

S8 – CONSTRUCTION ELECTRIQUE

Magnétostatique

Choix d'un moteur électrique

**Moteurs asynchrone et
synchrone**

Variateurs

Table des matières

1. PRINCIPES DE MAGNETOSTATIQUE	5
1.1 Nature des effets magnétiques : l'électrostatique	5
1.2 Champ magnétique créé par une charge en mouvement	5
1.3 Champ magnétique créé par un ensemble de charges en mouvement	6
1.4 Champ créé par un circuit électrique quelconque	6
1.5 Champ créé par un fil électrique	7
1.6 Champ créé par une spire circulaire	8
1.7 Champ créé par un solénoïde	9
1.8 Flux du champ magnétique	10
1.9 Force magnétique sur une particule chargée : force de LORENTZ	11
1.10 Loi de LAPLACE	11
1.11 Force électromotrice induite (f.e.m.)	12
2 CHOIX D'UN MOTEUR ELECTRIQUE	14
2.1 Chaîne de transmission d'un moteur électrique :	14
2.2 Types de couple résistant sur la machine :	15
2.3 Le moment d'inertie	16
2.4 Rappel du principe fondamental en dynamique pour les systèmes en rotation :	17
2.4.1 Conditions au démarrage	17
2.4.2 Régime établi	17
2.4.3 Ralentissement naturel de la machine	17
2.4.4 Freinage de la machine	18
2.5 Quadrants de fonctionnement d'une machine :	18
2.6 Choix en fonction de l'environnement :	19
2.6.1 Altitude	19
2.6.2 Indices de protection	20
2.6.3 Résistance aux chocs	21
2.6.4 Classes de températures :	21
2.7 Choix par rapport au fonctionnement :	23
3 MOTEUR ASYNCHRONE	25

3.1 Principe de fonctionnement du moteur asynchrone.....	25
3.2 Technologie utilisée du moteur asynchrone.....	27
3.2.1 Le stator du moteur asynchrone :	27
3.2.2 Le rotor du moteur asynchrone :	29
3.3 Caractéristiques du moteur asynchrone.....	29
3.3.1 Glissement :	29
3.3.2 Couple :	30
3.3.3 Pilotage de la vitesse de rotation	31
3.4 Schéma équivalent du moteur asynchrone.....	33
3.5 Démarrage étoile triangle	35
3.6 Bilan des puissances du moteur asynchrone.....	38
4 MOTEUR SYNCHRONE	39
4.1 Principe de fonctionnement du moteur synchrone.....	39
4.2 Technologie utilisée du moteur synchrone.....	40
4.2.1 Le stator du moteur synchrone :	40
.....	40
4.2.2 Le rotor du moteur synchrone :	41
.....	41
Rotor à aimant permanent	42
Rotor bobiné.....	42
4.3 Caractéristiques du moteur synchrone.....	43
4.3.1 Pilotage de la vitesse de rotation	43
4.4 Schéma équivalent du moteur synchrone	44
Schéma équivalent monophasé :.....	44
4.5 Fonctionnement en alternateur :	45
4.5.1 Caractéristique à vide	45
4.5.2 Caractéristiques en charge :	46
5 EXERCICE DE DECHIFFRAGE D'UNE PLAQUE SIGNALÉTIQUE DE MOTEUR :	47
6 LES VARIATEURS DE VITESSE	52
6.1 Principe de base des variateurs de vitesse:.....	52
6.2 Fonction des variateurs de vitesse:	53
L'accélération contrôlée.....	53
La décélération contrôlée.....	53
La variation et la régulation de vitesse	54
L'inversion du sens de marche.....	55
Le freinage d'arrêt	55
6.3 Le redresseur:	55
Le redresseur non commandé	56

Le redresseur commandé	57
6.4 Le circuit intermédiaire:.....	58
Le circuit intermédiaire à courant continu variable	59
Le circuit intermédiaire à tension continue constante ou variable	59
Le circuit intermédiaire à tension variable	60
6.5 L'onduleur:.....	60
6.6 Modes de fonctionnement de l'onduleur:	62
Modulation d'impulsion en amplitude	62
Modulation de largeur d'impulsion (PWM).....	63
6.7 Le circuit de commande	64
La commande U/f (scalaire).....	64
La commande vectorielle de tension (ou de flux)	66

1. PRINCIPES DE MAGNETOSTATIQUE

1.1 Nature des effets magnétiques : l'électrostatique

Soient deux particules q_1 et q_2 situées à un instant t aux points M_1 et M_2 distantes de r .

En l'absence de mouvement, la particule q_1 crée au point M_2 un champ électrostatique $\vec{E}_1(M_2)$ et la particule q_2 subit une force dont l'expression est donnée par la loi de Coulomb :

$$\vec{F}_{1/2} = q_2 \vec{E}_1(M_2)$$

Avec $F_{1/2}$ en N (Newton), q_2 en C (Coulomb), $E_{1(M_2)}$ en $V.m^{-1}$

Homogénéité de la formule :

On peut également exprimer cet effort sous cette forme :

$$\vec{f}_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{u}_{1 \rightarrow 2} \quad \text{Avec} \quad \vec{u}_{1 \rightarrow 2} = \frac{\vec{M_1 M_2}}{\|M_1 M_2\|} \quad \text{et} \quad \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ USI}$$

ϵ_0 s'appelle permittivité du vide en F/m
C'est une caractéristique qui décrit une capacité à affaiblir les forces électrostatiques

Homogénéité de la formule :

1.2 Champ magnétique créé par une charge en mouvement

Le champ magnétique créé en un point M par une particule de charge q située en un point P et animée d'une vitesse v dans un référentiel galiléen est :



$$\vec{B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q \vec{v} \wedge \vec{PM}}{\|PM\|^3}$$

- q s'exprime en Coulomb (C)
- v en mètre par seconde.
- μ_0 est la perméabilité du vide :
 - o Les expériences de l'époque montrèrent que la vitesse de propagation était toujours la même, à savoir c , la vitesse de la lumière. Cela signifiait qu'il y avait donc un lien entre le magnétisme, l'électricité et la lumière.
 - o On pose donc :

$$\mu_0 \epsilon_0 c^2 = 1$$

- L'unité de μ_0 est $H.m^{-1}$ (Henry par mètre)

Homogénéité de la formule :

- B s'exprime en Tesla (T), une autre unité, le Gauss (G), est également très souvent utilisée : $1 \text{ Gauss} = 10^{-4} \text{ Tesla}$
 - Unité du Tesla : $kg.A^{-1}.s^{-2}$

Homogénéité de la formule :

1.3 Champ magnétique créé par un ensemble de charges en mouvement

Considérons N particules de charges q_i situées en des points P_i et de vitesse v_i . En vertu du principe de superposition, le champ magnétique créé en un point M est la somme vectorielle des champs créés par chaque particule et vaut :

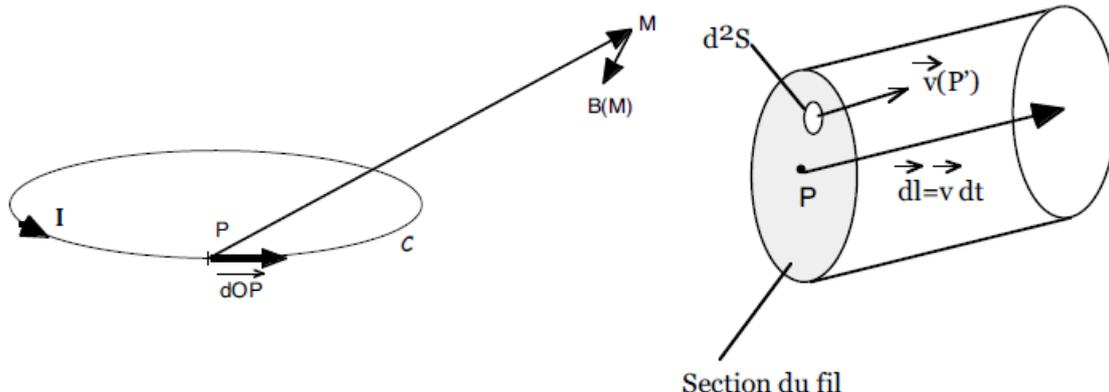
$$\vec{B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{i=1}^N \frac{q_i \vec{v}_i \wedge \vec{P}_i M}{\|\vec{P}_i M\|^3}$$

Quelques ordres de grandeur :

- Un aimant courant $B \approx 10 \text{ mT}$
- Un électroaimant ordinaire $B \approx \text{Tesla}$
- Une bobine supraconductrice $B \approx 20 \text{ Tesla}$
- Une bobine résistive $B \approx$ de 30 à 1000 Tesla
- Champ magnétique interstellaire moyen : $B \approx \mu\text{G}$
- Champ magnétique dans une tache solaire $B \approx \text{kG} \approx 0.1 \text{ Tesla}$
- Champ magnétique terrestre : $B_{\perp} \approx 0,4 \text{ G}$, $B_{\text{horizontal}} \approx 0.3 \text{ G}$
- Champ magnétique d'une étoile à neutrons $B \approx 10^8 \text{ Tesla}$

1.4 Champ créé par un circuit électrique quelconque

Dans le cas particulier d'un circuit filiforme fermé, parcouru par un courant permanent I, la formule précédente va nous fournir la loi de Biot et Savart.



En un point M quelconque de l'espace, le champ magnétique créé par un circuit parcouru par un courant permanent I est :

$$\vec{B}(M) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint_{\text{circuit}} \frac{d\vec{P} \wedge \vec{PM}}{\|\vec{PM}\|^3}$$

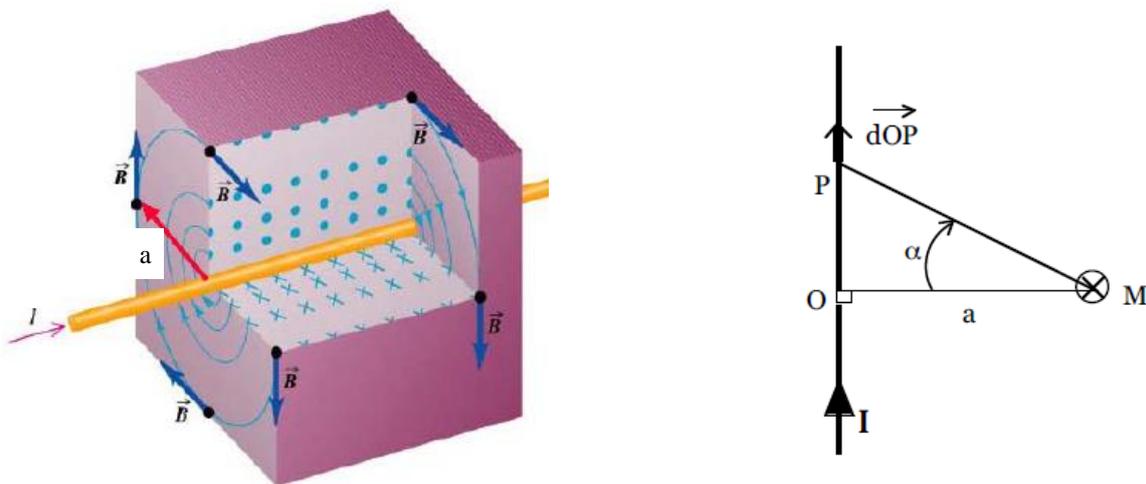
P étant un point quelconque sur le fil.

La formule de Biot et Savart (1820) a été établie expérimentalement et fournit un lien explicite entre le champ magnétique et le courant. Mais ce n'est que plus tard (1880+) que les physiciens ont réalisé que le courant était dû au déplacement de particules dans un conducteur.

1.5 Champ créé par un fil électrique

On considère un fil rectiligne, infini, parcouru par un courant I permanent. La densité de courant possède une invariance par translation selon l'axe z ainsi que par rotation autour de cet axe.

Elle possède donc une symétrie cylindrique, et le champ magnétique sera toroïdal :



Le champ créé en un point M situé à une distance a du fil par un élément dOP vu sous un angle α . La loi de Biot et Savart donne :

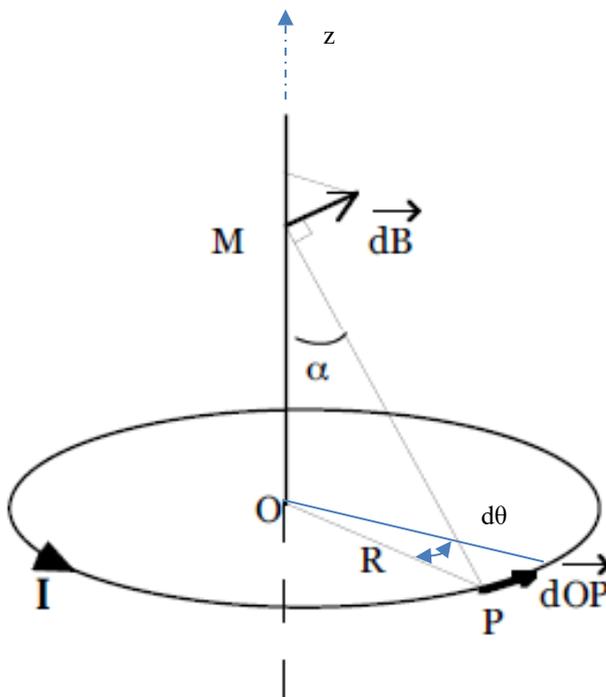
$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\vec{OP} \wedge \vec{PM}}{\|\vec{PM}\|^3}$$

On trouve alors : $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}$

Démonstration :

1.6 Champ créé par une spire circulaire

On considère le cas d'une spire circulaire de rayon R , parcourue par un courant permanent I . On ne s'intéresse ici qu'au champ magnétique sur l'axe z de la spire.



La densité de courant étant toroïdale et invariante par rotation autour de l'axe z , le champ magnétique sera poloïdal :

$$\vec{B}(\rho, \theta, z) = B_\rho(\rho, z)\vec{u}_\rho + B_z(\rho, z)\vec{u}_z$$

Cependant, sur l'axe u_ρ , la composante radiale du champ s'annule et il ne reste qu'une composante selon z .

En projetant la loi de Biot et Savart sur z on obtient :

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{2R} \sin^3 \alpha = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{R^2}{(R^2 + z^2)^{3/2}}$$

Avec $OM = z$

Démonstration :

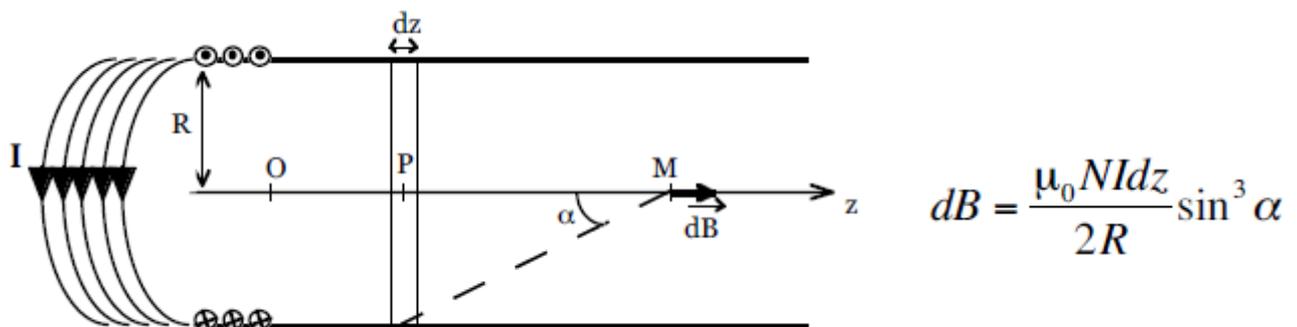
1.7 Champ créé par un solénoïde

Un solénoïde est constitué d'un enroulement d'un fil conducteur autour d'un cylindre. On suppose que ce fil est suffisamment mince pour pouvoir modéliser ce solénoïde comme une juxtaposition de spires coaxiales, avec N spires par unité de longueur. Chaque spire est alors parcourue par un courant permanent I.

Comme pour la spire simple vue au chapitre précédent, les propriétés de symétrie du courant montrent que le champ magnétique du solénoïde, qui est la somme vectorielle du champ créé par chaque spire, est suivant z uniquement.

Autour d'un point P situé en z, sur une épaisseur $dOP=dz$, il y a Ndz spires.

Ces spires créent donc un champ en un point M quelconque de l'axe :



$$dB = \frac{\mu_0 N I dz}{2R} \sin^3 \alpha$$

où la position z est reliée à l'angle par : $\tan \alpha = \frac{R}{z}$ avec $z=PM$

Le champ magnétique total s'écrit alors :

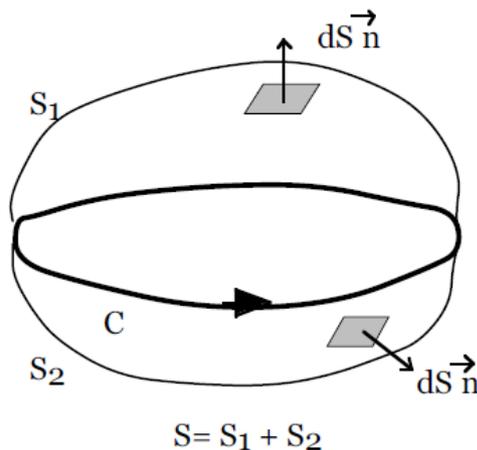
$$B = \frac{\mu_0 NI}{2} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)$$

Et pour un solénoïde infini : $B = \mu_0 NI$

Démonstration :

1.8 Flux du champ magnétique

Considérons une surface fermée S quelconque, s'appuyant sur une courbe C fermée et orientée, c'est à dire pour laquelle on peut définir localement un élément de surface : $\vec{dS} = dS \vec{n}$, par convention, le vecteur normal est orienté vers l'extérieur :



Le flux du champ magnétique à travers cette surface fermée vaut :

$$\Phi = \oiint_S \vec{B} \cdot \vec{dS} = 0$$

Cette loi est générale et reste valable même en régime variable.

