



Office de la Formation Professionnelle
et de la Promotion du Travail

Technicien Spécialisé

Génie Electrique

Tronc commun

Manuel de cours

Module 5

Les moteurs électriques à CC et à CA



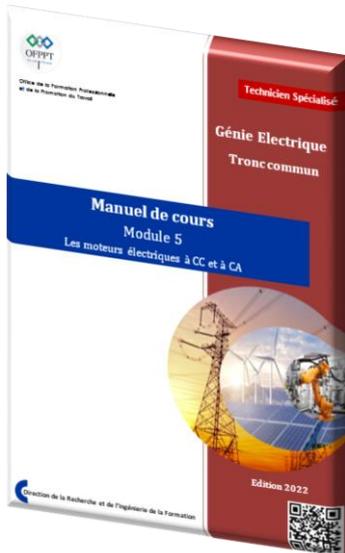
Edition 2022



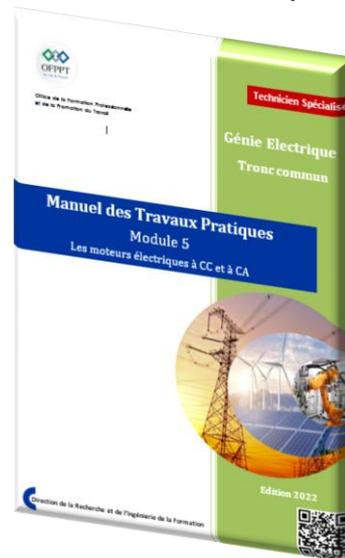
Avant-propos

Les manuels de cours, de travaux pratiques et le guide e-learning sont téléchargeables à partir de la plateforme e-learning OFPPPT moyennant les codes QR suivants :

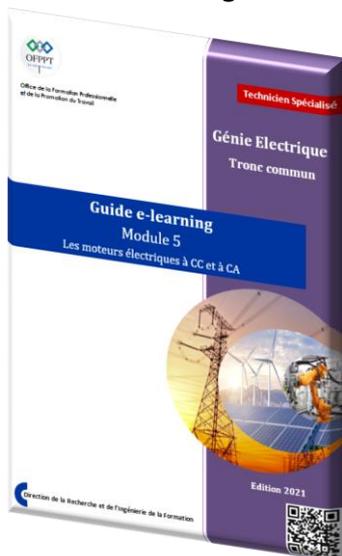
Manuel de cours



Manuel des travaux pratiques



Guide e-learning



SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	2
SOMMAIRE.....	3
COMPETENCES-CIBLES ET OBJECTIFS OPERATIONNELS	6
CHAPITRE I : CARACTÉRISTIQUES DES MOTEURS ÉLECTRIQUES CA ET CC.....	8
1. L'INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE	9
1.1 La loi d'Ørsted	9
1.2 La découverte de l'induction	10
1.3 Différence de potentiel induite dans un conducteur en mouvement	11
1.4 Loi d'induction de FARADAY	15
1.5 Le champ électrique induit.....	23
1.6 La loi de LENZ	28
1.7 Application de la loi d'induction de FARADAY.....	32
1.8 Résumé des équations	34
2. FONCTIONNEMENT DES MOTEURS ASYNCHRONES.....	35
2.1 Introduction : Différents types de machines électriques	35
2.2 Construction des moteurs asynchrones	35
2.3 Principe de fonctionnement du moteur asynchrone	46
2.4 Le glissement, et la vitesse de synchronisme	50
2.5 Couplage des enroulements statoriques du moteur asynchrone.....	52
2.6 Moteur triphasé asynchrone à cage raccordé en monophasé	53
3. FONCTIONNEMENT DES MOTEURS A COURANT CONTINU.....	61
3.1 Constitution d'une machine à courant continu	61
3.2 Principe de fonctionnement.....	69
3.3 Caractéristiques du moteur à courant continu	72
3.4 Excitation des moteurs à courant continu	75
3.5 Avantages et inconvénients d'un moteur à courant continu	79
4. FONCTIONNEMENT DES MOTEURS SYNCHRONES.....	86
4.1 Les types des moteurs synchrones	86
4.2 Démarrage – Réglage de la vitesse des moteurs synchrones	93

5. CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DES MOTEURS ELECTRIQUES	97
5.1 Principales caractéristiques.....	97
5.2 Caractéristiques spécifiques : classe d'isolement - classe de rendement - Services types.....	99
5.3 Bilan de puissance et rendement d'un moteur électrique (cas du moteur asynchrone)	102
5.4 Facteur de puissance.....	106
5.5 Tableau comparatif des différents types de moteurs électriques	110
6. AUTRES TYPES DE MOTEURS ELECTRIQUES.....	115
6.1 Moteur asynchrone à deux vitesses (moteur DALHANDER)	115
6.2 Moteur universel	116
6.3 Moteur pas à pas	121
CHAPITRE II: SCHEMAS DE CABLAGE DES MOTEURS ELECTRIQUES.....	130
7. RAPPEL SUR LES COMPOSANTES PRINCIPALES D'UNE INSTALLATION ELECTRIQUE INDUSTRIELLE	131
7.1 Constitution des installations électriques industrielles	131
7.2 Les appareils de commande, de signalisation et de protection	131
8. SCHEMAS DE MONTAGE DES MOTEURS ELECTRIQUES	137
8.1 Limitations aux démarrages	137
8.2 Démarrage direct (DOL)	137
8.3 Démarrage étoile/triangle	146
8.4 Démarrage par élimination de résistances statoriques	151
8.5 Démarrage par élimination de résistances rotoriques.....	153
8.6 Démarreurs progressifs.....	155
8.7 Démarrage avec un variateur de vitesse	157
CHAPITRE III: PROCÉDURES ET NORMES D'INSTALLATION DES MOTEURS ÉLECTRIQUES..	158
9. PROCEDURES D'INSTALLATION DES MOTEURS ELECTRIQUES	159
9.1 Consignes de sécurité.....	159
9.2 Préparation préalable	159
9.3 Techniques de mise en place.....	162
9.4 Protections des moteurs	169
9.5 Connexion électrique	170
10. VERIFICATION DE LA QUALITE DES TRAVAUX D'INSTALLATION DES MOTEURS ELECTRIQUES	175
10.1 Mesure d'isolement	175
10.2 Vérification des conditions de ventilation	176
10.3 Alignement	177
11. PROCEDURES DE DEMARRAGE ET DE MISE EN SERVICE DES MOTEURS ELECTRIQUES	180
11.1 Contrôle préliminaire avant le démarrage (Pre- Commissioning)	180
11.2 Démarrage (Commissioning)	180

12. NORMES APPLICABLES AUX MOTEURS ELECTRIQUES.....	182
12.1 Définitions	182
12.2 Tableaux de normes.....	183
12.3 Sens de rotation.....	185
12.4 Degrés de protection : code IP/code IK	186
12.5 Tolérances.....	186
12.6 Refroidissement.....	187
12.7 Dispositions de montage IM.....	188
12.8 Normes de contrôle vibratoire	189
BIBLIOGRAPHIE	192

COMPETENCES-CIBLES ET OBJECTIFS OPERATIONNELS

Module 5 : Les moteurs électriques à CC et à CA

Code : GETC – 05

Durée : 60 heures

ENONCE DE LA COMPETENCE

Analyser le fonctionnement des moteurs électriques à CC et à CA

CONTEXTE DE REALISATION

- Individuellement
- À partir de :
 - Directives ;
 - Cahier des charges d'une installation équipée de moteurs électriques
 - Schémas de puissance et de de commande ;
 - Dossier constructeur (manuel opératoire, manuel maintenance ...)
 - Simulation de problème de dysfonctionnement.
 - Normes et standards marocain et internationaux
 - Procédures de sécurité
- À l'aide :
 - Moteurs à courant continu
 - Moteurs à courant alternatif
 - Appareillage électrique pour circuits de puissance et commande
 - Banc d'essais pour moteurs électriques
 - Appareils de mesure (ampérage, vibration, température, isolement ...)

CRITÈRES GÉNÉRAUX DE PERFORMANCE

- Pertinence de la terminologie utilisée.
- Utilisation appropriée de l'outillage et de l'équipement
- Montage soigné et propre.
- Utilisation correcte des instruments de mesures.
- Précision des mesures
- Respect des tolérances
- Respect des règles de santé et de sécurité au travail.

OBJECTIF OPÉRATIONNEL

ÉLÉMENTS DE LA COMPÉTENCE	CRITÈRES PARTICULIERS DE PERFORMANCE
A. Interpréter le cahier des charges des travaux d'installation des moteurs électriques	<ul style="list-style-type: none"> • Interprétation judicieuse des éléments du cahier des charges et des directives • Interprétation juste de l'information technique sur le type de moteur, et des modes de fonctionnement • Analyse juste des plans de détail • Interprétation correcte du schéma de câblage
B. Choisir les appareillages de protection et de commande nécessaires à l'installation du moteur électrique.	<ul style="list-style-type: none"> • Sélection minutieuse des dispositifs de protection du circuit de puissance • Choix approprié des dispositifs de commande, des coffrets, des câbles et des canalisations. • Choix approprié de l'outillage.
C. Installer un moteur électrique	<ul style="list-style-type: none"> • Détermination judicieuse des modes de fixation • Choix judicieux de l'emplacement du moteur électrique, de la boîte de commande, du tableau et des canalisations. • Respect de la technique de fixation. • Installation correcte des câbles et des canalisations. • Repérage conforme des conducteurs.
D. Vérifier la qualité des travaux d'installation des moteurs électriques	<ul style="list-style-type: none"> • Conformité de l'installation au cahier des charges • Exécution correcte des tests de continuité. • Mise sous tension correcte. • Respect de la procédure de démarrage. • Utilisation appropriée des instruments de mesure. • Vérification appropriée de la tension, du courant et de la puissance. • Vérification appropriée du fonctionnement des commandes, des relais de commande ou des commandes électroniques. • Précision des mesures • Application minutieuse des techniques de vérification • Respect des règles de santé et de sécurité • Rangement approprié des outils. • Nettoyage approprié de l'aire de travail. • Rédaction correcte du rapport d'installation ou de la fiche d'intervention.

Chapitre I

Caractéristiques des moteurs électriques CA et CC

1. L'induction électromagnétique

1.1 La loi d'Ørsted

En physique et en génie électrique, la loi d'Ørsted décrit le fait qu'un circuit parcouru par un courant électrique constant crée un champ magnétique dans son voisinage. Ce phénomène a été découvert le 21 avril 1820, par le physicien danois Hans Christian Ørsted (1777-1851), quand il a remarqué que l'aiguille d'une boussole à côté d'un fil parcouru par un courant subissait un moment tendant à la tourner de sorte que l'aiguille soit perpendiculaire au fil. Après investigation du phénomène, Ørsted détermina la loi mathématique qui régit ce moment, qui est maintenant appelée loi d'Ørsted. Cette découverte d'Ørsted a été le premier lien identifié entre l'électricité et le magnétisme, et est la première des deux lois qui lient ces deux phénomènes ; l'autre étant la loi de Faraday de l'induction.

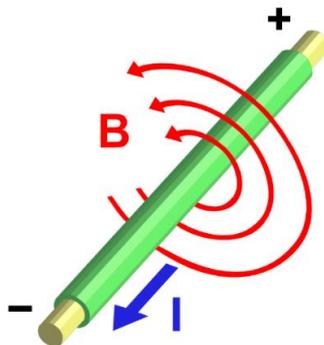
1.1.1 Règles d'Ørsted

Ørsted constata que, pour un fil conducteur rectiligne porteur d'un courant électrique constant :

- Les lignes de champ magnétique s'enroulent autour du fil conducteur ;
- Les lignes de champ magnétique se situent dans un plan perpendiculaire au fil ;
- Si le sens du courant est inversé, la direction de la force magnétique s'inverse ;
- L'intensité du champ magnétique est directement proportionnelle à l'amplitude du courant ;
- L'intensité du champ magnétique est en tout point inversement proportionnelle à la distance de ce point par rapport au fil.

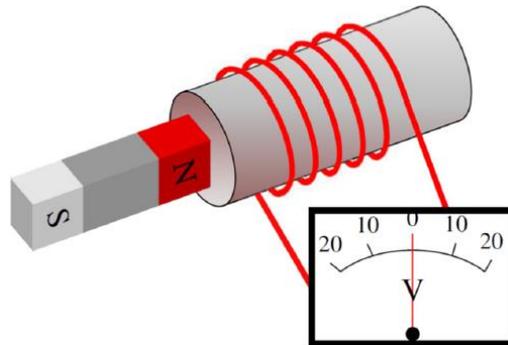
D'après la loi d'Ørsted, la contribution $d\vec{B}$ au champ magnétique du point P d'un élément infinitésimal $d\vec{l}$, situé au point Q et parcouru par le courant I, est :

$$d\vec{B}_{(P)} = \frac{\mu_0}{4\pi} I d\vec{l} \wedge \left(\frac{\vec{PQ}}{|\vec{PQ}|^3} \right)$$



1.2 La découverte de l'induction

Pendant 10 ans après la loi d'Ørsted, on ne parvient pas à obtenir un courant dans un fil avec un champ magnétique. On pouvait, par exemple, tenter d'obtenir un courant avec l'expérience montrée sur la figure suivante

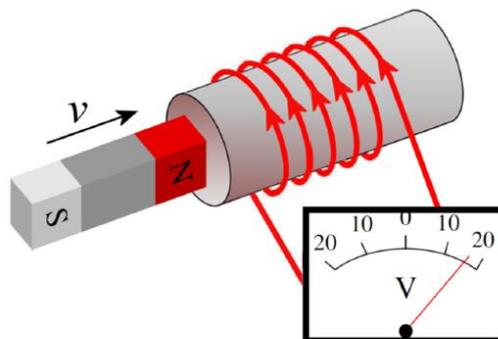


Il y a bien un champ magnétique fait par l'aimant, mais il n'apparaît aucun courant dans le fil de la bobine (ou de différence de potentiel aux bornes de ce fil, ce qui revient au même). On avait beau essayer toutes les configurations de fils et d'aimants, il n'y avait jamais de courant dans les fils.

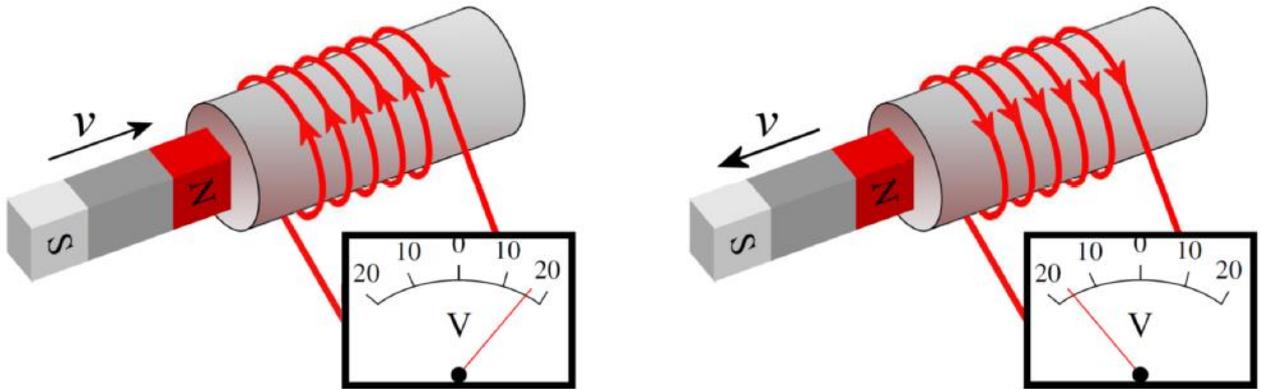
Finalement, Joseph Henry (en 1830) et Michael Faraday (en 1831) découvrent indépendamment comment on peut obtenir un courant dans une boucle de fil. Henry fit la découverte en premier, mais c'est Faraday qui publia ses résultats en premier. (Notez que plusieurs savants, dont Ampère dès 1822, avaient observé ce phénomène, mais ils ne parvinrent pas à se débarrasser de certaines idées préconçues fausses, ce qui les empêcha de formuler des théories cohérentes ou complètes à partir de leurs observations.)

Ainsi, Faraday et Henry découvrirent qu'on obtient un courant uniquement s'il y a un mouvement relatif entre la bobine et l'aimant. Par exemple, si on approche l'aimant de la bobine (comme sur la figure), il y a une différence de potentiel qui apparaît entre les deux extrémités du fil.

On remarque aussi que plus on déplace l'aimant rapidement, plus la différence de potentiel induite est importante.



Finalement, on remarque aussi que le signe de la différence de potentiel n'est pas toujours la même. Quand on approche l'aimant avec le pôle nord en premier, il y a une différence de potentiel dans un sens (figure de gauche). Si on éloigne l'aimant, la différence de potentiel dans la bobine est inversée (figure de droite).

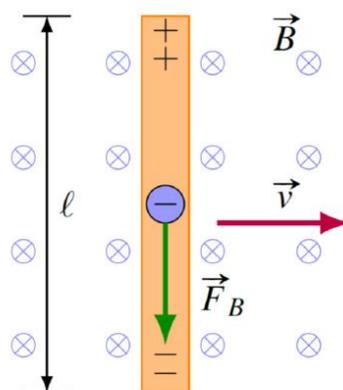


Faraday et Henry venaient de découvrir **l'induction électromagnétique**. Ce qu'on obtient en fait est une différence de potentiel entre les deux extrémités du fil formant la boucle (qui peut faire plusieurs tours comme c'est le cas dans notre figure). La différence de potentiel obtenue s'appelle la **différence de potentiel induite** et elle est notée E induite. Cette différence de potentiel fera un courant si la boucle de fil se referme sur elle-même pour faire un circuit.

On a alors un **courant induit**.

1.3 Différence de potentiel induite dans un conducteur en mouvement

On peut générer une différence de potentiel induite à partir de la force magnétique. En effet, on obtient une différence de potentiel en déplaçant un conducteur dans un champ magnétique. Examinons ce qu'on obtient dans le cas d'un morceau de métal qui se déplace dans un champ magnétique quand on a la configuration montrée sur la figure.



Le déplacement de la tige fait en sorte que les charges dans la tige se déplacent dans le champ magnétique. Il y aura alors une force sur les électrons libres de la tige. La figure vous montre la direction de la force sur les électrons sur une tige se déplaçant vers la droite dans un champ magnétique qui entre dans la page. Les électrons s'accumulent dans le bas de la tige alors qu'il y aura un manque d'électrons dans le haut de la tige. Or, cette séparation de charge amène la formation d'un champ électrique dans la tige allant de haut en bas. Ce champ va donc exercer une force vers le haut sur les électrons. On atteindra l'équilibre quand cette force électrique vers le haut sera égale à la force magnétique vers le bas. Il y a donc équilibre quand la force électrique est égal à la force magnétique sur les électrons

$$\begin{aligned}\vec{F}_{elec} &= \vec{F}_{mag} \\ q\vec{E} &= q\vec{v} \times \vec{B} \\ \vec{E} &= \vec{v} \times \vec{B}\end{aligned}$$

La différence de potentiel d'un côté à l'autre de la tige est donc

$$\Delta V = \vec{E} \cdot \vec{\ell} = \vec{v} \times \vec{B} \cdot \vec{\ell}$$

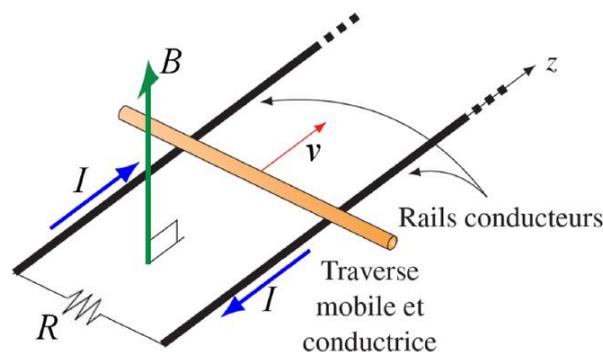
Dans le cas présenté ici (tige perpendiculaire à la vitesse et au champ), le champ électrique est $E = vB$ (puisque l'angle entre v et B est 90°) et la différence de potentiel est $vB\ell$ puisque le champ électrique est dans le même sens que la tige. On a donc

Différence de potentiel dans un conducteur en mouvement dans un champ magnétique

$$\mathcal{E}_{induit} = vB\ell$$

où la longueur ℓ est mesurée dans la direction perpendiculaire à v et B .

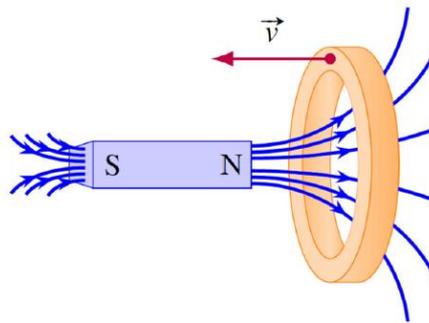
Voici comment on pourrait alors générer un courant dans une résistance. On place la tige sur deux rails conducteurs, tel qu'illustré sur cette figure.



Quand la tige se déplace, les électrons dans la tige subissent une force vers la gauche de la tige (côté marqué -). Le côté gauche de la tige prend donc une charge négative et le côté droit de la tige (marqué +) devient chargé positivement. Il y a donc une différence de potentiel d'un côté à l'autre de la tige et elle devient la source dans ce circuit. C'est cette différence de potentiel qui génère un courant induit dans la résistance dont la grandeur est

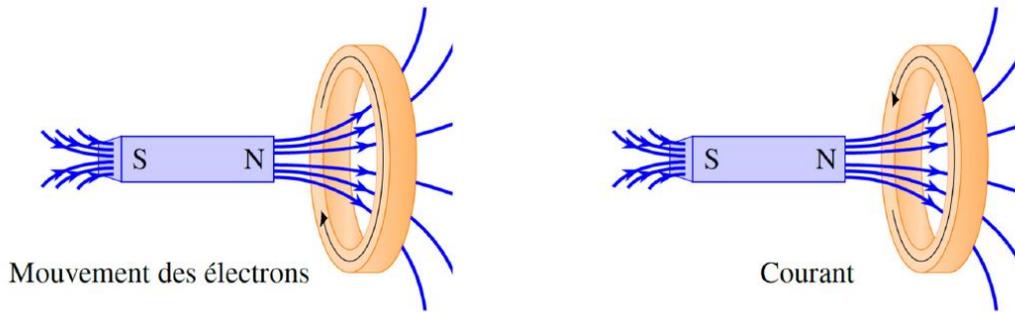
$$I = \frac{\Delta V}{R} = \frac{vB\ell}{R}$$

Voici quelques autres façons d'obtenir un courant induit en déplaçant un conducteur dans un champ magnétique. On peut approcher un anneau d'un aimant.

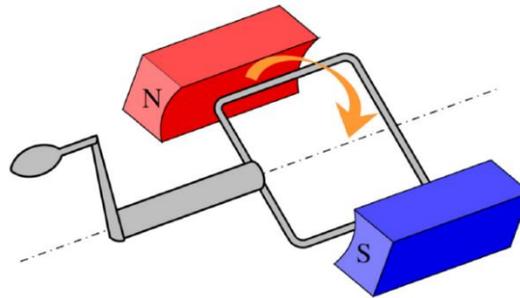


En déplaçant ainsi l'anneau, on déplace des charges dans un champ magnétique. Ces charges vont donc subir une force. Supposons que l'anneau est en métal. Les protons vont subir une force, mais ils ne peuvent se déplacer. Les électrons libres vont subir une force et vont se mettre en mouvement pour faire un courant. Trouvons la direction de la force sur un électron qui est à l'endroit indiqué sur la figure (dessus de l'anneau).

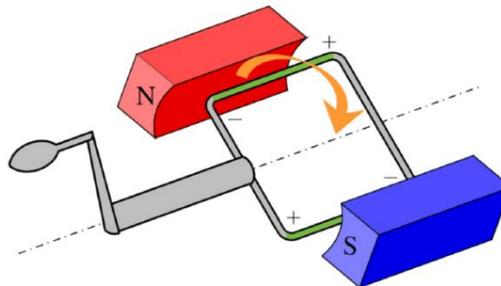
On a une vitesse vers la gauche et un champ vers la droite et un peu vers le haut, la force est donc en sortant de la page (contraire de la règle de la main droite, car c'est une charge négative.) Cette force cherche donc à déplacer la charge le long de l'anneau. Si on trouve la direction de la force sur n'importe quel électron de l'anneau, on trouve toujours que la force est dans la direction du fil composant l'anneau, les électrons se déplacent donc tous dans le fil pour faire un courant. L'image suivante vous montre la direction du mouvement des électrons et du courant (qui est dans le sens contraire du mouvement des électrons).



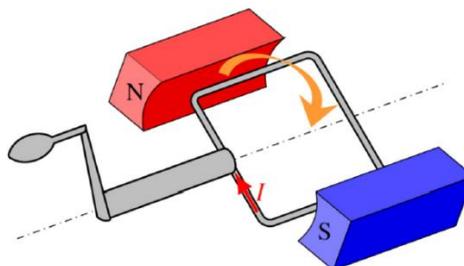
On peut aussi faire tourner une boucle dans un champ magnétique.



Dans ce cas, il y a une différence de potentiel qui apparaît dans deux des côtés de la boucle (montrés en vert sur cette figure).



Ces deux différences de potentiel génèrent un courant circulant dans le sens montré sur cette figure.



1.4 Loi d'induction de FARADAY

Pour calculer la différence de potentiel induite et le courant induit dans un circuit fermé, on va écrire la loi sous une forme un peu différente. Cette nouvelle forme de l'équation fera appel au flux magnétique. On a déjà vu le flux magnétique, mais on va développer un peu plus le concept. Par la suite, on développera notre nouvelle équation pour calculer la différence de potentiel induite.

1.4.1 Le flux magnétique

Définition du flux magnétique

On a vu dans un chapitre précédent qu'on définit le flux magnétique exactement de la même façon dont on définit le flux électrique traversant une surface, mais en utilisant le champ magnétique à la place du champ électrique.

Flux magnétique

$$\phi_B = \sum BA \cos \theta$$

où on sépare en régions où B et θ sont constants.

ou

$$\phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

La valeur de ce flux est proportionnelle au nombre de lignes de champ magnétique qui traversent la surface, exactement comme le flux électrique était proportionnel au nombre de lignes de champ électrique qui traversent la surface. Rappelez-vous que si on calcule le flux magnétique à travers une surface fermée, le résultat sera toujours nul puisque les lignes de champ se referment sur elles-mêmes (théorème de Gauss pour le champ magnétique).

Ce flux est en Tm^2 . Contrairement à la situation avec le flux électrique, on a donné un nom à l'unité mesurant le flux magnétique, c'est le weber (Wb).

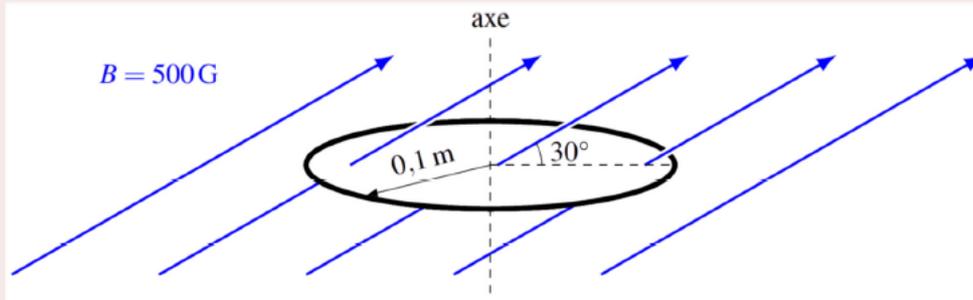
Unité de flux magnétique : le weber (Wb)

$$1Wb = 1Tm^2$$

Autrefois, on appelait souvent le champ magnétique *la densité de flux magnétique* et qu'on le mesurait en Wb/m^2 .

Exemple

Quel est le flux magnétique traversant cette boucle ?



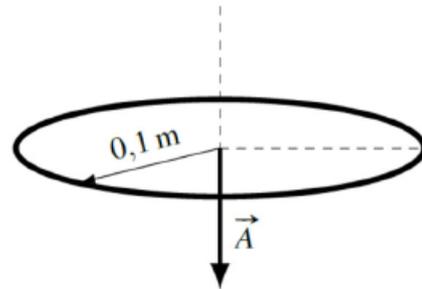
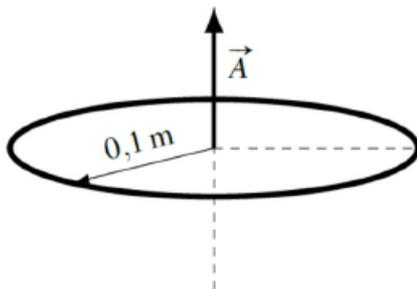
Le flux est

$$\begin{aligned}\phi_B &= BA \cos \theta \\ &= 500 \times 10^{-4} T \cdot (\pi \cdot (0,1 m)^2) \cdot \cos 60^\circ \\ &= 7,854 \times 10^{-4} Wb\end{aligned}$$

L'angle dans cette formule est l'angle entre le champ et le vecteur A , qui est un vecteur perpendiculaire au plan de la boucle, donc dans la direction de l'axe de la boucle.

Choix de la direction de A

A est un vecteur perpendiculaire à la surface. Toutefois, il y a deux vecteurs possibles pour A , car il y a deux côtés à une surface. On pouvait clairement définir une direction avec une surface fermée, car il y a un intérieur et un extérieur dans ce cas. Si la surface n'est pas fermée, il n'y a pas de convention et on peut prendre le côté de la surface qu'on veut pour notre vecteur A . Dans l'exemple précédent, on aurait donc pu prendre un des deux vecteurs suivants.



Avec le vecteur de la figure de gauche, l'angle avec le champ dans l'exemple est de 60° , alors qu'il aurait été de 120° avec le vecteur de la figure de droite. En utilisant le vecteur de la figure de droite, on aurait obtenu un flux de même grandeur, mais négatif.

S'il n'y a pas de convention, lequel doit-on choisir ? En fait, vous pouvez prendre celui que vous voulez. La suggestion : choisir le vecteur A qui fait le plus petit angle avec le champ.

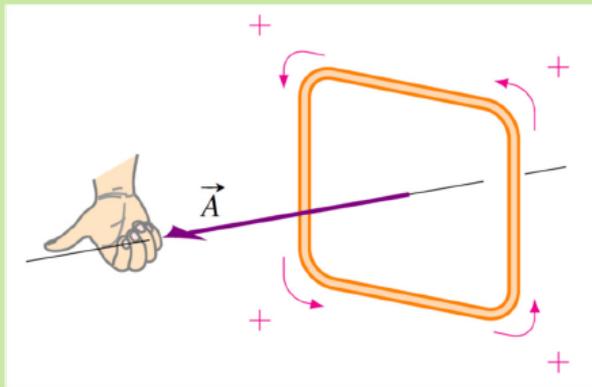
Avec cette suggestion, on prend 60° dans l'exemple. Une fois votre choix de la direction de A fait, ne le changez plus pendant le problème, même si le champ change de direction.

