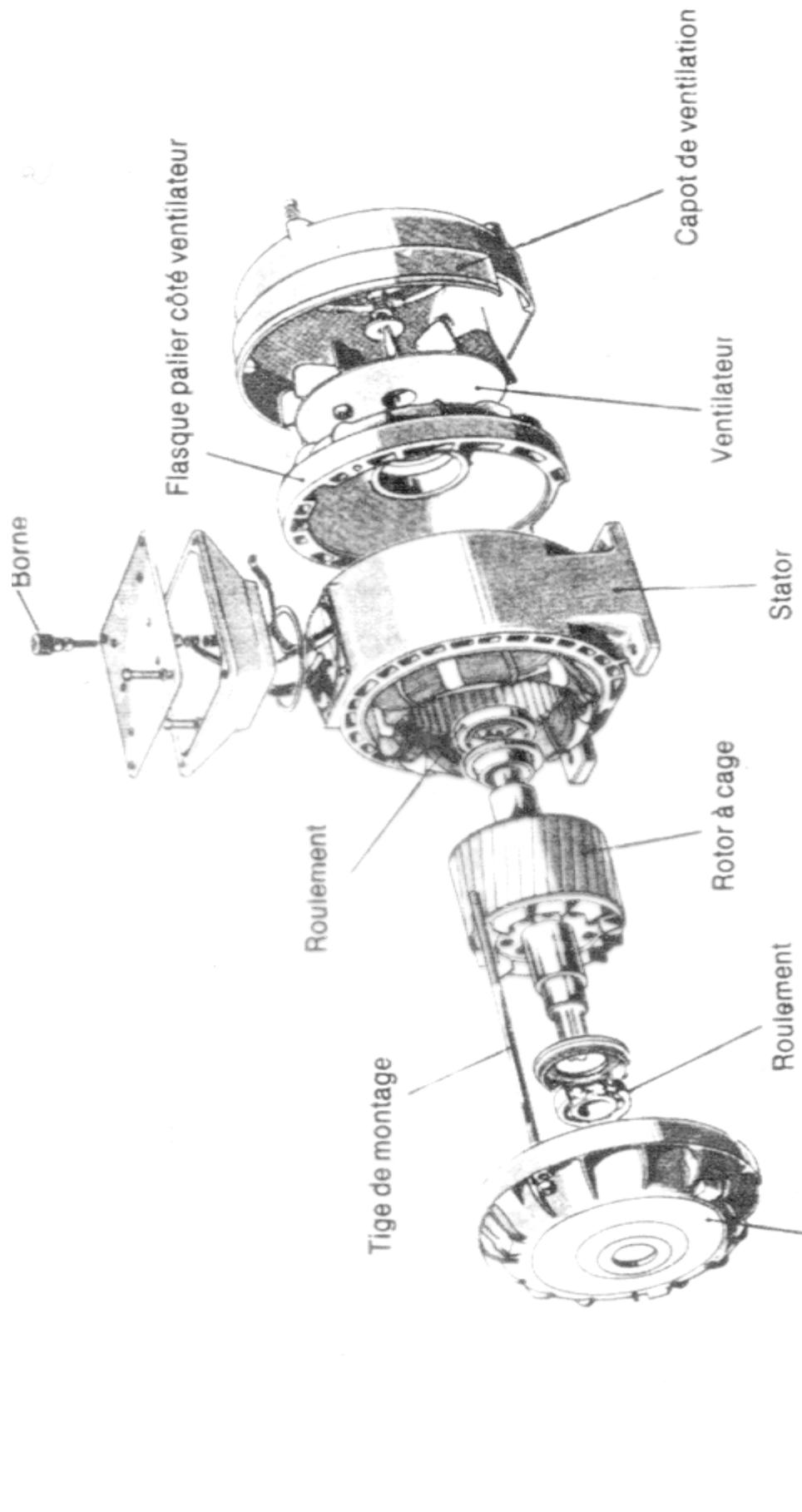
### 1.4. Plaques à bornes

La liaison entre les enroulements statorique et rotorique se fait par l'intermédiaire d'une plaque à bornes, fixée sur le bâti et comprenant 6 bornes pour une machine à cage et 9 bornes pour une machine à rotor bobiné. Nous avons toujours six bornes pour le stator afin de permettre le couplage en étoile ou triangle de ce dernier et trois bornes pour le rotor.