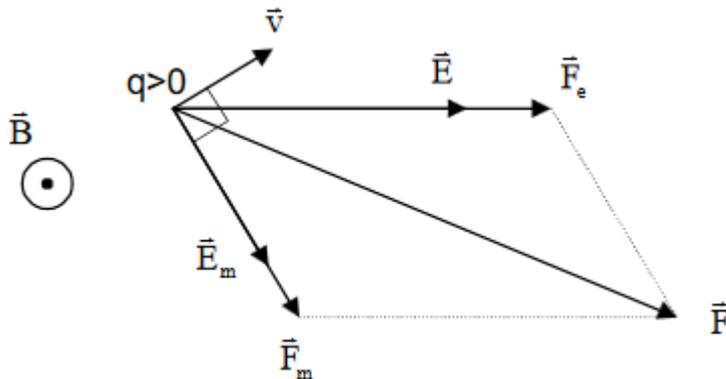
L'unité du flux est le Weber (Tesla mètre carré : T.m²)

La conservation du flux magnétique impose : $\Phi_S = \Phi_{S_1} + \Phi_{S_2} = 0$ et $\Phi_{S_1} = -\Phi_{S_2}$

Ce qui rentre d'un côté ressort de l'autre. La différence de signe provient de la convention d'orientation de la normale : le flux est le même dans les deux cas.

1.9 Force magnétique sur une particule chargée : force de LORENTZ

Soit une particule chargée q se déplaçant dans une région de l'espace où règne un champ électrique \vec{E} et un champ magnétique \vec{B} :



La particule est alors soumise à une force électromagnétique (ou force de Lorentz) telle que :

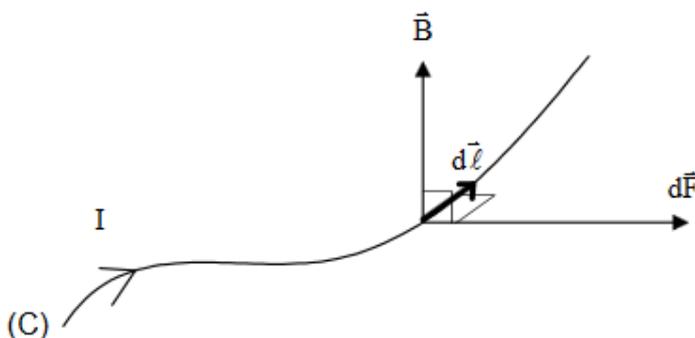
$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$

Cette force a deux composantes :

La force électrostatique : $\vec{F}_e = q\vec{E}$ et la force magnétique $\vec{F}_m = q\vec{v} \wedge \vec{B} = q\vec{E}_m$
On appelle \vec{E}_m le champ électromoteur : $\vec{E}_m = \vec{v} \wedge \vec{B}$

1.10 Loi de LAPLACE

Soit un circuit filiforme (C) plongé dans un champ magnétique \vec{B} et parcouru par un courant d'intensité I :



Une portion de circuit de longueur dl est soumise à une force magnétique (ou force de Laplace) :

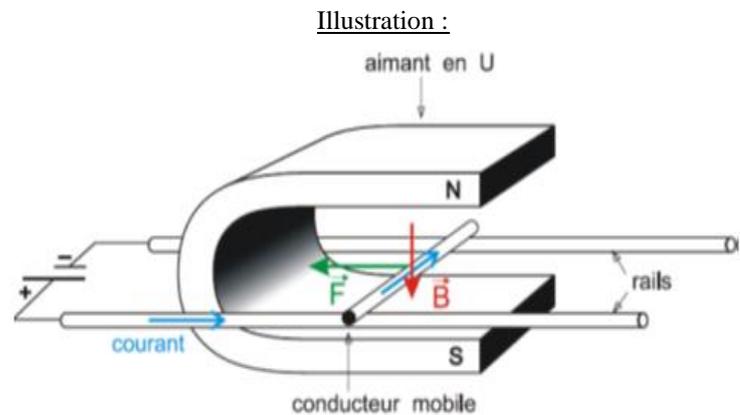
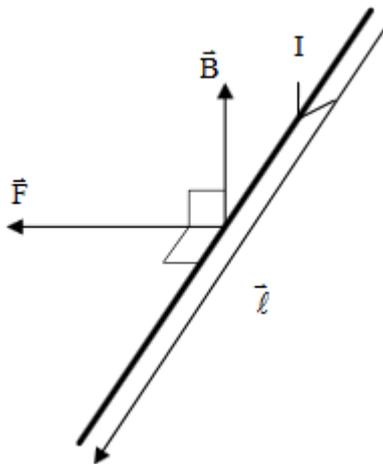
$$d\vec{F} = I d\vec{\ell} \wedge \vec{B}$$

Origine de la force de Laplace :

La force de Laplace est la résultante des forces magnétiques de Lorentz qui s'appliquent aux électrons de conduction qui forment le courant électrique d'intensité I .

Exemple (rails de LAPLACE) :

Soit un circuit rectiligne de longueur l soumis à un champ magnétique uniforme :



La force globale qui s'applique sur le conducteur est égale à la somme des forces élémentaires qui s'appliquent sur chaque portion du circuit :

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

Conséquences :

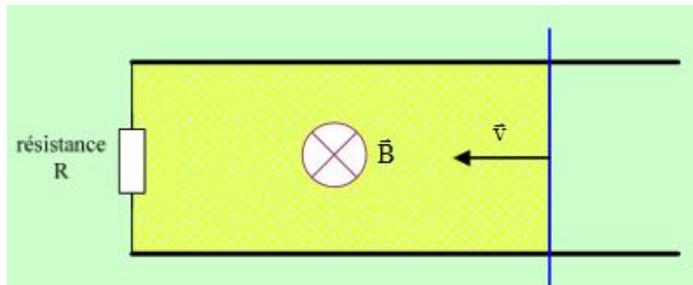
\vec{F} est perpendiculaire au plan défini par $\vec{\ell}$ et \vec{B} et $F = |I\ell B \sin(\vec{\ell}, \vec{B})|$

1.11 Force électromotrice induite (f.e.m.)

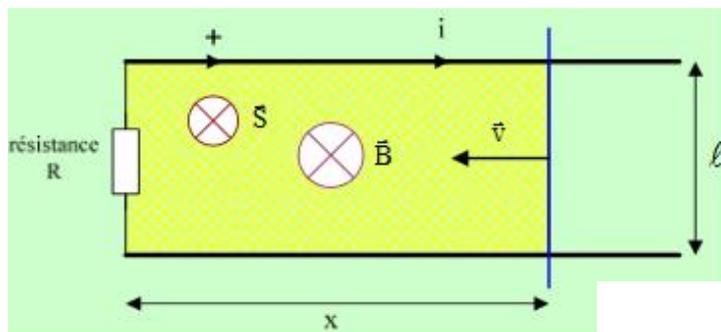
Dans un circuit électrique qui est le siège d'une variation de flux magnétique, il se crée une f.e.m. induite e (loi de LENTZ):

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

Avec e en volt, ϕ en Weber, t en secondes.

Expérience des rails de LAPLACE :

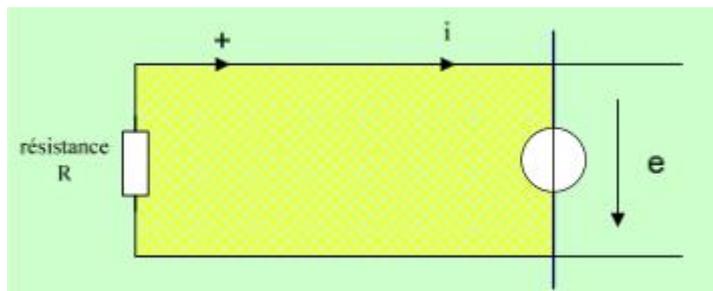
On déplace le rail à la vitesse v .



Le flux magnétique sera exprimé par la relation :

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = +Blx$$

Puisque x varie, le flux va aussi varier.



Une force électromotrice induite va alors apparaître :

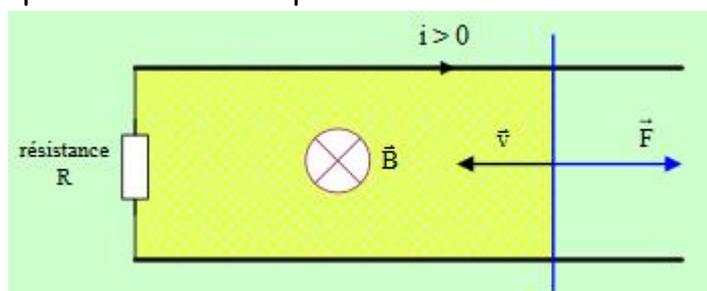
$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(Blx) = -Bl \frac{dx}{dt} = +Blv$$

Et un courant induit apparaîtra également :

$$i = \frac{e}{R} = \frac{Blv}{R}$$

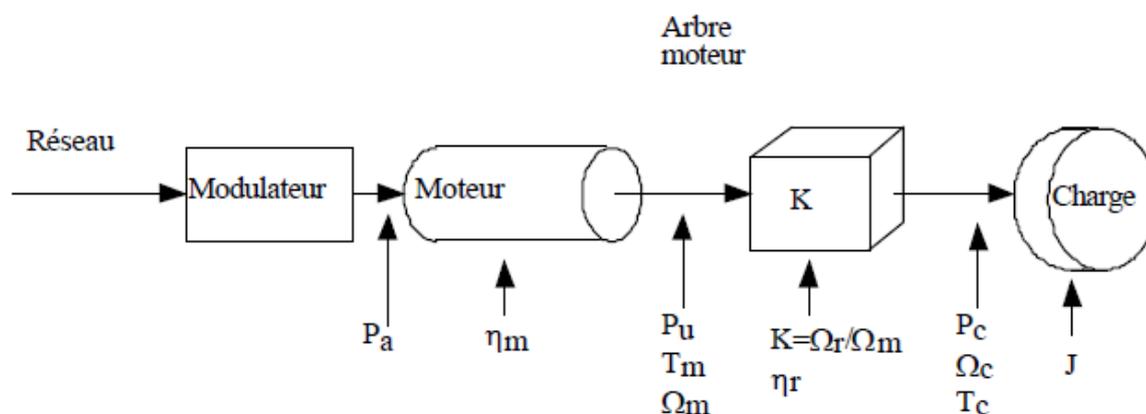
Le courant induit, par ses effets, s'oppose aux causes qui lui ont donné naissance.

Reprenons l'exemple des rails de Laplace :



Le courant induit provoque dans le rail une force de Laplace qui s'oppose au mouvement de celui-ci.

2 CHOIX D'UN MOTEUR ELECTRIQUE

2.1 Chaîne de transmission d'un moteur électrique :

P_a : Puissance absorbée par le moteur en W ou kW

η_m : Rendement du moteur ($\eta_m = P_u / P_a$)

P_u : Puissance utile fournie par le moteur sur l'arbre en W ou kW ($P_u = T_m \cdot \Omega_m$)

T_m ou C_m : Couple utile sur l'arbre moteur ou couple résistant opposé par la charge en N.m

Ω_m : Vitesse de rotation de l'arbre moteur en rad/s

K : Rapport de réduction du réducteur ($K = \Omega_r / \Omega_m$)

η_r : Rendement du réducteur ($\eta_r = P_c / P_u$)

P_c : Puissance demandée par la charge en W ou kW

Ω_c : Vitesse de rotation de la charge en rad/s

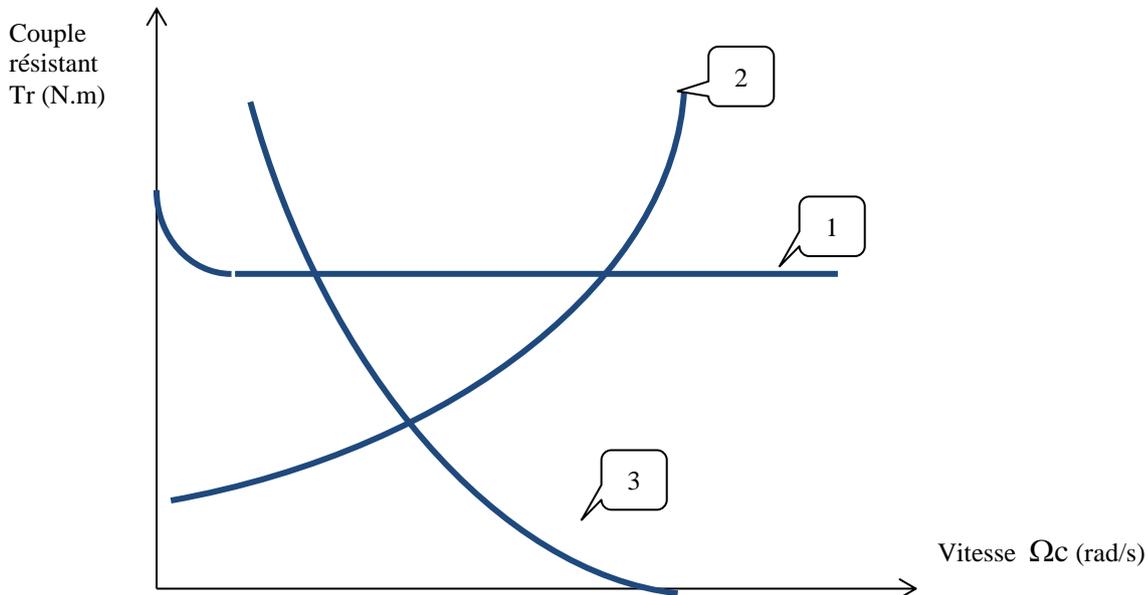
T_c ou C_c : Couple résistant de la charge en Nm

J : Moment d'inertie de la charge en kg.m²

On doit à l'aide des lois de la mécanique déterminer les paramètres P_u , Ω_m , T_m .

2.2 Types de couple résistant sur la machine :

La caractéristique du couple résistant de la charge C_r (ou T_r) en fonction de la vitesse Ω_c définit les besoins de la machine entraînée. Lorsque cette caractéristique n'est pas connue, elle est assimilée à l'une des trois caractéristiques ci-dessous :



1) Courbe 1 : Caractéristiques de levage

Le couple résistant T_r est plus fort au décollage, puis reste constant : $T_r = cte$

Exemples :

- Bande transporteuse horizontale,
- levage, ...

2) Courbe 2 : Caractéristiques de ventilation

Le couple résistant T_r est assez faible au décollage.

Il croît avec la vitesse selon une loi donnée :

$$T_r = k' \Omega^2$$

Exemples :

- Pompe centrifuge
- Ventilateur, ...

3) Courbe 3 : Caractéristiques d'essorage

Le couple résistant T_r est important au décollage, il décroît avec la vitesse :

$$T_r = \frac{k''}{\Omega}$$

La puissance P est constante

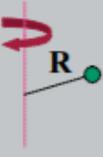
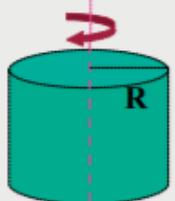
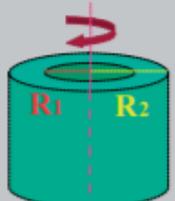
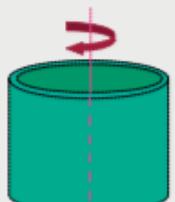
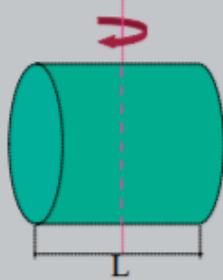
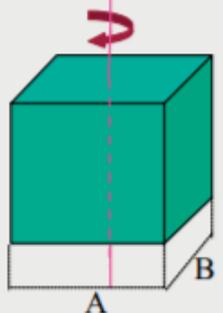
Exemples :

- Essoreuse
- Concasseur, ...

2.3 Le moment d'inertie

L'inertie caractérise les masses en mouvement (paramètre dynamique). C'est par son inertie qu'un système s'oppose aux changements de vitesse que l'on veut lui imposer.

La grandeur physique associée à l'inertie est le moment d'inertie J en kg/m^2

Masse ponctuelle	$J = M \cdot R^2$	
Cylindre plein	$J = \frac{1}{2} \cdot M \cdot R^2$	
Cylindre annulaire	$J = \frac{1}{2} \cdot M \cdot (R_1^2 - R_2^2)$	
Cylindre annulaire mince	$J = M \cdot R^2$	
Cylindre plein transverse	$J = \frac{1}{4} \cdot M \cdot (R^2 + \frac{L^2}{3})$	
Parallélépipède rectangle	$J = \frac{1}{12} \cdot M \cdot (A^2 + B^2)$	

2.4 Rappel du principe fondamental en dynamique pour les systèmes en rotation :**2.4.1 Conditions au démarrage**

La machine ne peut démarrer que si le couple de démarrage de la machine est supérieur au couple résistant de la charge.

$$T_d > T_m \Rightarrow T_a = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = T_m - T_r$$

T_m : Couple moteur

T_a : Couple accélérateur

T_r : Couple résistant opposé par la charge

J : Moment d'inertie

2.4.2 Régime établi

En régime établi la vitesse est constante. Donc le couple d'accélération n'existe plus.

$$\text{Si } \Omega = cte \Rightarrow \frac{d\Omega}{dt} = 0 \Rightarrow T_m = T_r$$

Le moteur est généralement choisi afin que le point de fonctionnement stable de la machine soit le plus proche possible du fonctionnement en régime nominal.

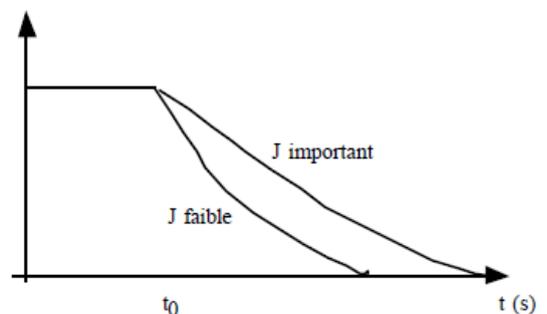
2.4.3 Ralentissement naturel de la machine

Le ralentissement naturel de la machine est obtenu par arrêt à la coupure de l'alimentation du moteur à l'instant t_0 . L'accélération est négative.