Définition du sens positif pour la différence de potentiel

Avec le choix de A , on définit alors une convention pour la différence de potentiel (et, par le fait même, pour le courant que ce potentiel va générer). Une fois notre A choisi, on met notre pouce dans la direction de ce vecteur. Nos doigts nous indiquent alors la direction positive dans la boucle. C'est notre 6^{ème} règle de la main droite.

Sens positif du courant pour l'induction

On place le pouce dans le sens de A (vecteur aire perpendiculaire au plan de la boucle) choisi pour calculer le flux. Le sens de rotation indiqué par les doigts est le sens positif pour le courant.



La forme de la surface délimitée par le circuit

La surface délimitée par le circuit peut prendre n'importe quelle forme quand on calcule le flux fait par le champ magnétique. Par exemple, les deux formes suivantes peuvent être utilisées pour calculer le flux.



Cette propriété est une conséquence du théorème de Gauss. En utilisant une surface fermée faite des deux surfaces utilisées, le théorème dit que le flux est nul à travers cette surface fermée. Cela implique que le flux soit le même à travers les deux surfaces.

Avec un champ constant, il sera beaucoup plus difficile de calculer le flux à travers la surface de droite puisque l'angle entre le vecteur aire, perpendiculaire à la surface, et le champ change constamment. Il faudrait donc séparer la surface en petits morceaux, calculer le flux à travers chacun des petits morceaux et sommer (probablement avec une intégrale).

Toutefois, un théorème important en mathématique indique que le flux est toujours le même, peu importe la forme de la surface utilisée.

1.4.2 La formule de l'induction

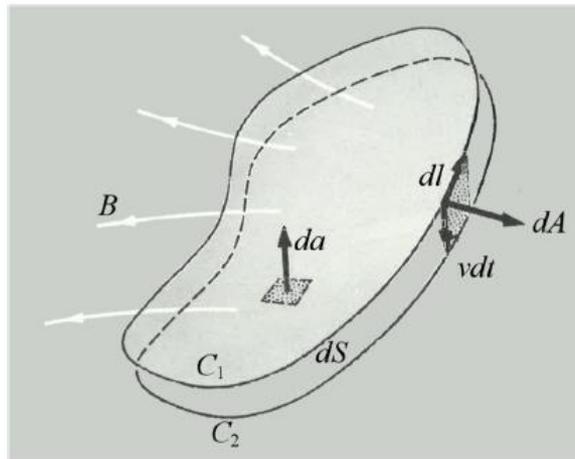
On peut maintenant trouver une autre équation pour calculer la différence de potentiel induite.

Quand un petit bout de fil de longueur $d\ell$ se déplace dans le champ, il y a une force magnétique qui agit sur les charges. On a montré précédemment que la différence de

$$d\mathcal{E} = \vec{v} \times \vec{B} \cdot d\vec{\ell}$$

(C'est $d\mathcal{E}$ puisque le morceau a une longueur infinitésimale.) Comme $\vec{a} \times \vec{b} \cdot \vec{c} = -\vec{a} \times \vec{c} \cdot \vec{b}$, on peut écrire

$$d\mathcal{E} = -\vec{v} \times d\vec{\ell} \cdot \vec{B}$$



Considérons maintenant le circuit au complet. Le circuit passe de la position C_1 à la position C_2 durant le temps dt .

Dans cette figure, le déplacement de chaque petit bout de fil semble être dans la même direction, mais la direction pourrait être différente à différents endroits du circuit. Par exemple, le côté gauche du circuit pourrait monter pendant que le côté droit descend.

On peut alors écrire

$$d\mathcal{E} = -\frac{\vec{v}dt \times \vec{d\ell} \cdot \vec{B}}{dt}$$

Or, le produit vectoriel $\vec{v}dt \times \vec{d\ell}$ donne l'aire de la surface dA sur la figure. On a donc

$$d\mathcal{E} = -\frac{\vec{dA} \cdot \vec{B}}{dt}$$

Maintenant, le produit scalaire $\vec{dA} \cdot \vec{B}$ est le flux magnétique qui traverse la surface dA . On a donc

$$d\mathcal{E} = -\frac{\phi_{B(\text{à travers } dA)}}{dt}$$

Si on somme les différences de potentiel pour tous les petits bouts de fils, on va sommer les flux qui traversent toutes les surfaces dA pour obtenir le flux à travers la surface dS (qui est la surface balayée par le circuit pendant son déplacement). On arrive donc à

$$\mathcal{E} = -\frac{\phi_{B(\text{à travers } dS)}}{dt}$$

Toutefois, le flux qui traverse le circuit en position 2 est

$$\phi_{B(\text{à travers } C2)} = \phi_{B(\text{à travers } C1)} + \phi_{B(\text{à travers } dS)}$$

(De cette façon, on calcule le flux à travers le circuit 2 avec une surface un peu bizarre, mais ce n'est pas grave puisqu'on peut prendre une surface ayant n'importe quelle forme.)

On a donc

$$\phi_{B(\text{à travers } dS)} = \phi_{B(\text{à travers } C2)} - \phi_{B(\text{à travers } C1)}$$

Ainsi, le flux à travers la surface dS correspond à la variation de flux qui traverse la surface délimitée par le circuit. On va appeler cette variation $d\phi_B$. On a donc

$$\phi_{B(\text{à travers } dS)} = d\phi_B$$

On arrive donc à

$$\mathcal{E} = -\frac{d\phi_B}{dt}$$

Il se pourrait que le fil fasse plusieurs fois le tour de la boucle. Si c'était le cas, la différence de potentiel calculée se ferait plusieurs fois. Avec N tours de fil, on aurait N fois la différence de potentiel calculée. Cela signifie que notre équation de la différence de potentiel est

La loi d'induction de Faraday

$$\mathcal{E}_{\text{induit}} = -N \frac{d\phi_B}{dt}$$

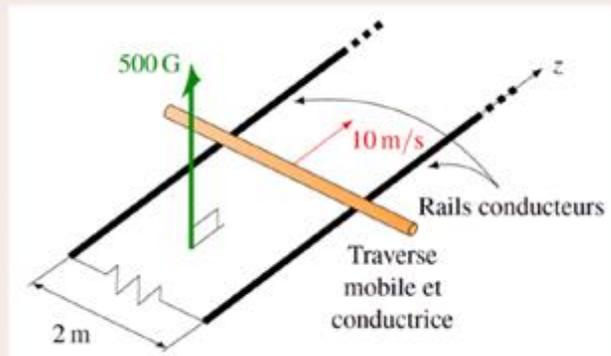
Cette équation permet de calculer la différence de potentiel induite dans un circuit fermé.

Note 1 : le flux dans cette équation est toujours le flux dans la région délimitée par le circuit. Il en est ainsi parce que le v qu'on retrouve dans la preuve de cette formule était la vitesse du fil formant le circuit. C'est donc le déplacement du fil qui fait changer le flux.

Note 2 : même si la loi porte le nom de loi de Faraday, Faraday n'a jamais écrit la loi sous cette forme.

Exemple

Une tige mobile de 2 m de long peut se déplacer sur des rails conducteurs. Ces rails sont reliés ensemble par un fil à leurs extrémités. La résistance de la tige et la résistance des rails sont négligeables. La résistance du fil qui relie les rails est de 5Ω . Quel est le courant qui circule dans la résistance ?



Le courant se trouve à partir de la différence de potentiel et de la résistance. On la résistance, mais on doit trouver la différence de potentiel. Celle-ci est une différence de potentiel induite qui se trouve avec

$$\mathcal{E}_{\text{induite}} = -N \frac{d\phi_B}{dt}$$

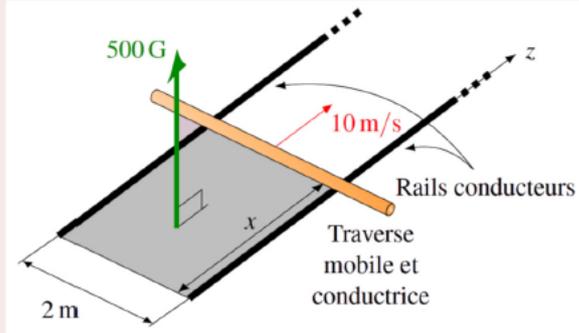
Comme ici il n'y a qu'un seul tour de fil, on a

$$\mathcal{E}_{\text{induite}} = - \frac{d\phi_B}{dt}$$

Il faut donc trouver le taux de variation de flux dans la boucle.

Il y a un flux dans la surface délimitée par la tige, les rails et le fil reliant les rails. (Surface en gris dans la figure.)

Comme la tige avance, le flux qui traverse cette surface augmente puisque la surface augmente. La variation de flux est donc



$$\begin{aligned}\frac{d\phi_B}{dt} &= \frac{d(BA \cos 0^\circ)}{dt} \\ &= \frac{d(BA)}{dt}\end{aligned}$$

(Comme on a mis un angle de 0° pour l'angle dans le cosinus, on a choisi un vecteur A dans la même direction que le champ magnétique.)

(Comme on a mis un angle de 0° pour l'angle dans le cosinus, on a choisi un vecteur A dans la même direction que le champ magnétique.)

Puisque le champ magnétique est constant, on a

$$\frac{d\phi_B}{dt} = B \frac{dA}{dt}$$

Comme l'aire est $A = \ell x$, on a

$$\begin{aligned}\frac{d\phi_B}{dt} &= B \frac{d(x\ell)}{dt} \\ &= B\ell \frac{dx}{dt}\end{aligned}$$

Puisque le taux de variation de x est égal à la vitesse de la tige v , on a

$$\frac{d\phi_B}{dt} = B\ell v$$

La différence de potentiel induite est donc

$$\mathcal{E}_{\text{induite}} = -B\ell v$$

(Notez que c'est exactement ce qu'on aurait obtenu avec la formule de la différence de potentiel induite dans une tige en mouvement dans un champ magnétique. C'est normal puisque c'est le mouvement de la tige qui fait apparaître la différence de potentiel. On a simplement retrouvé ce résultat avec notre autre version de la formule de la différence de potentiel induite. Ça semble plus long comme ça, mais ce sera avantageux dans d'autres cas.)

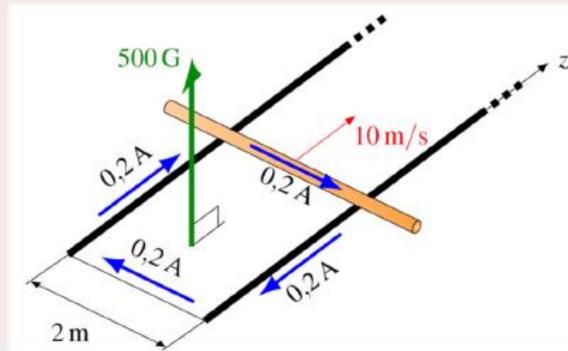
Si on calcule la valeur de la différence de potentiel induite, on obtient

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_{\text{induite}} &= -B\ell v \\ &= -0,05T \cdot 2m \cdot 10 \frac{m}{s} \\ &= -1V\end{aligned}$$

Le courant est donc

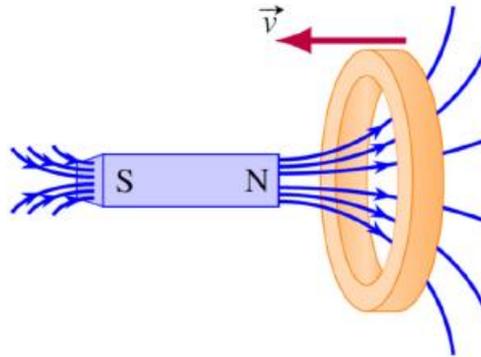
$$\begin{aligned}I &= \frac{\mathcal{E}}{R} \\ &= \frac{-1V}{5\Omega} \\ &= -0,2A\end{aligned}$$

On trouve donc le sens du courant positif en mettant notre pouce de la main droite dans le sens du vecteur A . Nos doigts nous indiquent alors la direction du courant positif (ici dans le sens contraire des aiguilles d'une montre). Notre courant étant négatif, il est dans le sens des aiguilles d'une montre.

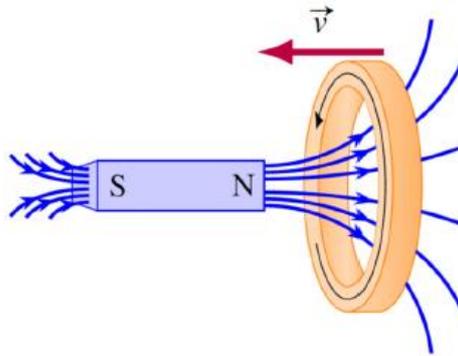


1.5 Le champ électrique induit

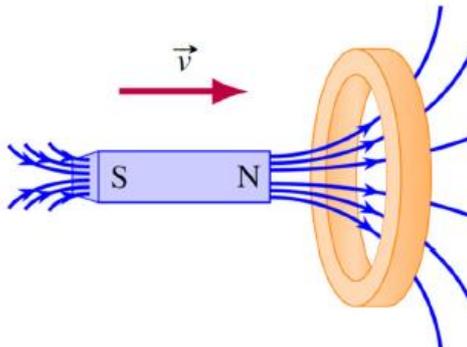
On a vu qu'il y a un courant induit si on approche un anneau d'un aimant.



On se rappelle que c'est la force magnétique sur les électrons qui met ces derniers en mouvement pour générer un courant dans le sens montré sur cette figure.



Regardons maintenant ce qui se passerait si on laissait l'anneau en place, mais qu'on rapprochait plutôt l'aimant.



Dans ce cas, il doit encore y avoir un courant induit puisque cette expérience est l'expérience dans laquelle on approche l'anneau de l'aimant, mais vue par un observateur qui suit l'anneau. S'il y a un courant pour un observateur, il doit y en avoir un pour tous les observateurs, sinon les résultats d'une expérience ne seraient pas les mêmes pour différents observateurs, ce qui contreviendrait au principe de relativité. La présence d'un courant induit est aussi ce que prévoit la loi de l'induction. En approchant l'aimant de l'anneau, la grandeur du champ

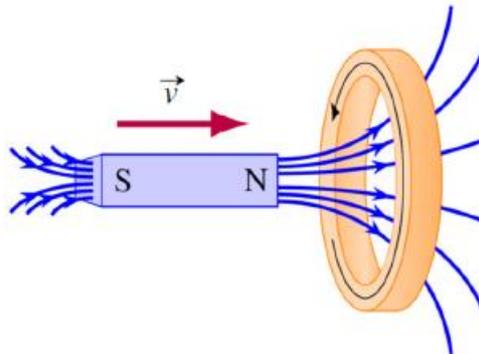
magnétique à l'intérieur de l'anneau augmente. Comme le champ augmente, le flux augmente, ce qui implique qu'il devrait y avoir un courant induit dans l'anneau. On s'entend donc pour dire qu'il doit aussi y avoir un courant induit dans ce cas.

Toutefois, il y a un problème : la force magnétique ne peut pas mettre les charges en mouvement puisque leur vitesse est nulle (l'anneau est immobile). On aurait donc un courant induit, mais ce courant ne peut pas être généré par la force magnétique. Que se passe-t-il alors dans ce cas ?

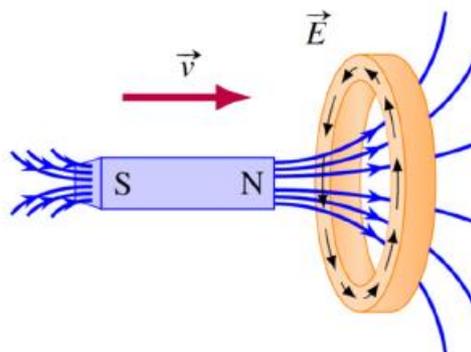
En fait, il ne reste qu'une seule autre possibilité : la force doit être faite par un champ électrique. Pourtant, il n'y a pas de champ électrique dans cette situation. Du moins, c'est ce qu'on pourrait croire... On vient de tomber sur un nouveau phénomène.

Un champ électrique apparaît quand le champ magnétique varie en fonction du temps.

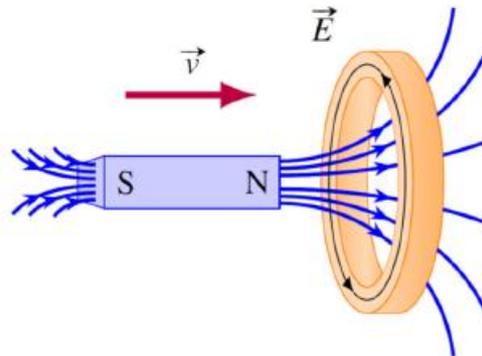
Dans la situation présentée ici, le mouvement de l'aimant fait en sorte que le champ magnétique varie en fonction du temps. Quand le champ magnétique change, il apparaît alors un champ électrique dont la direction sera telle que les électrons subiront une force qui les met en mouvement dans la direction montrée sur cette figure.



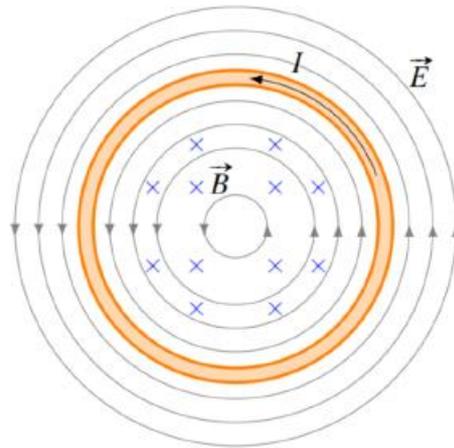
On doit avoir cette direction pour obtenir la bonne direction du courant.) Comme les électrons subissent une force dans le sens contraire du champ électrique, cela signifie que le champ doit être dans la direction montrée sur la figure suivante.



Ce qui amène directement à la conclusion que les lignes de champ électrique dans l'anneau sont des cercles.



Mais il n'y a pas qu'un champ induit dans l'anneau, il y en a un partout. Si on regarde cet anneau tel qu'on pourrait le voir si on était minuscule et qu'on était assis sur l'aimant, voici à quoi ressemblerait le champ électrique (figure ci-après).



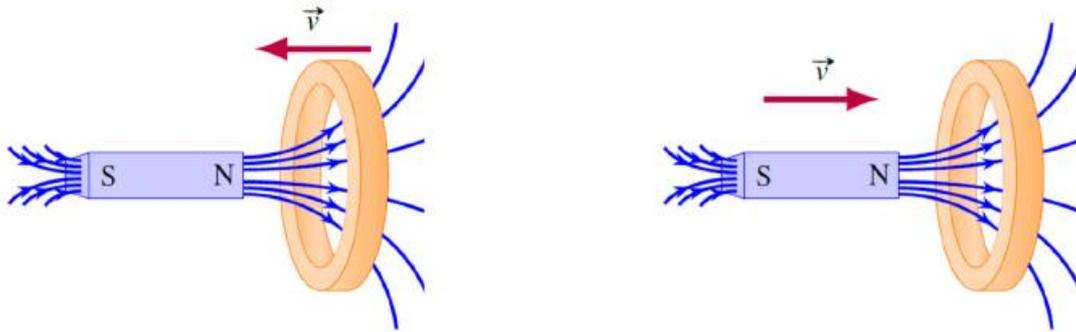
Il y a du champ électrique induit partout, incluant dans l'anneau. C'est la partie de ce champ qui est dans l'anneau (en jaune) qui fait le courant.

Ce champ induit change ce qu'on a appris concernant le champ électrique. Par exemple, on avait remarqué que les lignes de champ électrique partent des charges positives et se terminent aux charges négatives. On peut voir que ce n'est pas le cas des lignes de champ induit. Dans ce cas, les lignes de champ électrique se referment sur elles-mêmes comme le font les lignes de champ magnétique. Remarquez comme notre 3^{ème} propriété du champ (les lignes de champ ne peuvent pas apparaître ou disparaître dans le vide) avait été formulée pour pouvoir s'accommoder de cette situation

1.5.1 Calcul de la différence de potentiel induite dans tous les cas

Dans le fond, les deux situations présentées précédemment représentent exactement la même expérience, mais vue selon deux observateurs différents. Dans un cas (figure de gauche), on voit l'expérience selon un observateur au repos par rapport à l'aimant alors que

dans l'autre situation (figure de droite) on voit l'expérience selon un observateur au repos par rapport à l'anneau.



On a vu que dans la situation de gauche, le courant induit est fait par un champ magnétique alors que dans la situation de droite, le courant induit est fait par un champ électrique.

Pourtant, c'est exactement la même situation, mais vue par des observateurs différents. Est-ce le champ électrique ou le champ magnétique qui fait un courant ?

En réalité, la grandeur des champs magnétique et électrique change selon les observateurs.

Il y a des règles en relativité pour transformer les champs quand on passe d'un observateur à l'autre. Il peut arriver qu'il existe un champ électrique pour un observateur et que ce champ n'existe pas selon un autre observateur. C'est ce qui se passe ici. Il y a un champ électrique pour l'observateur au repos par rapport à l'anneau, mais il n'y en a pas pour l'observateur au repos par rapport à l'aimant. Il est donc possible que les différents observateurs attribuent la cause du courant à des champs de différentes natures. Notez que si on prenait le point de vue de n'importe quel autre observateur, le courant serait causé par le champ magnétique et aussi par le champ électrique.

Il y a cependant une bonne nouvelle. Cette symétrie implique que peu importe l'origine de la force qui met les charges en mouvement (électrique ou magnétique ou un mixte des deux), on peut toujours calculer la différence de potentiel induite avec la formule suivante.

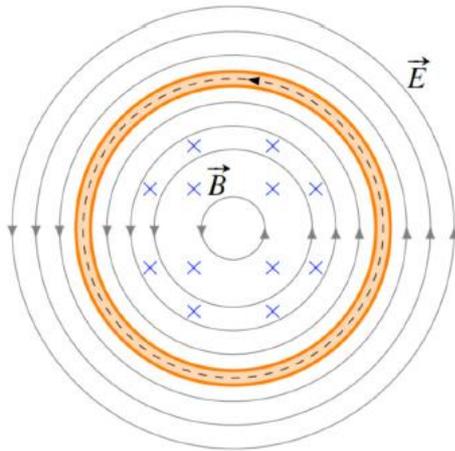
$$\mathcal{E}_{\text{induite}} = -N \frac{d\phi_B}{dt}$$

1.5.2 La deuxième équation de Maxwell

Comme on peut toujours calculer la différence de potentiel induite avec la variation de flux, il n'est pas nécessaire ici de calculer le champ électrique induit pour trouver les différences de potentiel induites.

On va quand même trouver une équation reliant le champ électrique et la variation de champ magnétique puisque cette équation fait partie des équations fondamentales de l'électromagnétisme, c'est-à-dire les équations de Maxwell

Pour l'obtenir, calculons le travail fait par le champ électrique sur une charge qui se déplace en suivant une trajectoire fermée. Par exemple, on pourrait suivre le trajet montré sur la figure.



$$W = \oint \vec{F} \cdot \vec{ds}$$

$$W = q \oint \vec{E} \cdot \vec{ds}$$

On utilise cette notation pour l'intégrale, car c'est l'intégrale sur un tour et il s'agit d'une trajectoire fermée. Notez que chaque partie du circuit doit être immobile pour calculer le travail uniquement fait par le champ électrique. Si le circuit se déplace, il y aura aussi un travail fait par la force magnétique.

Le travail fait peut aussi se trouver avec

$$W = \Delta U = q\Delta V = q\mathcal{E}$$

Comme ces deux travaux doivent être égaux, on a

$$q\mathcal{E} = q \oint \vec{E} \cdot \vec{ds}$$

$$\mathcal{E} = \oint \vec{E} \cdot \vec{ds}$$

Or, on sait que cette différence de potentiel sur un tour est, selon la loi de l'induction,

$$\mathcal{E} = -\frac{d\phi_B}{dt}$$

En égalant les deux, on obtient une nouvelle version de la deuxième équation de Maxwell.

Deuxième équation de Maxwell (complète)

$$\oint \vec{E} \cdot \vec{ds} = -\frac{d\phi_B}{dt}$$

Note : dans cette formule, le flux est le flux qui traverse une surface délimitée par une trajectoire qui peut être n'importe où. Elle n'est pas obligée de suivre un circuit.

Toutefois, cette trajectoire doit être fixe, ce qui veut dire que chaque partie de cette trajectoire doit rester immobile.)

Attention : auparavant, on avait

$$\oint \vec{E} \cdot \vec{ds} = 0$$

et on avait déduit à partir de là que la différence de potentiel devait être la même, et que la somme des différences de potentiel devait être nulle sur une trajectoire fermée (loi des mailles de Kirchhoff). Puisque cette équation n'est plus vraie, ces deux conclusions ne sont plus vraies quand il y a une variation de flux magnétique.

Maintenant on a

- La différence de potentiel entre deux points dépend du trajet emprunté si le flux varie dans la surface délimitée par les deux trajectoires.
- La somme des différences de potentiel sur une trajectoire fermée (loi des mailles de Kirchhoff) n'est plus nulle si le flux magnétique varie à l'intérieur de la trajectoire.

On aura alors

$$\sum \Delta V = -\frac{d\phi_B}{dt}$$

1.6 La loi de LENZ

On a vu qu'on peut trouver la direction du courant induit en utilisant la convention de signe de la loi de l'induction. Cependant, il existe une autre façon de déterminer le sens du courant induit. C'est la loi de Lenz.

La loi de Lenz (donne la direction du courant induit)

Le courant induit dans la boucle est dans une direction telle que le champ magnétique généré par le courant induit (qu'on va appeler le champ magnétique induit) à l'intérieur de la boucle s'oppose à la variation de flux.

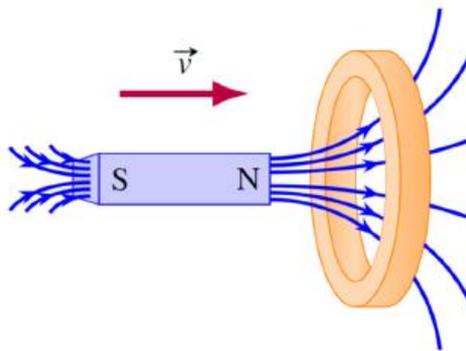
Cela signifie que :

- Si le flux augmente, le courant fait un champ magnétique induit dans la boucle dans le sens opposé au champ qui fait le flux.
- Si le flux diminue, le courant fait un champ magnétique induit dans la boucle dans le même sens que le champ qui fait le flux.

Prenons quelques exemples qui vont illustrer comment trouver la direction du courant induit. Dans tous les cas, on va trouver la direction avec la convention de signe de la loi de l'induction et ensuite avec la loi de Lenz.

➤ **1er cas**

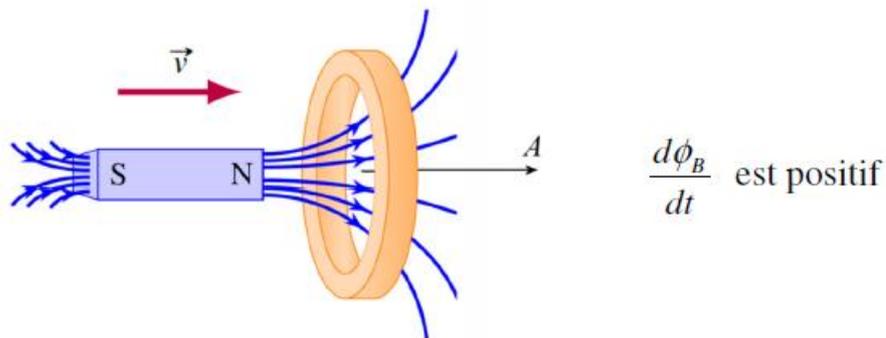
Dans cette première expérience, on approche un aimant d'un anneau métallique tel qu'illustré sur l'image.



Selon la loi de l'induction

On doit choisir une direction pour le vecteur A . On va prendre un vecteur vers la droite. Dans ce cas, le flux dans la boucle est positif et il augmente.

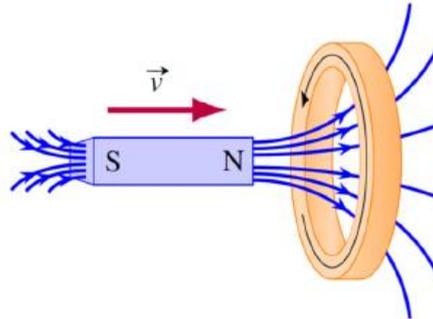
Ainsi,



Si cette dérivée est positive, alors la différence de potentiel

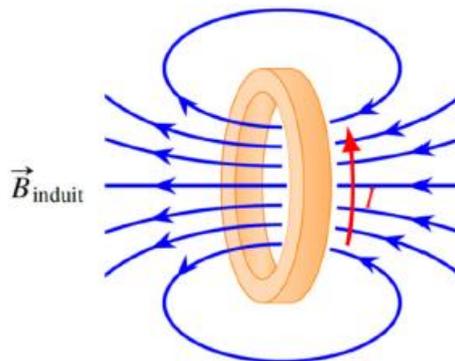
$$\mathcal{E}_{\text{induite}} = -N \frac{d\phi_B}{dt} \text{ est négative.}$$

Ainsi, la direction du courant est la suivante.



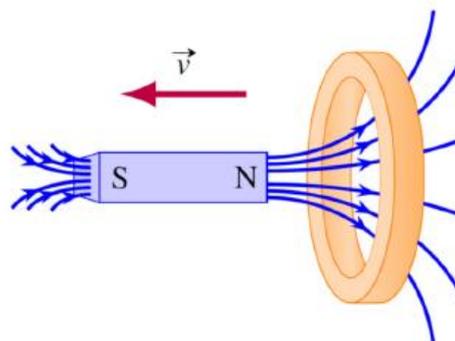
Selon la loi de Lenz

La loi de Lenz nous dit que si le flux augmente, le courant induit va faire un champ magnétique induit dans le sens contraire du champ qui fait le flux. Comme le champ qui fait le flux dans l'anneau est vers la droite, le champ induit est vers la gauche. Ainsi, pour que le champ soit vers la gauche, il faut que le courant soit dans la direction indiquée sur la figure.