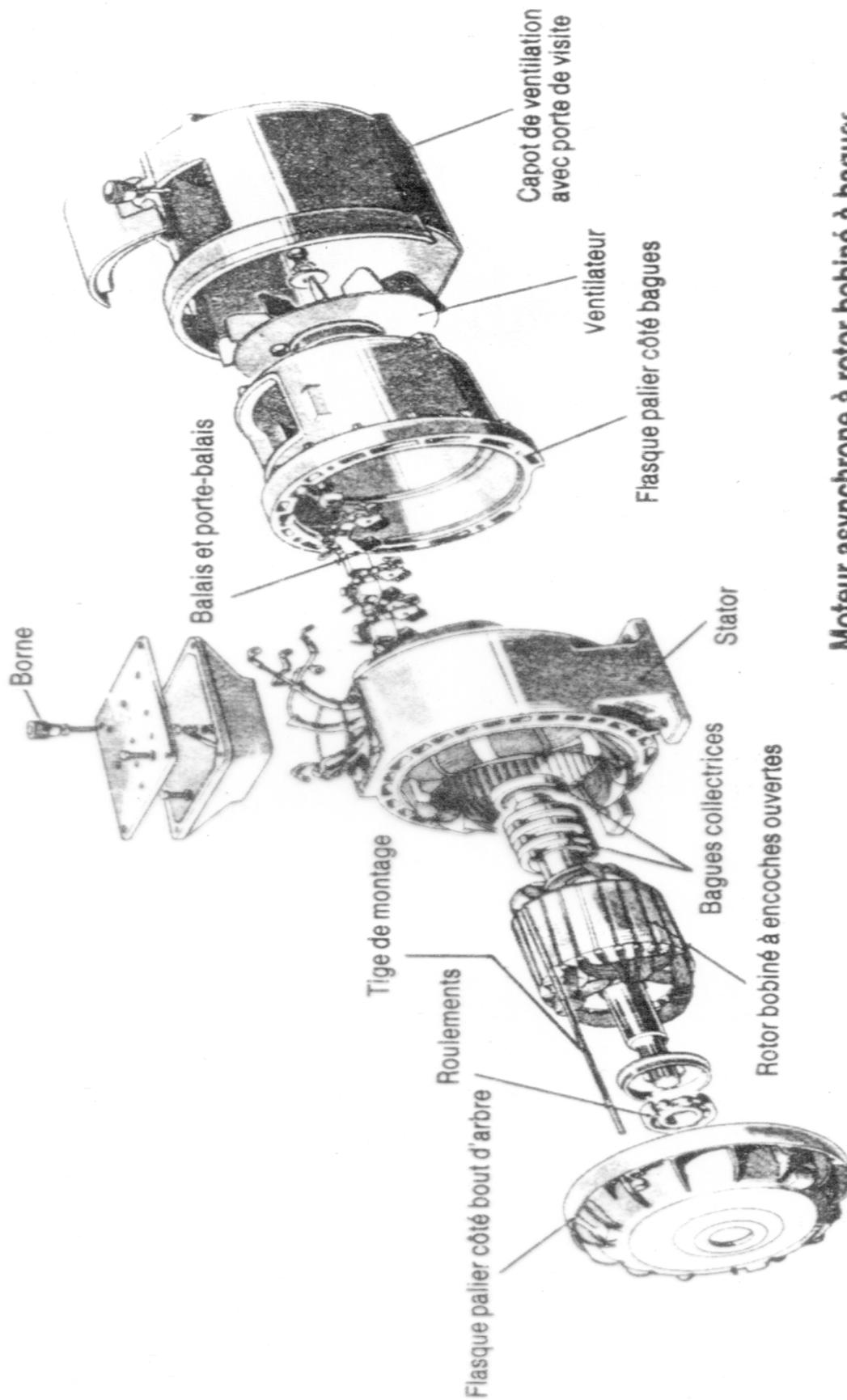
### 1.5. Vues éclatées

D'un moteur asynchrone avec rotor à cage d'écureuil.  
D'un moteur asynchrone avec rotor bobiné.