L'arrêt de la machine est d'autant plus court que le moment d'inertie est faible.

$$\text{À } t = t_0 \quad T_r + T_a = 0 \Rightarrow T_r = -T_a \Rightarrow \frac{d\Omega}{dt} = -\frac{T_r}{J}$$

Ω (rad s⁻¹)



2.4.4 Freinage de la machine

Pour réaliser un freinage on ajoute à l'instant t_0 un couple de freinage C_f .

Le couple de freinage peut être produit par :

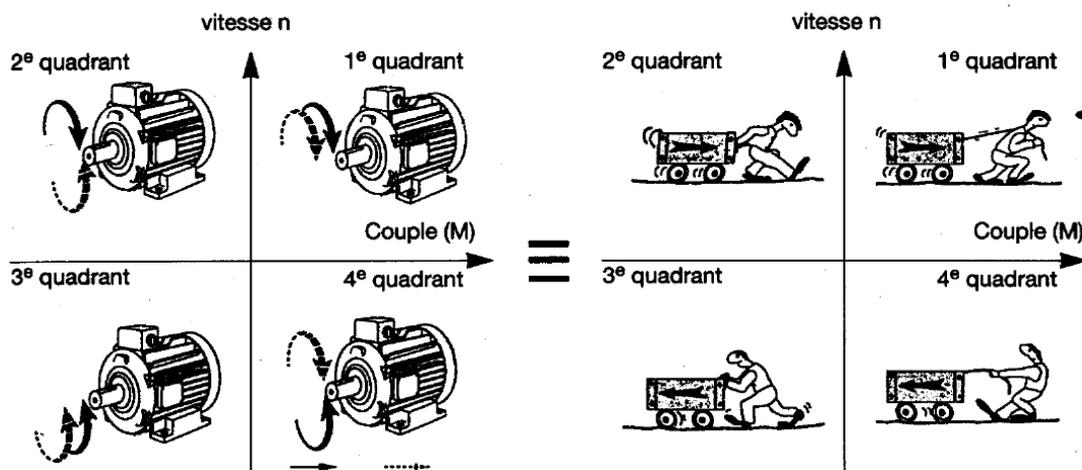
- Un élément mécanique ;
- Un système électrique extérieur (frein à poudre, frein à courant de Foucault) ;
- Par le moteur lui-même :
- Par injection de courant continu ;
- Un fonctionnement en génératrice.

En cas de coupure réseau, seul le frein mécanique assure l'immobilisation de la charge.

$$\text{À } t = t_0 \Rightarrow T_r + T_a + T_f = 0 \Rightarrow T_r + T_f = -T_a \Rightarrow \frac{d\Omega}{dt} = -\frac{(T_r + T_f)}{J}$$

2.5 Quadrants de fonctionnement d'une machine :

- QUADRANTS DE FONCTIONNEMENT :



- Les divers fonctionnements sont caractérisés :

- par une marche en **MOTEUR** : quadrants 1 et 3 (le moteur fournit une puissance mécanique),
- par une marche en **FREINAGE** : quadrants 2 et 4 (le moteur absorbe une puissance mécanique).

• Analyse de fonctionnement

Sens de rotation	Vitesse	Couple	Puissance $P = T\Omega$	Quadrant	Travail machine électrique	Charge
sens 1	+	+	+	1	moteur	résistante
	+	-	-	2	génératrice	entraînante
sens 2	-	-	+	3	moteur	résistante
	-	+	-	4	génératrice	entraînante

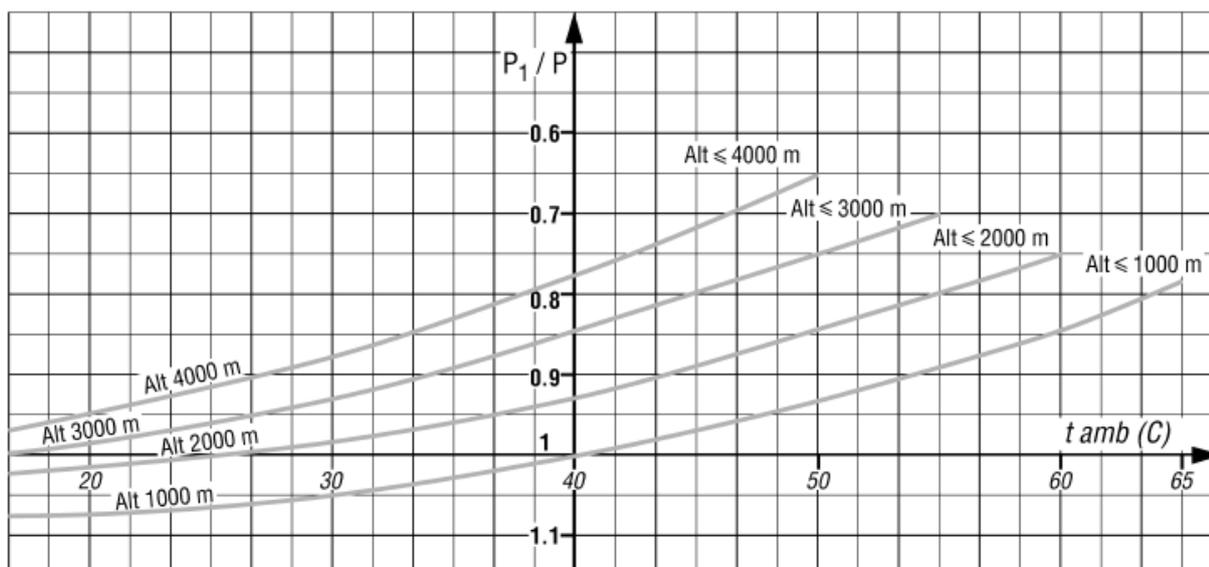
2.6 Choix en fonction de l'environnement :

2.6.1 Altitude

Les conditions normales d'utilisation des machines standard sont :

- une température comprise entre -16 °C et 40 °C
- une altitude inférieure à 1000 m.

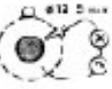
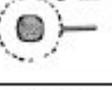
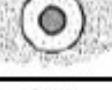
Des corrections doivent être apportées en dehors de ces valeurs.



$$P_{installée} = P_{calculée} \cdot \frac{P_1}{P}$$

2.6.2 Indices de protection

Il faut s'assurer que la machine choisie sera protégée contre l'insertion de corps étrangers ainsi que contre les projections d'eau. Il faut que l'IP de la machine soit supérieur chiffre à chiffre à l'IP du local ou de l'armoire.

1er chiffre : protection contre les corps solides			2ème chiffre : protection contre les liquides		
IP	tests		IP	tests	
0		Pas de protection	0		Pas de protection
1		Protégé contre les corps solides supérieurs à 50 mm (ex. contacts involontaires de la main)	1		Protégé contre les chutes verticales de gouttes d'eau (condensation)
2		Protégé contre les corps solides supérieurs à 12 mm (ex. : doigt de la main)	2		Protégé contre les chutes de gouttes d'eau jusqu'à 15° de la verticale
3		Protégé contre les corps solides supérieurs à 2,5 mm (outils, fils)	3		Protégé contre l'eau en pluie jusqu'à 60° de la verticale
4		Protégé contre les corps solides supérieurs à 1 mm (outils fins, petits fils)	4		Protégé contre les projections d'eau de toutes directions
5		Protégé contre les poussières (pas de dépôt nuisible)	5		Protégé contre les jets d'eau de toutes directions à la lance
6		Totalement protégé contre les poussières	6		Protégé contre les projections d'eau assimilables aux paquets de mer
			7		Protégé contre les effets de l'immersion
			8		Protégé contre les effets prolongés de l'immersion sous pression (profondeur x à spécifier)

2.6.3 Résistance aux chocs

Résistance aux chocs de l'enveloppe de l'appareil			
Degré de protection contre les chocs	Energie de choc (joules)	Correspond à	Lâchés d'une hauteur de
IK 01	0,15	200 g	2,5 cm
IK 02	0,23	200 g	10 cm
IK 03	0,35	200 g	17,5 cm
IK 04	0,5	200 g	25 cm
IK 05	0,7	200 g	35 cm
IK06	1	500 g	20cm
IK 07	2	500 g	40 cm
IK 08	5	1700 g	29,5 cm
IK 09	10	5000 g	20 cm
IK 10	20	5000 g	40 cm

2.6.4 Classes de températures :

Les bobinages d'une machine sont enduits d'un vernis qui s'altère avec des températures élevées. La norme a défini des classes d'isolation en température qui assurent un fonctionnement correct pendant au moins 105 heures.

Dans le cas où la machine utilisée fonctionnerait avec une température supérieure à celle de sa classe, il convient de corriger la durée de vie de la machine à l'aide du tableau de vieillissement thermique des isolants.

Classe d'isolation	Echauffement Maxi $\Delta\theta$ (si $\theta_i \leq 40$ °C)	Température Maxi $\theta_i + \Delta\theta$
A	60 °C	100 °C
E	75 °C	115 °C
B	80 °C	120 °C
F	100 °C	140 °C
H	125 °C	165 °C

Pour une température ambiante $> 40\text{ °C}$, on décline la machine suivant les coefficients suivants :

$$P_{\text{installée}} = k \cdot P_{\text{choisie}}$$

θ_i	k
45 °C	100/95
50 °C	100/90
55 °C	100/85

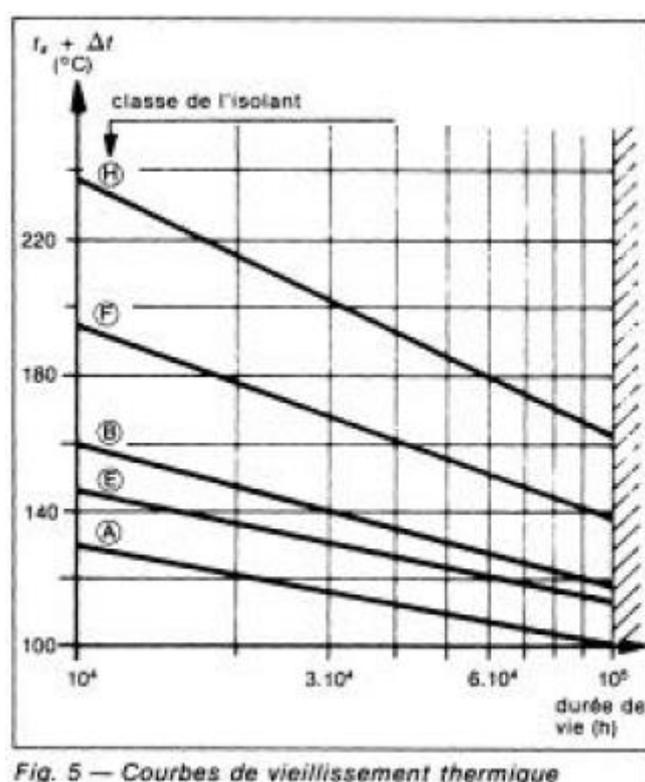


Fig. 5 — Courbes de vieillissement thermique

2.7 Choix par rapport au fonctionnement :

Le choix d'une machine est également conditionné par ses conditions de fonctionnement. Ainsi on définit 10 "services" type en fonction des régimes de fonctionnement (Démarrage, Fonctionnement nominal, fonctionnement à vide, freinage, arrêt).

Service continu S 1

Forme de service comportant un fonctionnement à régime constant d'une durée suffisante pour que l'équilibre thermique soit atteint.

Services temporaires S 2

Formes de services comportant un fonctionnement à régime constant pendant un temps N déterminé, moindre que celui requis pour atteindre l'équilibre thermique, suivi d'un repos d'une durée suffisante pour rétablir l'égalité de température avec celle du milieu refroidissant.

Services intermittents périodiques S 3

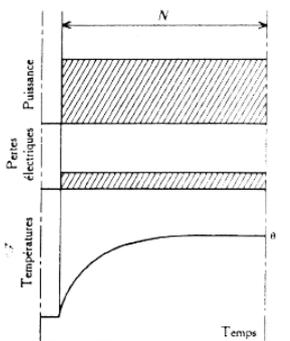
Forme de services composés d'une suite de cycles identiques comprenant chacun un temps N de fonctionnement à un régime constant, et un temps R de repos, ces temps étant insuffisants pour que l'équilibre thermique soit atteint aussi bien pendant les périodes d'échauffement que pendant les périodes de refroidissement.

Services intermittents à démarrage S 4

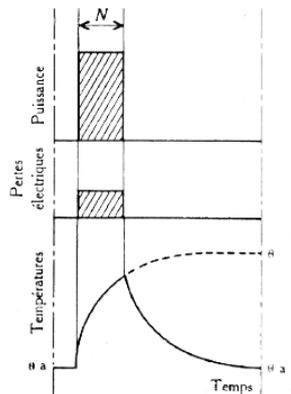
Formes de services composés d'une suite de cycles identiques comprenant chacun un temps D de démarrage, un temps N de fonctionnement à un régime constant et un temps R de repos. Les temps de fonctionnement et de repos sont suffisamment courts pour que l'équilibre thermique ne soit pas atteint au cours d'un cycle.

- Dans ces services, l'arrêt du moteur est obtenu, soit par ralentissement naturel après coupure de courant, soit par un moyen de freinage tel qu'un frein mécanique ne provoquant pas d'échauffement supplémentaire des enroulements

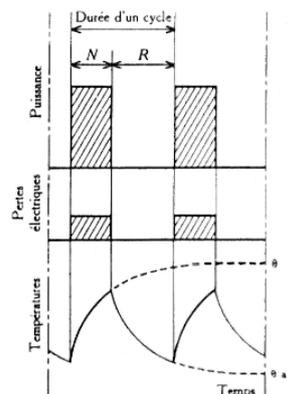
S1 : Service continu



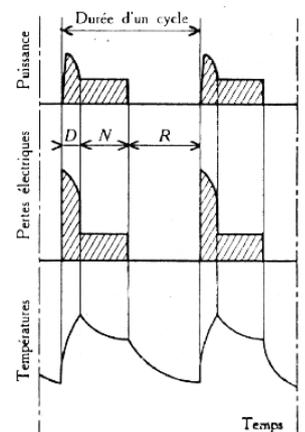
S2 : Service temporaire



S3 : Service intermittent périodique



S4 : Service intermittent périodique à démarrage



Services intermittents à démarrage et freinage électrique S 5

Formes de services composés d'une suite de cycles identiques comprenant chacun un temps D de démarrage, un temps N de fonctionnement à régime constant, un temps F de freinage et un temps R de repos. Les temps de fonctionnement et de repos sont suffisamment courts pour que l'équilibre thermique ne soit pas atteint au cours d'un cycle.

- Dans ces services, le freinage est rapide et réalisé par un procédé électrique.

Services ininterrompus à charge intermittente S 6

Formes de services composés d'une suite de cycles identiques comprenant chacun un temps N de fonctionnement à régime constant et un temps V de fonctionnement à vide, ces temps étant insuffisants pour que l'équilibre thermique soit atteint, aussi bien pendant les périodes d'échauffement que pendant les périodes de refroidissement.

Services ininterrompus à démarrage et freinage S 7

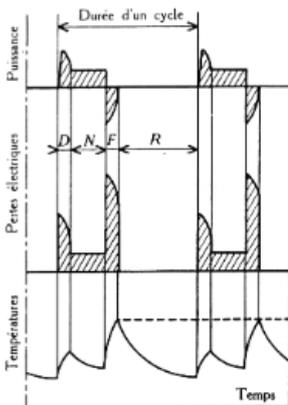
Formes de services composés d'une suite de cycles identiques comprenant chacun un temps de démarrage, un temps de fonctionnement à régime constant et un temps de freinage électrique. Les temps de fonctionnement sont suffisamment courts pour que l'équilibre thermique ne soit pas atteint au cours d'un cycle. Il n'existe pas de temps de repos, le moteur restant pratiquement toujours sous tension.

Services ininterrompus à changement de vitesse périodique S 8

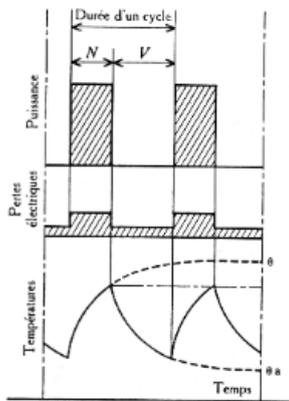
Formes de services composés d'une suite de cycles identiques comprenant chacun un temps de fonctionnement à régime constant correspondant à une vitesse de rotation déterminée suivi de temps de fonctionnement à d'autres régimes correspondant à des vitesses de rotation différentes réalisées par exemple par changement du nombre de pôles dans le cas de moteur à induction.

- Les temps de fonctionnement sont suffisamment courts pour que l'équilibre thermique ne soit pas atteint au cours du cycle. Il n'existe pas de temps de repos, le moteur restant pratiquement toujours sous tension.

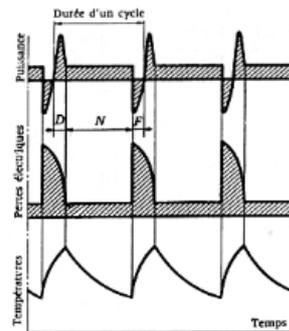
S5 : Service intermittent périodique à freinage électrique



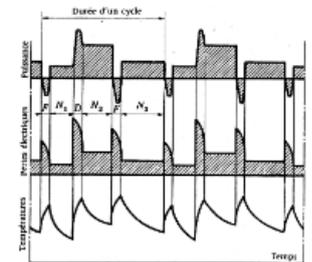
S6 : Service ininterrompu périodique à charge intermittente



S7 : Service ininterrompu périodique à freinage électrique



S8 : Service ininterrompu périodique à changements liés de charge et de vitesse



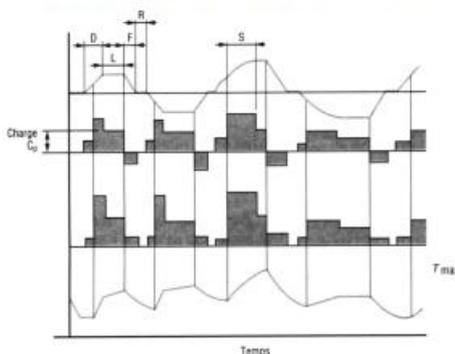
Service à variations non périodique de charge et de vitesse S9

Service dans lequel la charge et la vitesse ont une variation non périodique dans la plage de fonctionnement admissible. Ce service inclut fréquemment des surcharges appliquées qui peuvent être largement supérieures à la pleine charge. Pour ce service type, des valeurs appropriées à pleine charge devront être considérées comme bases du concept de surcharge.