➤ 2me cas

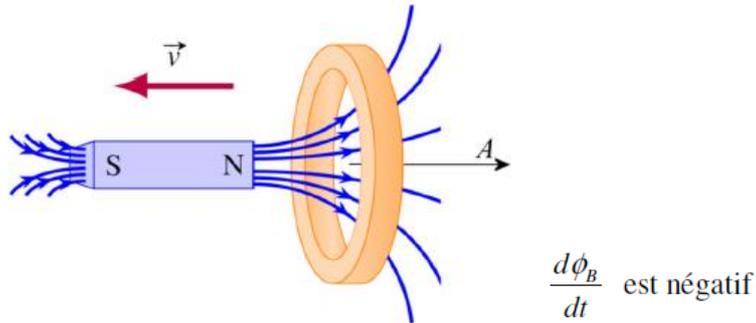
Dans cette deuxième expérience, on éloigne un aimant d'un anneau métallique tel qu'illustré sur l'image.



Selon la loi de l'induction

On doit choisir une direction pour le vecteur A. On va prendre un vecteur vers la droite. Dans ce cas, le flux dans la boucle est positif et il diminue.

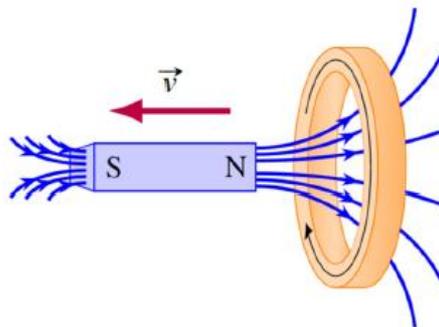
Ainsi,



Si cette dérivée est négative, alors la différence de potentiel

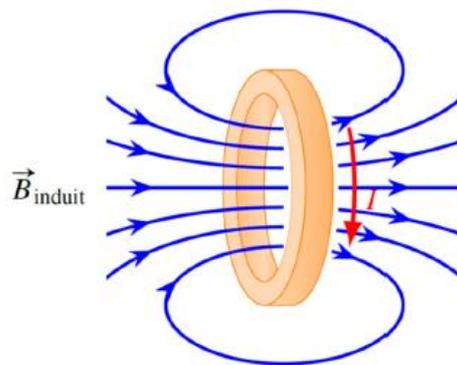
$$\mathcal{E}_{\text{induite}} = -N \frac{d\phi_B}{dt} \text{ est positive.}$$

Ainsi, la direction du courant est la suivante



Selon la loi de Lenz

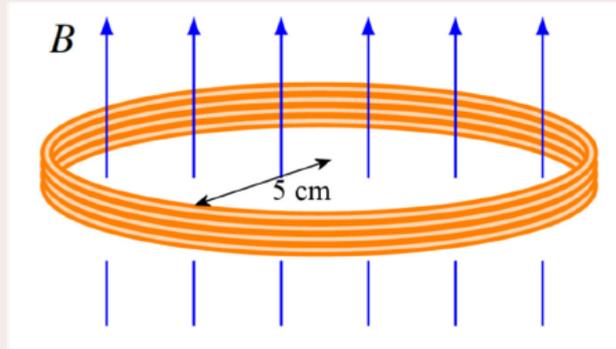
La loi de Lenz nous dit que si le flux diminue, le courant induit va faire un champ magnétique induit dans le même sens que le champ qui fait le flux. Comme le champ qui fait le flux dans l'anneau est vers la droite, le champ induit est vers la droite. Ainsi, pour que le champ soit vers la droite, il faut que le courant soit dans la direction indiquée sur la figure.



1.7 Application de la loi d'induction de FARADAY

Exemple

Un fil ayant une résistance de 5Ω forme un anneau avec 100 tours de fil. Le rayon de l'anneau est de 5 cm. Initialement, il n'y a pas de champ magnétique. Puis, le champ magnétique monte à un rythme constant pour atteindre 0,1 T (dans la direction indiquée sur la figure) en 0,05 s. Quel est le courant induit dans le fil pendant la montée du champ magnétique ?



Le courant se trouve à partir de la différence de potentiel et de la résistance. On a la résistance, mais on doit trouver la différence de potentiel. Celle-ci est une différence de potentiel induite qui se trouve avec

$$\mathcal{E}_{\text{induite}} = -N \frac{d\phi_B}{dt}$$

Quand le taux de variation du flux est constant, on peut le calculer avec

$$\frac{d\phi_B}{dt} = \frac{\Delta\phi_B}{\Delta t}$$

La différence de potentiel est donc

$$\mathcal{E}_{\text{induite}} = -N \frac{\Delta\phi_B}{\Delta t}$$

La variation de flux est

$$\begin{aligned} \Delta\phi_B &= \Delta(BA \cos \theta) \\ &= (BA \cos \theta)_f - (BA \cos \theta)_i \\ &= (B_f - B_i) A \cos \theta \end{aligned}$$

puisqu'il n'y a que la grandeur du champ qui varie. Cette variation est donc

$$\begin{aligned}\Delta\phi_B &= (B_f - B_i) A \cos\theta \\ &= (0,1T - 0T) \cdot \pi \cdot (0,05m)^2 \cdot \cos 0^\circ \\ &= 7,85 \times 10^{-4} Wb\end{aligned}$$

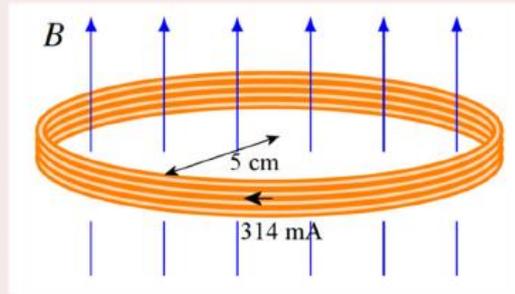
Si on a mis l'angle de 0° , c'est qu'on a choisi un vecteur A vers le haut, donc dans le même sens que le champ magnétique. La différence de potentiel est donc

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_{\text{induite}} &= -N \frac{\Delta\phi_B}{\Delta t} \\ &= -100 \cdot \frac{7,85 \times 10^{-4} Wb}{0,05s} \\ &= -1,57V\end{aligned}$$

Le courant dans l'anneau est donc

$$\begin{aligned}I_{\text{induit}} &= \frac{\mathcal{E}_{\text{induite}}}{R} \\ &= -314mA\end{aligned}$$

Le signe est là pour nous indiquer que le courant est dans le sens négatif. On trouve le sens positif en plaçant notre pouce de la main droite dans la direction de A (donc vers le haut). La direction positive correspond donc à un courant vers la droite



sur le devant de l'anneau. Puisque le courant est négatif, le courant est dans le sens contraire. On a donc le courant indiqué sur la figure.

On peut aussi trouver le sens du courant avec la loi de Lenz. Comme le flux augmente, le champ magnétique induit fait par le courant induit est dans le sens contraire de champ qui fait le flux, donc vers le bas. On trouve ensuite la direction avec la règle de la main droite qui donne la direction du champ dans l'anneau à partir du courant (pouce dans la direction du champ, donc vers le bas, et doigts dans la direction du courant). On obtient la même direction pour le courant.

1.8 Résumé des équations

- **Différence de potentiel entre les extrémités d'une tige en mouvement dans un champ Magnétique**

$$\mathcal{E}_{\text{induit}} = vB\ell$$

Où la longueur ℓ est mesurée dans la direction perpendiculaire à v et B .

- **Flux magnétique**

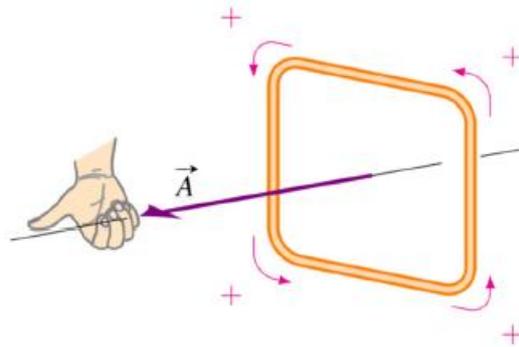
$$\phi_B = \sum BA \cos \theta$$

Où on sépare en régions où B et θ sont constants.

Ou
$$\phi_B = \int \vec{B} \cdot \vec{dA}$$

- **Sens positif du courant pour l'induction**

On place le pouce dans le sens de A (vecteur aire perpendiculaire au plan de la boucle) choisi pour calculer le flux. Le sens de rotation indiqué par les doigts est le sens positif pour le courant.



- **La loi d'induction de Faraday**

$$\mathcal{E}_{\text{induit}} = -N \frac{d\phi_B}{dt}$$

- **Champ électrique induit**

Il y a un champ électrique qui apparaît quand le champ magnétique varie en fonction du temps

- **Deuxième équation de Maxwell (complète)**

$$\oint \vec{E} \cdot \vec{ds} = - \frac{d\phi_B}{dt}$$

- **La loi de Lenz (donne la direction du courant induit)**

Le courant induit dans la boucle est dans une direction telle que le champ magnétique généré par le courant induit (qu'on va appeler le champ magnétique induit) à l'intérieur

Cela signifie que

- Si le flux augmente, le courant fait un champ magnétique induit dans la boucle opposée au champ qui fait le flux.
- Si le flux diminue, le courant fait un champ magnétique induit dans la boucle dans le même sens que le champ qui fait le flux.

2. Fonctionnement des moteurs asynchrones

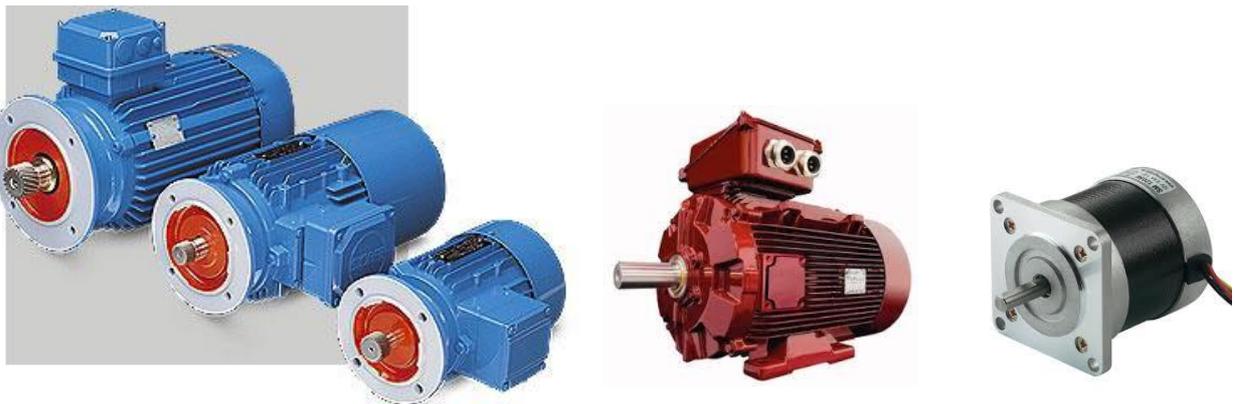
2.1 Introduction : Différents types de machines électriques

Les machines électriques tournantes convertissent l'énergie mécanique en énergie électrique et inversement : ce sont les générateurs (électriques) ou les moteurs. On rencontre :

- En courant continu :
 - les machines à courant continu : moteur, génératrice (dynamo) ;
- En courant alternatif :
 - les machines synchrones : moteur synchrone, génératrice (alternateur) ;
 - les machines asynchrones : moteur asynchrone, génératrice asynchrone.

Il s'agit d'une conversion d'énergie qui s'effectuera, bien évidemment, avec un rendement inférieur à un en raison des pertes inévitables.

2.2 Construction des moteurs asynchrones



Le tableau suivant résume les principales caractéristiques et les domaines d'utilisation des moteurs électriques :

catégorie	type	propriétés	utilisation
courant continu	aimants permanents	faible puissance (qq kW) asservissement aisé	matériel informatique, robotique, véhicule électrique
	excitation indépendante	couple important	levage, machines outils
	excitation série	fort couple au démarrage	démarrateur automobile, traction électrique (TGV SE : 0,5 MW par moteur)
courant alternatif	asynchrone monophasé	faible puissance, très économique	électroménager
	asynchrone triphasé	économique, toutes puissances	moteur industriel le plus répandu, traction électrique (TGV Nord)
	synchrone à aimant	faible puissance, variateur de vitesse obligatoire	robotique (moteur sans balais), matériel informatique
	synchrone à électro-aimants	grande et très grande puissance	concasseur, propulsion de navire, pompage, turbinage, traction électrique (TGV Ouest : 1,1 MW par moteur)
	universel (continu série)	faible puissance	électroménager, outillage
pas à pas	aimants permanents, hybride, réluctance variable	très faible puissance, positionnement précis en boucle ouverte	matériel informatique

Les moteurs asynchrones basse tension sont des moteurs électriques dont la puissance de rotation est basée sur l'induction électromagnétique. Le courant induit vers les enroulements du moteur crée un champ magnétique rotatif qui induit une tension dans les barres du rotor.

Les barres forment un circuit fermé où le courant commence à circuler, formant un autre champ magnétique. Les champs magnétiques du rotor et du stator interagissent de telle sorte que le rotor commence à suivre le champ magnétique du stator, produisant ainsi un couple.

Dans la nature des moteurs asynchrones, le rotor a tendance à chuter sous la vitesse du champ magnétique dans le stator. Lorsque la charge mécanique augmente sur l'arbre moteur, la différence en vitesse (glissement) augmente et un couple plus élevé est produit.

Le moteur asynchrone est un moteur électrique qui utilise la puissance électrique pour induire la rotation du rotor. Les principales pièces du moteur à induction et leurs fonctions sont les suivantes.

Stator - partie stationnaire du moteur qui entoure le rotor. Le stator est constitué de fils de cuivre (enroulements) bobinés entre ses encoches pour transporter le courant d'alimentation et induire un champ magnétique rotatif et interagir avec le rotor.

Rotor - partie rotative du noyau du moteur fixée à l'arbre. Le rotor est constitué d'un empilement de fines tôles d'acier et d'une construction en cage de barres conductrices qui réagissent avec le champ magnétique du moteur et produisent le couple qui permet de faire tourner l'arbre.

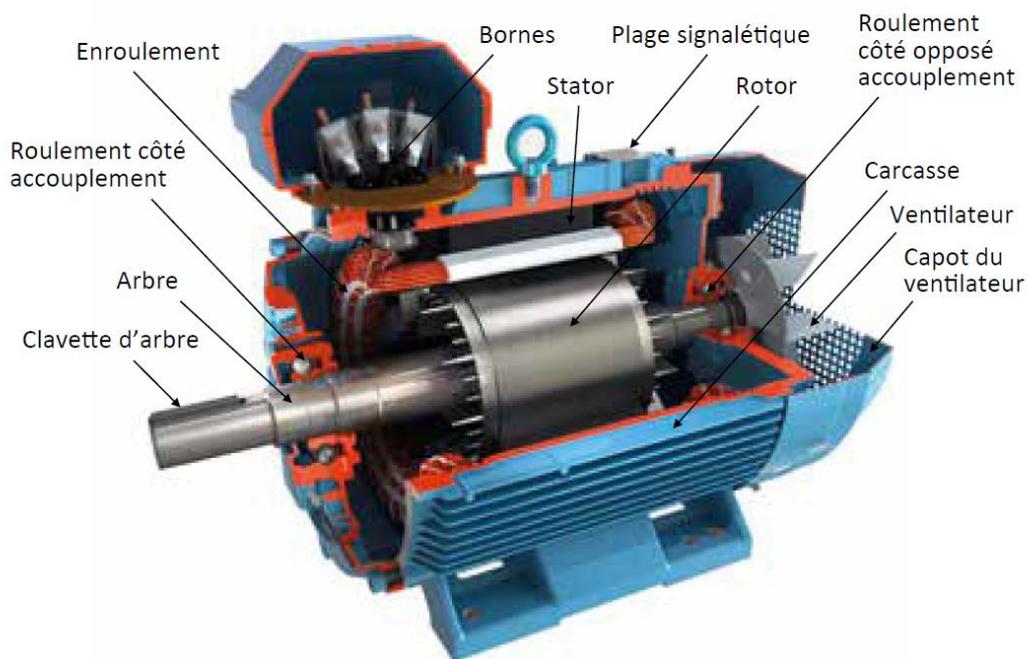
Arbre - partie rotative la plus profonde du moteur qui transmet la puissance de rotation du moteur à l'application fixée côté accouplement du moteur.

Roulements - les roulements entourent l'arbre du moteur aux deux extrémités et réduisent le frottement entre la carcasse du moteur et l'arbre.

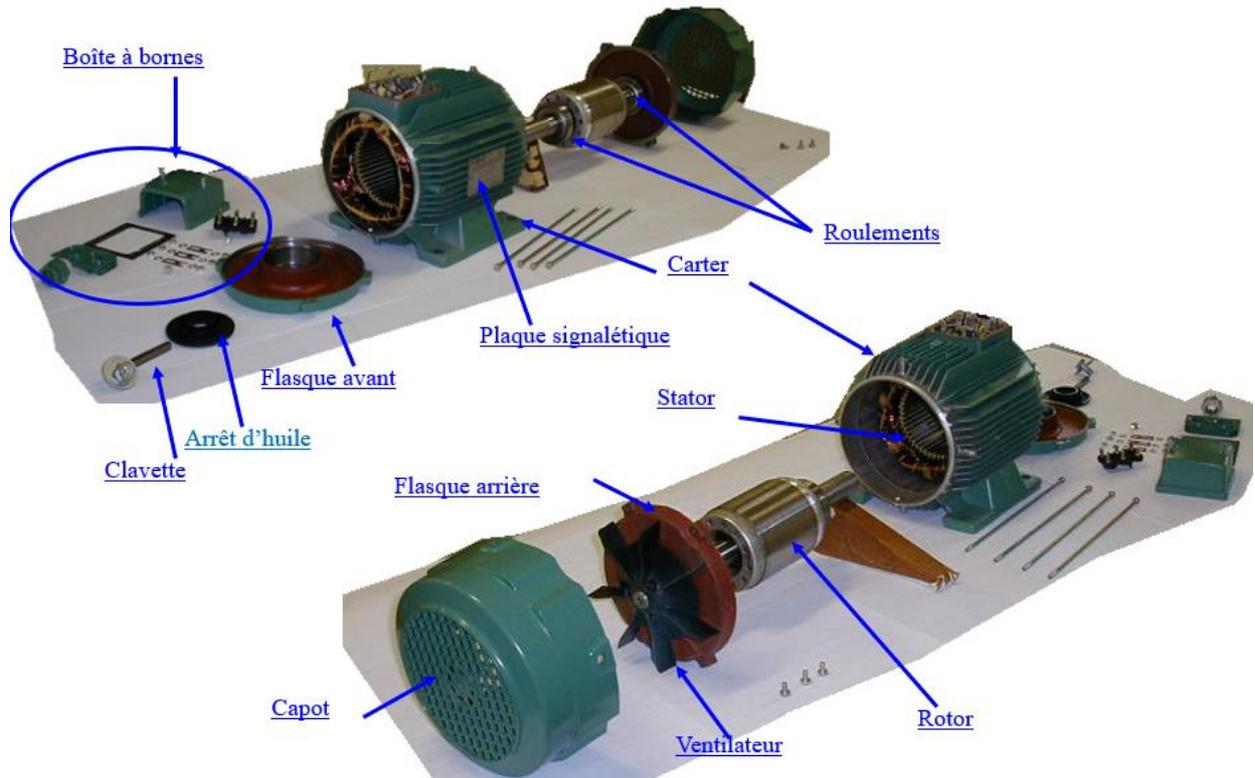
Carcasse – boîtier en fonte ou en aluminium qui couvre les pièces du noyau du moteur et fournit les raccords électriques.

Côté accouplement - extrémité d'entraînement du moteur.

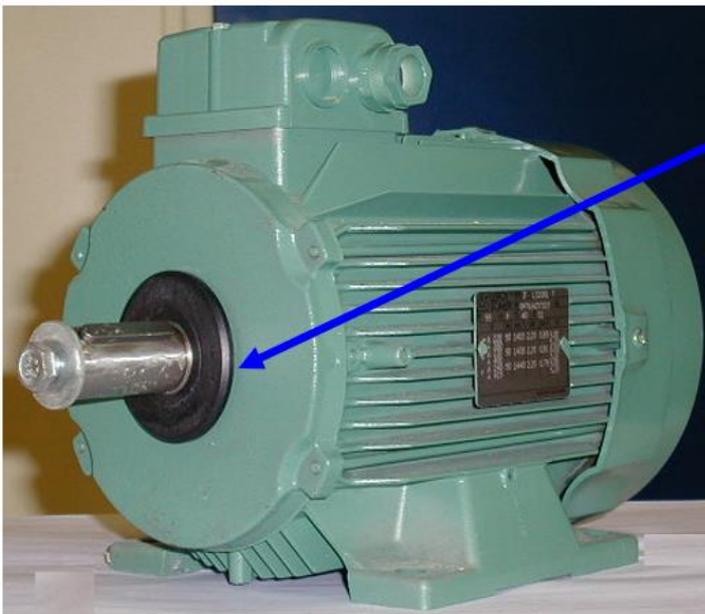
Côté opposé à l'accouplement - extrémité isolée du moteur.



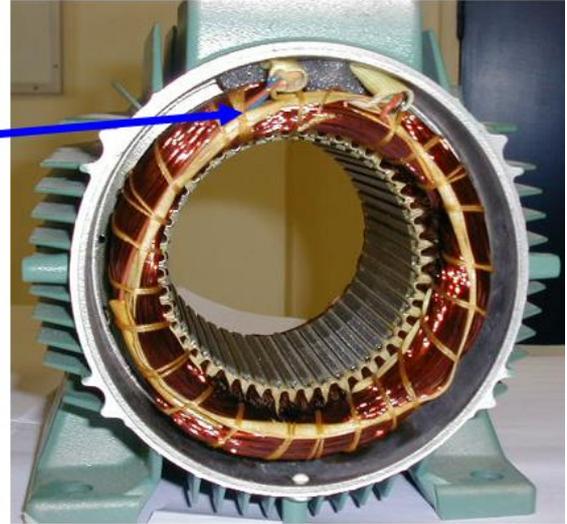
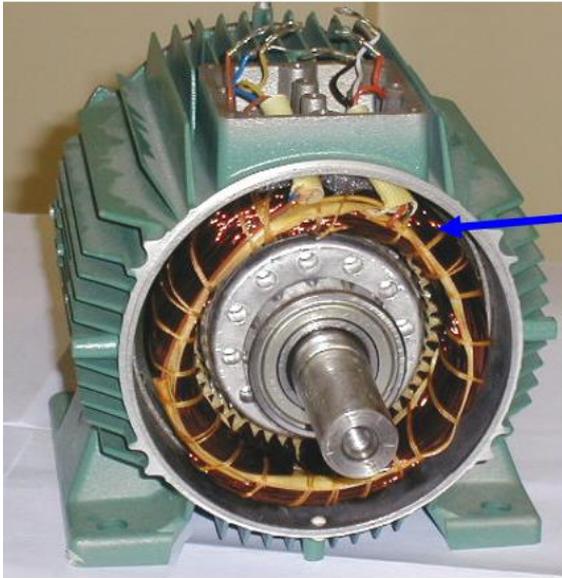
2.2.1 Vue éclatée d'un moteur asynchrone