**Moteur asynchrone à rotor à cage**

Document : Leroy-Somer



**Moteur asynchrone à rotor bobiné à bagues**

Document : Leroy-Somer

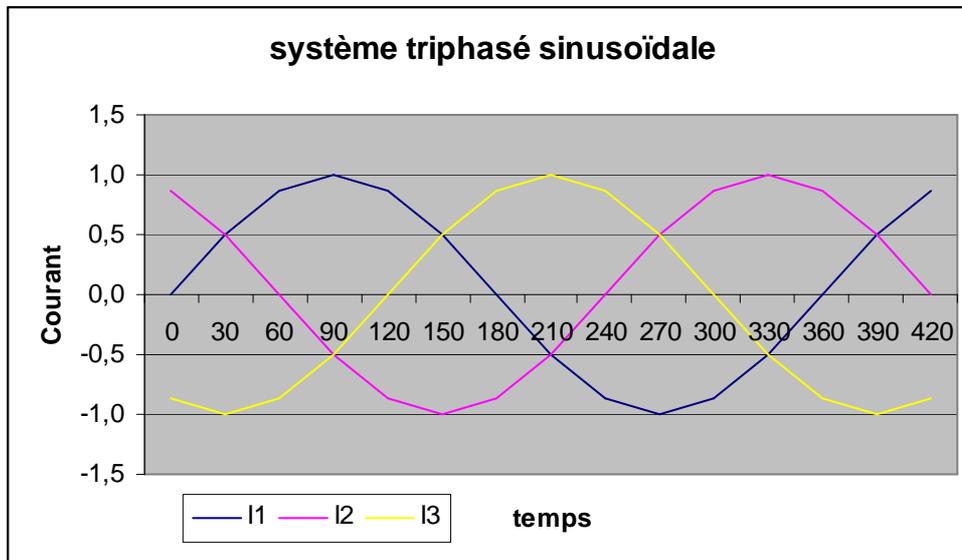
## 2. Les phénomènes au sein de la machine

### 2.1. La génération des flux statoriques

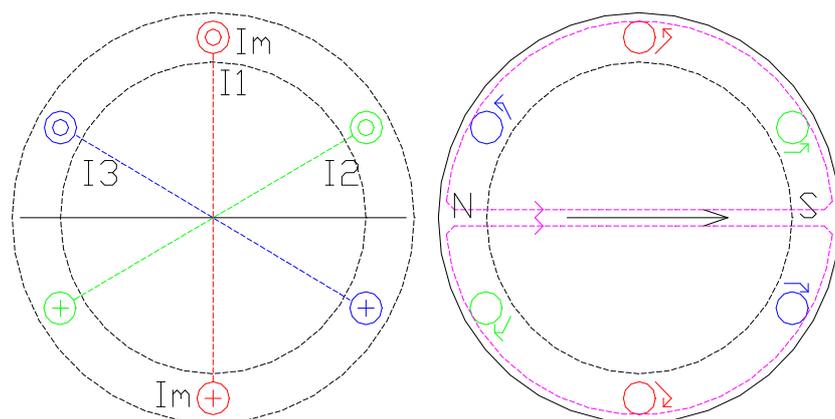
Nous savons que notre stator est constitué de bobinages que nous avons fixé pour notre explication à trois. Ces dernières sont déphasées entre elles de  $120^\circ$  et sont alimentées par une tension alternative sinusoïdale triphasée. La loi d'ohm nous dit que si nous appliquons une tension sur une résistance, nous allons avoir une circulation d'un courant. Rappelons que nos bobines sont constituées de fil de cuivre et que dès lors ces dernières offrent une certaine résistance (voir lois de Pouillet). Ce courant sera donc du type alternatif sinusoïdale et formera également au regard des trois bobines un réseau triphasé. Nous savons encore que toute bobine traversée par un courant est le siège de la création de champ magnétique. Nous avons donc au sein de notre machine trois bobines déphasées de  $120^\circ$  et générant chacune un champ magnétique. Notons encore que suite au réseau alternatif alimentant notre système, le champ créé au sein de nos bobines est variable.