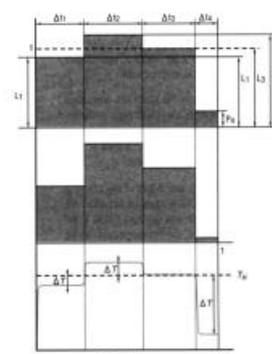
Service avec charges constantes distinctes S10

Service comprenant au plus quatre valeurs distinctes de charges (ou charges équivalentes), chaque valeur étant appliquée pendant une durée suffisante pour que la machine atteigne l'équilibre thermique. La charge minimale pendant un cycle de charge peut avoir la valeur zéro (fonctionnement à vide ou temps de repos).

S9 : Service à variations non périodique de charge et de vitesse

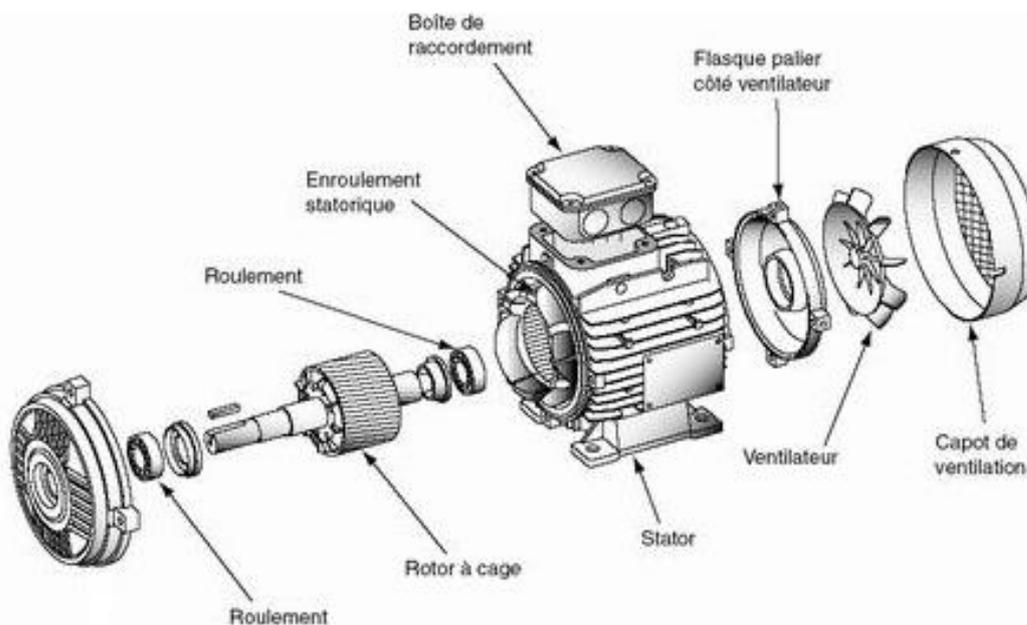


S10 : Service avec charges constantes distinctes



3 MOTEUR ASYNCHRONE

3.1 Principe de fonctionnement du moteur asynchrone



Le moteur asynchrone couplé à un variateur de fréquence est de loin le type de moteur le plus utilisé pour les applications où il est nécessaire de contrôler la vitesse et le déplacement d'une charge.

La popularité du moteur asynchrone seul, résulte du peu d'entretien nécessaire, de sa simplicité de construction, de sa standardisation et de sa robustesse.

Avantages :

- Coût peu élevé
- Simplicité de l'appareillage de commande
- Couple croissant pendant l'accélération

Inconvénients :

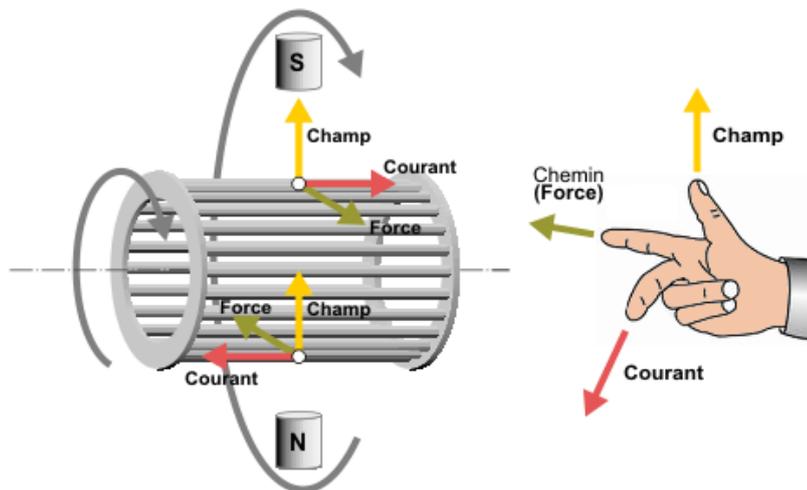
- Fortes intensités au démarrage, de ce fait, on l'utilisera sur des machines qui ne nécessitent pas de couple de démarrage trop élevé, et qui ne présentent pas d'inertie des masses en mouvement trop importante.

En effet, si l'on réduit la pointe d'intensité, le couple de démarrage sera également réduit dans des proportions importantes.

Par ailleurs, pour les machines à forte inertie, le moteur à cage supportera mal l'échauffement entraîné par la forte intensité pendant le démarrage dans ses enroulements, ceci pouvant même dans certains cas extrêmes amener sa destruction.

Le principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone repose :

- D'une part sur la création d'un courant électrique induit dans un conducteur placé dans un champ magnétique tournant (causé par une f.e.m induite de la loi de Lenz). Le conducteur en question est un des barreaux de la cage d'écureuil ci-dessous constituant le rotor du moteur. L'induction du courant ne peut se faire que si le conducteur est en court-circuit (c'est le cas puisque les deux bagues latérales relient tous les barreaux).
- D'autre part, sur la création d'une force motrice sur le conducteur considéré (parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique tournant ou variable) dont le sens est donné par la règle des trois doigts de la main droite.



Comme montré sur le schéma ci-dessus, le champ tournant, à un instant donné, est orienté vers le haut. En considérant deux conducteurs diamétralement opposés, on constate que les courants induits dans ces deux conducteurs sont en sens inverse et, associés au champ magnétique, créent des forces motrices en sens inverse. Le rotor étant libre de tourner sur l'axe X-Y, les deux forces s'associent pour imprimer aux deux conducteurs un couple permettant la rotation de la cage d'écureuil.

Pour entretenir la rotation du moteur, il est nécessaire de faire varier soit le courant dans les conducteurs de la cage, soit le champ magnétique. Dans un moteur asynchrone, c'est le champ magnétique qui varie sous forme de champ tournant créé dans le stator.

Au démarrage le champ tournant balaye les conducteurs de son flux à la vitesse angulaire de synchronisme. Le rotor mis en rotation tend à rattraper le champ tournant. Pour qu'il y ait un couple entretenu au niveau des conducteurs, la variation de flux doit être présente en permanence ; ce qui signifie que si les conducteurs tournent à la vitesse de synchronisme comme le champ tournant, la variation de flux sur les conducteurs devient nulle et le couple moteur disparaît.

Un rotor de moteur asynchrone ne tourne donc jamais à la vitesse de synchronisme (50 Hz). Pour un moteur à une paire de pôles (à 50 Hz, la vitesse de rotation du champ tournant est de 3 000 [tr/min]) la vitesse de rotation du rotor peut être de 2 950 [tr/min] par exemple; intervient ici la notion de glissement.

3.2 Technologie utilisée du moteur asynchrone

3.2.1 Le stator du moteur asynchrone :

Le stator d'un moteur triphasé (le plus courant en moyenne et grosse puissance), comme son nom l'indique, est la partie statique du moteur asynchrone. Il se compose principalement :

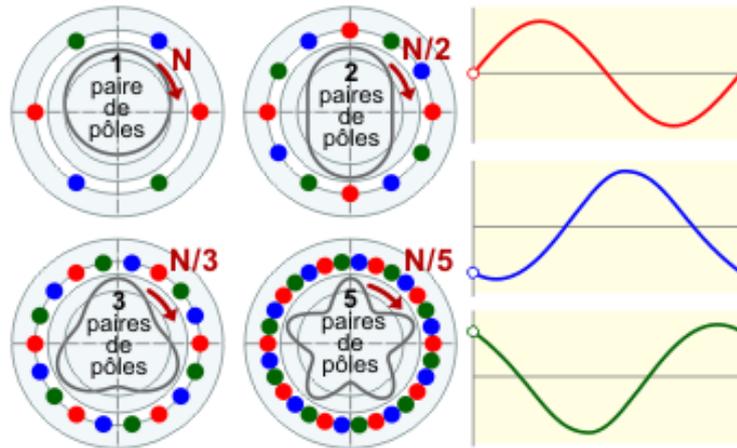
- De la carcasse,
- Des paliers,
- Des flasques de palier,
- Du ventilateur refroidissant le moteur,
- Le capot protégeant le ventilateur.



L'intérieur du stator comprend essentiellement :

- Un noyau en fer feuilleté de manière à canaliser le flux magnétique,
- Les enroulements (ou bobinage en cuivre) des trois phases logés dans les encoches du noyau.

Dans un moteur triphasé les enroulements sont au nombre minimum de trois décalés l'un de l'autre de 120° comme le montre le schéma ci-dessous :



Influence du nombre de paires de pôles sur la vitesse de rotation et de la forme du champ statorique résultant.

Lorsque les enroulements du stator sont parcourus par un courant triphasé, ceux-ci produisent un champ magnétique tournant à la vitesse de synchronisme.

La vitesse de synchronisme est fonction de la fréquence du réseau d'alimentation (50 Hz en Europe) et du nombre de paires de pôles. Vu que la fréquence est fixe, la vitesse de rotation du champ tournant du moteur ne peut varier qu'en fonction du nombre de paires de pôles.

La vitesse de synchronisme s'exprime par la relation suivante :

$$N_0 = (f \times 60) / p$$

Avec,

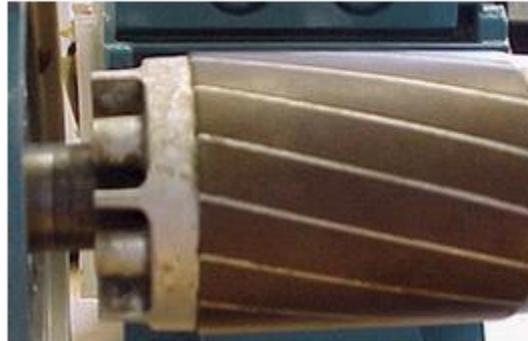
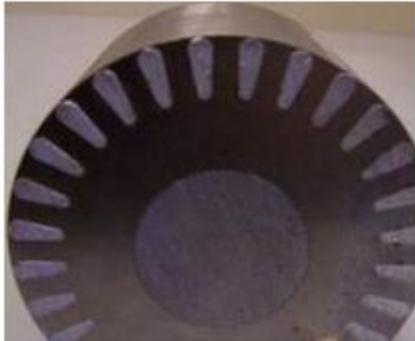
- N_0 = vitesse du champ tournant.
- f = la fréquence du réseau (en général 50 Hz).
- p = le nombre de paires de pôles.

Paires de pôles	1	2	3	4	6
Nombre de pôles	2	4	6	8	12
n_0 [tr/min]	3 000	1 500	1 000	750	500

3.2.2 Le rotor du moteur asynchrone :

Le rotor est la partie mobile du moteur asynchrone. Il se compose essentiellement :

- D'un empilage de disques minces isolés entre eux et clavetés sur l'arbre du rotor afin de canaliser et de faciliter le passage du flux magnétique.
- D'une cage d'écurueil en aluminium coulé dont les barreaux sont de forme trapézoïdale pour les moteurs asynchrones standards et fermés latéralement par deux "flasques" conductrices.



3.3 Caractéristiques du moteur asynchrone

3.3.1 Glissement :

Comme on l'a vu au niveau du principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone, la vitesse de rotation de l'arbre du moteur est différente de la vitesse de synchronisme (vitesse du champ tournant).

Le glissement représente la différence de vitesse de rotation entre l'arbre du moteur et le champ tournant du stator; il s'exprime par la relation suivante :

$$g = N_0 - N_n$$

Avec, N_0 = vitesse du champ tournant.

N_n = vitesse de rotation de l'arbre.

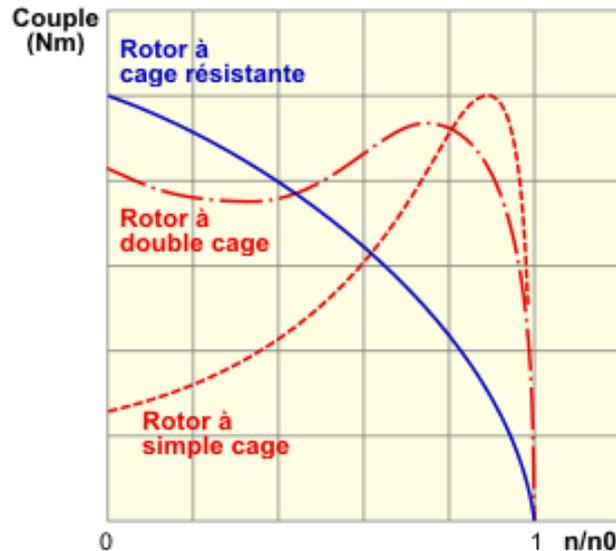
Le glissement est généralement exprimé en pourcentage de la vitesse de synchronisme n_0 .

$$g = (N_0 - N_n) / N_0 [\%]$$

Le glissement est toujours faible, de l'ordre de quelques pour-cent : de 2 % pour les machines les plus grosses à 6 ou 7 % pour les petites machines triphasées, il peut atteindre 10 % pour les petites machines monophasées.

3.3.2 Couple :

Une des courbes la plus caractéristique des moteurs asynchrones est celle du couple en fonction du rapport vitesse de rotation / vitesse de synchronisme :

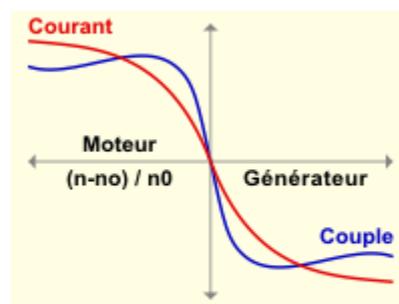


Couple en fonction du rapport :
vitesse de rotation/vitesse de synchronisme.

Sur le graphe ci-dessus on voit tout de suite qu'il faut choisir le type de moteur en fonction de l'application : pour les motorisations des ascenseurs, on préférera les moteurs à double cage présentant un profil de courbe plus plat en fonction du glissement afin de bénéficier d'un couple relativement constant quelle que soit la charge.

Une des caractéristiques importantes du moteur asynchrone, est qu'il peut, dans certaines conditions, se transformer en générateur asynchrone. Lorsqu'une cabine d'ascenseur redescend en charge maximum, le moteur renvoie de l'énergie au réseau.

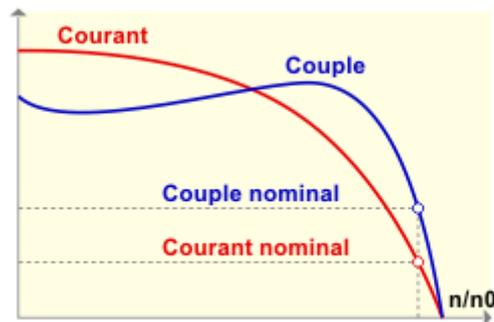
Les courbes suivantes montrent ce phénomène :



Fonction en moteur ou en générateur suivant le couple résistant .

Pour être complet, on peut noter qu'un moteur asynchrone classique a les caractéristiques suivantes :

- Le courant de démarrage est de l'ordre de 6 à 7 fois le courant nominal. Il est impératif de prévoir des systèmes de limitation de courant au démarrage (étoile/triangle, variateur de fréquence, ...).
- Le couple de démarrage est important (de l'ordre de 2,5 fois le couple nominal).
- Le couple est maximum pour un glissement de l'ordre de 30 %.



Caractéristiques d'un moteur asynchrone classique.

3.3.3 Pilotage de la vitesse de rotation

Le pilotage de la vitesse de rotation du moteur asynchrone est essentiel pour beaucoup d'applications.

La relation suivante permet de cerner quels sont les paramètres qui peuvent influencer la vitesse de rotation.

$$\text{On a : } \mathbf{g = (N_0 - N) / N_0} \quad \text{ou} \quad \mathbf{N = N_0 \cdot (1 - g)}$$

Avec : g = glissement [%], N_0 = vitesse du champ tournant [tr/min], N = la vitesse de rotation de l'arbre du moteur [tr/min].

$$\text{Ou : } \mathbf{N = (1 - g) \cdot 60 \cdot f / p}$$

Avec : f = fréquence du réseau [Hz], p = le nombre de paire de pôle.

On peut donc piloter la vitesse de rotation en intervenant sur :

- Le nombre de paire de pôle (moteur à deux vitesses par exemple).
- Le glissement du moteur (moteur à bague).
- La fréquence du réseau.

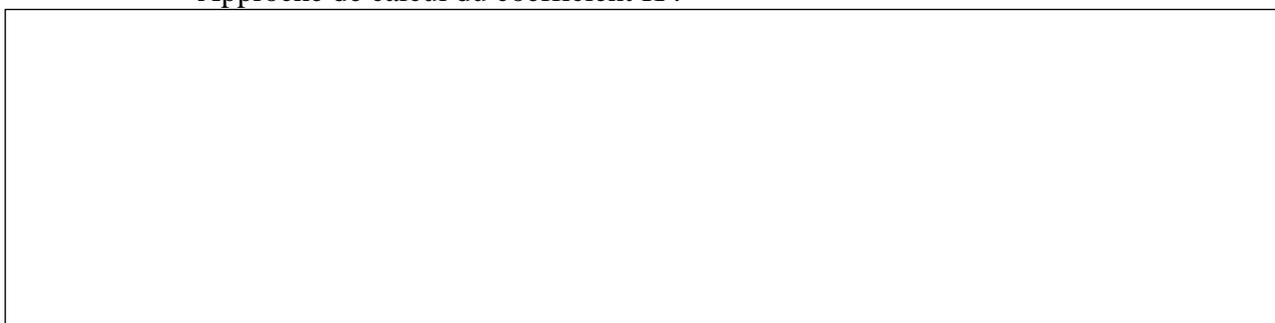
A l'heure actuelle, le pilotage de la vitesse des moteurs asynchrones se fait électroniquement grâce à des variateurs de vitesse. Pour cette raison, on ne parlera ici que du contrôle de la fréquence qui de loin la plus courante.