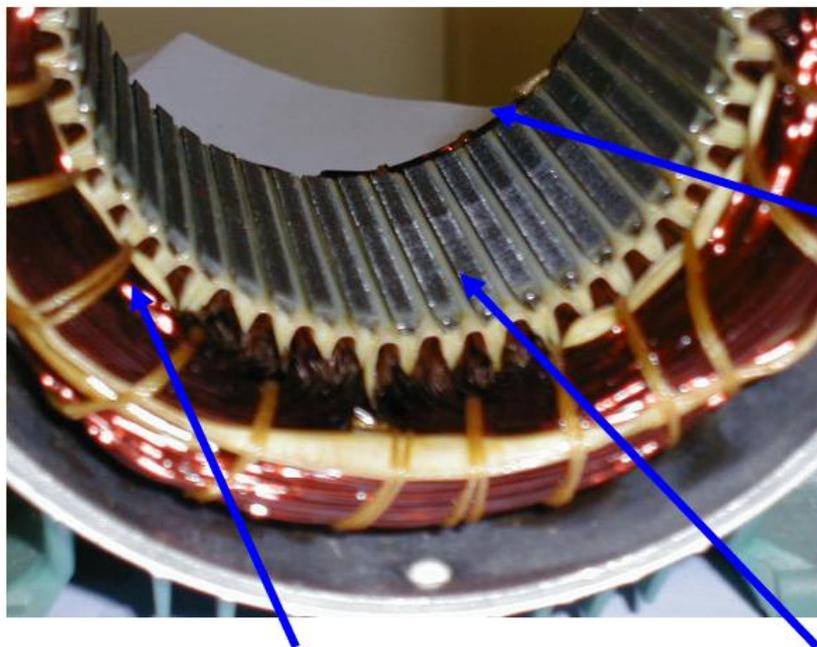
□ Flasque avant



□ Stator



□ Stator

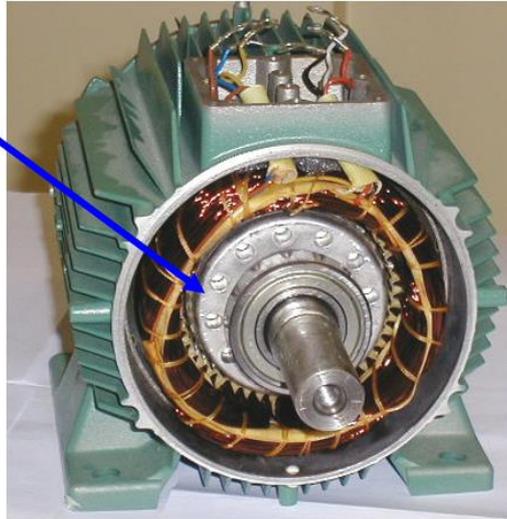


Circuit magnétique

Enroulements

Encoches

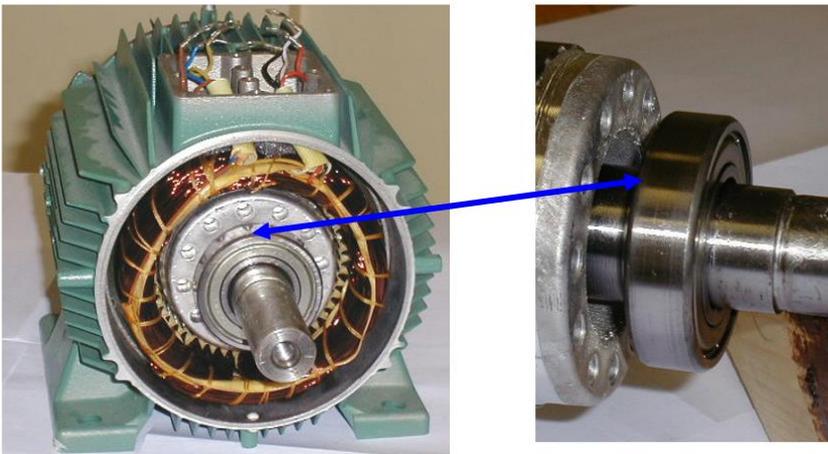
□ Rotor



□ Le rotor cage d'écuréuil



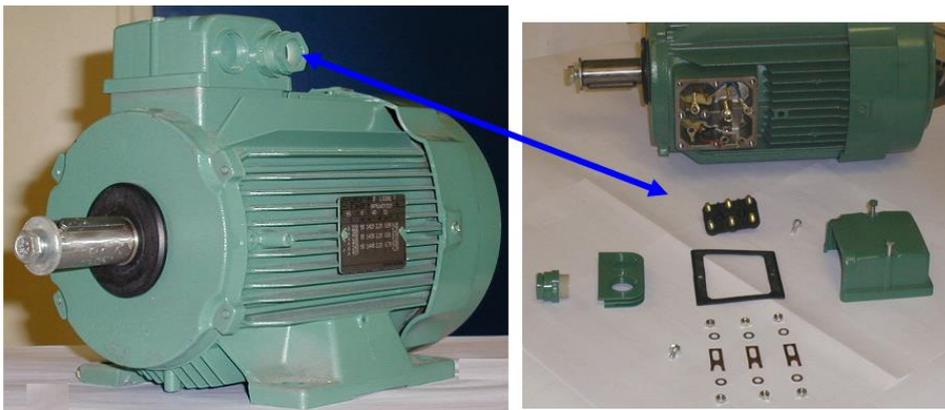
□ Les roulements



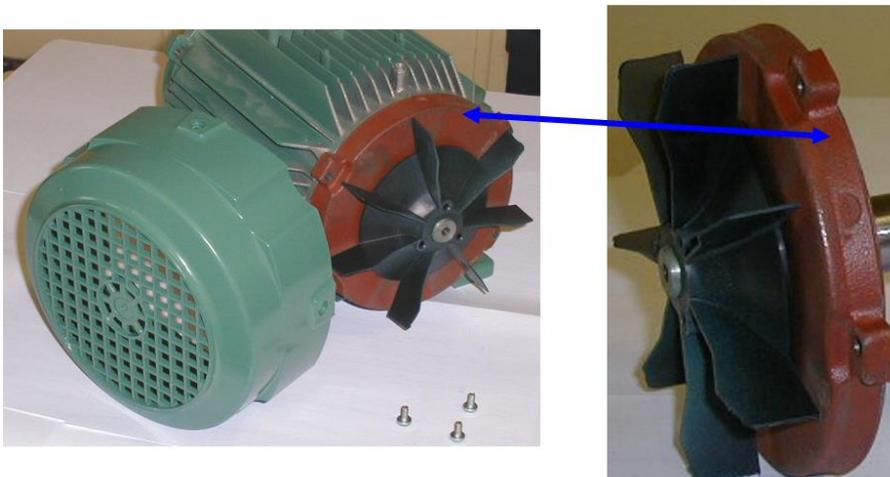
Clavette



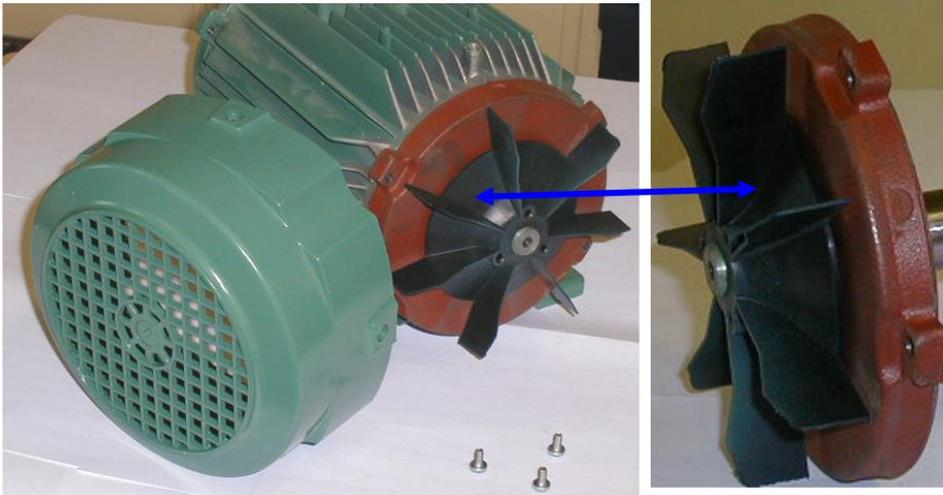
Boîte à bornes



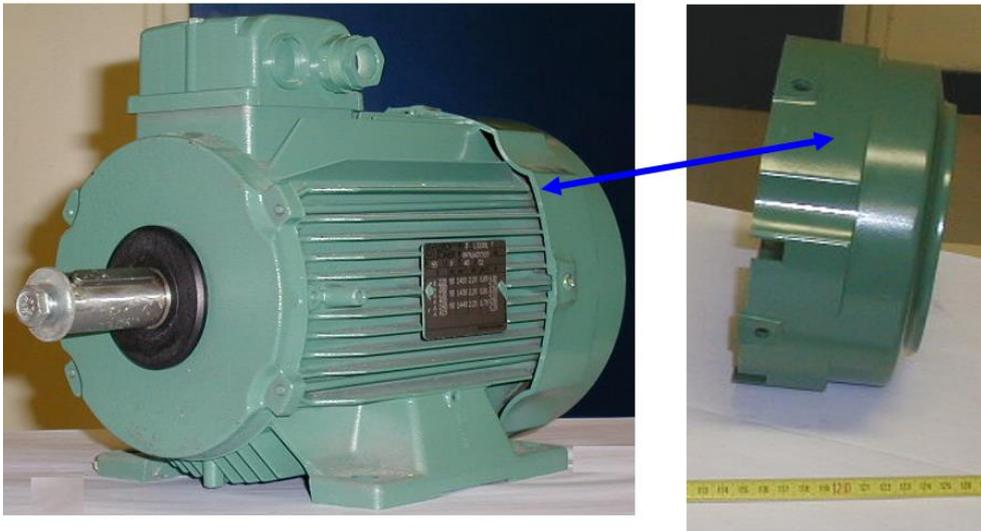
Flasque arrière



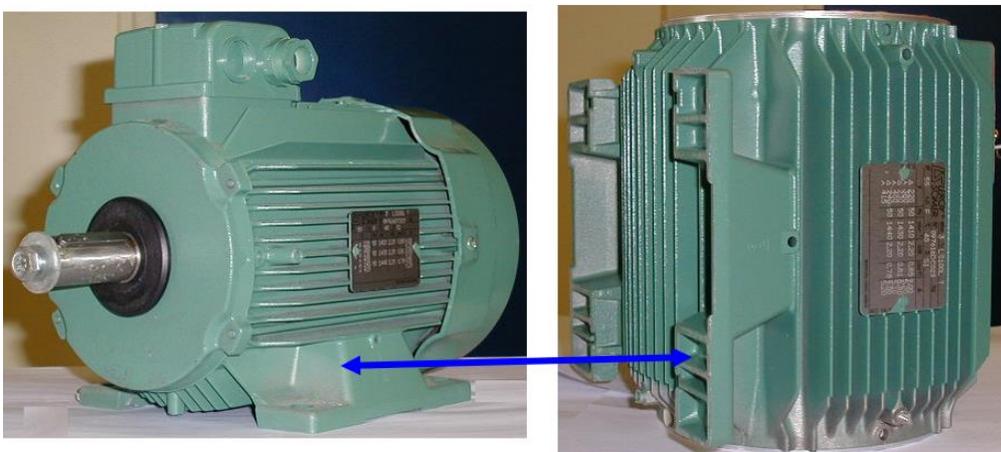
□ Ventilateur



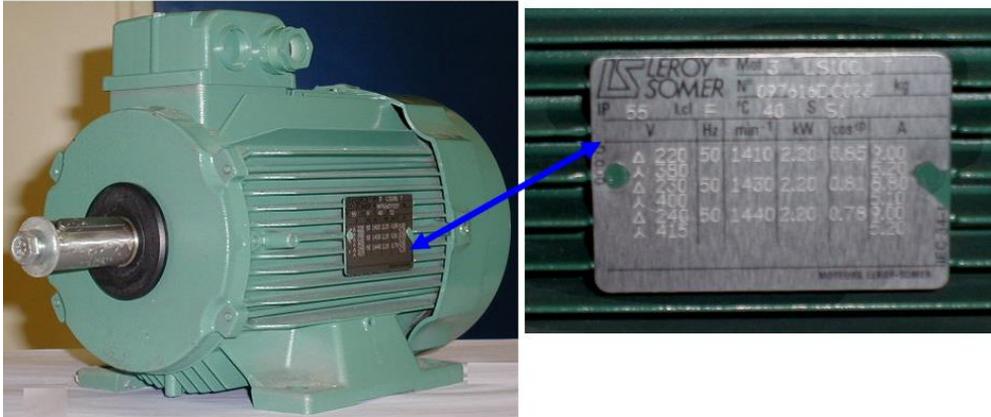
□ Capot



□ Carter

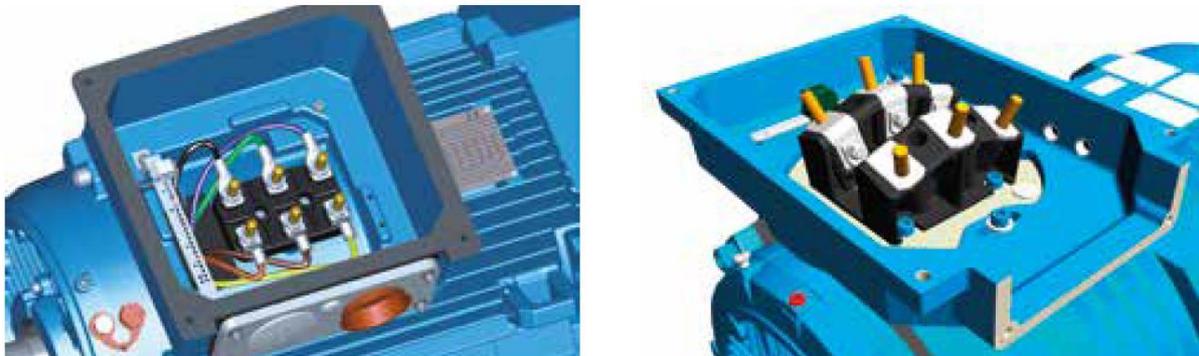


□ Plaque signalétique



2.2.2 La boîte à bornes

La boîte à bornes des moteurs aluminium permet l'entrée de câbles de deux côtés. Dans les petits moteurs, le boîtier est intégré dans la carcasse du moteur et est équipé d'une bride borgne avec ouvertures prédécoupées des deux côtés

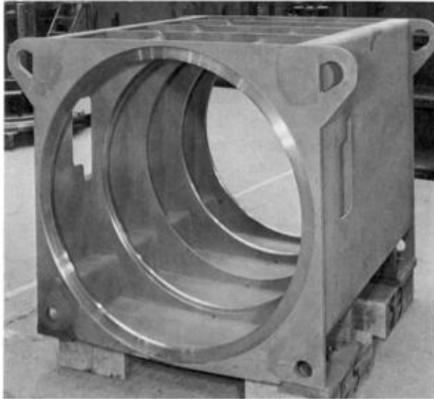


2.2.3 Constitution du stator (inducteur)

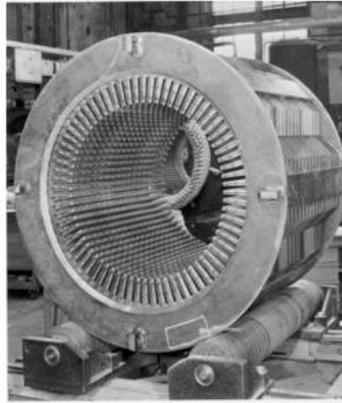
Les moteurs électriques fermés sont disponibles avec carcasse aluminium et fonte pour différents domaines d'application. Les moteurs fonte sont généralement utilisés dans les industries lourdes exigeant une meilleure durabilité par rapport aux produits chimiques et à la corrosion, alors que les moteurs aluminium sont mieux adaptés aux applications plus légères telles que les pompes et les ventilateurs.

Les bobinages sont maintenus immobiles dans des encoches qui sont creusées dans le stator c'est dans ces bobinages qu'est créé le champ magnétique inducteur

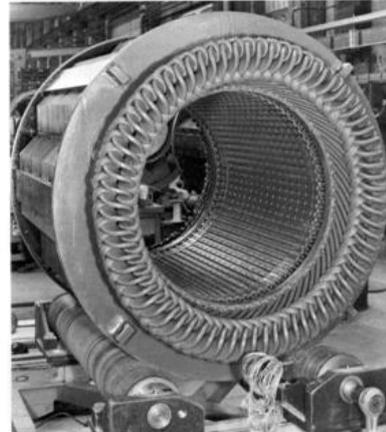
Carcasse usinée



Avant bobinage



Après bobinage



2.2.4 Bobinage du stator

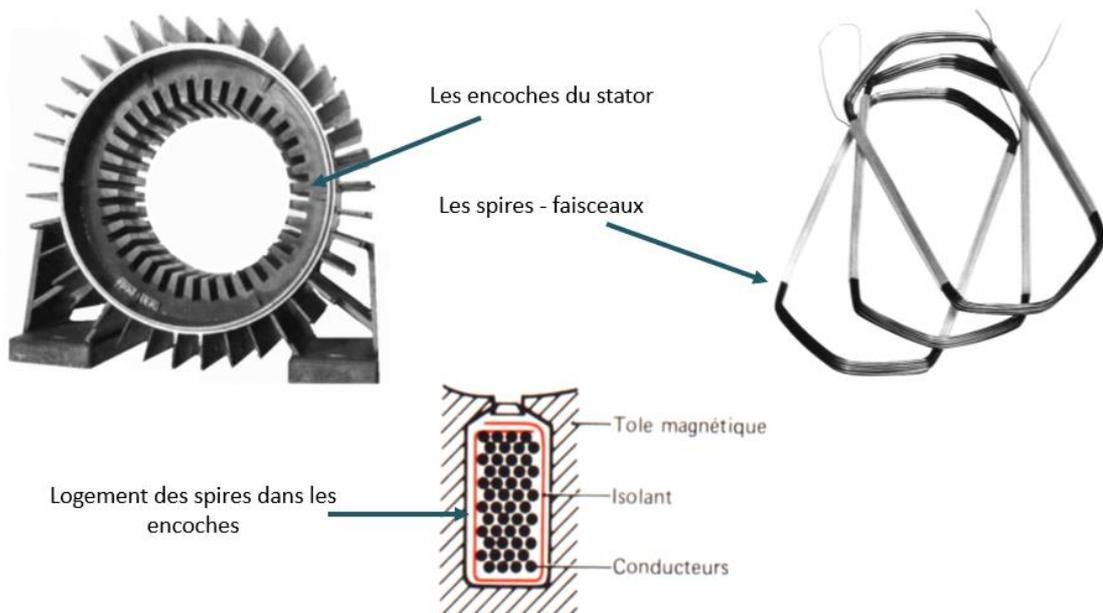
Le stator est au moins constitué de trois bobinages décalés l'un de l'autre de $\pm 120^\circ$

Les courants qui traversent ces bobinages sont appelés courant statorique, ils sont eux aussi déphasés de $\pm 120^\circ$ l'un de l'autre

Selon le théorème de Ferraris, ces courants créent un champ magnétique tournant

B_s à la pulsation ω_s

En jouant sur le bobinage, il est possible d'avoir plusieurs paires de pôles au niveau des bobinages statoriques dans chaque phase. On note p le nombre de paires de pôles

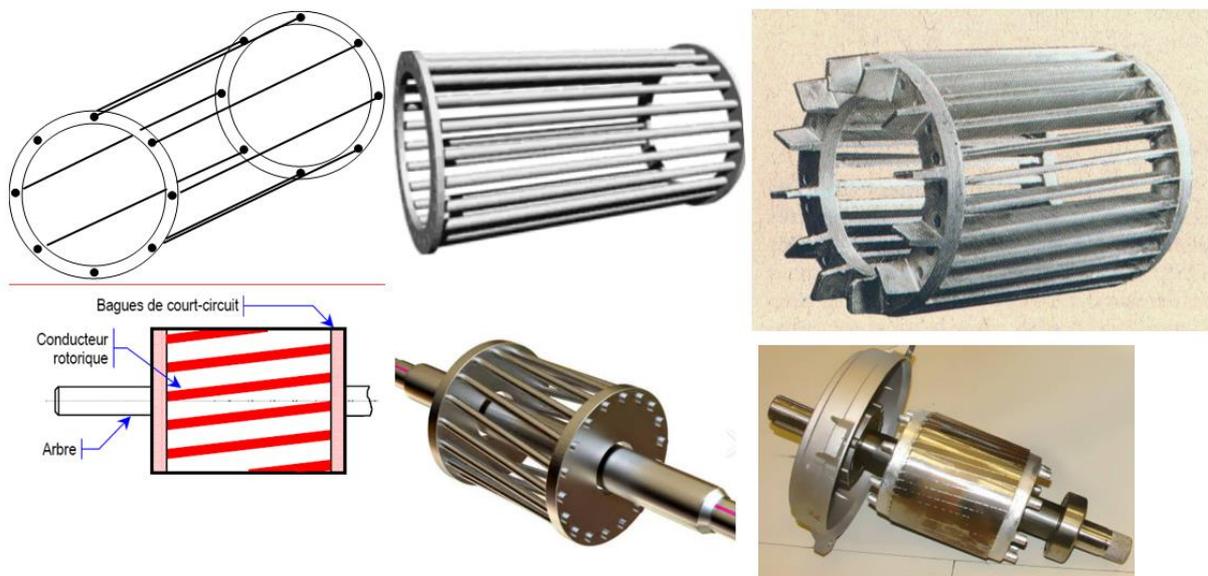


- Synchronisme

Il ne faut pas confondre la vitesse de synchronisme Ω_s (mécanique) et la pulsation ω_s (électrique) des courants statoriques. Le rotor tourne à la vitesse de synchronisme uniquement lorsqu'il est à vide. À ce moment-là, on peut écrire $\omega_s = p \times \Omega_s$

2.2.5 Constitution du rotor (induit)

Le rotor est constitué d'un ensemble de conducteurs en court-circuit appelé « cage d'écureuil »



- Le rotor (l'induit)

Il existe différentes technologies au niveau du rotor : la plus utilisée est le rotor à cage d'écureuil, mais il existe aussi des rotors bobinés



- Le rotor à cage d'écureuil

Le rotor à cage d'écureuil est constitué de lame conductrice fermé de chaque côté par un anneau de court-circuit

Le rotor n'est pas connecté à une alimentation Il n'y pas de collecteur, ni de balais (comme le cas du moteur à courant continu) ce qui est un avantage en termes de coût d'entretien et d'usure

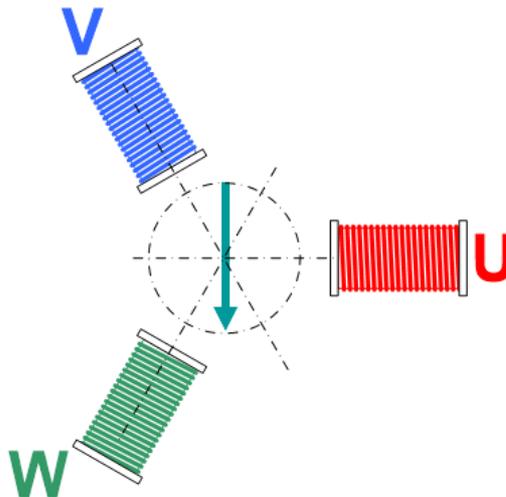
- Les courants rotoriques

Le rotor ne tournant pas à la vitesse du champ magnétique inducteur, les courants dans l'induit sont variables et évoluent de manière sinusoïdale à une pulsation que l'on notera ω_R

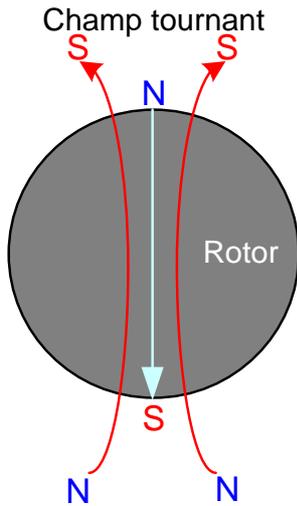
De plus les courant rotoriques vont créer à leur tour un champ tournant rotorique B_R avec une pulsation ω_R

2.3 Principe de fonctionnement du moteur asynchrone

Les 3 bobines du stator forment une paire de pôles

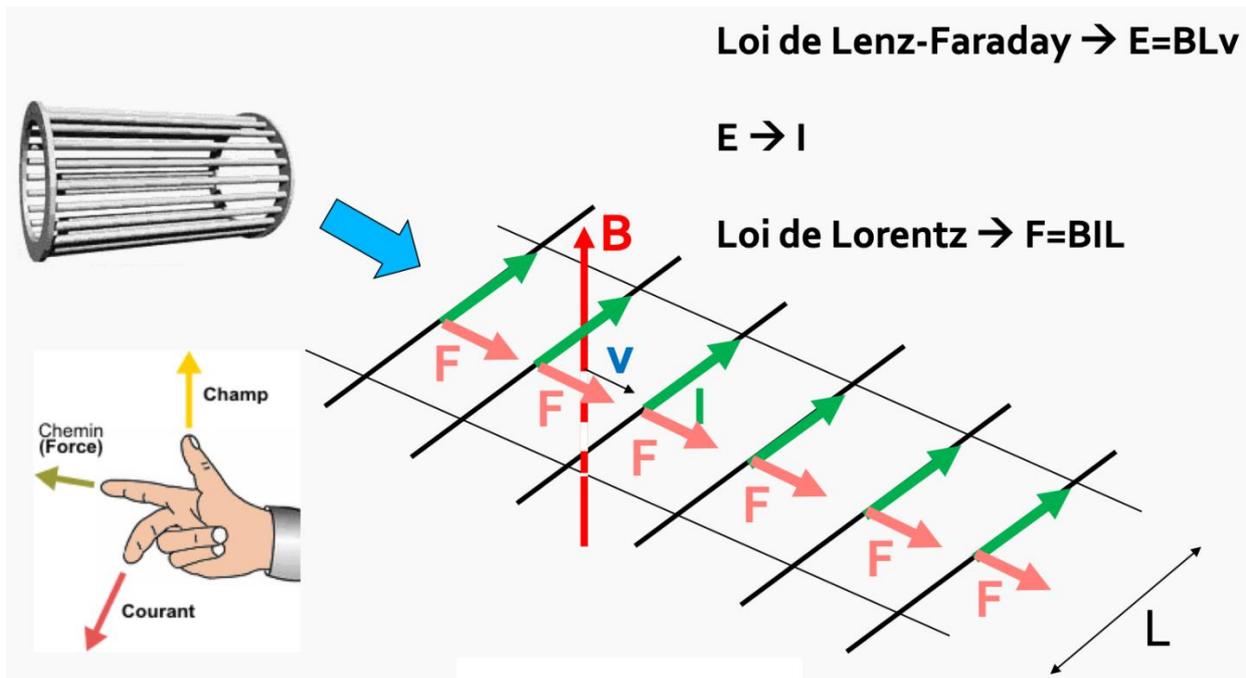


Le principe de la mise en rotation du rotor est assez simple. Nous prenons le modèle de la cage d'écureuil, plus simple que celui du rotor bobiné (montré sur la figure ci-dessus).

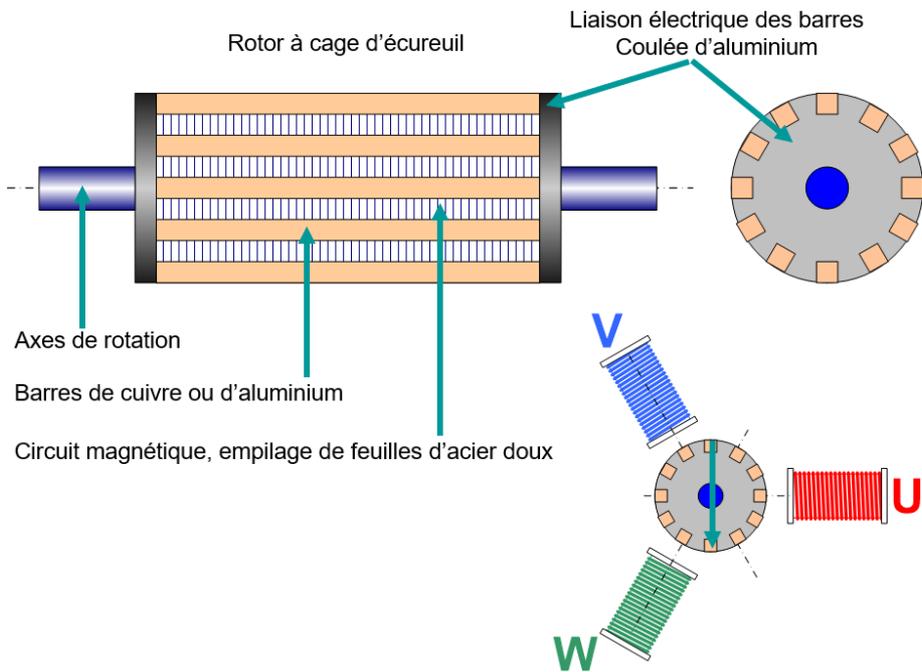
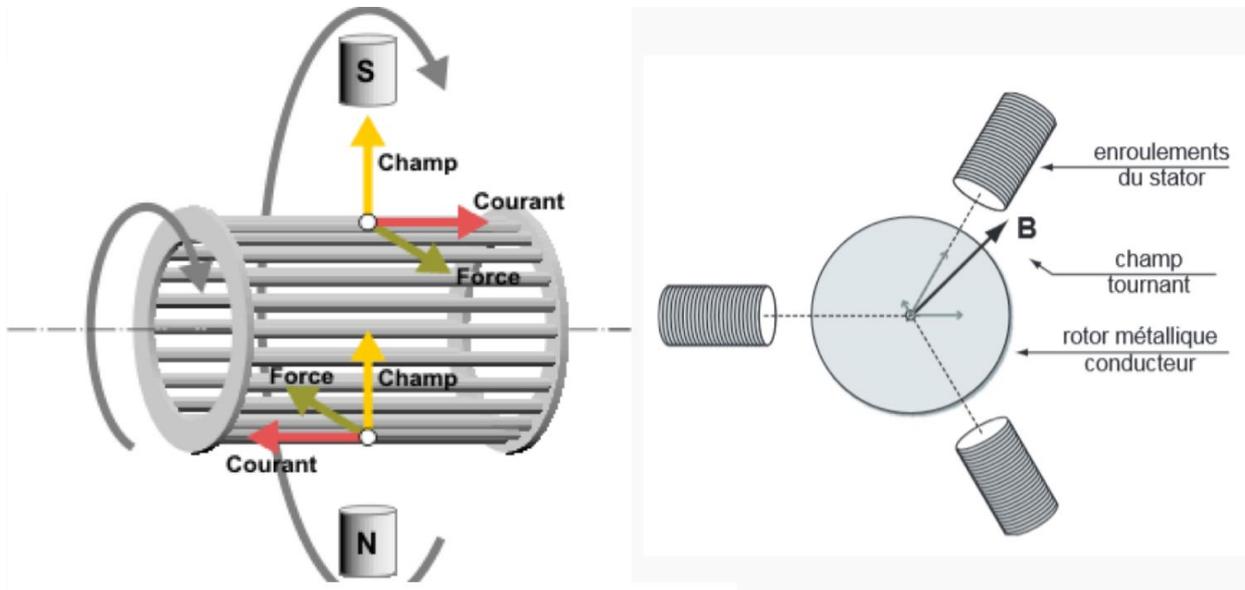


Loi de Lenz : Le sens du courant induit est tel que, par ses effets, il s'oppose à la cause qui lui donne naissance

Déroulons notre cage d'écureuil, et nous obtenons des barres court-circuitées sur les bords :
 cette échelle conductrice est baignée dans un champ magnétique qui se déplace perpendiculairement à la vitesse v ;
 il s'ensuit un phénomène d'induction, caractérisé par une tension induite dans chaque barre ;
 un courant circule sous l'effet de la tension induite, limité par la résistance totale des barres ;
 le champ magnétique interagit alors avec le courant pour donner naissance à une force électromagnétique ;
 si les barres sont libres, cette force tend à les entraîner dans le sens du mouvement, pour s'opposer au phénomène d'induction qui lui donne naissance.



Revenons à notre cage d'écureuil, montée sur un axe, en rotation libre. Le champ magnétique est perpendiculaire aux barres et tourne autour, d'où le nom de champ tournant. Les forces électromagnétiques entraînent le rotor en rotation dans le sens du mouvement du champ magnétique.



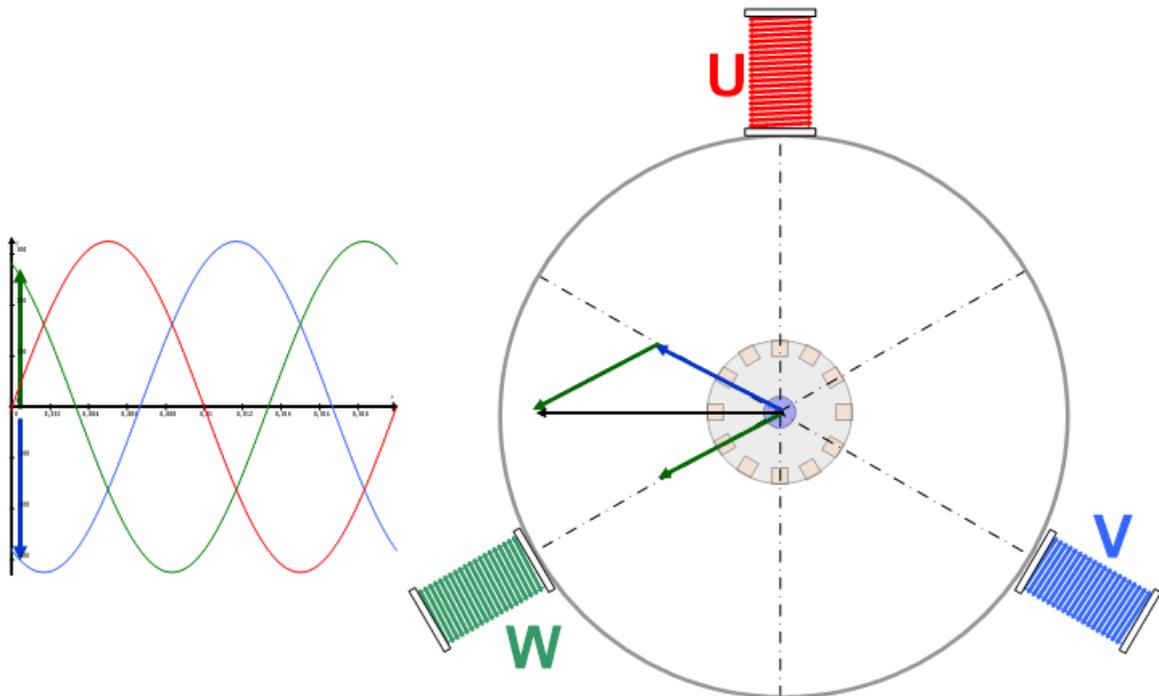
Idéalement, la vitesse de rotation du rotor devrait atteindre celle du champ magnétique tournant, appelée vitesse de synchronisme. Or, le couple résistant appliqué au rotor et les

forces de frottement font que le rotor tournera moins vite. L'écart entre la vitesse idéale (celle du champ tournant) et la vitesse réelle est appelé le **glissement**.

En fait, c'est ce qui permet de transférer de la puissance mécanique (du couple électromécanique). Plus le glissement est grand, plus le rotor transmet de puissance mécanique.

➤ Explication du champ magnétique tournant

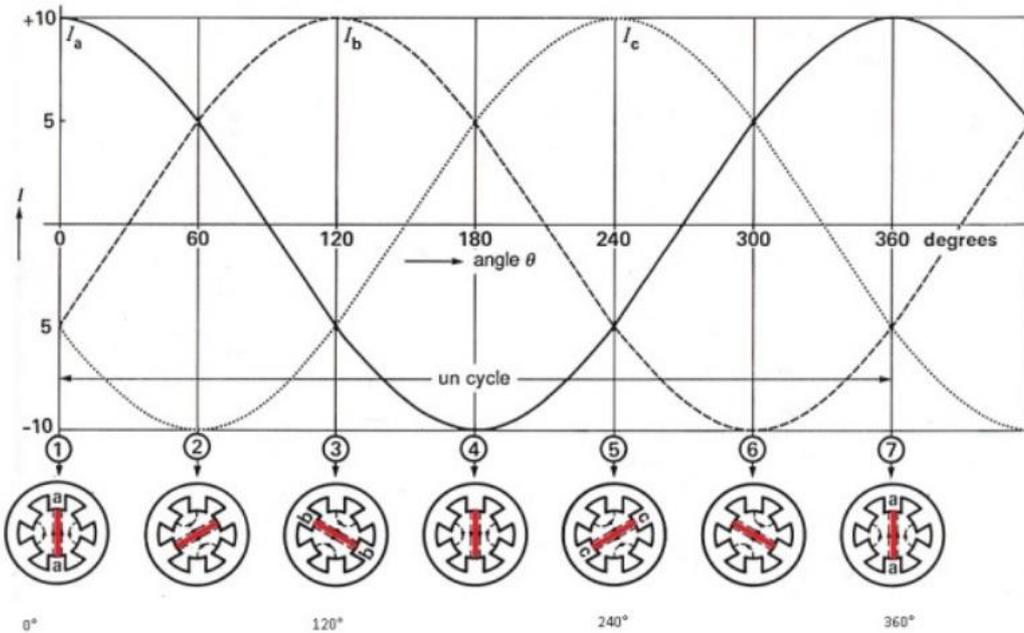
Revenons à la question de la génération du champ magnétique tournant dans le cas de la machine triphasée. Le bobinage du stator crée les pôles magnétiques. Il peut y en avoir beaucoup, mais le fonctionnement est similaire au cas simple suivant



Trois enroulements sont disposés géométriquement, de manière équidistante, sur un cercle. Chaque enroulement crée un champ magnétique dans la direction de son axe propre. Le champ effectif est la somme vectorielle des trois composantes. Si ces composantes n'ont pas la même amplitude, le champ résultant prend une certaine direction et une certaine amplitude.