### 2.2. Le champ tournant statorique

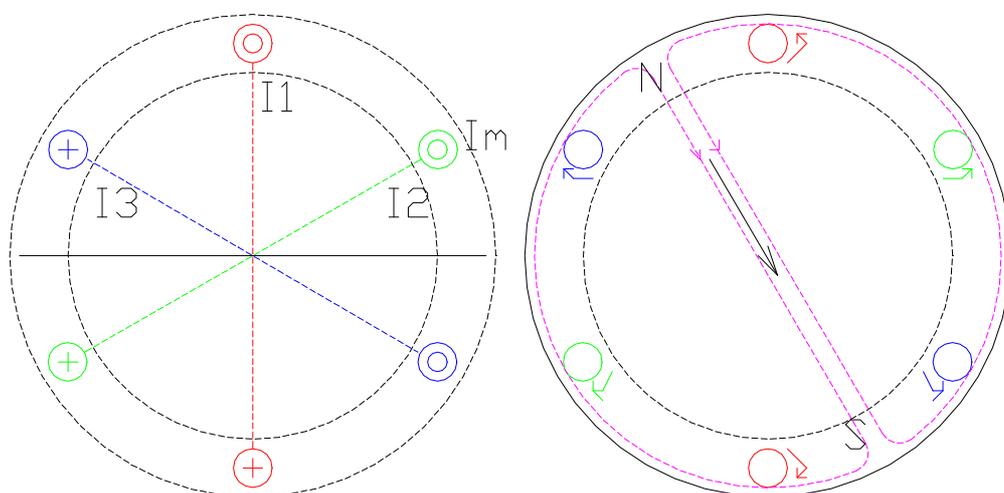
Ayant la génération d'un flux variable au sein de chaque bobine, vérifions si la combinaison de ces derniers ne forme pas un champ résultant. Les illustrations ci-dessous nous montrent l'évolution du courant dans chaque bobine et l'influence sur la génération des champs.



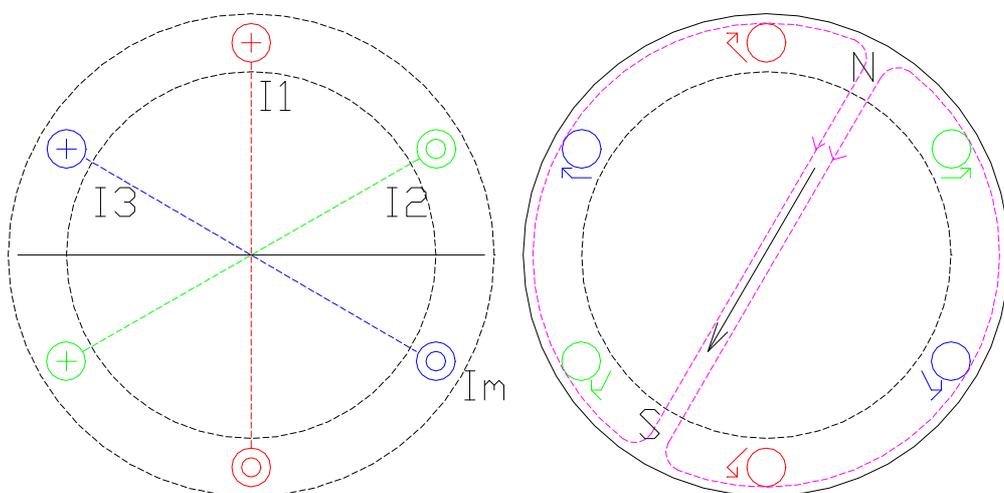
Pour  $90^\circ$  nous avons les courants suivants entraînant les champs statoriques qui ensemble polarisent la machine.



Pour  $120^\circ$  nous avons les courants suivants entraînant les champs statoriques qui ensemble polarise la machine.



Pour  $150^\circ$  nous avons les courants suivants entraînant les champs statoriques qui ensemble polarise la machine.



Nous pourrions poursuivre notre raisonnement pour une évolution complète des sinusoïdes courants, mais nous voyons déjà clairement avec ces quelques représentations que nous obtenons bel et bien une combinaison des champs de chaque bobine. Cette combinaison nous montre l'apparition de pôle fictif qui polarise mon stator. Nous voyons encore clairement que les pôles fictifs se déplacent sur la périphérie de notre stator. Cela pourrait être caractérisé par un aimant mis en rotation. Nous appellerons la génération de cette polarisation fictive le champ tournant statorique. Ce champ tournera à une vitesse fonction de la fréquence du réseau. Comme nous avons à faire à une machine bipolaire, on peut dire que un déplacement de 30° électrique correspond à un déplacement de la polarité fictive au stator de 30° également.

### 2.3. La FEM rotorique

Nous venons de voir que le champ tournant statorique peut être ramené à un aimant en rotation, cela veut dire que vu du rotor, les conducteurs voient une variation de flux. Nous pouvons dès lors conclure que les conducteurs de notre rotor sont le siège d'une FEM induite. Cette FEM sera à l'arrêt du rotor de même allure que la tension du réseau à savoir alternatif sinusoïdale. Nous pouvons encore dire que la fréquence de ce signal sera la même que celle du réseau d'alimentation.