Sans perte de puissance, on peut piloter la vitesse de rotation du moteur en faisant varier la fréquence car la vitesse de rotation du champ tournant au niveau du stator change. Pour conserver le couple moteur, il faut que la tension du moteur se modifie avec la fréquence dans un rapport constant. En effet, le couple est lié à la fréquence, la tension et le courant par la formule suivante :

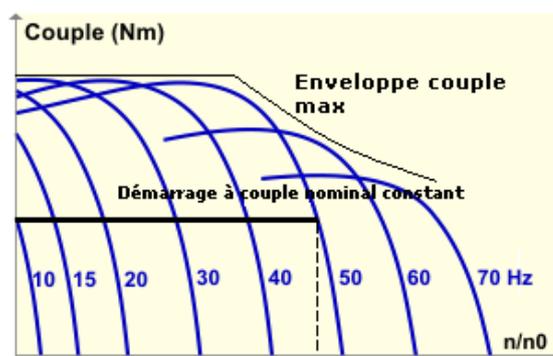
$$\text{On a : } C = (U/f).I.K$$

Avec : C = couple moteur [Nm], U = tension du réseau[V], I = courant absorbé par le moteur, K = coefficient sans dimensions

Approche de calcul du coefficient K :



Si le rapport entre la tension et la fréquence reste constant, le couple le reste aussi.



Pilotage en fréquence et en tension.

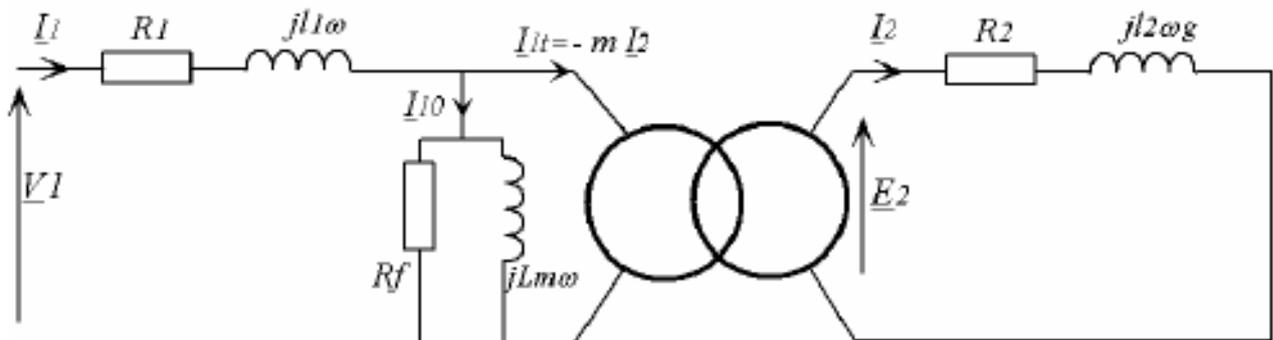
Le pilotage du moteur par un variateur de fréquence et de tension montre des intérêts certains; à savoir principalement :

- La limitation du courant de démarrage (de l'ordre de 1,5 fois le courant nominal);
- Un couple relativement constant quelle que soit la vitesse du moteur.

3.4 Schéma équivalent du moteur asynchrone

Le moteur asynchrone est un transformateur avec un secondaire en court-circuit et tournant. De ce fait la fréquence des courants rotoriques (courants secondaires) vaut : $f_r = g \cdot f$

Pour une bobine (une phase) du moteur, le schéma équivalent est identique à celui du transformateur en court-circuit ($V_2 = 0$). On considère qu'une phase du moteur est alimentée par la tension simple V_1 du réseau (couplage étoile pour le moteur) :



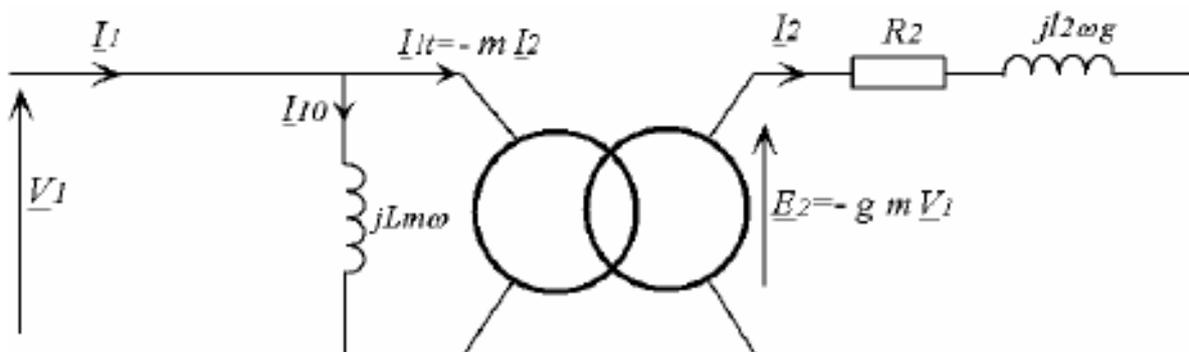
$\underline{z}_1 = r_1 + j l_1 \omega$: impédance d'un enroulement statorique (primaire),

$\underline{z}_2 = r_2 + j l_2 \omega g$: impédance d'un enroulement rotorique (secondaire).

R_f : résistance équivalente aux pertes ferromagnétiques,

L_m : inductance magnétisante

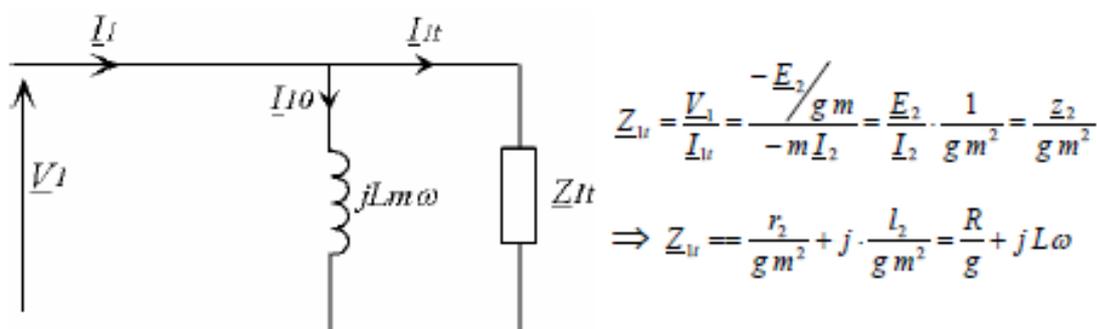
En négligeant \underline{z}_1 et les pertes fer, on en déduit le schéma équivalent simplifié pour une phase :



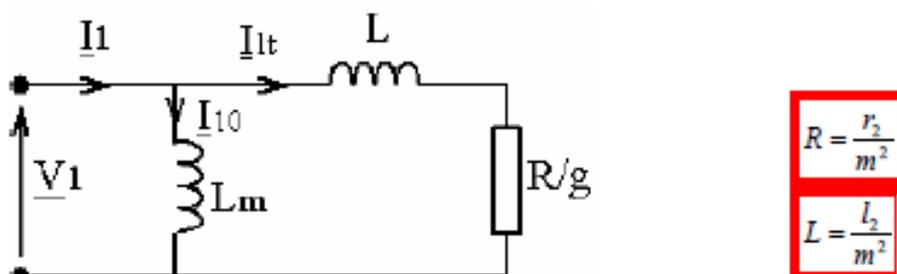
La tension \underline{E}_2 induite au secondaire est proportionnelle au glissement (si le rotor tourne à la vitesse de synchronisme, c'est-à-dire comme le champ tournant, le glissement est nul ainsi que \underline{E}_2) :

$$\underline{E}_2 = -g m \underline{V}_1$$

Il est alors intéressant de ramener les impédances du secondaire au primaire :

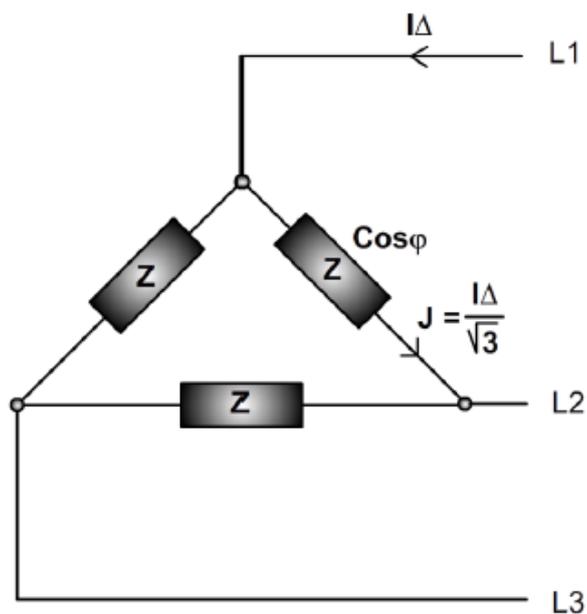


En négligeant l'impédance de fuite primaire et les pertes fer, le schéma équivalent à une phase à retenir est donc le suivant :



3.5 Démarrage étoile triangle

Analyse des caractéristiques de la position triangle



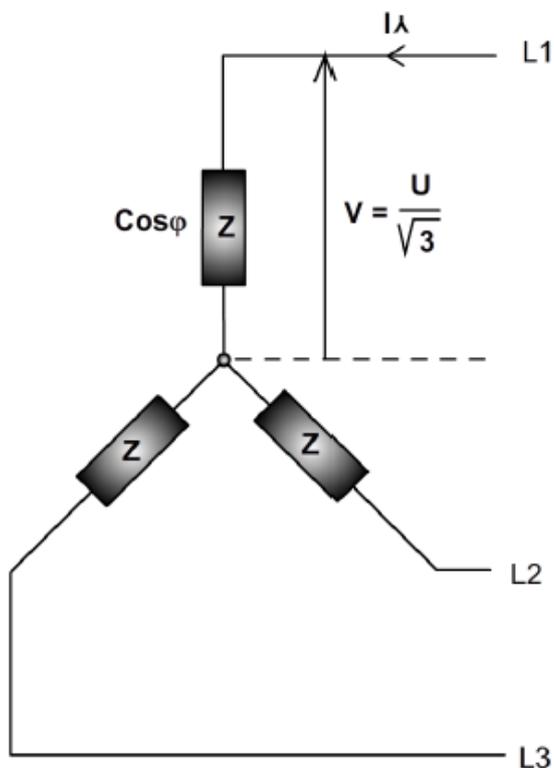
Soit U la tension d'alimentation d'un enroulement.

Soit I_{Δ} l'intensité en ligne.

Soit J l'intensité qui traverse un enroulement. $J = \frac{I_{\Delta}}{\sqrt{3}}$

Nous allons exprimer l'intensité en ligne I_{Δ} en fonction de U et Z

Analyse des caractéristiques de la position étoile



Soit V la tension d'alimentation d'un enroulement. $V = \frac{U}{\sqrt{3}}$

Soit I_λ l'intensité en ligne.

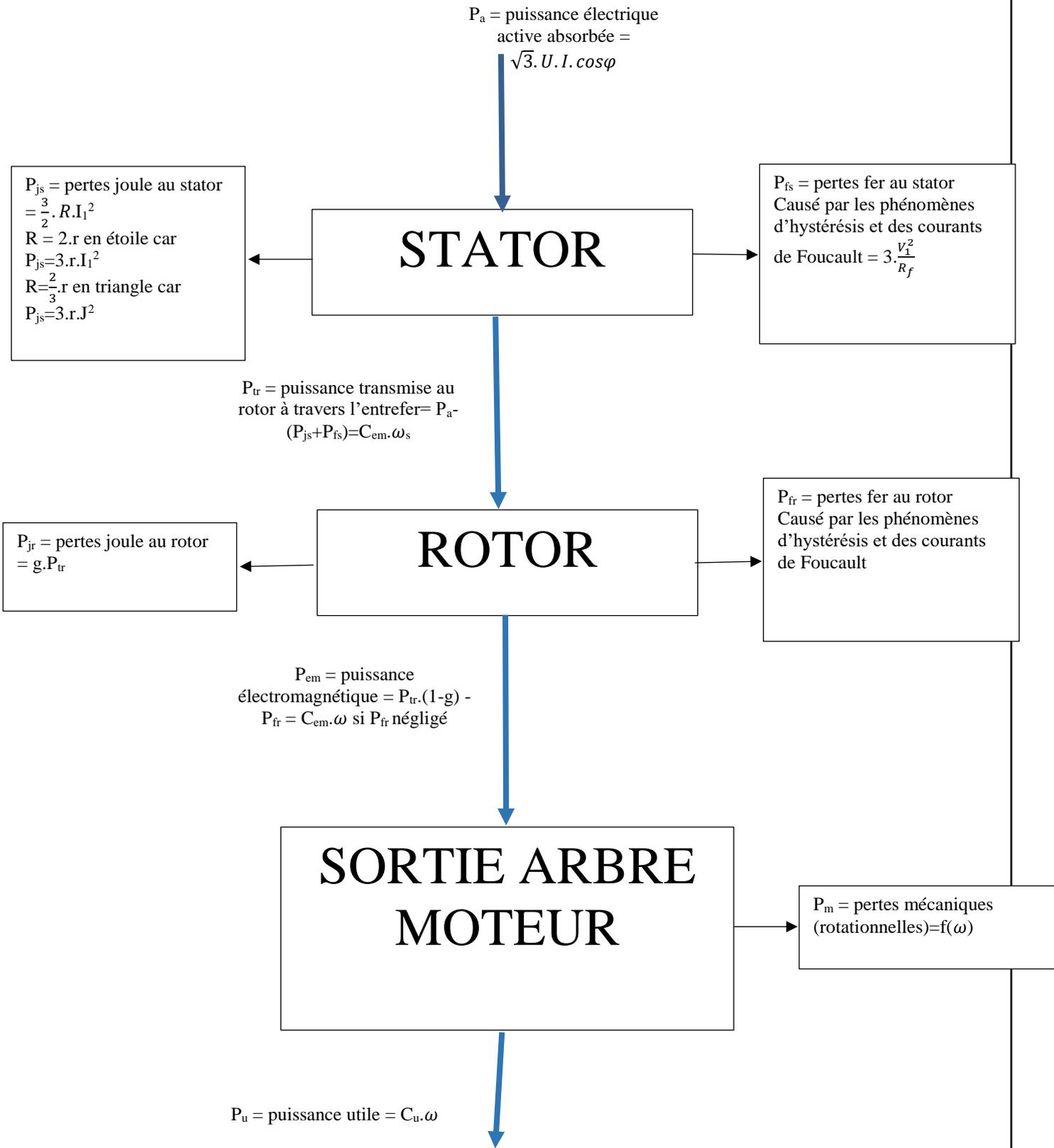
Exprimons l'intensité en ligne I_λ en fonction de U et Z

Comparaison des caractéristiques des positions étoile et triangle

ETOILE	TRIANGLE
$I_{\lambda} = \frac{U \times \sqrt{3}}{3 \times Z}$	$I_{\Delta} = \frac{U \times \sqrt{3}}{Z}$
$P_{\lambda} = \frac{U^2 \times \cos \varphi}{Z}$	$P_{\Delta} = \frac{3 \times U^2 \times \cos \varphi}{Z}$

L'intensité en position étoile est 3 fois plus faible que l'intensité en position triangle.
La puissance en étoile est 3 fois plus faible que celle en position triangle.

3.6 Bilan des puissances du moteur asynchrone

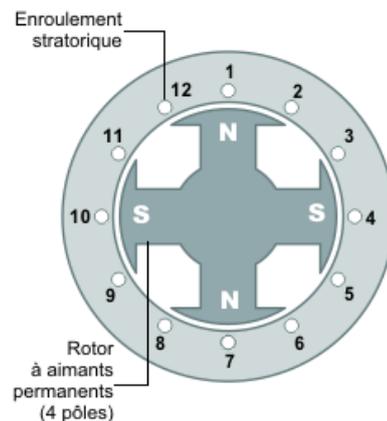


4 MOTEUR SYNCHRONE

4.1 Principe de fonctionnement du moteur synchrone

Le moteur synchrone se compose, comme le moteur asynchrone, d'un stator et d'un rotor séparés par un entrefer. La seule différence se situe au niveau de la conception du rotor.

La figure ci-dessous montre un rotor à pôles saillants constitués d'aimants permanents ou d'électro-aimants alimentés en courant continu (rotor bobiné).



Après le démarrage, le moteur tourne en synchronisme avec le champ tournant. A vide, les axes des pôles du champ tournant et du rotor sont confondus. En charge, les axes sont légèrement décalés. La vitesse du moteur synchrone est constante quelle que soit la charge. On notera aussi que :

- La charge ne doit pas dépasser l'effort de démarrage entre le rotor et le champ tournant.
- Le couple moteur est proportionnel à la tension à ses bornes.

Avantages :

- il peut travailler avec un facteur de puissance proche de 1 ($\cos \varphi \sim 1$). Il contribue donc à redresser le $\cos \varphi$ global de l'installation électrique.
- la vitesse du moteur est constante quelle que soit la charge.
- Il peut supporter des chutes de tension important sans décrocher.
- ...

Inconvénients :

- S'il n'est pas associé à un variateur de vitesse, il a des difficultés à démarrer.
- il peut décrocher en cas de forte charge (pas intéressant, par exemple, au niveau des ascenseurs nécessitant un couple important).
- Les moteurs à bagues sont plus onéreux que les moteurs à cage,
- Nécessite un appareillage de court-circuitage rotorique.
- Cependant, le moteur à bagues, plus encombrant, plus élaboré, donc plus cher que le moteur à cage offre l'avantage de maintenir jusqu'aux valeurs maximales de couple une relative proportionnalité entre les valeurs de couple et d'intensité. Le stator reste toujours sous pleine tension. L'insertion de résistances dans le rotor permet d'ajuster les valeurs de couple de façon très précise.