En faisant varier dans le temps les amplitudes des composantes, on obtient un champ résultant tournant.

La figure ci-après montre la rotation du champ magnétique sur un cycle de tension. On constate que le champ effectue un tour complet en une période



2.4 Le glissement, et la vitesse de synchronisme

2.4.1 Le glissement

Si le moteur tourne en synchronisme avec le champ tournant, la vitesse relative entre le rotor et le champ tournant est NULLE. **L'induction ne peut donc pas exister !**

Le rotor tourne toujours moins vite que le champ tournant. De cette façon il est toujours balayé par le champ tournant et se transforme en une pièce magnétique ; **Ce qui donne le nom de moteur asynchrone**

Cette différence de vitesse s'appelle le **glissement**

Équations

Vitesse de synchronisme
(le champ tournant)

$$N_s = \frac{60 \cdot f}{P}$$

N , N_s = vitesse en tr.mn⁻¹

P = Nombre de paire de pôles

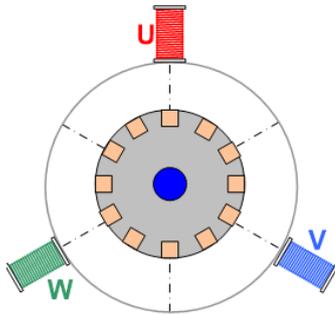
Glissement en %

$$g = \frac{N_s - N}{N_s}$$

f = fréquence d'alimentation en Hz

Le glissement généralement est de l'ordre de 5%

2.4.2 Vitesse de synchronisme en fonction du nombre de paires de pôles

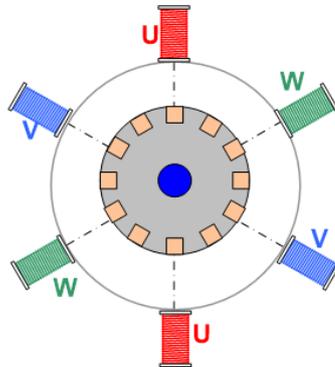


Une paire de pôles

$$N_s = \frac{60 \cdot f}{1}$$

Si la fréquence d'alimentation est de 50Hz

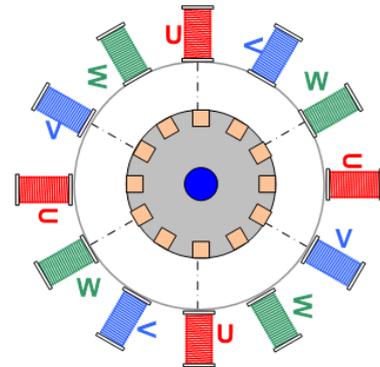
$$N_s = 3000 \text{ tr.mn}^{-1}$$



2 paires de pôles

$$N_s = \frac{60 \cdot f}{2}$$

$$N_s = 1500 \text{ tr.mn}^{-1}$$



4 paires de pôles

$$N_s = \frac{60 \cdot f}{4}$$

$$N_s = 750 \text{ tr.mn}^{-1}$$

➤ Exercices d'application

- Un moteur de 2 pôles est alimenté en courant alternatif 50Hz

Sa vitesse de synchronisme sera de :

$$2 \text{ pôles} = 1 \text{ paire de pôles donc } N_s = 3000 \text{ tr.mn}^{-1}$$

- Un moteur de 4 paires de pôles est alimenté en courant alternatif 50Hz

Sa vitesse de synchronisme sera de : $N_s = 750 \text{ tr.mn}^{-1}$

Avec un glissement de 5% sa vitesse réelle sera de : $N = 712 \text{ tr.mn}^{-1}$

- Un moteur de 1 paire de pôles est alimenté en courant alternatif 50Hz

Sa vitesse réelle est de 2910 tr.mn^{-1} :

Quel est son glissement ?

Réponse : Glissement = 3%

2.5 Couplage des enroulements statoriques du moteur asynchrone

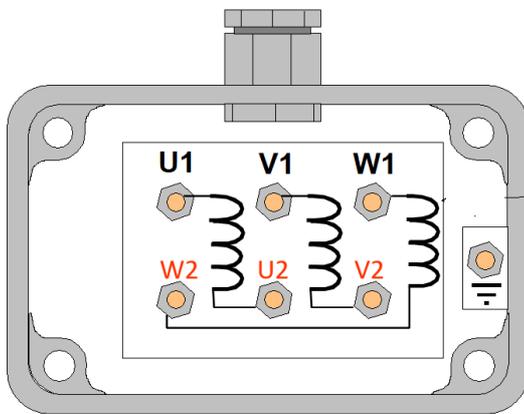
Le couplage des enroulements statoriques permet de faire fonctionner les moteurs asynchrones sous deux tensions.

Il est fonction de la tension du réseau et de la tension que peut supporter les enroulements.

Le couplage est réalisé par une connexion, à l'aide de barrettes, sur la plaque à bornes.

La plaque à borne d'un moteur asynchrone triphasé à cage comporte six bornes sur lesquelles sont connectées les enroulements du stator (par construction du fabricant).

La disposition « croisée » des enroulements a permis de normaliser l'appellation et la position des bornes en deux groupes : U1, V1, W1 et U2, V2, W2.



Plaque à bornes

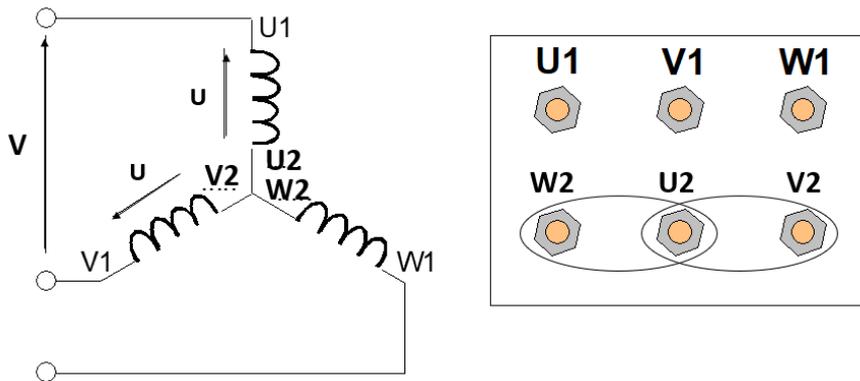
LEROY - SOMER		
Mot asyn	Type : LS 132 M	
N° : 562895566	3 ~	cos φ = 0,86
KW : 7,5	CI : F	t° : 80 K
50 Hz	IP : 55	56 Kg
V : 230 V		I : 28 A
U : 400 V		i : 14,8A
min ⁻¹ : 1450		S1
ANGOULEME - FRANCE		

En couplage triangle, chaque enroulement du moteur asynchrone voit directement la tension appliquée. En couplage étoile, chaque enroulement voit une tension réduite (divisée par racine de 3).

2.5.1 Couplage étoile

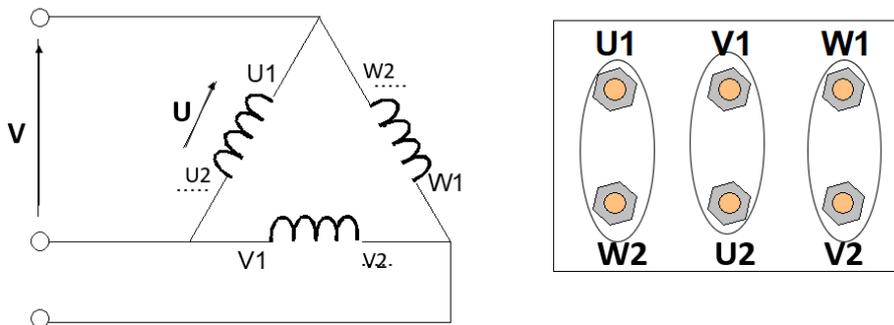
Quand les tension réseau et nominale du moteur sont égales, on choisit le couplage étoile.

Exemple : moteur 230V/400V sur réseau 230V/400V : couplage étoile



Ici, la tension est de 400V entre phases. Or chaque enroulement a besoin de 230V pour fonctionner. On choisit donc le couplage étoile. Si on utilisait le couplage triangle, chaque enroulement subirait 400V à ses bornes et serait détruit.

2.5.2 Couplage Triangle



Quand la plus "petite" tension nominale du moteur asynchrone est égale à la plus "grande" tension réseau (donc la tension entre phases), on choisit le couplage triangle.

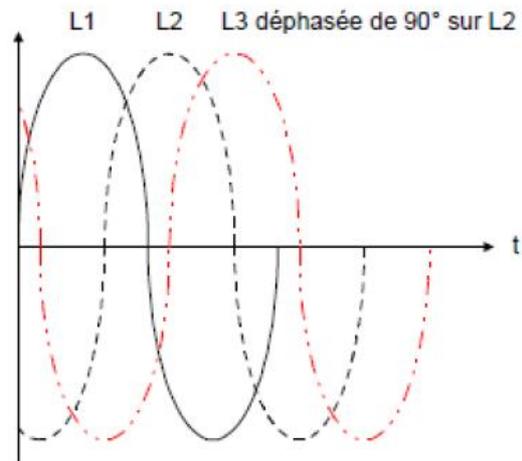
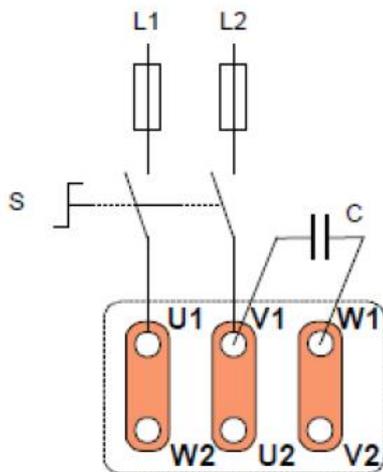
Exemple : moteur 230V/400V sur réseau 127V/230V : couplage triangle

Ici, la tension est de 230V entre phases. Or chaque enroulement a besoin de 230V pour fonctionner. On choisit donc le couplage triangle.

2.6 Moteur triphasé asynchrone à cage raccordé en monophasé

Il est possible de faire fonctionner un moteur triphasé de petite puissance (environ 1 kW maximum) sur un réseau monophasé.

On remplace la phase manquante par une des deux phases qui est déphasée par un condensateur.



• **Usages :**

- Aspirateur de salle de peinture,
- Moteur de brûleur et de circulateur de chauffage central,
- Petit groupe motopompe.

Le couple au démarrage du moteur en monophasé est d'environ la moitié de celui en triphasé.

La valeur de la capacité dépend de la puissance en chevaux du moteur, de la tension du réseau et de la fréquence.

1 cheval = 736 Watts

$$C \text{ (en } \mu\text{F)} = 50 P \text{ (en ch)} \left(\frac{220}{U}\right)^2 \frac{50}{f}$$

• **Exemple :**

Calculez la valeur de la capacité d'un moteur triphasé pour une pompe de circulation de chauffage central, fonctionnant en monophasé sur un réseau de 220 V. La puissance du moteur est de 1/3 de cheval.

$$C = 50 \times 0,3 \left(\frac{220}{220}\right)^2 \times \frac{50}{50} = 15 \times 1^2 \times 1 = 15 \mu\text{F} \quad \Rightarrow \quad \text{Choix du condensateur : } 16 \mu\text{F} - 350 \text{ V (Umax)}$$

Auto-Evaluation : A1

QCM

1

Ce sont les tôles :



- a *Rotor*
- b *Stator*

2

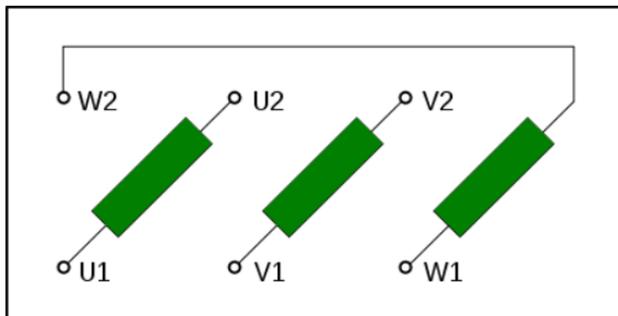
C'est un rotor de moteur :



- a *asynchrone à cage*
- b *asynchrone à bagues*
- c *à courant continu*
- d *pas à pas*

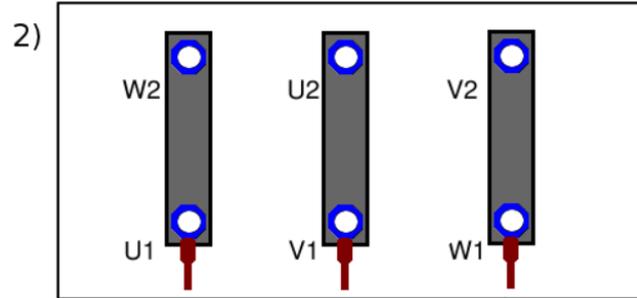
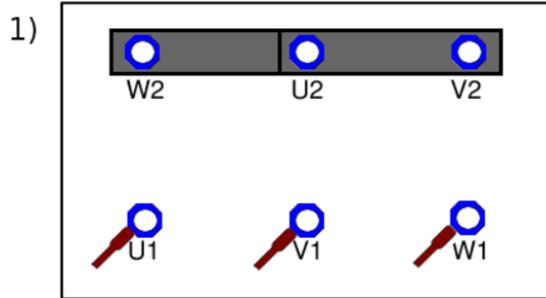
3

On donne le schéma des enroulements d'une plaque à bornes d'un moteur asynchrone triphasé :



Quel câblage correspond à un couplage étoile ?

- a *Câblage 1*
- b *Câblage 2*



4

La plaque signalétique d'un moteur asynchrone triphasé à cage indique :

400 / 690 V - 50 Hz - Δ 234 A - Y 136 A - 1485 tr/min - 132 kW - $\cos \phi = 0,85$ - 785 kg

Donc Le moteur possède :

- a 2 pôles
- b 4 pôles
- c 6 pôles
- d 8 pôles

5

La plaque signalétique d'un moteur asynchrone triphasé à cage indique :

400 / 690 V - 50 Hz - Δ 234 A - Y 136 A - 1485 tr/min - 132 kW - $\cos \phi = 0,85$ - 785 kg

Alors Le glissement nominal est :

- a 1 %
- b 10 %
- c 0,1 %
- d 0,01 %

6

La plaque signalétique d'un moteur asynchrone triphasé à cage indique :

400 / 690 V - 50 Hz - Δ 234 A - Y 136 A - 1485 tr/min - 132 kW - $\cos \phi = 0,85$ - 785 kg

En couplage Δ , il faut alimenter le moteur avec un réseau triphasé :

- a 133 V / 230 V

- b 230 V / 400 V
- c 400 V / 600 V

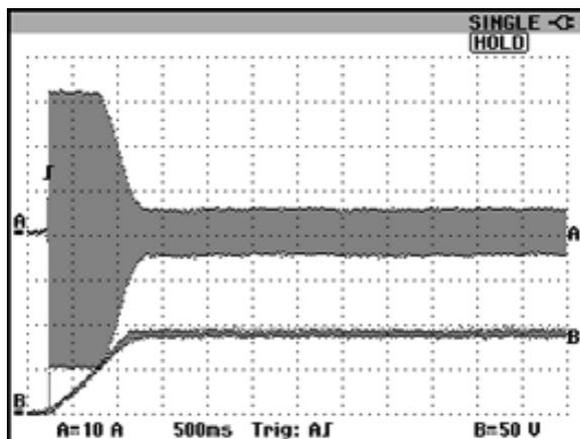
7

La plaque signalétique d'un moteur asynchrone triphasé à cage indique :
 400 / 690 V - 50 Hz - Δ 234 A - Y 136 A - 1485 tr/min - 132 kW - $\cos \phi = 0,85$ - 785 kg
 La puissance absorbée nominale est :

- a 132 kW
- b 138 kW
- c 162 kW
- d 239 kW

8

Quel est la durée approximative du démarrage de ce moteur asynchrone ?
 (courbe A : courant – courbe B : vitesse)

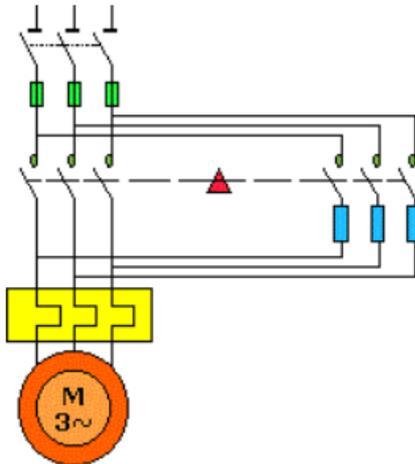


- a 0,1 seconde

- b 1 seconde
- c 10 secondes

9

C'est le schéma d'un :



- a démarrage statorique
- b freinage par injection de courant continu
- c démarrage direct
- d démarrage étoile-triangle
- e freinage par contre-courant
- e démarrage rotorique

10

Ce fusible est spécifique à la protection des moteurs :



- a Vrais

b *Faux*

3. Fonctionnement des moteurs à courant continu

3.1 Constitution d'une machine à courant continu

Une machine à courant continu comprend quatre parties principales :

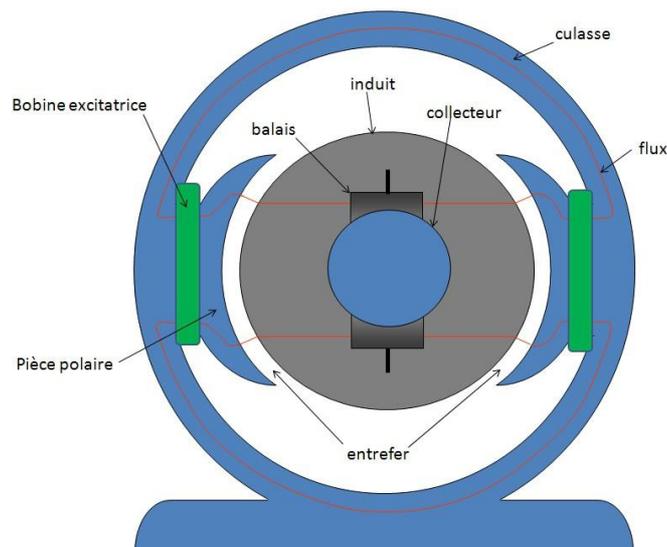
- l'inducteur ;
- l'induit ;
- le collecteur ;
- les balais également appelés charbons.

3.1.1 L'inducteur

L'inducteur d'un moteur à courant continu est la partie statique du moteur. Il se compose principalement :

- De la carcasse,
- Des paliers,
- Des flasques de palier,
- Des portes balais.

Le bobinage inducteur, traversé par le courant inducteur I_E , produit le flux magnétique dans la machine. Il est constitué d'un électro-aimant qui engendre la force magnétomotrice (F.M.M.) nécessaire à la production du flux. Dans les machines bipolaires (à deux pôles), deux bobines excitatrices sont portées par deux pièces polaires montées à l'intérieur d'une culasse. La culasse est généralement en fonte d'acier, tandis que les pièces polaires sont formées de tôles d'acier doux, voir figures suivantes.



Constitution d'une machine à courant continu.

Les bobines excitatrices sont alimentées en courant continu, et le courant qui les traverse porte le nom de courant d'excitation (IE). Ces bobines sont composées de plusieurs centaines de spires et sont traversées par un courant relativement faible. Dans certaines machines, les bobines et les pièces polaires sont remplacées par des aimants permanents.

Le champ magnétique créé par la F.M.M. des bobines traverse les pièces polaires, la culasse, l'induit et l'entrefer. L'entrefer est l'espace d'air séparant la surface de l'induit de celle des pièces polaires : il est de l'ordre de 1,5 à 5 mm pour les machines de faible et moyenne puissance.

Comme l'induit et l'inducteur sont construits avec des matériaux de faible réluctance, la majeure partie de la F.M.M. sert à « pousser » le flux à travers l'entrefer. Celui-ci doit donc être aussi peu long que possible.

Le nombre de pôles que porte l'inducteur d'une machine à courant continu dépend surtout de la grosseur de la machine. Plus une machine est puissante et plus sa vitesse est basse, plus grand sera le nombre de pôles.

Les bobines excitatrices d'un inducteur multipolaire sont connectées de façon à ce que les pôles adjacents soient de polarités magnétiques opposées.



Culasse, circuit magnétique statorique d'une machine à courant continu.



Culasse, circuit magnétique statorique d'une machine à courant continu.



Mise en place des bobines sur le circuit magnétique statorique d'une machine à courant continu.

Le nombre de pôles que porte l'inducteur dépend surtout de la grosseur de la machine. Plus une machine est puissante et plus sa vitesse est basse, plus elle aura de pôles.

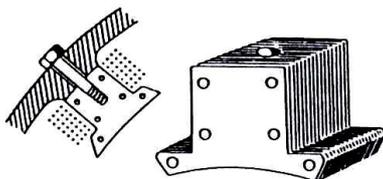


Fig. a- Pôle d'inducteur

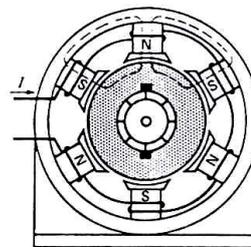
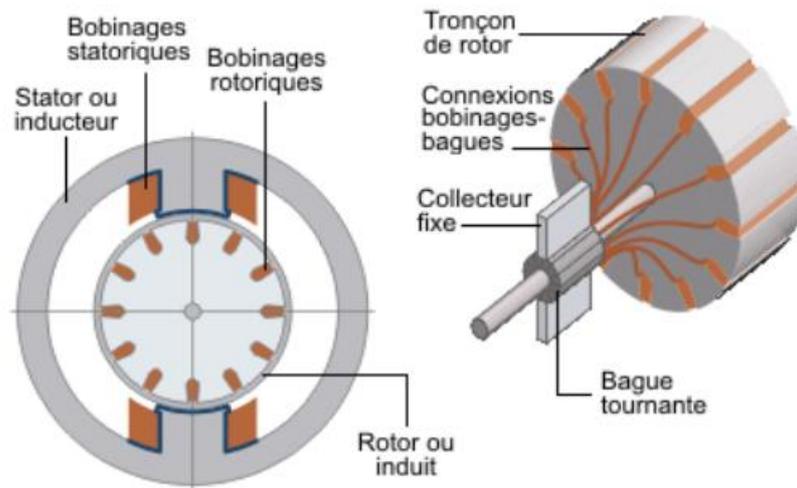


Fig. b - Polarité magnétique d'une génératrice à 6 pôles

3.1.2 L'induit

L'induit est composé d'un ensemble de bobines identiques réparties uniformément autour d'un noyau cylindrique. Il est monté sur un arbre et tourne entre les pôles de l'inducteur. L'induit constitue un ensemble de conducteurs qui coupent les lignes de champ magnétique. Les bobines sont disposées de telle façon que leurs deux côtés coupent respectivement le flux provenant d'un pôle nord et d'un pôle sud de l'inducteur.



Composition de l'induit.

Le noyau est formé d'un assemblage de tôles en fer doux. Ces tôles sont isolées électriquement les unes des autres et portent des encoches destinées à recevoir les bobines.

Les conducteurs de l'induit sont parcourus par le courant absorbé ou débité par la machine. Ils sont isolés du noyau par des couches de feuilles isolantes. Pour résister aux forces centrifuges, ils sont maintenus solidement en place dans les encoches au moyen de cales en fibre de verre. Si le courant est inférieur à une cinquantaine d'ampères, on emploie des conducteurs ronds. Au-delà de 50 A, les conducteurs sont rectangulaires, ce qui permet une meilleure utilisation du volume de l'encoche.



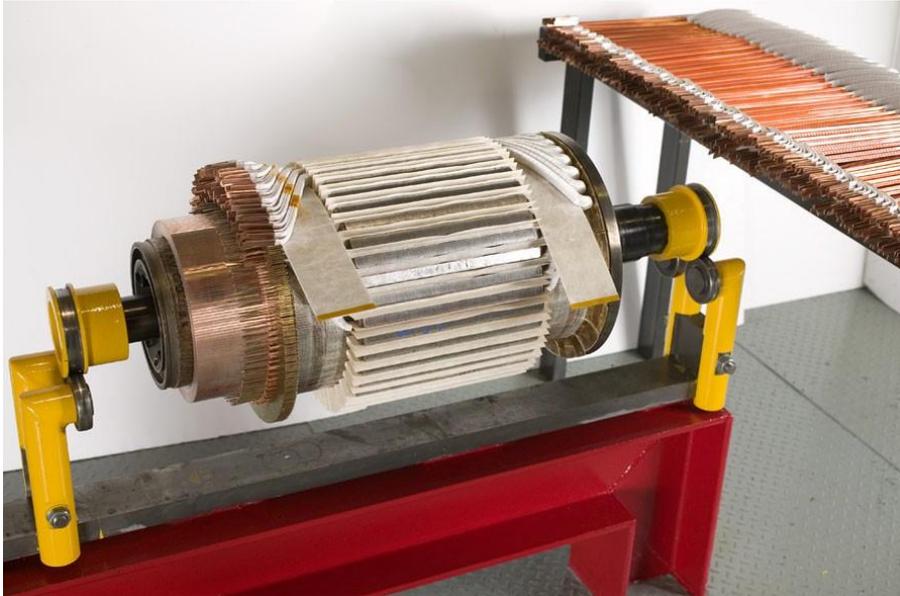
Encoche sur l'induit destinée à recevoir les conducteurs dits actifs



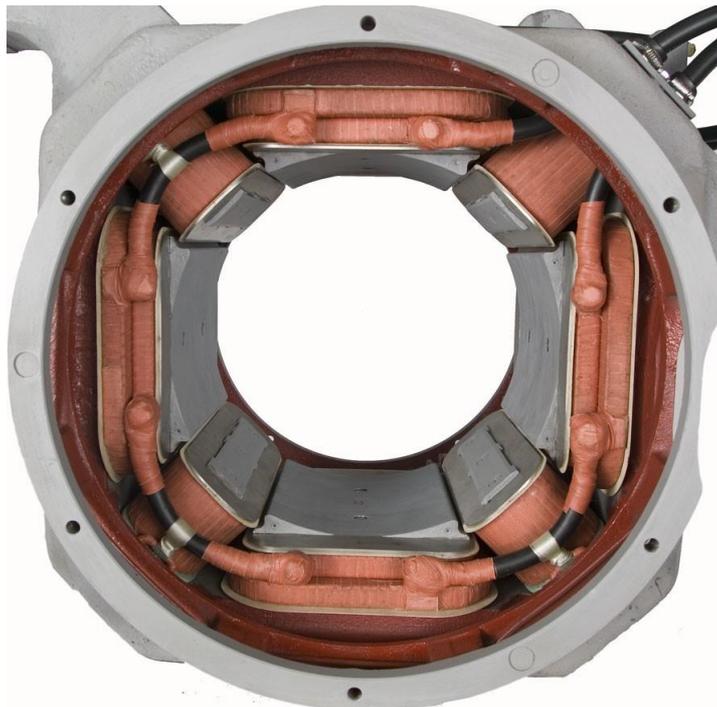
Mise en place des conducteurs d'induit dans les encoche et soudure de ceux-ci sur le collecteur



Mise en place des conducteurs d'induit dans les encoche et sou- dure de ceux-ci sur le collecteur.



Mise en place des conducteurs d'induit dans les encoche et soudure de ceux-ci sur le collecteur



Inducteur complet d'une machine à courant continu.

3.1.3 Collecteurs et balais

Le collecteur est un ensemble cylindrique de lames de cuivre isolées les unes des autres par des feuilles de mica. Le collecteur est monté sur l'arbre de la machine, mais isolé de celui-ci.

Les deux fils sortant de chaque bobine de l'induit sont successivement et symétriquement soudés aux lames du collecteur.

Dans une machine bipolaire, deux balais fixes et diamétralement opposés appuient sur le collecteur. Ainsi, ils assurent le contact électrique entre l'induit et le circuit extérieur. La construction du collecteur relève de la mécanique de précision. Les machines multipolaires ont autant de balais que de pôles.

Les balais permettent l'injection ou la collecte du courant sur le collecteur. Lors de la construction des premières machines à courant continu, les balais étaient constitués de fils de cuivre disposés comme la paille de riz ou les branches sur les balais pour nettoyer, d'où le nom de balais.

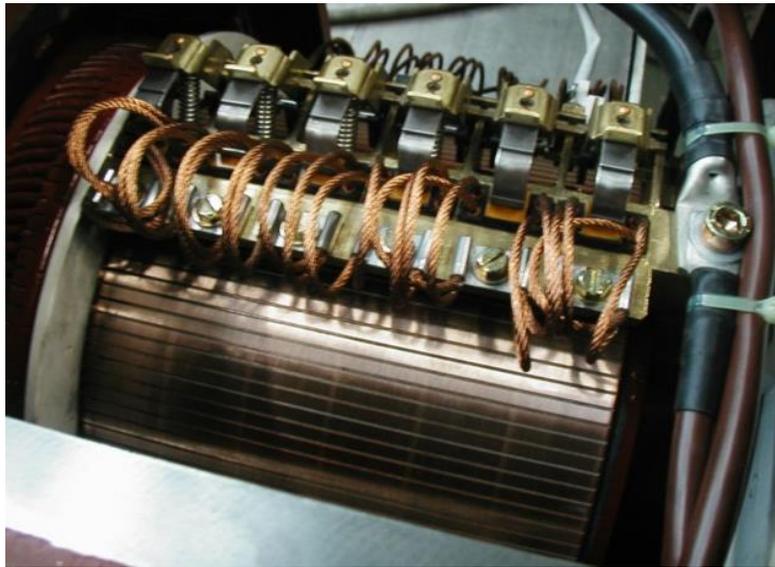
Les balais (aussi appelés « charbon ») sont en carbone (on choisit souvent du graphite). D'une part, ce matériau possède une bonne conductivité d'autre part, le frottement du couple cuivre/carbone est faible et ainsi, le collecteur ne s'use pas prématurément. La pression des balais sur le collecteur peut être réglée par des ressorts ajustables. Pour les intensités très importantes, on utilise plusieurs balais connectés en parallèle.



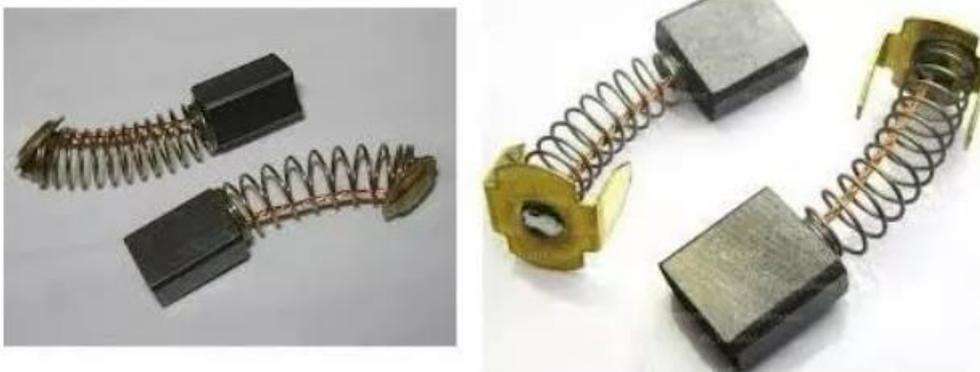
Collecteur d'une machine à courant continu de faible puissance.