Nous savons dans le cas de notre machine bipolaire, que une sinusoïde est équivalent à la rotation d'un tour du rotor. Si nous prenons une machine tétrapolaire, nous pourrions dire que pour 1 allure de sinusoïde, notre rotor aura réalisé 1/2 tour.

Nous pouvons donc tirer la formule suivante :  $f = p \times n$

Avec : f la fréquence

n la vitesse de rotation en t/sec

p le nombre de paire de pôles

Quelques valeurs pratiques.

P	N (t/min)
1	3000
2	1500
3	1000
4	750
5	600
6	500
7	428
8	375
16	188
24	125
32	94
72	42

## 2.4. La génération des flux rotoriques

Nous venons de trouver ci-dessus que les conducteurs du rotor étaient le siège de la génération de FEM. Nous savons que notre rotor qu'il soit à cage ou bobiné est composé de conducteurs de cuivre et que dès lors offrent une résistance. La loi d'ohm nous dit que notre FEM va pousser un courant dans les conducteurs du rotor. La circulation de ce courant au sein des conducteurs aura la même allure que la FEM et sera donc du type alternatif sinusoïdale. Nous retrouvons donc une situation où nos conducteurs sont soumis à une tension alternative sinusoïdale comme pour le stator. Noter encore que la fréquence du courant rotorique est identique à la fréquence du courant statorique. Nous savons encore que tout conducteur parcouru par un courant génère au sein de celui-ci des champs. Comme notre courant est alternatif sinusoïdale, je peux dire que les champs créés sont variable.

## 2.5. Le champ tournant rotorique

Dans un raisonnement analogue à celui tenu pour le stator, on peut trouver que l'ensemble des champs rotoriques forment un champ tournant rotorique. Je peux encore conclure que la vitesse de ce champ tournant rotorique est identique à la vitesse du champ tournant statorique. Ce point se vérifie puisque la fréquence des tensions et des courants est la même de part et d'autre de la machine.

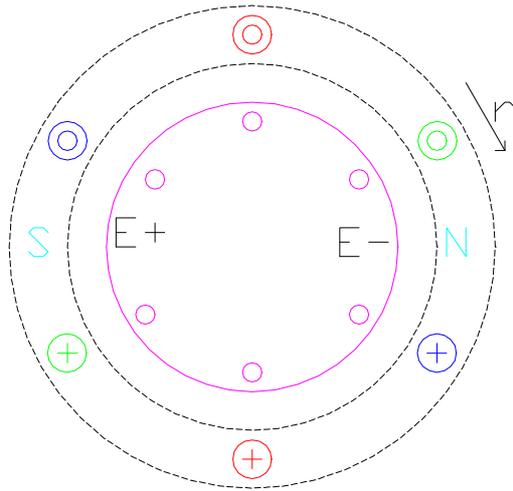
## 2.6. La FCEM statorique

Nous savons que nous avons un champ tournant rotorique qui peut être caractérisé par un aimant en rotation. La polarité fictive générée par ce champ va donc induire au sein de mon stator et plus précisément dans mes bobinages statoriques des FCEM. Nous savons que ces FCEM en regard à la loi de Lenz vont s'opposer à ce qui leur a donné naissance à savoir la tension d'alimentation. Précisons que la fréquence de la FCEM est la même que celle du réseau et que dès lors ces tensions vont se sommer vectoriellement. Nous pourrions nous demander ici s'il s'agit réellement du champ tournant rotorique ou l'une de ces composantes qui induit ainsi le stator.

Simulons au sein de notre machine les déphasages entre tension et courant, entre courant et champs tournant .

Figeons nous comme conventions les points suivants :

- un courant entrant est caractérisé par une croix
- un courant sortant est caractérisé par un point
- La FEM est maximum devant un pôle
- La FEM est positive devant un pôle nord
- Le champ tournant statorique tourne dans le sens horlogique

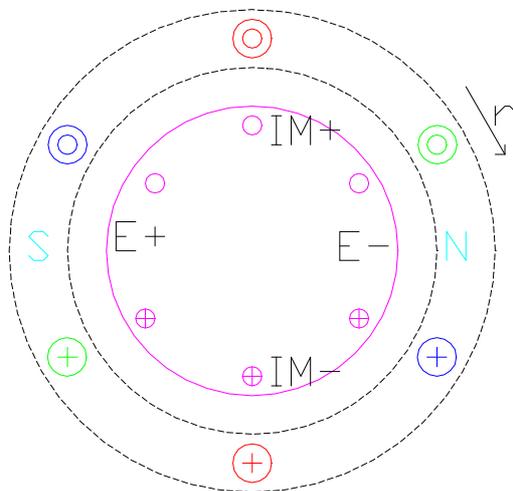


Nous connaissons la valeur de la FEM au rotor, nous pouvons donc implanter le courant au sein des conducteurs du rotor. Nous savons que l'impédance de notre rotor est caractérisé d'une part par un résistance et d'autre part par une réactance.