4.2 Technologie utilisée du moteur synchrone

4.2.1 Le stator du moteur synchrone :

Le stator d'un moteur triphasé (le plus courant en moyenne et grosse puissance), comme son nom l'indique, est la partie statique du moteur synchrone. Il s'apparente fort au stator des moteurs asynchrones. Il se compose principalement :

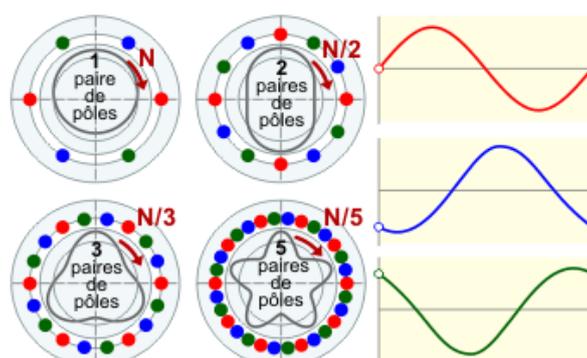
- De la carcasse,
- Des paliers,
- Des flasques de palier,
- Du ventilateur refroidissant le moteur,
- Le capot protégeant le ventilateur.



L'intérieur du stator comprend essentiellement :

- Un noyau en fer feuilleté de manière à canaliser le flux magnétique,
- Les enroulements (ou bobinage en cuivre) des trois phases logés dans les encoches du noyau.

Dans un moteur triphasé les enroulements sont au nombre minimum de trois décalés l'un de l'autre de 120° comme le montre le schéma ci-dessous.



Influence du nombre de paires de pôles sur la vitesse de rotation et de la forme du champ statorique résultant.

Lorsque les enroulements du stator sont parcourus par un courant triphasé, ceux-ci produisent un champ magnétique tournant à la vitesse de synchronisme.

La vitesse de synchronisme est fonction de la fréquence du réseau d'alimentation (50 Hz en Europe) et du nombre de paires de pôles. Vu que la fréquence est fixe, la vitesse de rotation du champ tournant du moteur ne peut varier qu'en fonction du nombre de paires de pôles.

Paires de pôles	1	2	3	4	6
Nombre de pôles	2	4	6	8	12
n_0 [tr/min]	3 000	1 500	1 000	750	500

4.2.2 Le rotor du moteur synchrone :

Le rotor est la partie mobile du moteur synchrone. Couplé mécaniquement à un treuil d'ascenseur par exemple, il va créer un couple moteur capable de fournir un travail de montée et de descente de la cabine d'ascenseur. Il se compose essentiellement d'une succession de pôles Nord et Sud intercalés sous forme d'aimants permanents ou de bobines d'excitation parcourues par un courant continu.

On distingue donc deux types de moteurs :

- À aimants permanents,
- À rotor bobinés.

Rotor à aimant permanent

Ce sont des moteurs qui peuvent accepter des courants de surcharge importants pour démarrer rapidement. Associés à des variateurs de vitesse électronique, ils trouvent leur place dans certaines applications de motorisation d'ascenseurs lorsque l'on cherche une certaine compacité et une accélération rapide (immeuble de grande hauteur par exemple).

Rotor bobiné

Ce type de machines est réversible car elles peuvent fonctionner en régime moteur comme en régime alternateur. Pour les moyennes et grosses puissances, les moteurs synchrones à rotor bobiné, associé avec un variateur de vitesse, sont des machines performantes.

Comme la montre la figure ci-dessous, le rotor est composé d'un empilement de disques ferromagnétiques. Comme dans le stator du moteur, des enroulements sont logés dans des encoches pratiquées sur le rotor et reliés électriquement aux bagues de bout d'arbre. L'alimentation en courant continu s'effectue via l'ensemble bagues-balais.



4.3 Caractéristiques du moteur synchrone

4.3.1 Pilotage de la vitesse de rotation

Le pilotage de la vitesse de rotation du moteur synchrone est essentiel pour beaucoup d'applications.

La relation suivante permet de cerner quels sont les paramètres qui peuvent influencer la vitesse de rotation.

On a :

$$N_0 = N$$

Avec,

- N_0 = vitesse du champ tournant [tr/min].
- N = la vitesse de rotation de l'arbre du moteur [tr/min].

Ou :

$$N = 60.f / p$$

Avec,

- f = fréquence du réseau [Hz].
- p = le nombre de paires de pôles du stator.

On peut donc piloter la vitesse de rotation en intervenant sur :

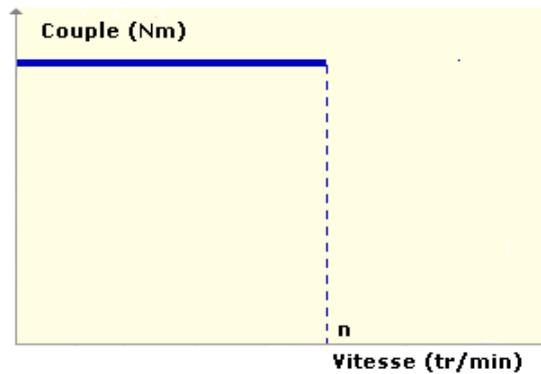
- Le nombre de paires de pôles (moteur à nombre de pôles variable),
- La fréquence du réseau.

A l'heure actuelle, le pilotage de la vitesse des moteurs synchrones se fait électroniquement grâce à des variateurs de vitesse. Pour cette raison, on ne parlera ici que du contrôle de la fréquence qui de loin la plus courante.

Vu la nécessité pour un moteur synchrone d'être démarré avec un système auxiliaire (le rotor ne peut pas "accrocher" un champ tournant statorique trop rapide de 3 000 [tr/min]), le variateur de fréquence associé au moteur synchrone permet de le démarrer avec une fréquence statorique faible voire nulle.

Sans perte de puissance, on peut piloter la vitesse de rotation du moteur en faisant varier la fréquence et la tension car la vitesse de rotation du champ tournant au niveau du stator change.

A remarquer que le couple d'un moteur synchrone ne change pas en fonction de la vitesse puisqu'il n'y a pas de glissement (contrairement au moteur asynchrone).



Variation de la vitesse à couple constant (moteur synchrone).

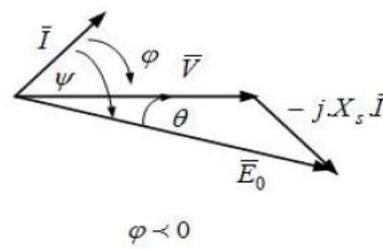
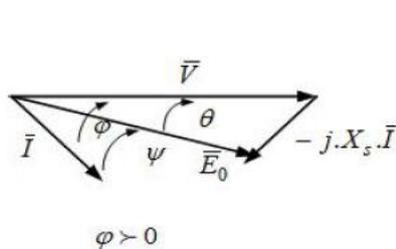
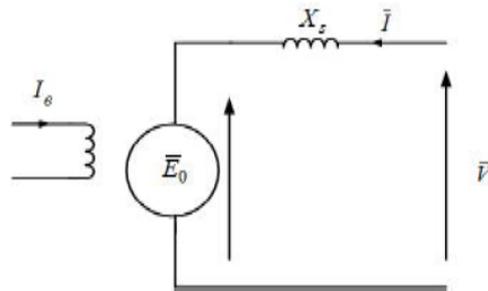
Le pilotage du moteur synchrone par un variateur de fréquence montre des intérêts certains, à savoir principalement :

- La limitation du courant de démarrage (de l'ordre de 1,5 fois le courant nominal),
- Un couple constant quelle que soit la vitesse du moteur.

4.4 Schéma équivalent du moteur synchrone

Schéma équivalent monophasé :

$$\bar{V} = \bar{E}_0 + j.X_s.\bar{I}$$



le vectoriel

Remarque l'angle interne θ est orienté de \bar{E}_0 vers \bar{V} ; il est positif dans le cas d'un moteur il est négatif le cas d'un alternateur

4.5 Fonctionnement en alternateur :

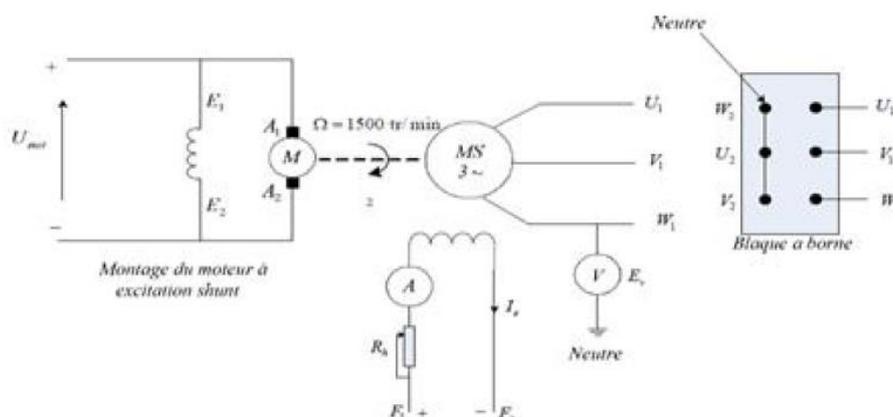
forces électromotrices induites déphasées l'une par rapport à l'autre d'un angle $2\pi/3$, si le flux magnétique est sinusoïdal, la force électromotrice l'est aussi. Elle a comme valeur efficace :

$$E = K_b \cdot N \cdot f \cdot \phi \quad (8.1)$$

avec : K_b : facteur de bobinage, N : Nombre des conducteurs par phase, f : Fréquence en Hz, ϕ : Flux utile par pôle

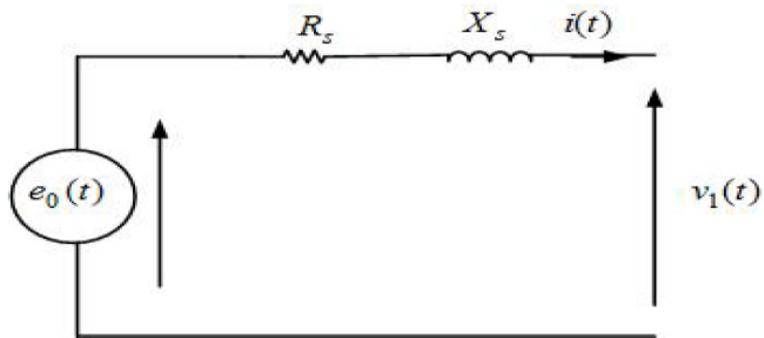
4.5.1 Caractéristique à vide

On entraîne le rotor à l'aide d'un moteur d'entraînement à sa vitesse de synchronisme et on l'alimente par une tension continue. On mesure le courant d'excitation I_e et la force électromotrice à vide E_0



4.5.2 Caractéristiques en charge :

Les trois enroulements sont identiques , donc ils possèdent la même schéma equivalent monophasé représenté par la figure suivante :



5 Exercice de déchiffrement d'une plaque signalétique de moteur :

3 PHASE INDUCTION MOTOR
ULTRA POWER SERIES

	MODEL NO. TB0014DFA		CONNECTIONS 4 5 6 7 8 9 1 2 3 ↓ ↓ ↓ LOW VOLTS 4 5 6 7 8 9 1 2 3 ↓ ↓ ↓ HIGH VOLTS
	VOLTS 208-230/460	AMP. 3.8-3.6/1.8	
HP 1	ENCL. ODP	FRAME NO. 143T	LOW VOLTS 4 5 6 7 8 9 1 2 3 ↓ ↓ ↓ HIGH VOLTS
RPM 1720	MAX. AMB. 40 °C	SERVICE FACTOR 1.15	
INS. B	TIME RATING CONT.	BRG. D.E. 6205ZZ	HIGH VOLTS 4 5 6 7 8 9 1 2 3 ↓ ↓ ↓
HZ 60	KVA CODE K	NO. O.D.E. 6205ZZ	
	NEMA F.L. EFF. 77	NEMA DESIGN B	
	DATE CODE 0396	SER# 001687411	

 **TATUNG CO.** MADE IN TAIWAN R.O.C.
4-20706

- 1) Déterminer la puissance que peut délivrer de ce moteur en W
- 2) Déterminer le couple maxi pouvant être transmis en N.m
- 3) Déterminer le nombre de paires de pôles du stator, le facteur de glissement
- 4) Déterminer la température maximale d'utilisation du moteur
- 5) Déterminer les tensions et courants maxi associés en fonction des couplages

6) Déterminer le type de construction du moteur :

Fermé ventilé : Un ventilateur est monté sur l'arbre du moteur pour forcer l'air à circuler sur la carcasse. La carcasse de ce moteur est souvent munie d'ailettes pour faciliter l'échange de chaleur. (TEFC: Totally Enclosed Fan Cooled)

Fermé non ventilé : Ce moteur ne possède aucune ventilation et est généralement de faible puissance. Dans certains cas, sa charge peut-être elle même un ventilateur à hélice qui permettra une ventilation supérieure au moteur fermé ventilé. (TEAO : Totally Enclosed Air-Over):

Antidéflagrant: ce moteur supporte des explosions de gaz internes et empêche l'inflammation de gaz externes.(TEEP : Totally Enclosed Explosion Proof)

Protégé contre les poussières inflammables: sa conception exclut l'introduction de poussières inflammables à l'intérieur du moteur.

7) Donner le type de service d'utilisation du moteur :

8) A l'aide du tableau ci-dessous, déterminer l'intensité au démarrage :

CODE	kVA/hp	CODE	kVA/hp
A	0,00 - 3,14	L	9,0 - 9,99
B	3,15 - 3,54	M	10,0 - 11,19
C	3,55 - 3,99	N	11,2 - 12,49
D	4,00 - 4,49	P	12,5 - 13,99
E	4,5 - 4,99	R	14,0 - 15,99
F	5,0 - 5,59	S	16,0 - 17,99
G	5,6 - 6,29	T	18,0 - 19,99
H	6,3 - 7,09	U	20,0 - 22,39
J	7,1 - 7,99	V	22,4 et plus
K	8,0 - 8,99		

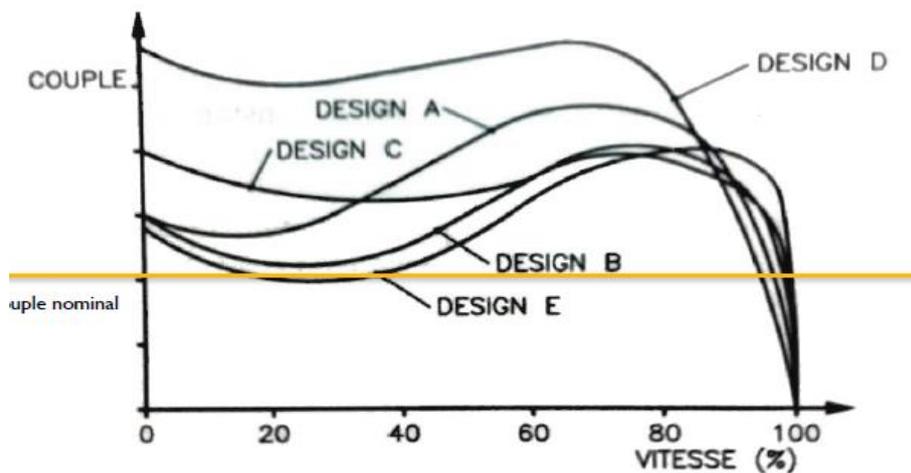
9) Déterminer le rendement du moteur :

10) Donner le facteur de service et expliquer ce que cela signifie :

11) Donner les références des roulements et où ils sont situés :

12) Caractéristiques couple vitesse :

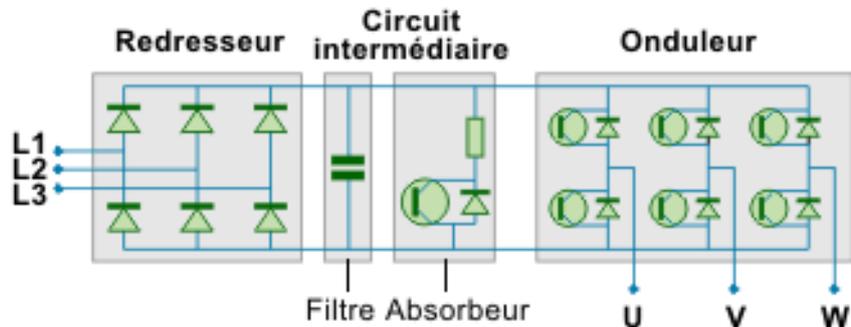
- Un des paramètres importants de sélection d'un moteur électrique est la caractéristique couple-vitesse.
- NEMA désigne par les lettres A, B, C, D et E les différents types de moteurs de 200 hp et moins.
- Cette désignation est utilisée pour les moteurs triphasés à cage d'écurieil seulement.



Type	Couple de démarrage et de décrochage	Courant	Glissement	efficacité	application
A	démarrage normal, décrochage élevé		3 à 5 %	moyenne	Ce type est moins utilisé à cause de son fort courant de démarrage.
B	démarrage normal, décrochage normal	Moins que A	3 à 5%	Moyenne à élevée	Ce type de moteur est le plus courant car il convient à presque toutes les applications.
C	démarrage élevé décrochage normal		1 à 5%	moyenne	Pour les applications qui nécessitent un couple de démarrage plus élevé.
D	démarrage très élevé	faible	5 à 8% Peux atteindre 25%	moyenne	Pour les applications du type de levage, presse avec gros volant d'inertie.
E	démarrage normal, décrochage normal Plus faible que B	Plus élevé que B	0,5 à 3%	élevée	Pour des applications nécessitant un couple de démarrage relativement faible comme des pompes centrifuges ou des ventilateurs

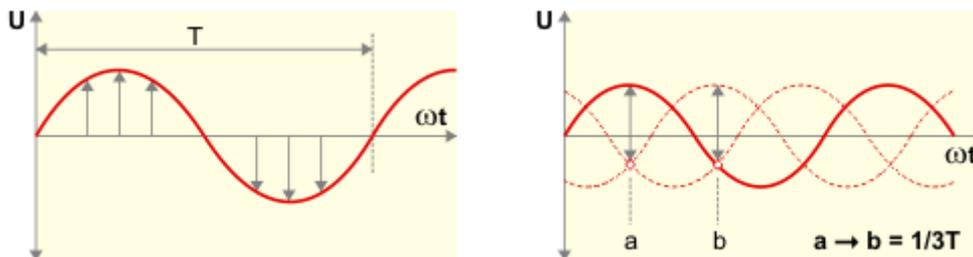
13) En déduire le couple au démarrage :

6 LES VARIATEURS DE VITESSE

6.1 Principe de base des variateurs de vitesse:

Cette technologie, devenue fiable, part toujours du même principe : à partir d'une source, la plupart du temps triphasée alternative, le variateur de vitesse va recréer en sortie :

- Une tension triphasée variable en fréquence et en amplitude pour les moteurs à courant alternatif.
- Une tension continue variable en amplitude pour les moteurs à courant continu.