Collecteur d'une machine à courant continu de forte puissance

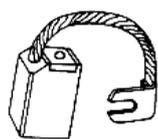


Détails de la ligne des balais d'une machine à courant continu de forte puissance.

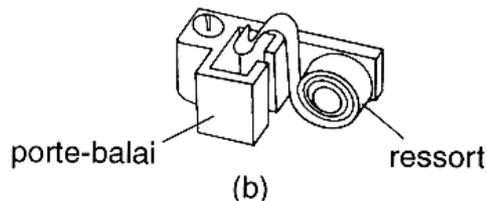


Charbons de remplacement pour moteur à courant continu

La pression des balais sur le collecteur peut être réglée à une valeur appropriée grâce à des ressorts ajustables (figures. a et. b). Si la pression est trop grande, le frottement provoque un échauffement excessif du collecteur et des balais. Par contre, si elle est trop faible, le contact imparfait peut produire des étincelles.



(a) balai



porte-balai

(b)

ressort

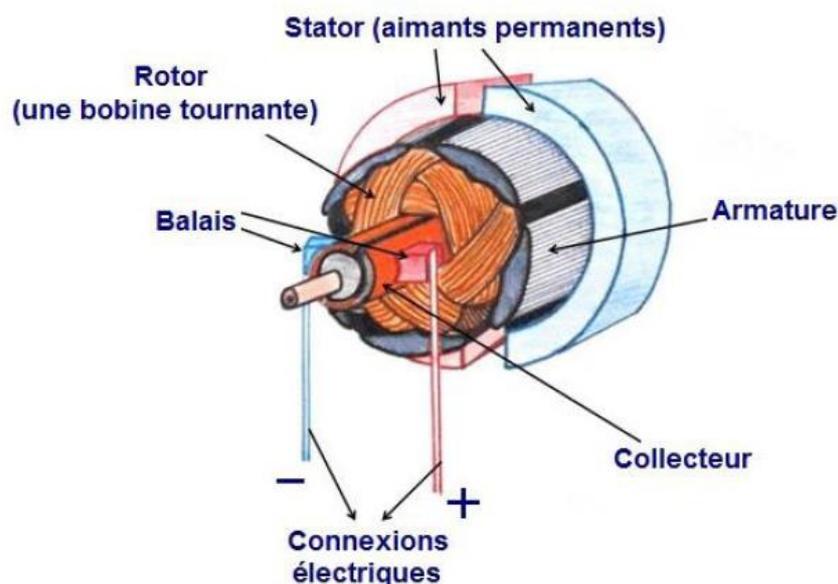
3.2 Principe de fonctionnement

Comme élucidé précédemment, le moteur à courant continu se compose de deux parties distinctes :

- La première est la partie fixe : l'inducteur (ou également appelée le stator)
- La seconde est la partie tournante : l'induit (ou aussi appelée le rotor)

Le rotor est un cylindre de fer feuilleté ou ont été usinées des encoches en périphérie. Ce circuit correspond également au circuit de puissance car le couple de la machine est proportionnel au courant I . Par conséquent, notons que la puissance maximale est limitée par le courant maximum que l'on est capable de faire passer du rotor tournant vers l'extérieur (pour une génératrice).

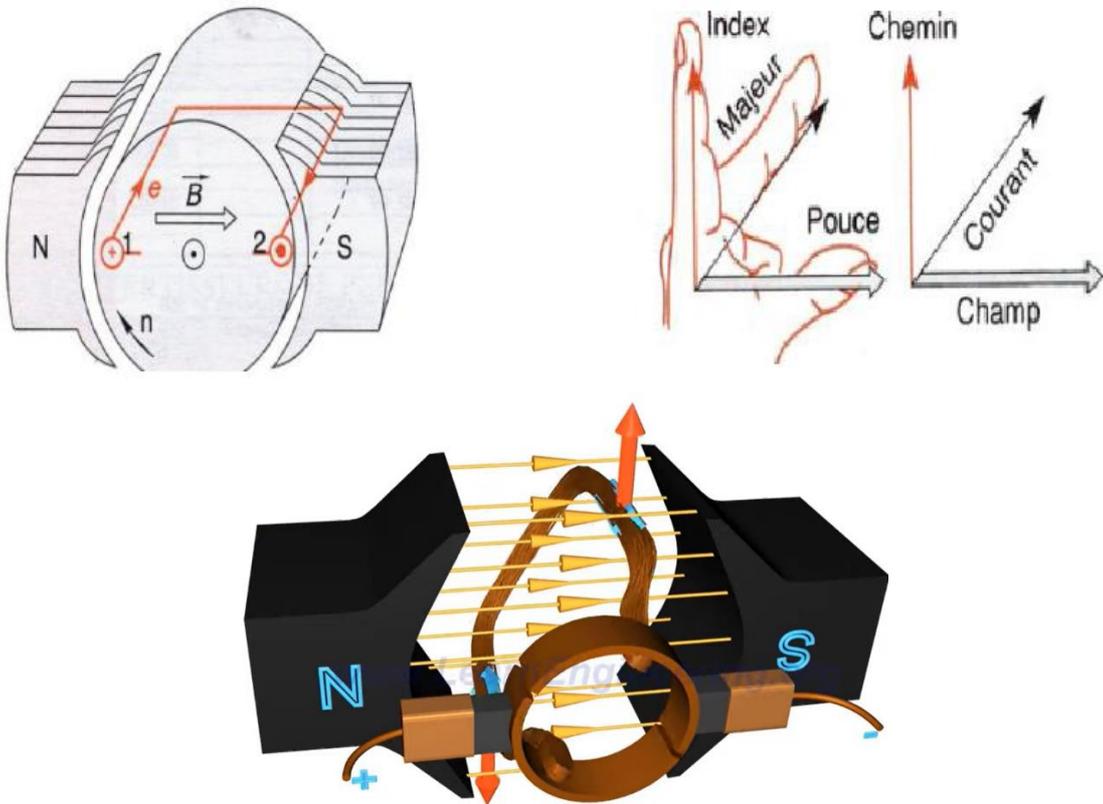
Le stator quant à lui, comporte deux pièces polaires opposées enveloppant chacune le rotor d'un angle de 90° . C'est grâce à des aimants permanents ou des inducteurs que les pièces polaires deviennent des pôles N et S fixes. Alors, les lignes d'inductions engendrées se referment à travers le rotor entraînant sa rotation.



Remarquons néanmoins, que ces lignes d'induction éprouvent énormément de difficultés à traverser les quelques millimètres séparant le stator et le rotor.

Considérons que le conducteur est placé sur le rotor qui tourne. Nous faisons circuler un courant I dans un champ électrique. Le conducteur va alors couper les lignes de champ magnétique B lors de la rotation du rotor. Il va dès lors être le siège d'une force électromotrice (f.e.m) dont le sens de circulation est donné par la règle de la main droite (ou règle des 3 doigts de la main gauche). C'est le principe de la force de

Laplace qui va alors mettre en mouvement une partie du circuit. Ce principe est utilisé par exemple pour les moteurs électriques de voitures ou autres moyens de transport motorisés.

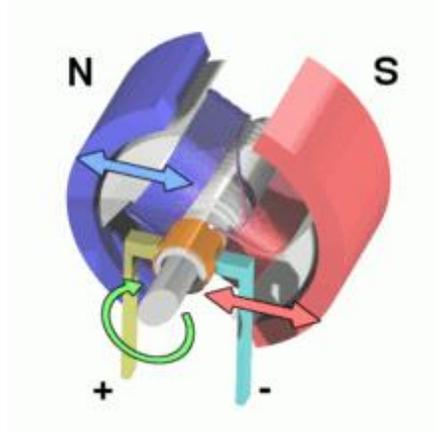


Désormais considérons la spire comme étant fermée par deux conducteurs diamétralement opposés. On fait tourner le moteur. On donne ainsi une Energie mécanique au système. Il apparait alors dans le moteur un champ électromoteur d'induction. Les deux forces électromotrices s'ajoutent et nous pouvons alors fermer le circuit. Nous réalisons ainsi un générateur de courant.

Ce principe de fonctionnement est utilisé dans la réalisation d'une lampe dynamo.

➤ **L'inversion de sens de courant :**

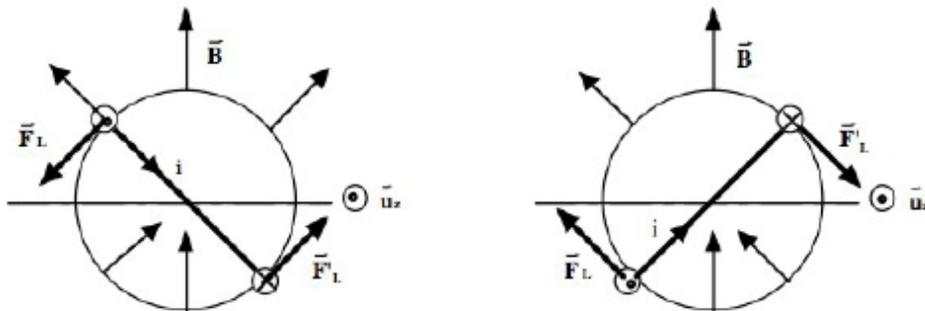
Si nous prenons pour exemple le cas d'un dispositif a une seule spire et d'un collecteur a deux lames simples.

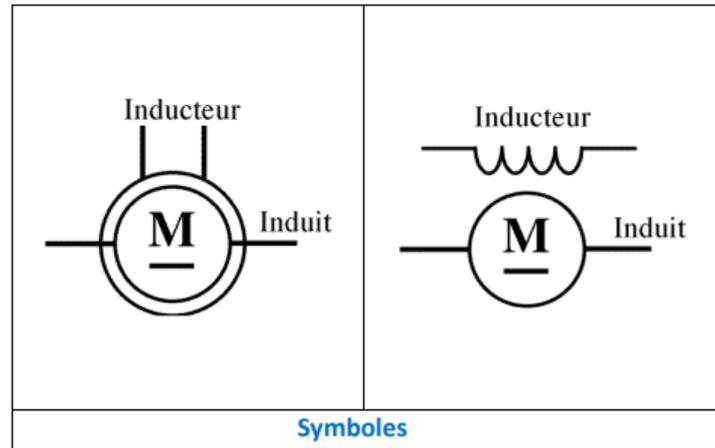


Notons que les balais sont solidaires du bâti tandis que les lames du collecteur tournent en même temps que le rotor.

Au passage de la ligne neutre les lames du collecteur auxquelles sont attachées les extrémités de la spire changent de balai ce qui implique un courant dans la spire qui s'inverse. Ainsi nous remarquons que le couple des forces de Laplace garde alors un signe identique. En effet, si le courant ne s'inversait pas alors les forces de Laplace changeraient et le moteur ne tournerait pas. Notons également que l'ensemble collecteurs plus balais (représentent dans notre projet par les fils fixes par les mains) joue le rôle de commutateur.

L'inversion du sens de courant est primordiale pour le bon fonctionnement du moteur à courant continu. En effet, si ce phénomène est négligé, le moteur se lance mais n'effectue qu'un demi-tour avant de s'arrêter net dans une certaine position d'équilibre. Cela correspond au moment où les lames de cuivre changent de balais.





3.3 Caractéristiques du moteur à courant continu

3.3.1 Valeur de la f.e.m :

La valeur de la f.e.m induite est donnée par la relation d'électrotechnique. La force électromotrice E est la tension produite par notre rotor lors de sa rotation dans le flux magnétique produit par la partie fixe de la machine, c'est à dire le stator. Elle dépend entre autres des éléments de constitution de la machine.

La relation est : $E = (\rho/a) * N * n * \phi$

Avec :

- ρ : nombre de paire de pôles du rotor
- N : nombre de conducteurs du rotor
- a : nombre de paire de voies d'enroulement
- n : fréquence de rotation (en tr/s)
- ϕ : flux en Webers (Wb)

3.3.2 Contrôle de la vitesse du moteur :

La loi d'Ohm pour un circuit rotorique s'écrit $U = E + RI + eB$.

Si le moteur est à vide, alors nous remarquons que l'expression devient $U = E = nN \phi$ car I est absorbé.

La vitesse n est alors proportionnelle à la tension U d'alimentation. C'est d'ailleurs le grand intérêt du moteur à courant continu. Si on inverse U , on peut faire tourner la machine en arrière. Ainsi la machine possède la possibilité d'avoir deux sens de rotation.

Le moteur à courant continu est idéal pour la traction électrique (embrayage, boîte de vitesse). En revanche, il faut prendre garde à lui délivrer une alimentation en tension continu U variable.

3.3.3 Le couple moteur :

Prenons le cas suivant, une spire de longueur l et de diamètre $2R$, est parcourue par un courant I , le tout soumis à un champ magnétique radial. La spire tourne ainsi autour d'un axe de rotation (ici U_z , voir schéma ci-dessous) avec une vitesse de rotation (Ω).

Qu'en est-il de la notion de couple moteur ? Une notion est primordiale pour la réalisation, d'un moteur à courant continu, c'est celle liant le couple moteur au courant.

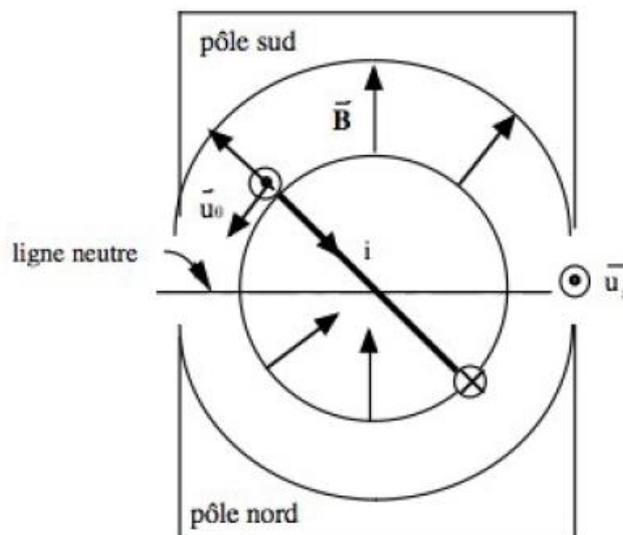
En effet le couple est proportionnel à l'intensité du courant parcouru dans l'enroulement. Le facteur de proportionnalité est le flux (ϕ).

On obtient que $\mathbf{B}(R, \theta) = B_0$ si θ (appartient) $]0, \pi[$ et $\mathbf{B}(R, \theta) = -B_0$ si θ appartient à $]\pi, 2\pi[$ et sinon $B=0$.

$$C = \phi \cdot I \text{ avec } \phi = 2 \cdot R \cdot I \cdot B_0$$

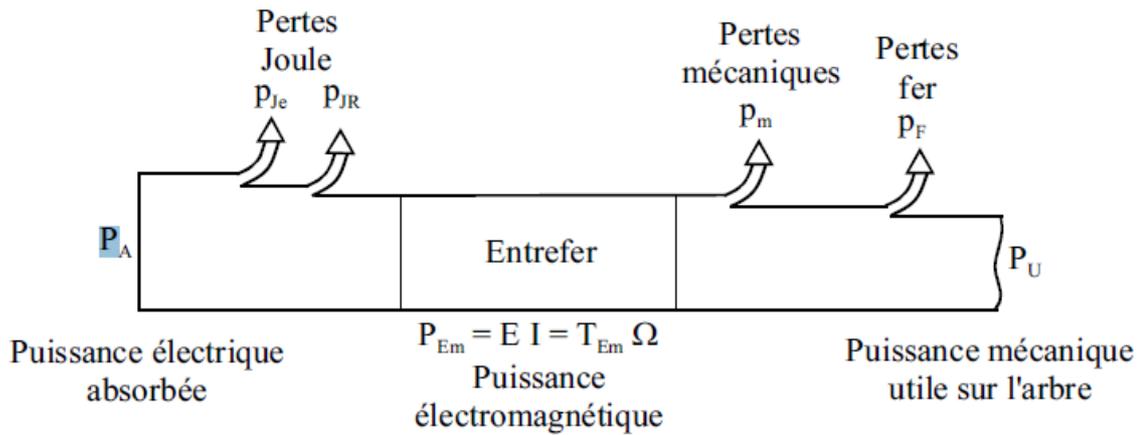
On néglige les effets de Bore pour B . Et ϕ est homogène à B_0 à travers la surface de la spire.

Il faut néanmoins prendre soin d'associer à cette relation un schéma de convention d'orientation.



3.3.4 Bilan des puissances – Rendement

➤ Arbres des puissances



Arbres des puissances

$P_A = UI + U_e I_e$	$p_{Je} = r I_e^2 = \frac{U_e^2}{r} = U_e I_e$	$p_{JR} = R I^2$	$P_U = T_U \Omega$
$W = VA$	$W = \Omega A^2$	$W = \Omega A^2$	$W = Nm \text{ rad s}^{-1}$

U : tension d'induit et U_e : tension de l'inducteur (V)

I : courant d'induit et I_e : courant de l'inducteur (A) ;

R : résistance de l'induit et r : résistance de l'inducteur (en Ohm) ;

T_U : couple utile sur l'arbre (Nm) ;

Ω : vitesse de rotation (rad/s).

Remarques :

– À vitesse constante, les pertes mécaniques et les pertes fer sont constantes.

– Les pertes sont groupées sous le nom de pertes collectives, soit

$P_c = P_f + P_m$, qui, en première approximation, sont proportionnelles à la vitesse.

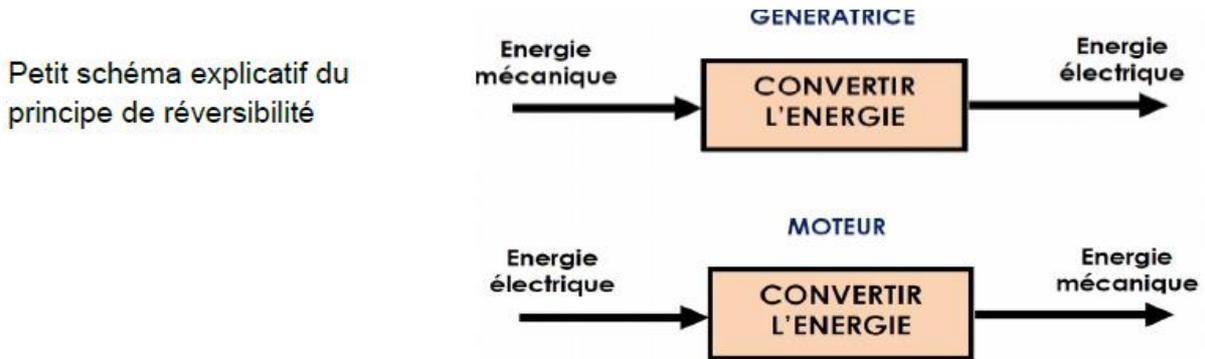
➤ Rendement

$$\eta = \frac{P_U}{P_A} = \frac{P_A - (p_{Je} + p_{JR} + p_C)}{P_A}$$

3.3.5 Principe de réversibilité machine à courant continu

Considérons que nous faisons circuler un courant dans une spire, en présence du flux inducteur, une force agit sur les conducteurs et fait tourner l'induit. On a ainsi réalisé un moteur à courant continu. Mais maintenant considérons une machine à courant continu, cette

dernière est entraînée quand elle est alimentée par courant continu de la même manière qu'un moteur. Il n'y a que le sens du phénomène qui change.



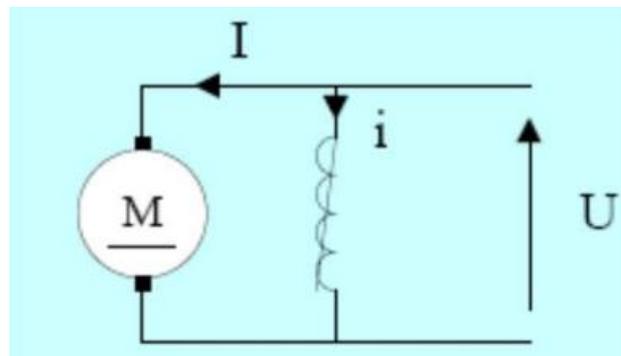
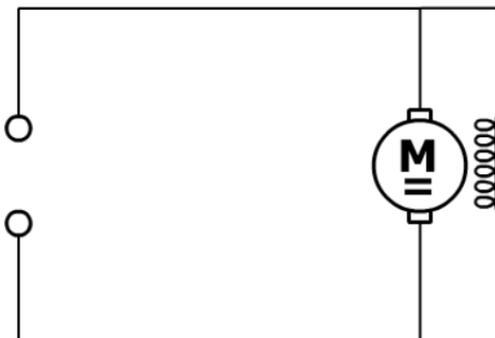
Un moteur est donc une machine qui transforme de l'énergie électrique en énergie mécanique. Cependant il existe un grand nombre de différents moteurs (moteur à courant continu, alternatif, pas à pas etc...). Ici, nous nous concentrerons sur les machines à courant continu, qui comportent : le moteur à excitation parallèle (shunt), le moteur à excitation en série, le moteur à excitation séparée et le moteur à aimant permanent.

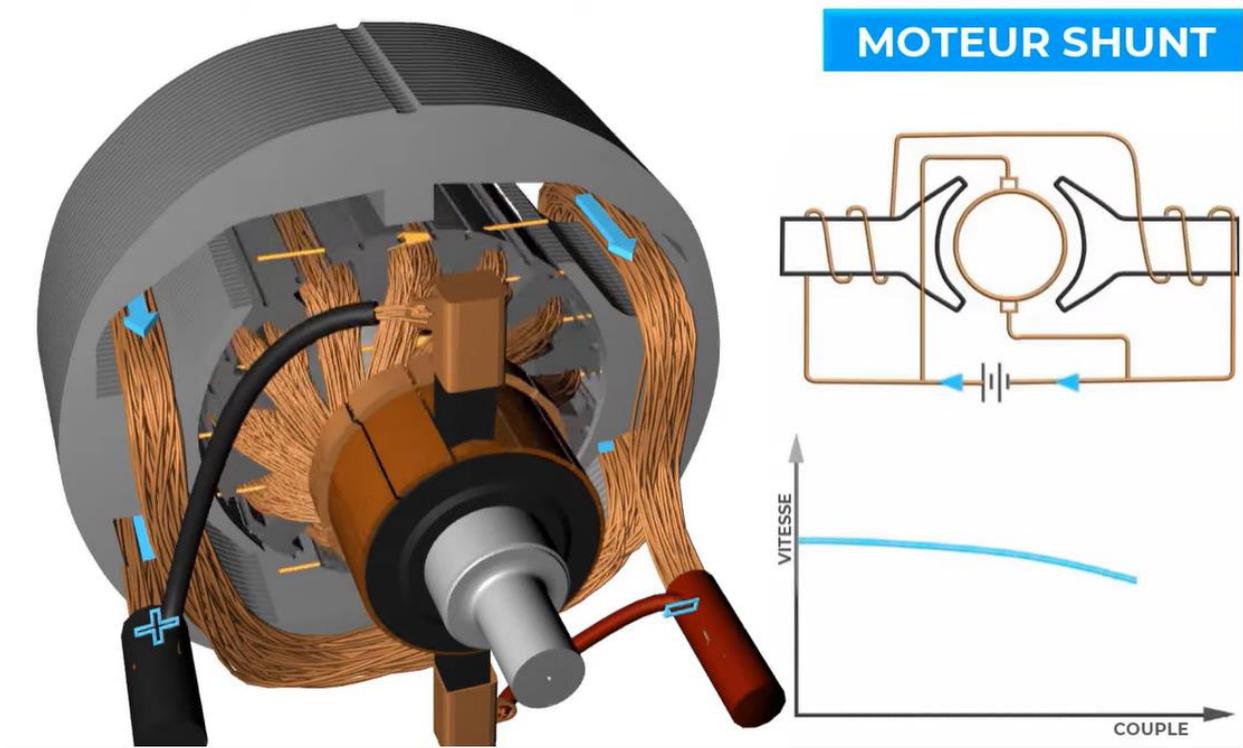
3.4 Excitation des moteurs à courant continu

Le type d'inducteur (à aimant permanent ou inducteur bobiné) et la méthode utilisée pour alimenter l'inducteur et l'induit déterminent le comportement des moteurs à courant continu. On parle d'excitation pour décrire le mode d'alimentation de l'inducteur et de l'induit bobiné.

3.4.1 Le moteur à excitation parallèle (ou shunt)

Le moteur à excitation dérivée ou shunt est composé de deux enroulements : un enroulement autour du stator et un autour du rotor. Ils sont connectés en parallèle et sont donc parcourus par des courants d'amplitudes différentes. Schéma équivalent :



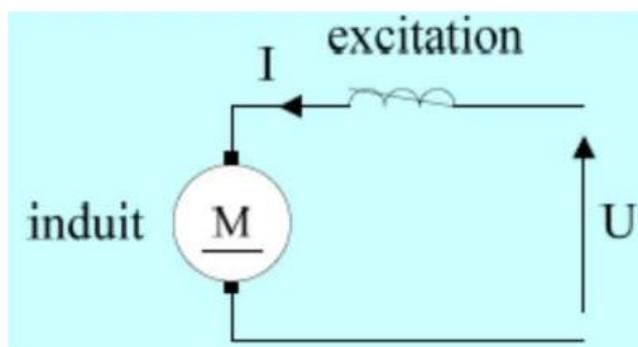
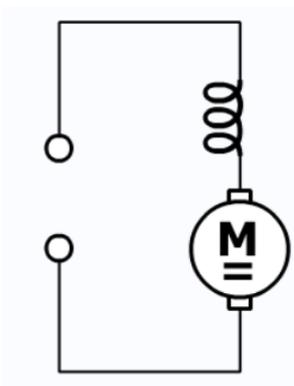


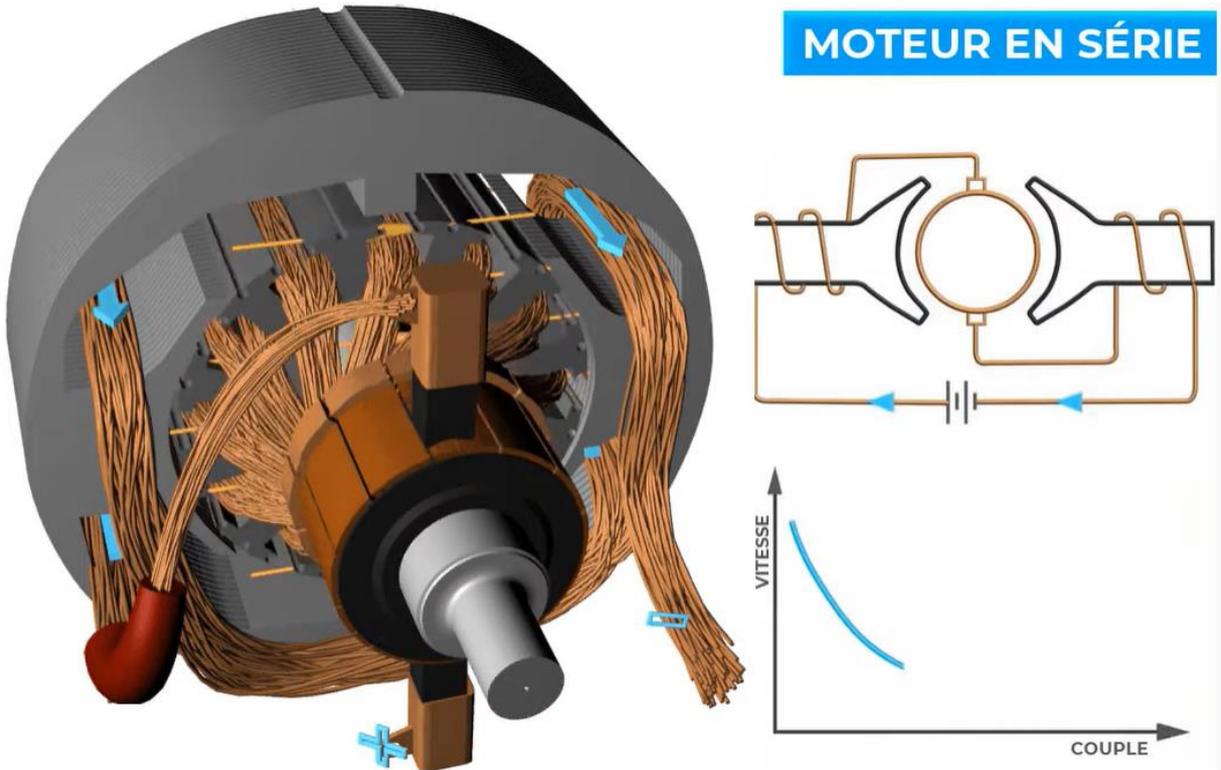
Ce moteur présente beaucoup d'avantages. Sa vitesse est sensiblement constante et facile à régler. De plus, il suffit de changer le sens du courant pour changer sa vitesse de rotation. Ses utilisations sont diverses : machines-outils, appareils de lavage, pompes, ventilateurs, etc...

Voici quelques-unes de ses plus importantes propriétés :

- Circuit inducteur et induit, alimente sous la même tension
- Proportionnalité entre fem et vitesse de rotation
- Si U augmente, la vitesse augmente
- Ne jamais couper le courant dans l'induit sinon le moteur s'emballe, en effet la vitesse du moteur est inversement proportionnelle à la tension dans le circuit induit.

3.4.2 Le moteur à excitation en série





Ce type de moteur est caractérisé par le fait que le stator (inducteur) est raccordé en série avec le rotor (induit), ainsi la même tension traverse le stator et le rotor. Par conséquent, le sens de rotation ne change pas avec le sens du courant ; il suffit de brancher le rotor et le stator dans l'autre sens. Et l'induit reçoit une puissance de $P_{em}=EI$

Maintenant supposons que le flux utile sous un pôle est proportionnel au courant d'excitation I , ainsi $\Phi=k \cdot I$ avec k =constante. De plus. On a donc $E=K \Phi \Omega$ avec la vitesse angulaire Ω .