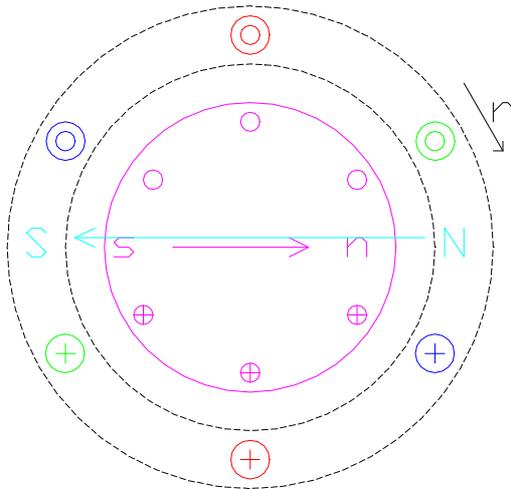
$$Z_r = R_r + X_{Lr}$$

Nous savons que la réactance est fonction de la fréquence.  $X_{Lr} = \omega \times l = 2 \times \pi \times f \times l$

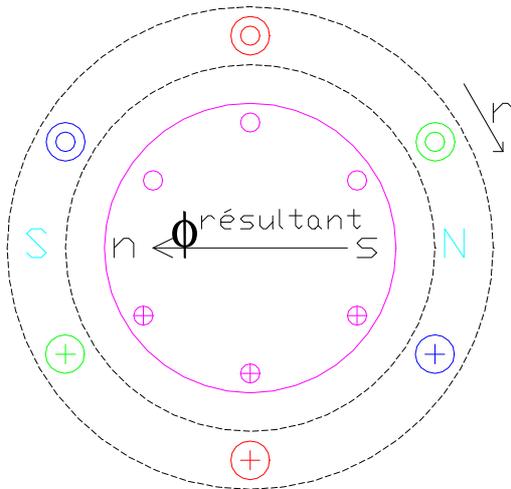
Nous savons que la fréquence du courant rotorique est identique à celle du réseau et que dès lors elle est maximum. Notre terme réactance est donc maximum et majoritaire dans notre impédance. Considérons que nous estimions la résistance rotorique comme négligeable, l'impédance devient équivalent à la réaction. Nous savons que dans un système dit selfique, le courant est en retard de  $90^\circ$  sur la tension. Nous pouvons donc trouver les courants dans les conducteurs de notre rotor.



Nous pouvons connaissant les courants déduire les pôles fictifs du rotor.



Nous voyons clairement que la polarité du flux statorique est en opposition à la polarité du flux rotorique, je peux donc dire que la somme vectorielle va nous donner un champ tournant rotorique résultant. Comme le champ tournant statorique est toujours plus important que le champ tournant rotorique, je peux trouver le sens de polarisation de ce champ tournant rotorique résultant.



Nous voyons donc que le sud du champ tournant statorique se trouve en face du nord du champ tournant rotorique résultant. De même nous voyons que le nord du champ tournant statorique se trouve en face du sud du champ tournant rotorique résultant.

Nous pouvons donc conclure que la FCEM au stator est générée par ce champ tournant rotorique résultant.

### **2.7. La FCEM d'auto induction statorique**

Un dernier phénomène que nous pouvons encore avancer dans le cadre de notre étude est la génération au sein même des conducteurs du stator d'une FEM d'auto induction. Cette dernière s'implique par une induction des bobines par leur propre flux. De nouveau, on retrouve l'application de Lenz, en effet, les bobines étant soumises à des variations de flux (champ statorique) ces dernières vont être le siège de FEM induite qui vont s'opposer à ces variations et plus précisément à ce qui leur a donné naissance à savoir la tension d'alimentation. Je peux donc dire que la tension du réseau aux bornes du stator est égale à la somme vectorielle de plusieurs termes à savoir  $E_r$ ,  $X_s$  et  $R_s$ .