Le variateur de vitesse est composé essentiellement :

- D'un redresseur qui, connecté à une alimentation triphasée (le réseau), génère une tension continue à ondulation résiduelle (le signal n'est pas parfaitement continu). Le redresseur peut être de type commandé ou pas,
- D'un circuit intermédiaire agissant principalement sur le "lissage" de la tension de sortie du redresseur (améliore la composante continue). Le circuit intermédiaire peut aussi servir de dissipateur d'énergie lorsque le moteur devient générateur,
- D'un onduleur qui engendre le signal de puissance à tension et/ou fréquence variables,
- D'une électronique de commande pilotant (transmission et réception des signaux) le redresseur, le circuit intermédiaire et l'onduleur.

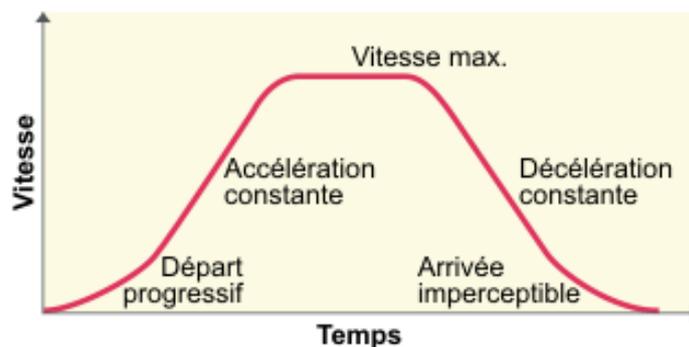
Le variateur de vitesse est principalement caractérisé selon la séquence de commutation qui commande la tension d'alimentation du moteur. On a :

- Les variateurs à source de courant (CSI),
- Les variateurs à modulation d'impulsions en amplitude (PAM),
- Les variateurs à modulation de largeur d'impulsion (PWM/VVC).

6.2 Fonction des variateurs de vitesse:

Parmi la multitude de possibilités de fonctions qu'offrent les variateurs de vitesse actuels, on épinglera :

- L'accélération contrôlée,
- La décélération contrôlée,
- La variation et la régulation de vitesse,
- L'inversion du sens de marche,
- Le freinage d'arrêt.



L'accélération contrôlée

Le profil de la courbe de démarrage d'un moteur peut être soit linéaire ou en forme de "s". Ce profil ou "rampe" est la plupart du temps ajustable en permettant de choisir le temps de mise en vitesse de la charge.

La décélération contrôlée

Les variateurs de vitesse permettent une décélération contrôlée sur le même principe que l'accélération. Dans certains cas, cette fonction est capitale dans le sens où l'on ne peut pas se permettre de simplement mettre le moteur hors tension et d'attendre son arrêt complet suivant l'importance du couple résistant (le poids de la charge par exemple qui varie en permanence).

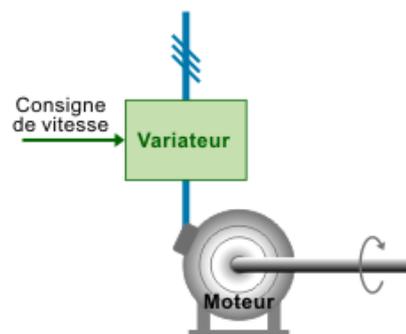
On distingue, au niveau du variateur de vitesse deux types de freinage :

- En cas de décélération désirée plus importante que la décélération naturelle, le freinage peut être électrique soit par renvoi d'énergie au réseau d'alimentation, soit par dissipation de l'énergie dans un système de freinage statique.
- En cas de décélération désirée moins importante que la décélération naturelle, le moteur peut développer un couple moteur supérieur au couple résistant de la charge et continuer à l'entraîner jusqu'à l'arrêt.

La variation et la régulation de vitesse

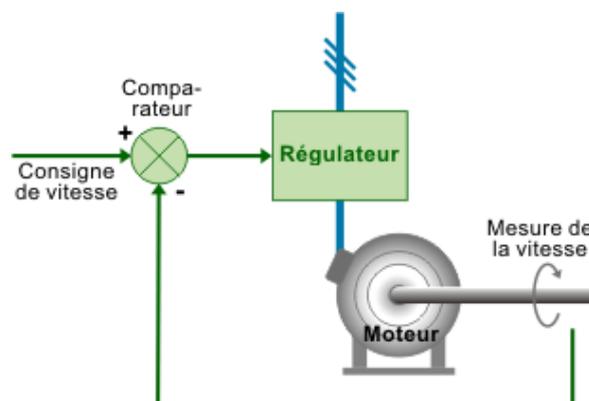
Parmi les fonctionnements classiques des variateurs de vitesse, on distingue :

- La variation de vitesse proprement dite où la vitesse du moteur est définie par une consigne d'entrée (tension ou courant) sans tenir compte de la valeur réelle de la vitesse du moteur qui peut varier en fonction de la charge, de la tension d'alimentation, ... On est en boucle "ouverte" (pas de feedback).



Boucle ouverte.

- La régulation de vitesse où la consigne de la vitesse du moteur est corrigée en fonction d'une mesure réelle de la vitesse à l'arbre du moteur introduite dans un comparateur. La consigne et la valeur réelle de la vitesse sont comparées, la différence éventuelle étant corrigée. On est en boucle "fermée".



Boucle fermée.

L'inversion du sens de marche

Sur la plupart des variateurs de vitesse, il est possible d'inverser automatiquement le sens de marche. L'inversion de l'ordre des phases d'alimentation du moteur de l'ascenseur s'effectue :

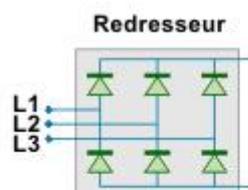
- Soit par inversion de la consigne d'entrée,
- Soit par un ordre logique sur une borne,
- Soit par une information transmise par une connexion à un réseau de gestion.

Le freinage d'arrêt

C'est un freinage de sécurité pour certains cas :

- Avec des moteurs asynchrones, le variateur de vitesse est capable d'injecter du courant continu au niveau des enroulements statoriques et par conséquent stopper net le champ tournant; la dissipation de l'énergie mécanique s'effectuant au niveau du rotor du moteur (danger d'échauffement important).
- Avec des moteurs à courant continu, le freinage s'effectue au moyen d'une résistance connectée sur l'induit de la machine

6.3 Le redresseur:



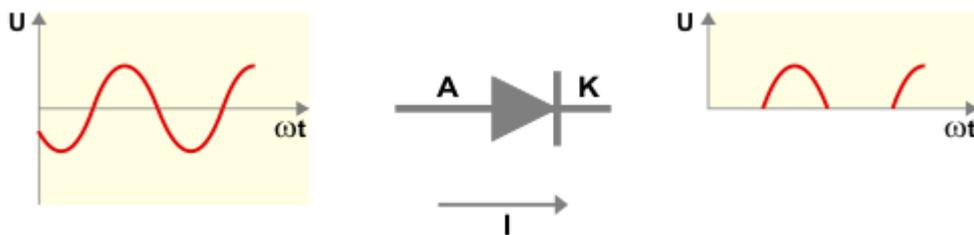
Redresseur triphasé.

Les systèmes électriques sont généralement alimentés par un réseau triphasé alternatif à fréquence fixe (50 Hz). La fonction du redresseur au sein du variateur de vitesse est de transformer la tension triphasée alternative en tension continue monophasée. Cette opération se réalise par l'utilisation :

- Soit d'un pont de diodes, le redresseur est "non-commandé",
- Soit d'un pont de thyristors, alors le redresseur est commandé.

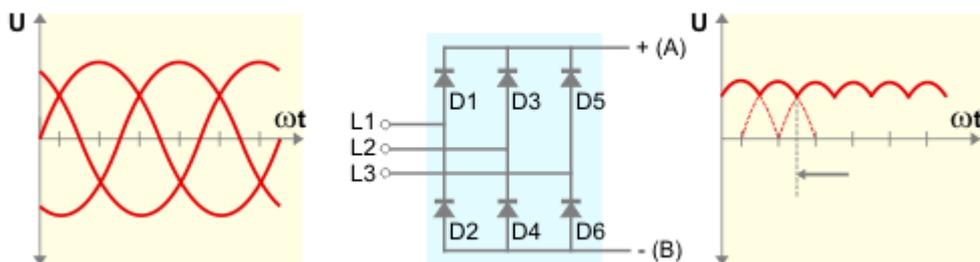
Le redresseur non commandé

Comme la montre la figure ci-dessous, des deux alternances d'une tension monophasée alternative (positive et négative), seule l'alternance positive passe à travers la diode entre les électrodes couramment appelées "anode" et "cathode"; on dit que la diode est "passante".

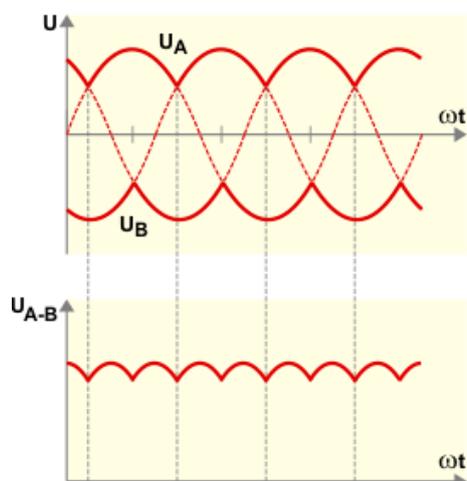


Pour obtenir une tension continue à la sortie du redresseur, il est nécessaire de trouver un système qui permette d'exploiter les deux alternances ; c'est le pont de diodes.

Dans un redresseur triphasé non-commandé, le pont de diodes permet, comme le montre la figure ci-dessus, de générer une tension continue en redressant l'alternance négative de chacune des trois tensions composées. On voit que la tension de sortie n'est pas tout à fait continue et comporte une ondulation résiduelle.

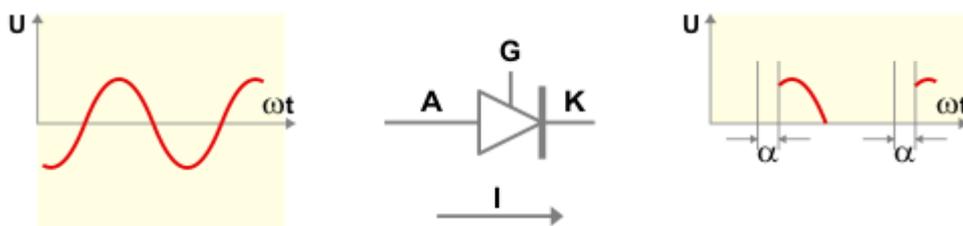


La tension à ondulation résiduelle sortant du redresseur a une valeur moyenne de l'ordre de 1,35 fois la tension du réseau.



Le redresseur commandé

Dans le redressement commandé d'une tension alternative, la diode est remplacée par le thyristor qui possède la particularité de pouvoir contrôler le moment où il deviendra "passant" dans l'alternance positive. C'est la troisième électrode, appelée "gâchette", qui, lorsqu'elle est alimentée sur commande par la régulation du redresseur, devient conductrice. Tout comme la diode, le thyristor est "bloquant" durant l'alternance "négative".

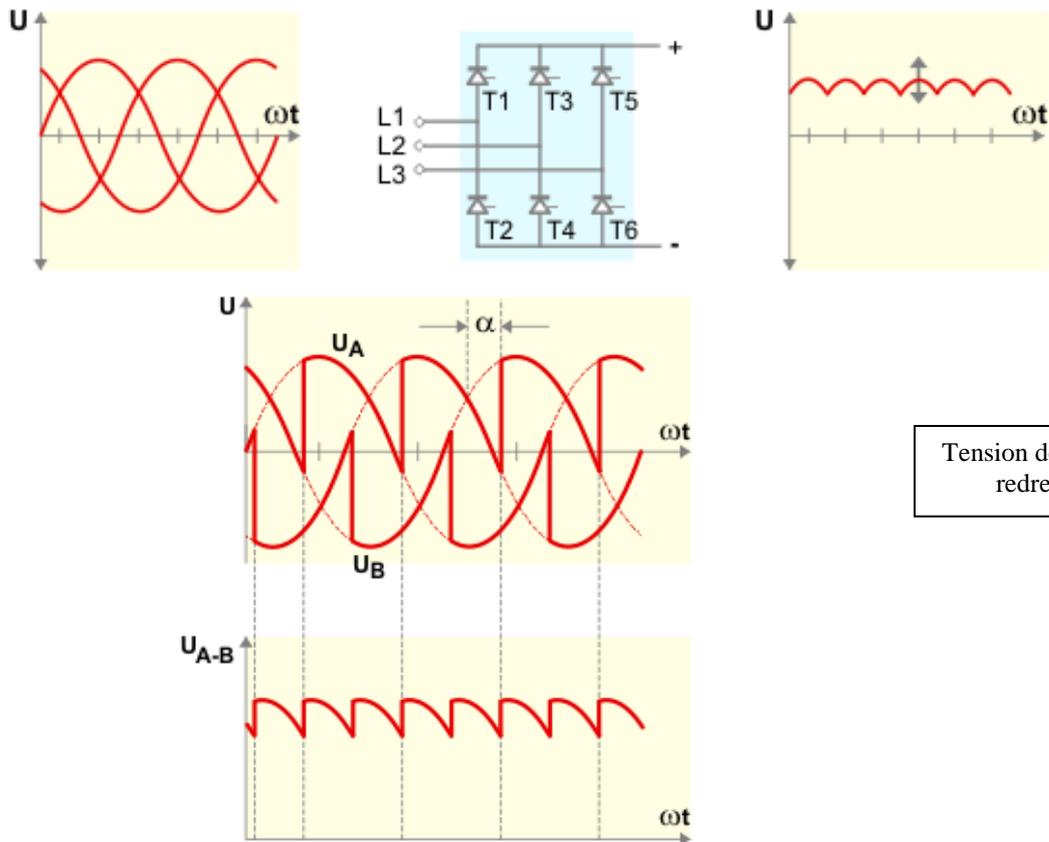


On voit tout de suite l'intérêt du thyristor par rapport à la diode : on peut faire varier la valeur de la tension moyenne de sortie en contrôlant le moment où l'impulsion sera donnée sur la gâchette pour rendre le thyristor "passant".

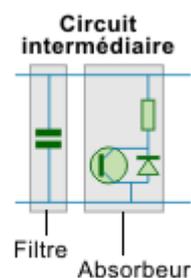
Dans un redresseur triphasé commandé, le pont de thyristors permet, comme le montre la figure ci-dessus :

- De générer une tension continue en redressant l'alternance négative de chacune des trois tensions composées. On voit que la tension de sortie n'est pas tout à fait continue et comporte une ondulation résiduelle.

De faire varier le niveau de tension moyenne à la sortie du redresseur.



6.4 Le circuit intermédiaire:



Circuit auxiliaire.

Ce circuit joue plusieurs rôles suivant les options prises sur le type de variateur dont principalement le lissage en courant ou en tension du signal de sortie du redresseur et le contrôle du niveau de tension ou de courant d'attaque de l'onduleur. Il peut aussi servir à :

- Découpler le redresseur de l'onduleur,
- Réduire les harmoniques,
- Stocker l'énergie due aux pointes intermittentes de charge.

On différencie le circuit intermédiaire :

- À courant continu variable lorsque le redresseur est commandé (variation de la tension de sortie du redresseur).
- À tension continue variable ou constante lorsque le redresseur est respectivement commandé ou pas.
- À tension variable lorsque le redresseur est non-commandé.

Le circuit intermédiaire à courant continu variable

Ce type de circuit intermédiaire caractérise les variateurs à source de courant. Il est composé d'une bobine (ou self) de lissage "passe bas" (filtration des basses fréquences) permettant de réduire l'ondulation résiduelle. En d'autres termes la bobine transforme la tension de sortie du redresseur à ondulation résiduelle en un courant continu.

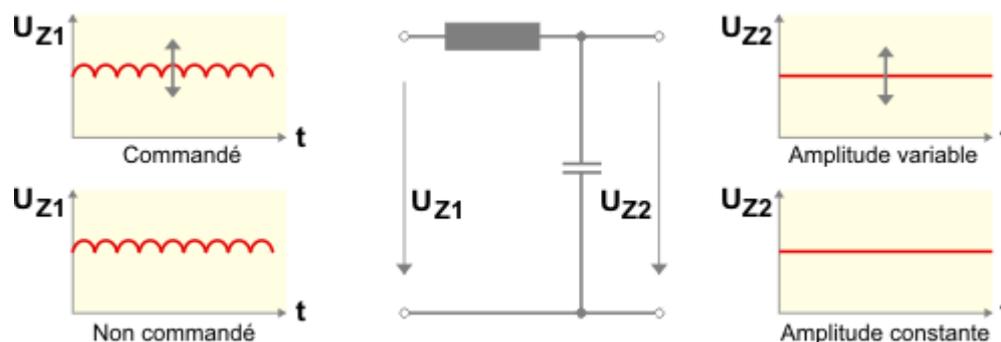


Le circuit intermédiaire à tension continue constante ou variable

Ce type de circuit intermédiaire caractérise les variateurs à source de tension. Il est composé d'une bobine (ou self) de lissage "passe bas" (filtration des basses fréquences) et d'un condensateur "passe haut" (filtration des hautes fréquences) permettant de réduire l'ondulation résiduelle.