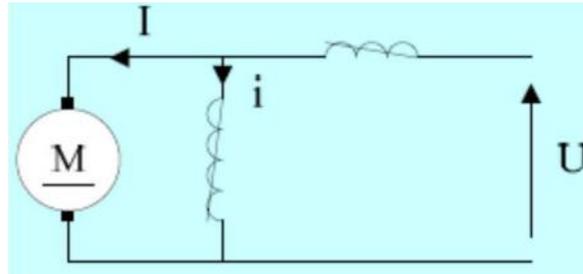
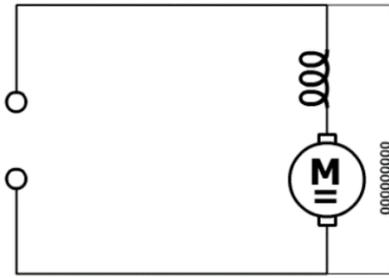
Voyons rapidement la puissance utile P_u de ce moteur. On a $P_u=P_{abs}-P_j-P_c$ avec P_{abs} la puissance absorbée ($P_{abs}=UI$), P_j la puissance perdue par effet joule ($P_j=R_t \times I^2$) et P_c les pertes collectives (pertes fer pertes mécaniques) .

Ainsi le rendement de ce moteur est $\eta=P_u/ P_{abs}$.

Le principal inconvénient de ce type de moteur est qu'il s'emballe à vide.

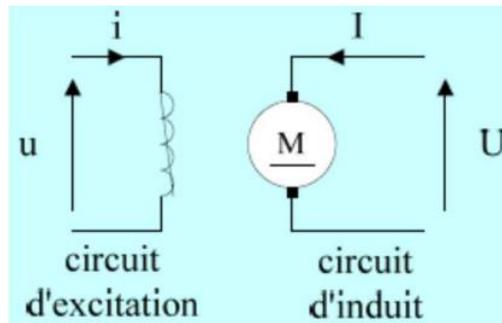
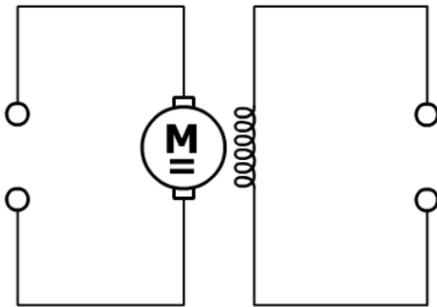
Ce type de moteur est utile dans l'électroménager par exemple ou dans les actions de traction ou de levage.

3.4.3 Le moteur a excitation compound



Le montage compound est un hybride ou mixte. En fait oublions la bobine en parallèle sur le rotor puisqu'elle est secondaire. On se retrouve donc face à un classique moteur série, la bobine parallèle n'intervenant qu'à vide (en l'absence de charge mécanique), pour maintenir un champ magnétique inducteur minimal et interdire l'emballement mécanique ! Son usage, de par son côté onéreux, était réservé aux applications industrielles pour lesquelles le risque d'absence de charge existait

3.4.4 Le moteur à excitation séparée



Pour ce moteur deux alimentations sont nécessaires : une pour l'inducteur et une pour l'induit.

Ici, $E=U -RI=K \Phi \Omega$, donc la vitesse de ce moteur est $\Omega=(U-RI) / K \Phi$

et sa puissance est $P_u=P_{abs}-P_{je}-P_j-P_c$

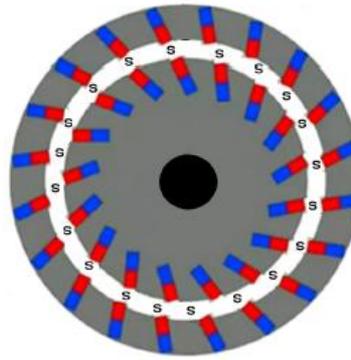
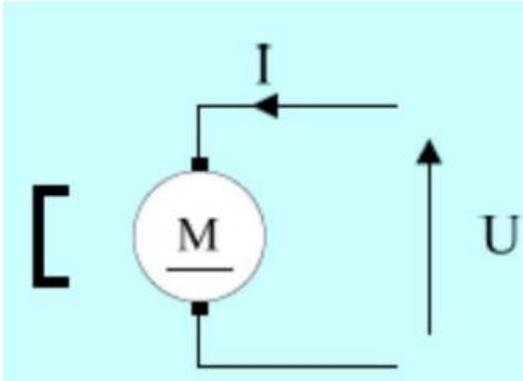
avec

- $P_{abs}=U.I+ U_e.I_e$ la puissance absorbée,
- $P_{je}=U_e. I_e$, la puissance perdue par effet joule de l'inducteur,
- $P_j=RI^2$ la puissance perdue par effet joule de l'induit et p_c les pertes collectives.

Ainsi, son rendement est $\eta=P_u/ P_{abs}$.

La vitesse de ce moteur est réglable par tension et est indépendante de la charge. De plus, elle fournit un couple important à faible vitesse ce qui peut être utile pour les machines-outils ou le levage.

3.4.5 Le moteur a aimant permanent



Dans le moteur à aimants permanents, le rotor et le stator sont constitués d'aimants dont les pôles identiques sont mis face à face afin de permettre le mouvement du moteur grâce au champ magnétique créé. Les pôles identiques se repoussent ce qui met le moteur en mouvement.

Le principal avantage de ce type de moteur réside dans sa durée de vie élevée qui correspond à celle des aimants (environ 400 ans). En revanche, les moteurs à aimants permanents peuvent être encombrants lorsque l'on veut obtenir des moteurs puissants car il faut des aimants plus puissants.

3.5 Avantages et inconvénients d'un moteur à courant continu

➤ Avantages

- L'avantage principal des machines à courant continu réside dans leur adaptation simple aux moyens servant à régler ou de faire fluctuer leur vitesse, leur couple et leur sens de rotation : les variateurs de vitesse, ou alors leur raccordement direct à la source d'énergie : batteries d'accumulateur, piles, etc.
- Accompagné d'un variateur de vitesse électronique, il possède une large plage de variation (1 à 100 % de la plage),
- Régulation précise du couple,
- Son indépendance par rapport à la fréquence du réseau fait de lui un moteur à large champ d'application,

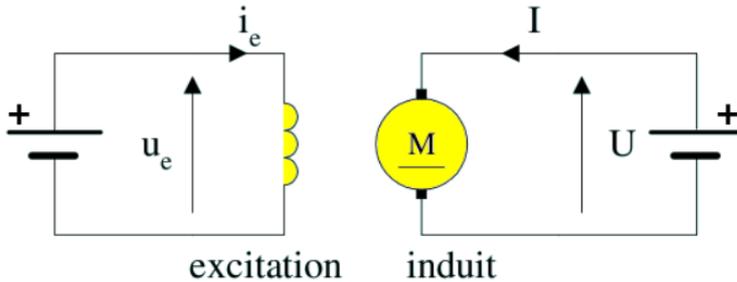
➤ Inconvénients

- Le principal problème de ces machines vient de la liaison entre les balais, ou « charbons » et le collecteur rotatif. Mais aussi le collecteur lui-même comme indiqué plus haut et la complexité de sa réalisation. De plus il faut signaler que : plus la vitesse de rotation est élevée, plus la pression des balais doit augmenter pour rester en contact avec le collecteur par conséquent plus le frottement est important ; aux vitesses élevées les balais doivent par conséquent être remplacés particulièrement régulièrement ;

le collecteur imposant des ruptures de contact provoque des arcs, qui usent rapidement le commutateur et génèrent des parasites dans le circuit d'alimentation, mais aussi par rayonnement électromagnétique.

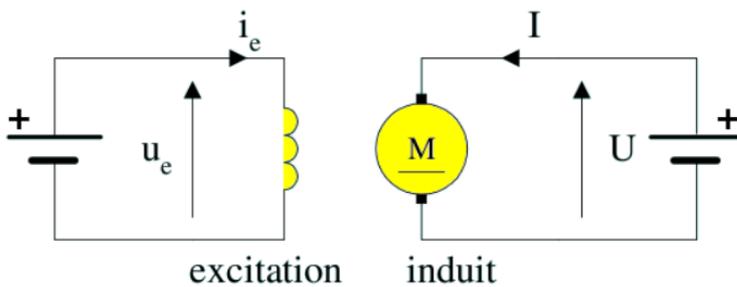
- Un autre problème limite les vitesses d'utilisation élevées de ces moteurs quand le rotor est bobiné, c'est le phénomène de «défretage», la force centrifuge finissant par casser les liens assurant la tenue des ensembles de spires (le frettage).
 - Un certain nombre de ces inconvénients ont partiellement été résolus par des réalisations de moteurs sans fer au rotor, comme les moteurs « disques » ou les moteurs «cloches», qui néanmoins possèdent toujours des balais.
 - Les inconvénients ci-dessus ont été radicalement éliminés grâce à la technologie du moteur brushless, aussi dénommé « moteur à courant continu sans balais », ou moteur sans balais.
- Le tableau suivant récapitule également les avantages et les inconvénients de chaque type d'excitation

Type de moteur	Avantages	Inconvénients
Série	- Fort couple lors du démarrage. - Supporte des surcharges temporaires.	- Variation de la vitesse avec la charge. - Ne peut tourner sans charge.
Dérivation et à aimant permanents	- Peu de variation de la vitesse avec les fluctuations de la charge.	- Faible couple au démarrage.
Composé cumulatif	- Fort couple lors du démarrage. - Tourne sans charge.	- Diminution de la vitesse avec l'augmentation de la charge.
Composé différentiel	- La vitesse varie peu avec les augmentations de la charge.	- Faible couple au démarrage.

Auto-Evaluation : A2
QCM
1
Moteur à courant continu à excitation indépendante


Pour mettre en marche ce moteur, il faut :

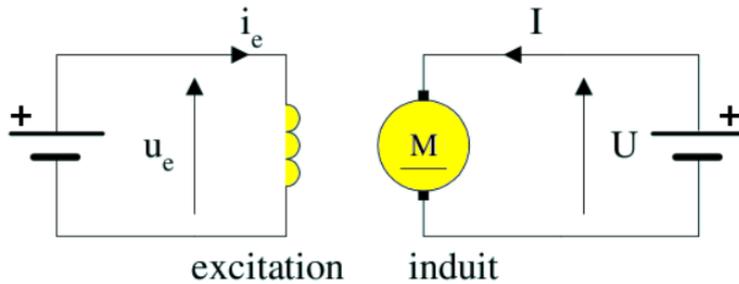
- a alimenter l'induit puis alimenter l'excitation
- b alimenter l'excitation puis alimenter l'induit
- c alimenter l'induit et l'excitation dans un ordre quelconque

2
Moteur à courant continu à excitation indépendante


Quand on augmente la tension d'excitation, alors :

- a le courant d'excitation augmente
- b le courant d'excitation diminue
- c le courant d'excitation reste constant

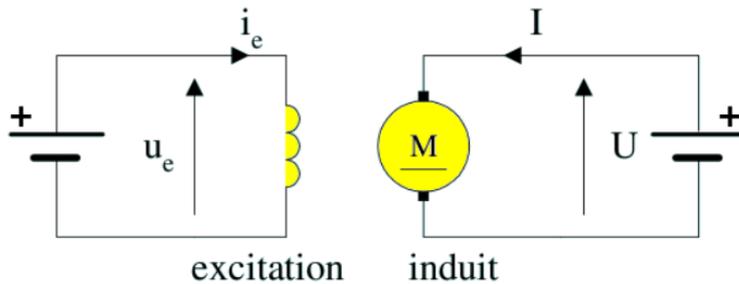
3

Moteur à courant continu à excitation indépendante


Le moteur est en fonctionnement normal.
Si on diminue la tension d'excitation, alors :

- a la vitesse de rotation augmente
- b la vitesse de rotation diminue
- c la vitesse de rotation reste quasiment constante

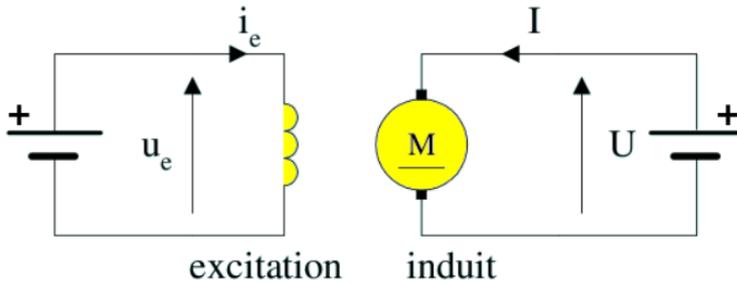
4

Moteur à courant continu à excitation indépendante


Le moteur est en fonctionnement normal.
Si on coupe l'excitation, alors :

- a le moteur s'arrête lentement
- b le moteur s'arrête rapidement
- c la vitesse de rotation augmente brusquement, avec un risque d'emballement

5

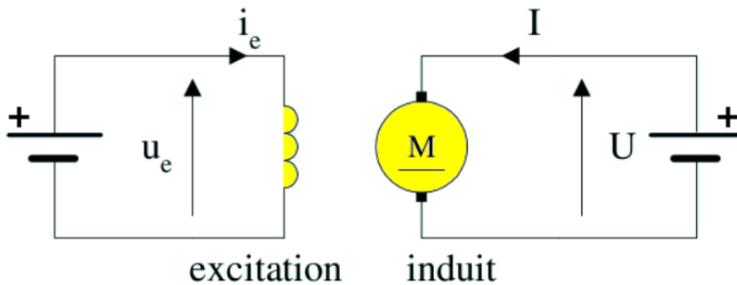
Moteur à courant continu à excitation indépendante


Le moteur est en fonctionnement normal.

Si le couple résistant de la charge mécanique double, alors :

- a *le courant d'induit diminue de moitié*
- b *le courant d'induit reste quasiment constant*
- c *le courant d'induit double*

6

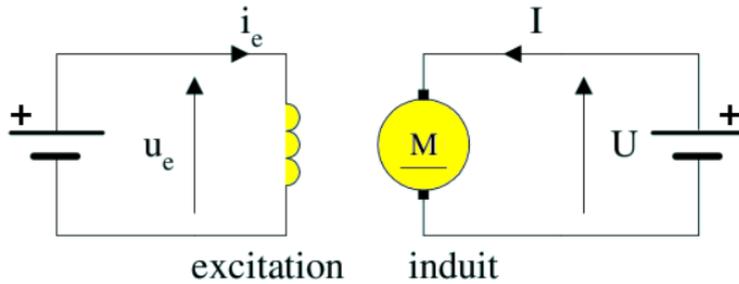
Moteur à courant continu à excitation indépendante


Le moteur est en fonctionnement normal.

Si le couple résistant de la charge mécanique double, alors :

- a *la vitesse de rotation diminue de moitié*
- b *la vitesse de rotation diminue légèrement*
- c *la vitesse de rotation double*

7

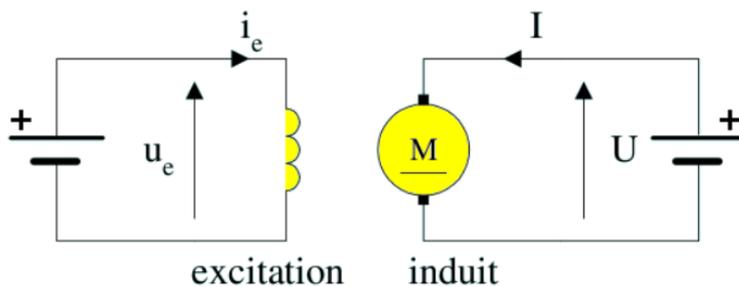
Moteur à courant continu à excitation indépendante


Le moteur est utilisé dans un système de levage (le couple résistant est quasiment indépendant de la vitesse de rotation).

Si on diminue de moitié la tension d'alimentation de l'induit, alors :

- a la vitesse de rotation diminue quasiment de moitié
- b la vitesse de rotation diminue légèrement
- c la vitesse de rotation augmente

8

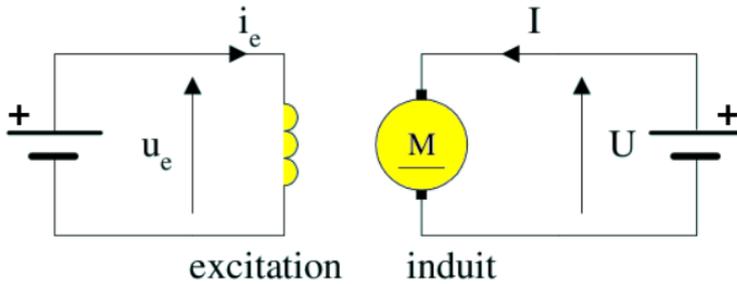
Moteur à courant continu à excitation indépendante


Le moteur est utilisé dans un système de levage (le couple résistant est quasiment indépendant de la vitesse de rotation).

Si on diminue de moitié la tension d'alimentation de l'induit, alors :

- a le courant d'induit diminue de moitié
- b le courant d'induit reste quasiment constant
- c le courant d'induit double

9

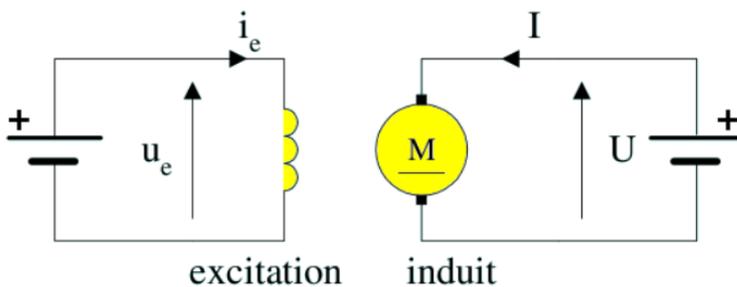
Moteur à courant continu à excitation indépendante


Le moteur est utilisé dans un système de ventilation (le couple résistant augmente avec la vitesse de rotation).

Si on diminue de moitié la tension d'alimentation de l'induit, alors

- a la vitesse de rotation diminue quasiment de moitié
- b la vitesse de rotation diminue légèrement
- c la vitesse de rotation augmente

10

Moteur à courant continu à excitation indépendante


Le moteur est utilisé dans un système de ventilation (le couple résistant augmente avec la vitesse de rotation).

Si on diminue de moitié la tension d'alimentation de l'induit, alors :

- a le courant d'induit augmente
- b le courant d'induit reste quasiment constant
- c le courant d'induit diminue sensiblement

4. Fonctionnement des moteurs synchrones

4.1 Les types des moteurs synchrones

Le moteur synchrone très utilisé sur les voitures électriques du commerce, ce moteur est plutôt simple à décrypter au niveau de son principe de fonctionnement.

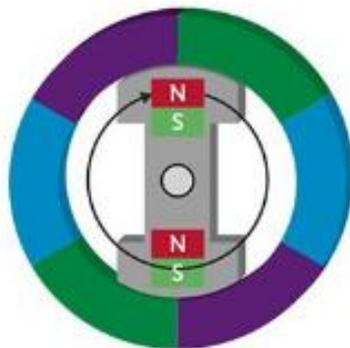
Ce moteur aura une vitesse de rotation physique (rotor qui tourne) synchronisée avec la vitesse circulaire d'alimentation des phases (bobines en périphérie sur le stator). Mes phases permettent de donner des impulsions pour faire tourner le rotor, et ces vitesses d'impulsions permettent de décider de la vitesse de rotation du moteur (qui tournera alors à la vitesse voulue).

Quand je fais faire un tour complet à toutes mes phases (en plusieurs impulsions donc), mon rotor aura lui aussi fait un tour de manière synchronisée, et donc il est synchrone ...

Il y a deux types principaux de moteurs synchrones :

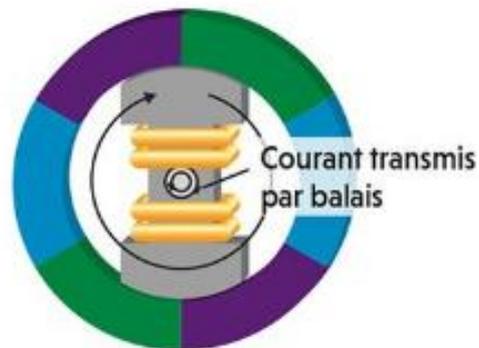
- Moteur synchrone à aimants permanents
- Moteur synchrone à rotor bobiné

**MACHINE SYNCHRONE
À AIMANTS PERMANENTS**



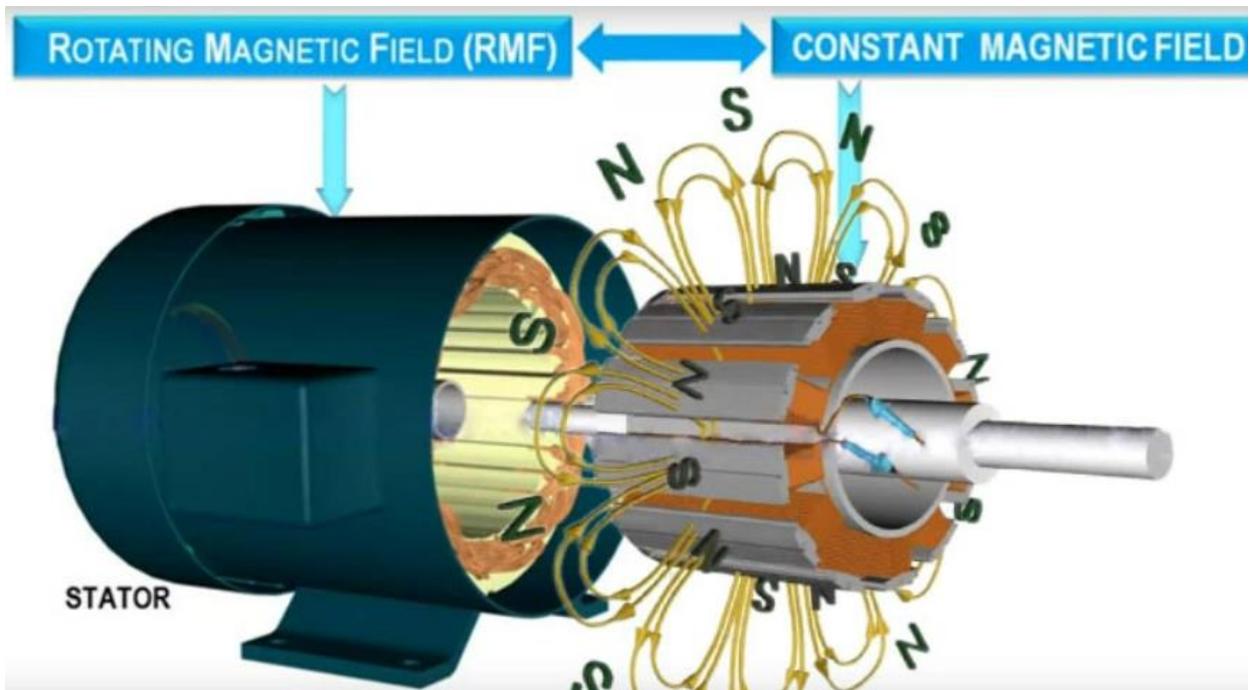
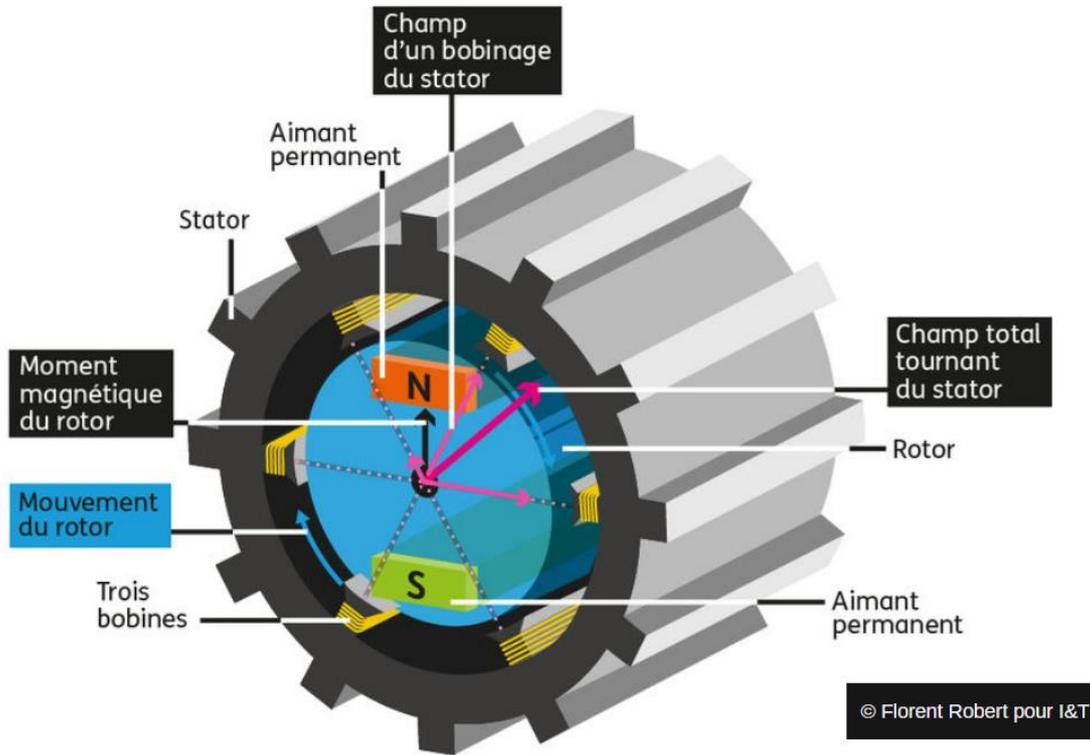
Le rotor comporte des aimants permanents.

**MACHINE SYNCHRONE
À EXCITATION BOBINÉE**



Le rotor intègre des bobines.

4.1.1 Le moteur synchrone à aimants permanents



Le moteur électrique synchrone à aimants permanents domine le marché. Il a représenté 70% de la production des moteurs pour véhicules tout électrique en 2020.

Rendement excellent, machine compacte, plage de fonctionnement idéale pour un usage automobile... Ces atouts font de la machine synchrone à aimants permanents la technologie la plus utilisée dans l'auto. Ils viennent de l'usage d'aimants permanents pour produire le champ magnétique du rotor, contrairement aux deux autres technologies disponibles sur le marché qui utilisent des bobinages. « L'excitation magnétique ne consomme donc pas d'énergie »

Le stator est, comme dans les deux autres machines, constitué de tôles ferromagnétiques et de bobinages parcourus par un courant triphasé. Le couple de la machine synchrone à aimants permanents est ainsi créé par l'interaction entre le champ électromagnétique tournant du stator et le moment magnétique du rotor.

Des modèles de voiture électriques comme la Nissan Leaf, la Volkswagen ID.3, la Peugeot e-208, la Tesla Model 3 ou la BMW i3 utilisent la technologie synchrone à aimant permanent. L'équipementier Bosch s'est également laissé séduire.

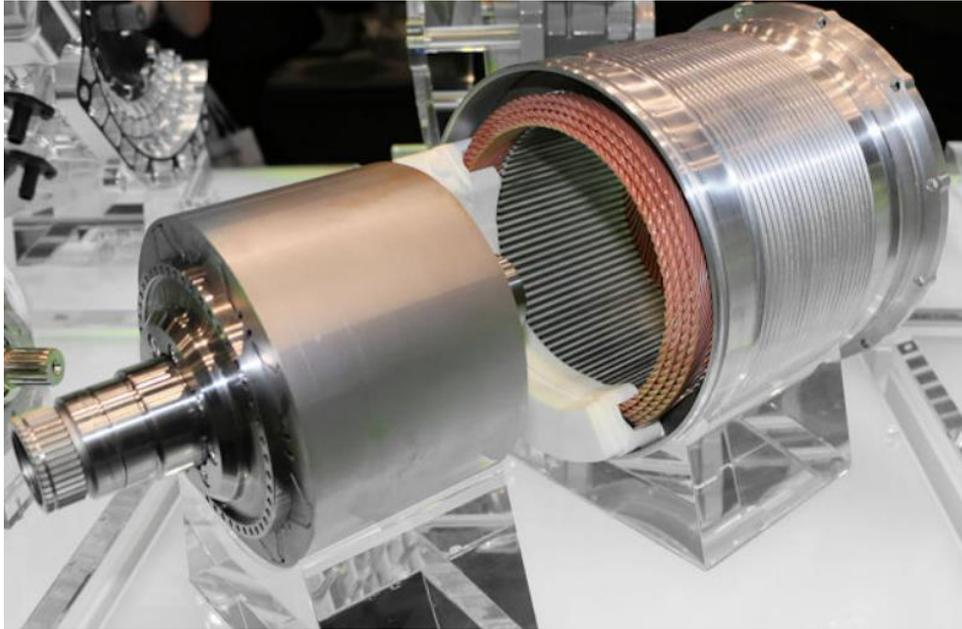
Ce moteur présente toutefois plusieurs inconvénients : ses aimants sont fabriqués à base de terres rares, son coût est élevé, il est impossible de réguler l'excitation magnétique, il nécessite un refroidissement performant...

➤ **Constitution moteur synchrone à aimants permanents**

Le stator est ici composé de plusieurs phases / bobines qui seront au minimum de 3 si on veut pouvoir lui faire faire des tours complets, on dit alors qu'il s'agit d'un moteur triphasé. Il faut en effet au minimum 3 impulsions pour couvrir les 360 degrés du tour complet.

Le rotor est un simple aimant permanent à deux pôles qui pourra être mis en mouvement si on lui applique une force magnétique : + et + se repoussent, - et - se repoussent et enfin + et - s'attirent.