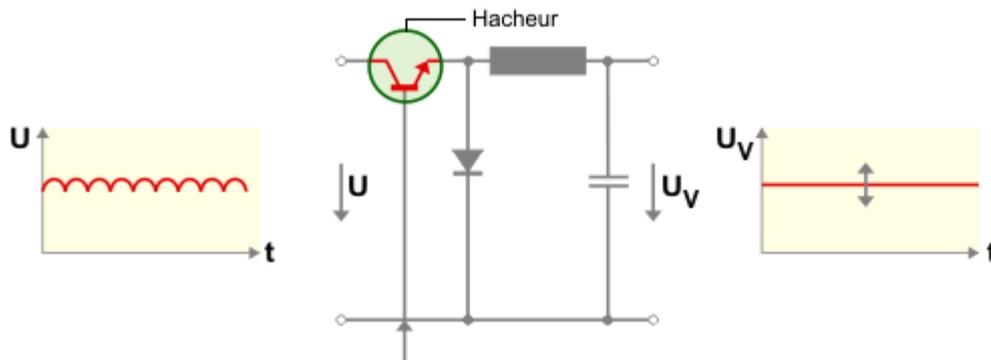
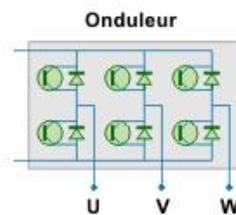
Pour un redresseur commandé, le circuit intermédiaire transforme la tension de sortie à ondulation résiduelle du redresseur en tension continue d'amplitude variable.

Pour un redresseur non-commandé, la tension à l'entrée de l'onduleur est une tension continue dont l'amplitude est constante.



Le circuit intermédiaire à tension variable

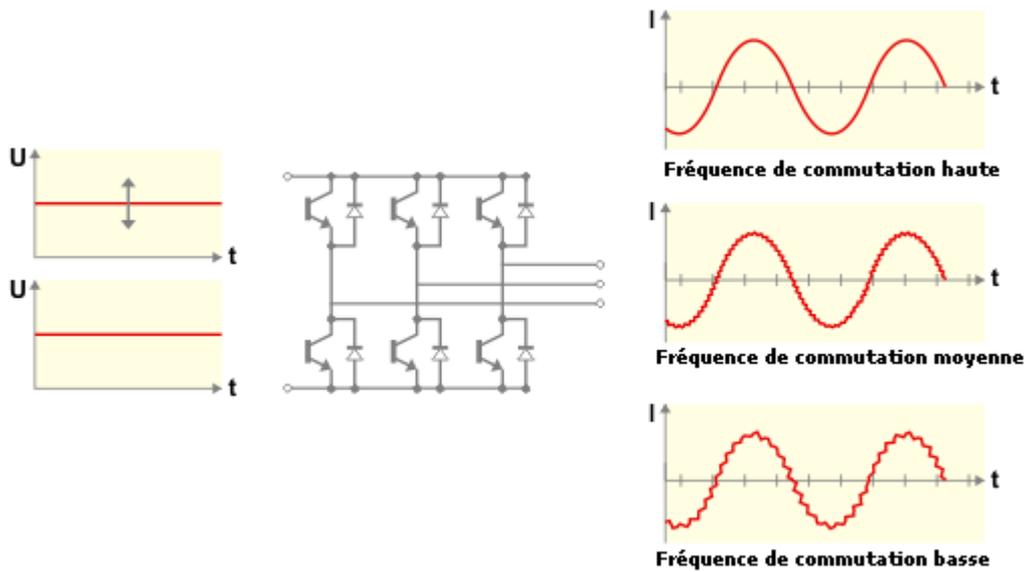
A l'entrée du filtre est ajouté un hacheur composé d'un transistor et d'une diode "roue libre". Dans ce cas, le circuit intermédiaire transforme la tension continue de sortie du redresseur à ondulation résiduelle en une tension carrée lissée par le filtre. Il en résulte la création d'une tension variable suivant que le pilote du hacheur rende le transistor "passant" ou pas.

6.5 L'onduleur:

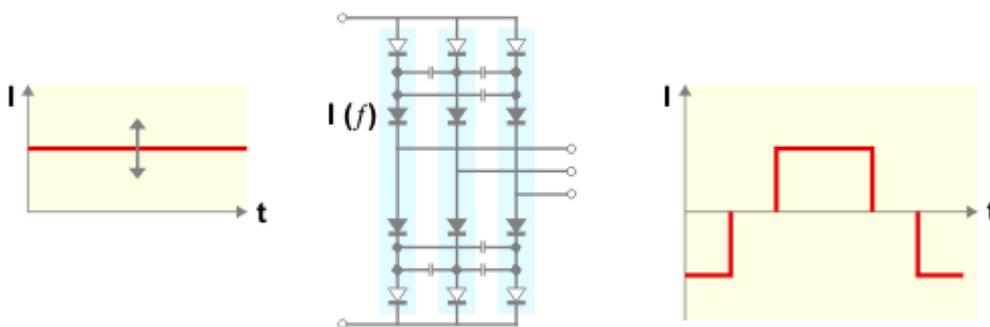
L'onduleur constitue la dernière partie du variateur de vitesse dans le circuit puissance.

Alimenté à partir du circuit intermédiaire par :

- Une tension continue variable ou constante,



- Un courant continu variable,



Onduleur pour courant intermédiaire continu variable.

L'onduleur fournit au moteur une grandeur variable en tension ou en fréquence ou les deux en même temps suivant le cas. En effet, une alimentation de l'onduleur :

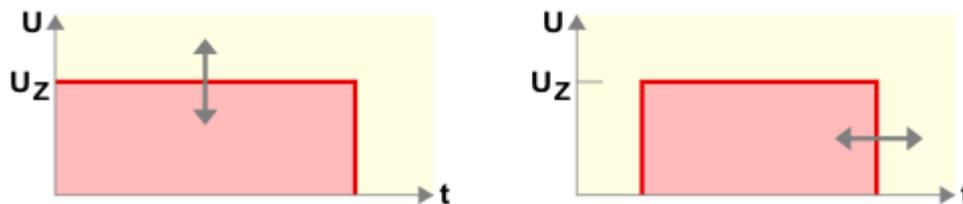
- En tension ou en courant continue variable, lui permet de réguler la vitesse du moteur en fréquence.
- En tension continue constante, lui impose de réguler la vitesse du moteur en tension et en fréquence.

Bien que les fonctionnements des onduleurs soient différents, la technologie reste plus ou moins identique. Pour une raison de souplesse de commande en fréquence, les onduleurs sont maintenant équipés de transistors haute fréquence plutôt que de thyristors. Ce type de transistor de puissance peut être allumé et éteint très rapidement et, par conséquent, couvrir une large plage de fréquence (entre 300 Hz et 20 kHz).

6.6 Modes de fonctionnement de l'onduleur:

On distingue plusieurs modes de fonctionnement des onduleurs en fonction principalement du signal de sortie du circuit intermédiaire :

- le fonctionnement en modulation d'impulsion en amplitude (*PAM : Pulse Amplitude Modulation*),
- le fonctionnement en modulation de largeur d'impulsion (*PWM : Pulse Width Modulation*).

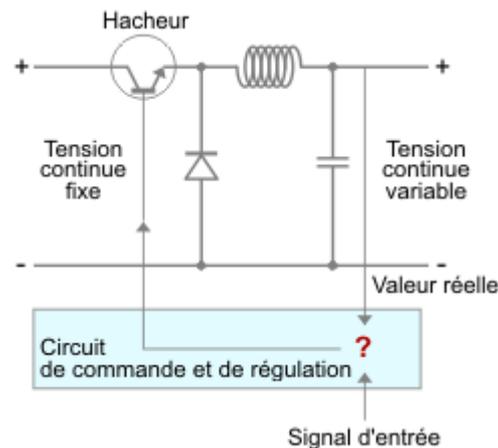


Modulation d'impulsion en amplitude

Ce type de modulation est utilisé lorsque le variateur de vitesse est à tension intermédiaire variable.

Comme on l'a vu dans le circuit intermédiaire :

- Pour les variateurs avec redresseurs non-commandés, un hacheur est nécessaire pour générer une tension variable au niveau de l'onduleur.
- Pour les variateurs avec redresseurs commandés, la variation de l'amplitude de la tension est générée par le redresseur lui-même.



Quel que soit le système, l'onduleur reçoit à son entrée une tension continue variable en amplitude. Dans ce cas, l'onduleur, lui, ne fait varier que la fréquence d'allumage et d'extinction des thyristor ou des transistors en fonction du niveau de la tension d'entrée pour recréer une tension sinusoïdale (dans le cas d'un moteur à courant alternatif).

Modulation de largeur d'impulsion (PWM)

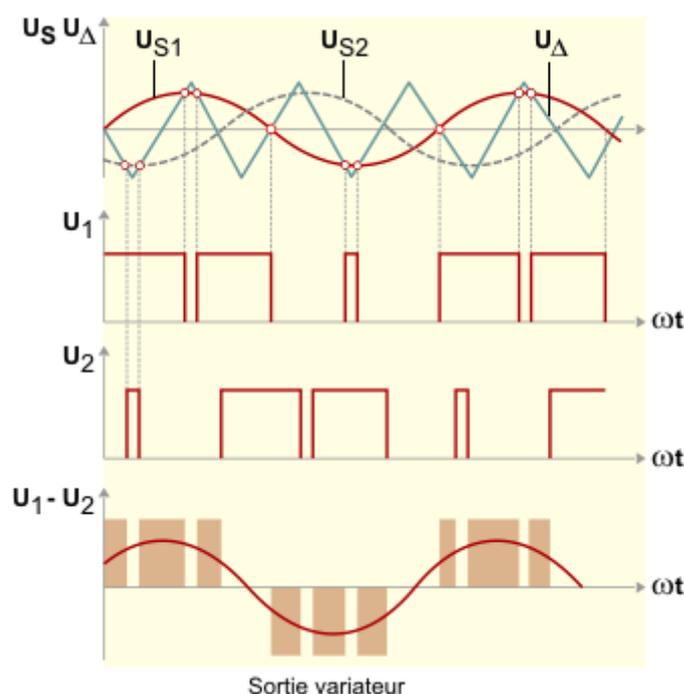
Ce type de modulation est souvent utilisé pour générer une tension triphasée à fréquence et tension variables.

Il existe 3 manières de gérer la commutation des thyristors ou des transistors de puissance :

- PWM à commande par sinusoïde,
- PWM synchrone pour limiter les harmoniques,
- PWM asynchrone pour améliorer la réaction du moteur à toute modification rapide de la commande du variateur de fréquence.

Dans un souci de clarté, seule la PWM à *commande par sinusoïde* est expliquée ci-dessous :

Le principe de commande de l'onduleur réside dans l'utilisation d'un comparateur de tensions. Ce comparateur superpose à trois tensions sinusoïdales de référence une tension de forme triangulaire. La fréquence des trois sinusoïdes de référence correspond à celle des tensions souhaitées à la sortie de l'onduleur. Les intersections entre les sinusoïdes et l'onde triangulaire détermine l'allumage ou l'extinction des thyristors (ou des transistors de puissance) selon le cas. Il en résulte un temps d'impulsion "passante" ou "non-passante" variable reconstituant un courant sinusoïdal en sortie du variateur de vitesse.



Principe PWM à commande par sinusoïde.

Attention, dans ce type de commande, il faudra être attentif à la génération d'harmoniques responsables de perturbation du réseau amont. Dans ce cas, une commande PWM synchrone limite la création d'harmoniques.

6.7 Le circuit de commande

Le circuit de commande ne fait pas partie du circuit puissance du variateur de vitesse. Ce circuit doit garantir quatre fonctions essentielles :

1. La commande des semi-conducteurs du variateur de vitesse.
2. L'échange d'informations de commande, de régulation et d'analyse avec les périphériques.
3. Le contrôle des défauts (interprétation et affichage).
4. La protection du variateur de vitesse et du moteur.

La venue des microprocesseurs a permis d'accroître la vitesse d'exécution des informations de commande et de régulation du circuit de commande vis à vis des autres circuits (circuit intermédiaire, onduleur, ...).

Le circuit de commande est donc en mesure de déterminer le schéma optimum d'impulsions des semi-conducteurs pour chaque état de fonctionnement du moteur par rapport à la charge, au réseau, aux consignes de commande, ...

La régulation de vitesse de moteurs triphasés à courant alternatif évolue selon deux principes de commandes différents :

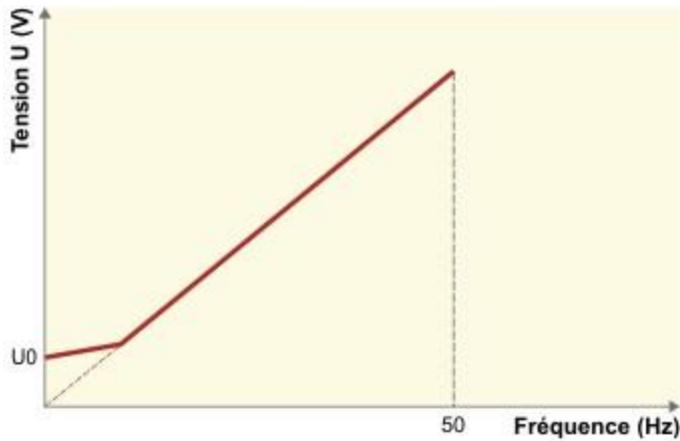
- la commande U/f (Scalaire),
- la commande vectorielle de flux (*VVC : Voltage Vector Control*).

Ces principes déterminent la manière de programmation des algorithmes de commande et de régulation des variateurs de vitesses. Les deux méthodes présentent des avantages en fonction des exigences spécifiques des performances (couple, vitesse, ...) et de la précision de l'entraînement.

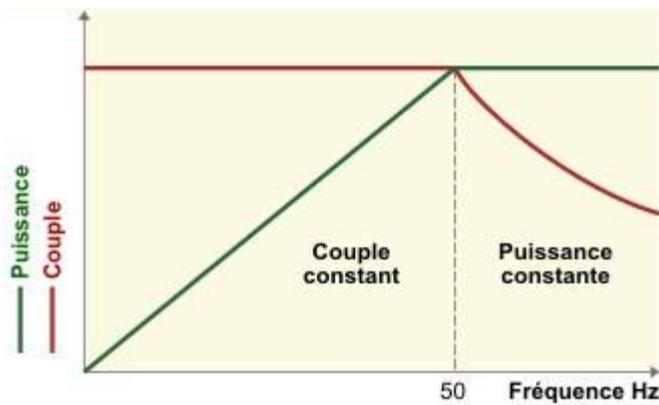
La commande U/f (scalaire)

La commande U/f se base sur la mesure de grandeurs scalaires (valeurs d'amplitude en tension et en fréquence). C'est le système de commande de base des variateurs de fréquence standards.

Afin de garder un flux constant dans le moteur et donc aussi une variation de vitesse à couple constant la tension et la fréquence varient proportionnellement jusqu'à la fréquence nominale du moteur (50 Hz). Lorsque la tension nominale est atteinte, la tension ne sachant plus augmenter, il est toujours possible d'augmenter la fréquence; dans ce cas la variation se fait à puissance constante, le couple diminue avec la vitesse. Ce mode de fonctionnement est intéressant pour des charges à couple constant tels que les ascenseurs. En effet, le couple moteur "colle" mieux au profil du couple résistant ; ce qui signifie que les consommations qui en découlent sont moindres.

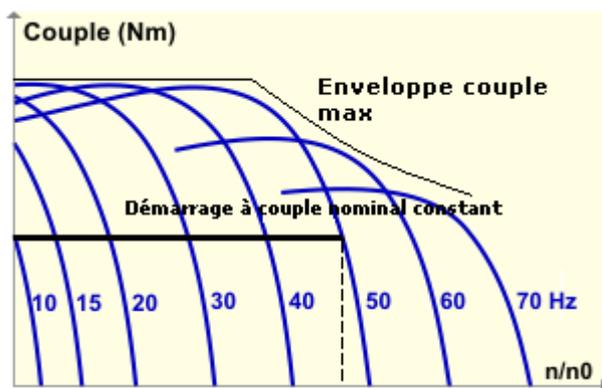


Fonctionnement U/f constant.



Fonctionnement à couple constant sous une fréquence de 50 Hz.

La figure ci-dessous montre les profils des courbes du couple en fonction de la vitesse pour différents rapports U/f :



La commande U/f a les avantages et les inconvénients suivants :

Avantages :

- Facilité d'adaptation du variateur de vitesse au moteur.
- Supporte aisément les variations de charge dans toute la plage de vitesses.
- Le couple moteur reste plus ou moins constant en fonction de la vitesse.
- ...

Inconvénients :

- Plage de régulation de la vitesse limitée à 1/20.
- À faible vitesse, pas de compensation par rapport au glissement et à la gestion de la charge.

La commande vectorielle de tension (ou de flux)

Pour ce type de commande, il est nécessaire de fournir des indications précises sur les paramètres du moteur (encodage de la plaque signalétique).

La *commande vectorielle en tension (VVC : Voltage Vector Control)* agit selon le principe de calcul de la magnétisation optimale du moteur à différentes charges à l'aide de paramètres de compensation permettant de contrôler le glissement et la charge du moteur.

Comme son nom l'indique, la commande vectorielle en tension travaille avec les vecteurs de tension à vide et de compensation par rapport à la variation de la charge.

La *commande vectorielle à champ orienté* travaille avec les valeurs des courants actifs, de magnétisation (flux) et du couple. Par un modèle mathématique approprié, il est possible de déterminer le couple nécessaire au moteur en fonction des vecteurs du flux statorique et du courant rotorique et ce afin d'optimiser et réguler le champ magnétique et la vitesse du moteur en fonction de la charge.

Avantages :

- Bonne réaction aux variations de charge.
- Régulation précise de la vitesse.
- Couple intégral à vitesse nulle.
- Performance semblable aux entraînements à courant continu.
- Réaction rapide aux variations de vitesse et large plage de vitesses (1/100).
- Meilleure réaction dynamique aux variations de sens de rotation.
- Une seule stratégie de commande pour toute la plage de vitesse est nécessaire.

Inconvénients :

- Nécessite de connaître les caractéristiques précises du moteur.
- ...