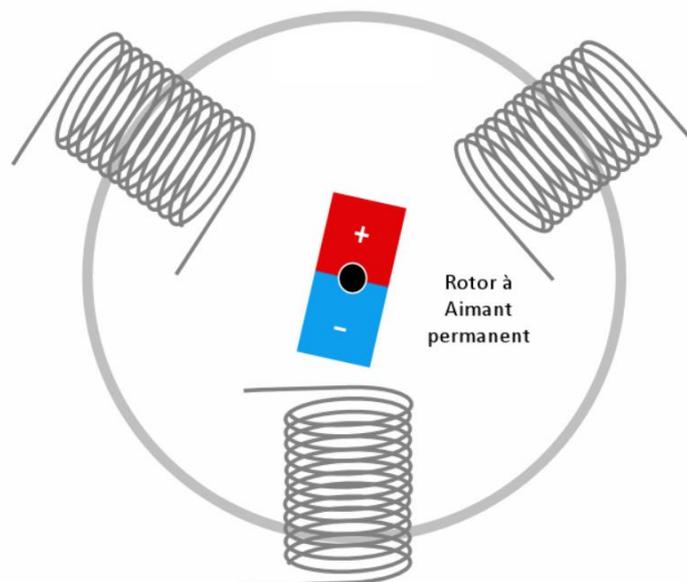


➤ **Principe de fonctionnement**

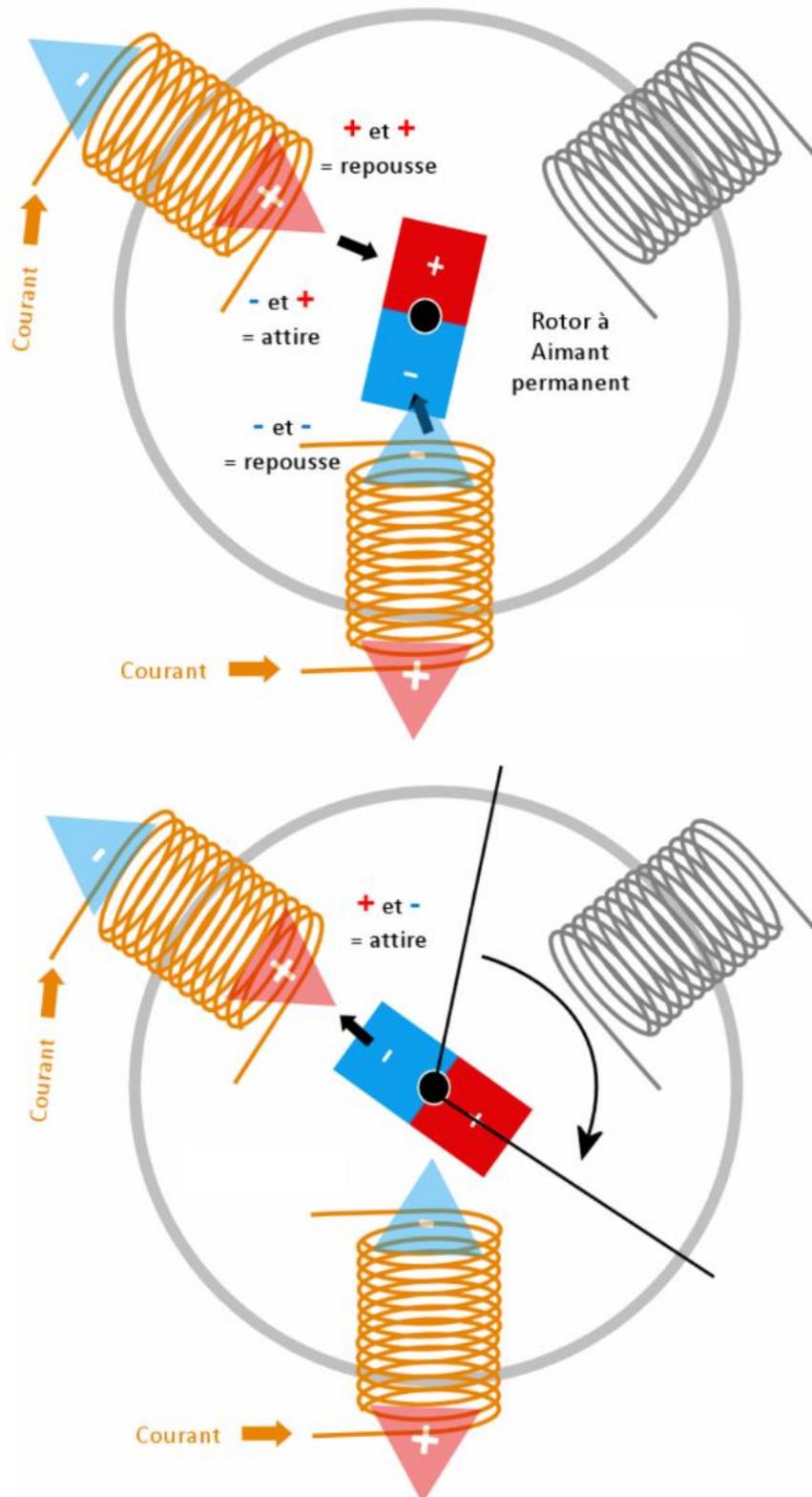
Le moteur électrique synchrone à aimant permanent fonctionne donc avec des impulsions. Ces impulsions sont obtenues par les bobines placées de part et d'autre du stator. Quand je fais passer du courant dedans, ces dernières se transforment en aimant dont le sens des pôles dépend du sens du courant. Chaque phase pourra donc avoir le + ou le moins vers le bas, selon qu'on veuille pousser ou attirer le rotor (selon sa position on activera le + ou le moins).

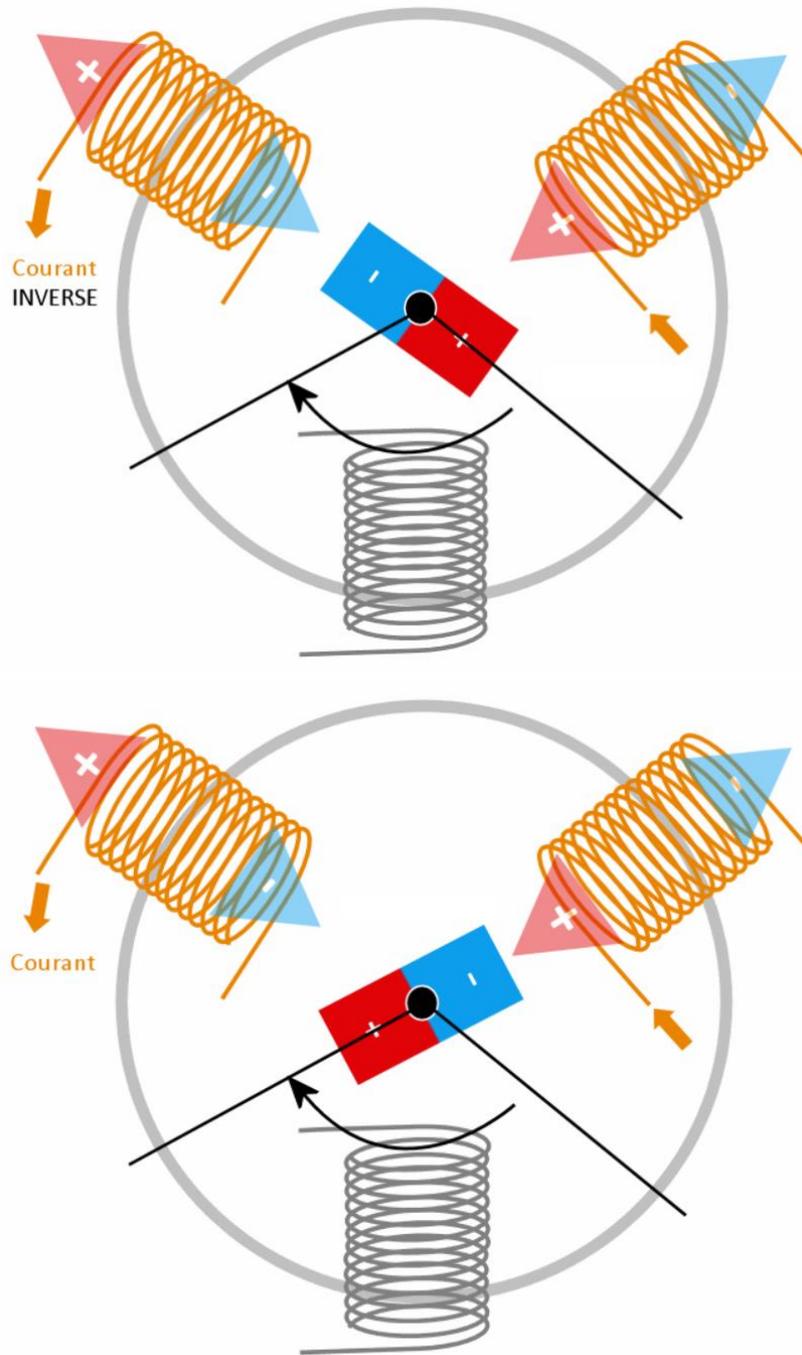
Voici les étapes de fonctionnement du moteur synchrone à aimant permanent, ce sera peut-être plus parlant pour ceux qui ont une intelligence plus orientée vers la géométrie et les formes.

- Ici tout est coupé, le courant ne passe nulle part

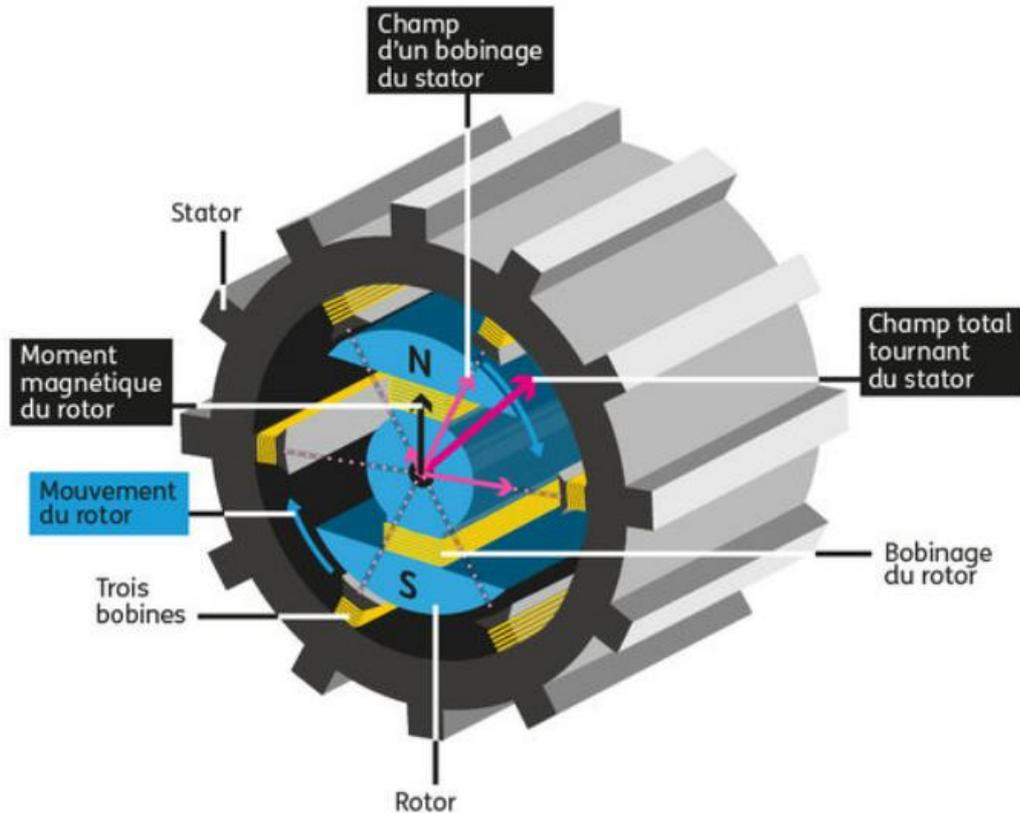


- L'entraînement se fait par une succession de commutations des bobines en courant alternatif (fluctuation des polarités +/-) afin de donner des pulsations au rotor qui est sensible à la force magnétique (puisque c'est un aimant permanent)





4.1.2 Le moteur synchrone à rotor bobiné



Bon rendement, réglage du niveau d'excitation, absence de terres rares... Autant d'atouts pour la technologie à rotor bobiné qui ont convaincu Renault à miser sur cette machine pour ces voitures électriques. Il fut parmi les premiers à le faire.

D'autres constructeurs automobiles lui emboîtent désormais le pas, à l'instar de BMW qui doit lancer son modèle i4.

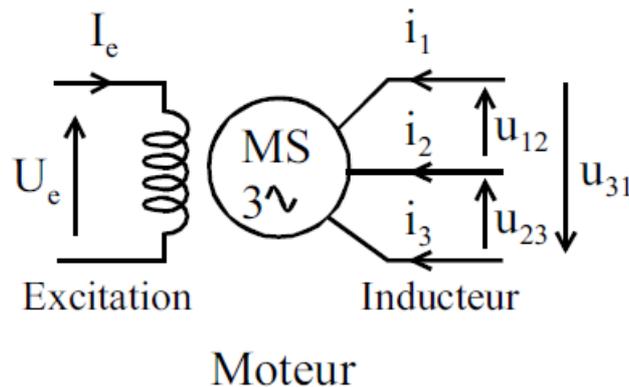
Le moteur synchrone à rotor bobiné fonctionne sur le même principe que le synchrone à aimants permanents, à la différence que le champ magnétique du rotor est créé par le passage du courant dans le bobinage. Le processus de fabrication est ainsi plus complexe à maîtriser, nécessitant des investissements lourds en R & D. « La structure du rotor est plus complexe que dans les autres technologies : le bobinage du rotor, avec ses fils, sa résine et ses pièces de maintien, doit résister aux forces centrifuges à vitesse élevée (jusqu'à 12 000 tours par minute sur la Zoé) et aux contraintes thermiques

C'est plus cher en développement, mais moins onéreux à grande échelle puisqu'il n'y a pas de terres rares. L'investissement en vaut donc la chandelle. Un autre avantage est de pouvoir moduler le courant d'excitation dans le rotor. À la clé, la possibilité de réduire l'excitation

quand le moteur n'a pas besoin d'être fortement sollicité, ce qui diminue les pertes magnétiques et permet donc un rendement élevé à faible charge.

➤ **Excitation de la machine synchrone**

- Ce peut être une source extérieure qui alimente le rotor en courant continu via un système de bagues et de balais.
- Ce peut être la machine elle-même qui fournit sa propre excitation via une génératrice excitatrice ou un alternateur auxiliaire relié sur l'arbre. La machine est alors auto-excitée.



4.2 Démarrage – Réglage de la vitesse des moteurs synchrones

Un moteur synchrone ne possède pas de couple au démarrage. Il ne peut être relié au réseau que si la vitesse est voisine du synchronisme. Quelques procédés possibles de démarrage :

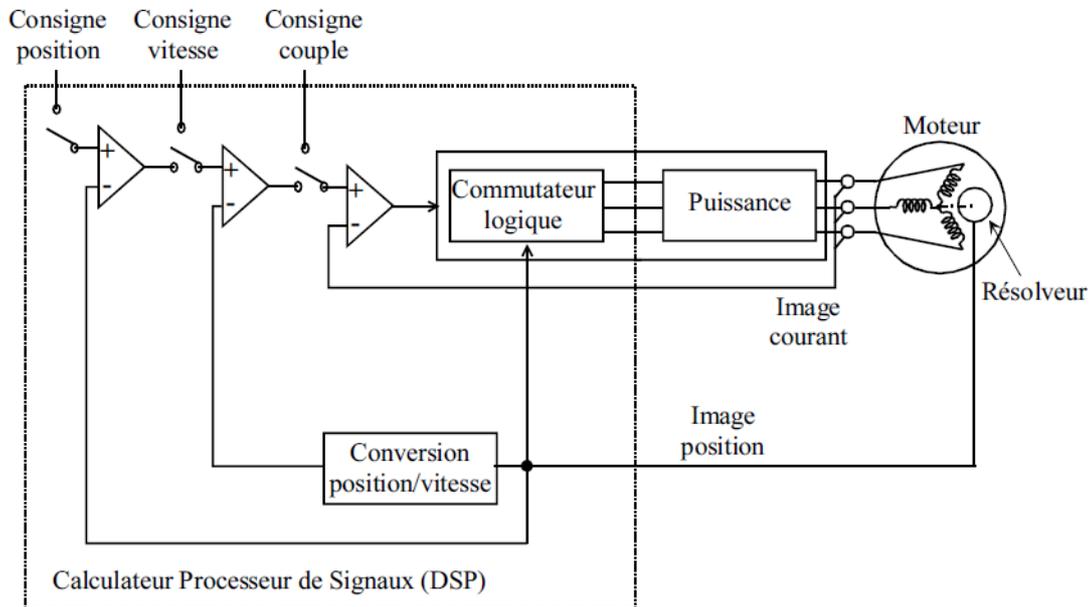
- On entraîne la machine avec un moteur auxiliaire, puis on couple sur le réseau.
- On alimente le moteur à fréquence variable avec un variateur électronique en maintenant le rapport V_{Eff}/f constant.
- Le moteur génère sa propre fréquence à partir d'informations sur la position du rotor, il est autopiloté.

4.2.1 Moteur synchrone autopiloté

➤ **Description et fonctionnement.**

Le couple électromagnétique est maximal si les champs tournants statorique et rotorique forment un angle de 90° . Un capteur (résolveur) permet de repérer à chaque instant la position du rotor, et un convertisseur électronique de fréquence alimente le stator. Une variation entre les déphasages des champs se répercute sur la fréquence d'alimentation qui agit en conséquence pour rétablir l'équilibre (vitesses du rotor et du champ tournant en synchronisme, décalage de 90°). Le moteur s'autopiloté et ne risque pas de décrocher. Finalement, le variateur de fréquence du moteur synchrone remplit la même fonction que le collecteur d'un moteur à courant continu. Un moteur synchrone autopiloté est donc équivalent à un moteur à courant continu alimenté par un hacheur.

L'étude du moteur autopiloté est complexe. La figure suivante donne un schéma fonctionnel simplifié de principe, sachant qu'il existe plusieurs types de convertisseurs et de stratégies de commande.

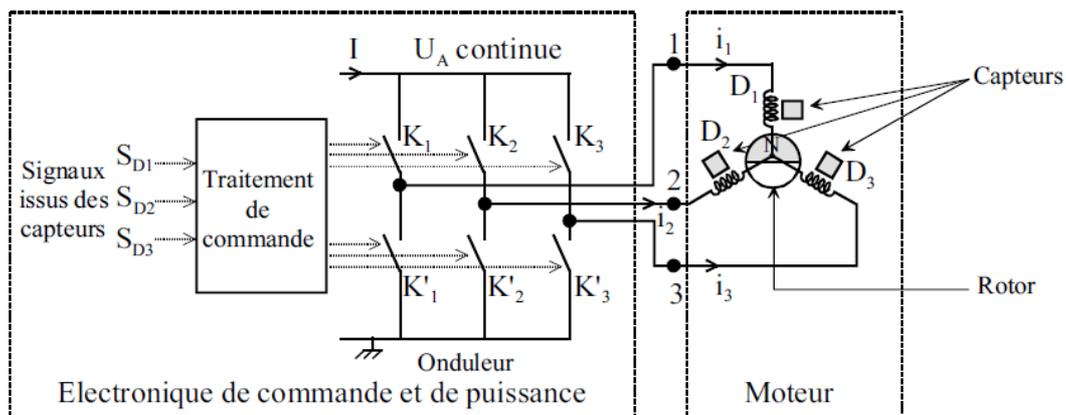


Principe du moteur synchrone autopiloté

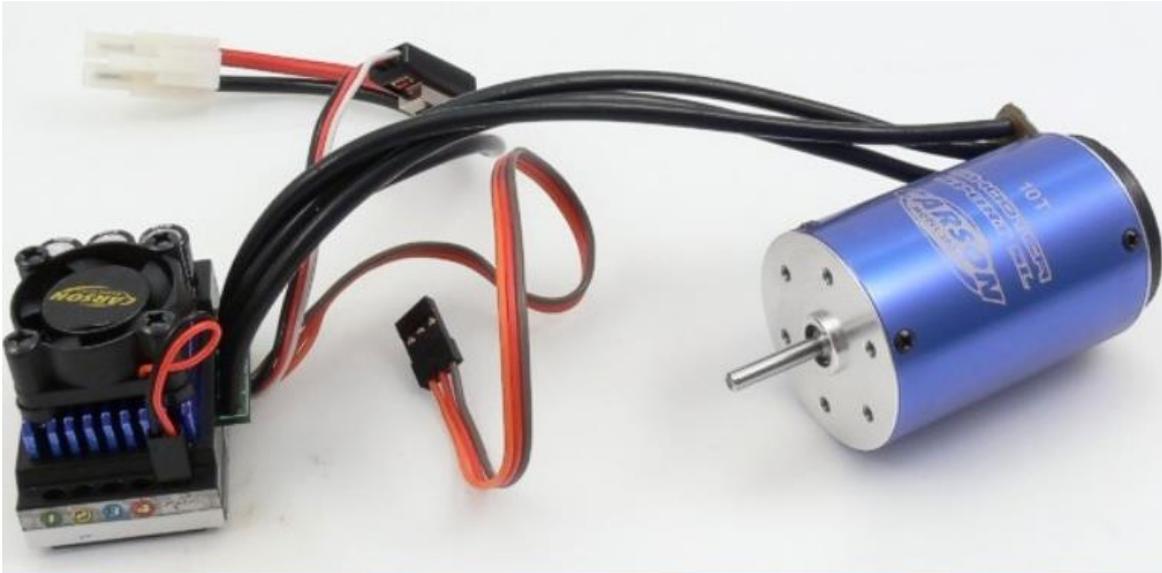
4.2.2 Moteur brushless / ou à commutation électronique

➤ Description

Tout comme le moteur synchrone autopiloté, le moteur brushless (sans balais en anglais) est un moteur synchrone autopiloté, mais son rotor est un aimant. Des capteurs sommaires (à effet Hall par exemple), placés au stator, détectent la position du rotor. Les informations recueillies, traitées électroniquement, alimentent le bobinage statorique en courant alternatif. Il est associé à un circuit de commande électronique (appelé aussi contrôleur) ; il a le même comportement qu'un moteur à courant continu (sans les inconvénients du système balais-collecteurs, d'où le nom de moteur brushless).

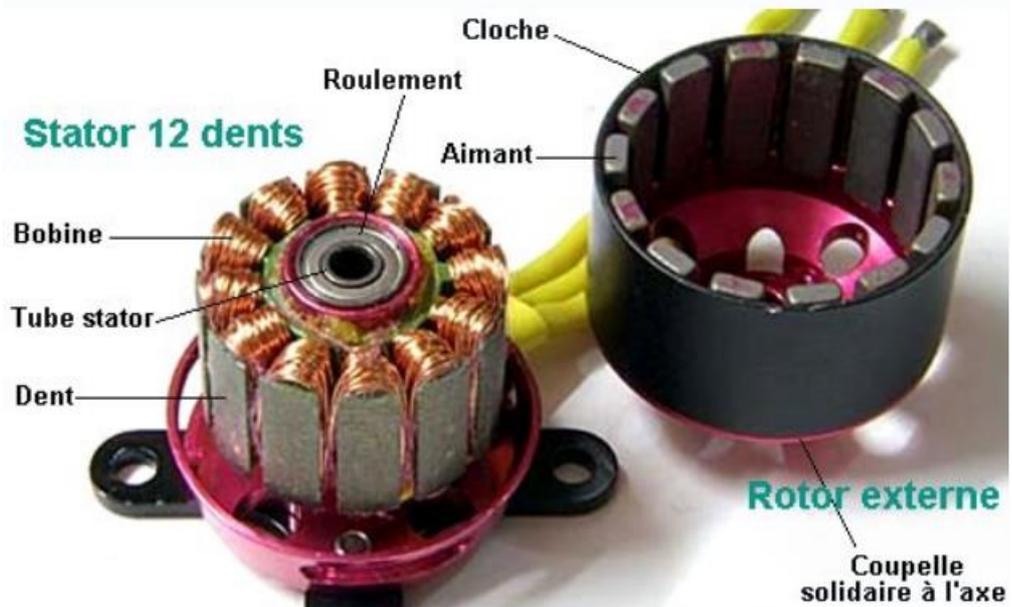


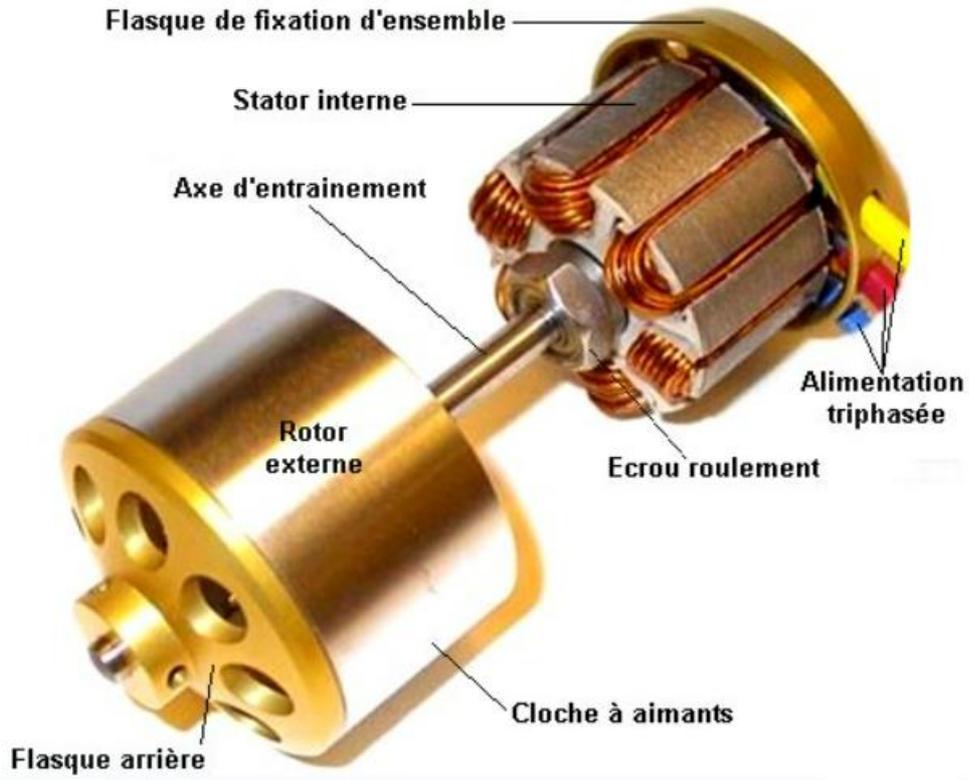
Description du principe d'un moteur « brushless »



Un moteur brushless et son controleur.

Composition d'un moteur brushless out-runner





5. Caractéristiques techniques des moteurs électriques

5.1 Principales caractéristiques

Les caractéristiques des moteurs électriques peuvent être définies à partir des fiches techniques, plaques signalétiques, ou notices et documents constructeur ; parmi ces caractéristiques on site :

- **Puissance** : puissance utile délivrée sur l'arbre du moteur. (ex: 1,5Kw)
- **Facteur de puissance ou cos phi**: permet le calcul de la puissance réactive consommée . (ex: 0,78)
- **Rendement** : permet de connaître la puissance électrique consommée ou absorbée (ex: 76%)
- **Tensions** : la première indique la valeur nominale de la tension aux bornes d'un enroulement. Elle détermine le *couplage* (étoile ou triangle) à effectuer en fonction de la tension du réseau d'alimentation.
(ex: 230v/400v)
- **Intensités nominales** :Elles représentent l'intensité en ligne (dans chaque phase) pour chacun des couplages (ex: 6,65A/3,84A)
- **Courant de démarrage**
- **vitesse** : Indique la vitesse nominale du rotor. On dit aussi vitesse réelle. On connaît alors La vitesse de synchronisme **ns** du moteur (ex: 1440 Tr/min)
- **classe d'isolement** (ex: F)
- **Température ambiante** :utilisation recommandée maximum (ex: 40°C)
- **Fréquence** :fréquence du réseau d'alimentation. (ex: 50Hz)
- **Nombre de phases** :(Ph 3) moteur triphasé
- **service** :(S1) utilisation en marche continue, intermittente...
- **Indice de protection IP** :(IP 56) défini par trois chiffres le degré de protection du moteur à la poussière, à l'eau et aux chocs mécaniques.

5.1.1 Identification des données figurant sur la plaque signalétiques

Cette opération d'identification sert à s'assurer de la conformité entre la plaque signalétique et les spécifications contractuelles dès réception du moteur

* LEROY SOMER		3 ~ LS 100 L - TR		CE	
		N 078594 HA 002			
IP 55 IK 08 cl.F 40C S1				kg 18	
V	Hz	min⁻¹	kW	cos φ	A
Δ 380	50	2840	3	0.89	6.4
Δ 400	-	2860	-	0.83	6.3
Y 690	-	-	-	-	3.6
Δ 415	-	2870	-	0.79	6.7
Δ 440	60	3430	3.6	0.90	6.5
Δ 460	-	3455	-	0.87	6.3

LEROY SOMER		MOT. 3 ~ FLSC 355 LB		CE	
		N 703 481 00 HA 002		kg : 1550	
IP 55 IK 08		cl.F 40 C		S1 % d/h	
V	Hz	min⁻¹	kW	cos φ	A
Δ 380	50	1483	300	0.91	525
Δ 400	-	1485	-	0.90	504
Y 690	-	-	-	-	291
Δ 415	-	1486	-	0.89	493
Δ 440	60	1777	345	0.91	518
Δ 460	-	1780	-	-	499
TR					
GRAISSE ESSO UNIREX N3					
DE 6322 C3		60 cm³		4500 / 3000 H 50/60 Hz	
NDE 6322 C3		60 cm³		4500 / 3000 H 50/60 Hz	

LEROY SOMER		MOT. 3 ~ FL5B 180 M		CE	
		N 596 059 GH 001		kg : 208	
IP 55 IK 08		cl.F 40 C		S3 40 % 6 d/h	
V	Hz	min⁻¹	kW	cos φ	A
Δ 220	50	1427	17	0.88	60
Y 380	50	1427	17	0.88	35
U _R 250					I _R 42
GRAISSE ESSO UNIREX N3					
DE 6310 C3		15 cm³		11000 / H 50/60 Hz	
NDE 6310 C3		15 cm³		11000 / H 50/60 Hz	

Définition des symboles des plaques signalétiques :


Repère légal de la conformité du matériel aux exigences des Directives Européennes.

MOT 3 ~ : Moteur triphasé alternatif
LS : Série
100 : Hauteur d'axe
L : Symbole de carter
TR : Repère d'imprégnation

N° moteur

N° : Numéro série moteur

pour moteurs types 80 à 355 :

H* : Année de production

A** : Mois de production

002 : N° d'ordre dans la série

* **G** = 1996

H = 1997

** **A** = Janvier

B = Février

IP55 IK08 : Indices de protection

(I) cl. F : Classe d'isolation F

40°C : Température d'ambiance

contractuelle de fonctionnement

S : Service

% : Facteur de marche

...d/h : Nombre de cycles par heure

kg : Masse

V : Tension d'alimentation

Hz : Fréquence d'alimentation

min⁻¹ : Nombre de tours par minute

kW : Puissance nominale

cos φ : Facteur de puissance

A : Intensité nominale

Δ : Branchement triangle

Y : Branchement étoile

U_R : Tension rotorique

I_R : Courant rotorique

Roulements

DE : Drive end

Roulement côté entraînement

NDE : Non drive end

Roulement côté opposé

à l'entraînement

60 cm³ : Quantité de graisse à chaque relubrification (en cm³)

4500 H : Périodicité de relubrification (en heures) pour θ amb indiquée, à fréquence 50 Hz

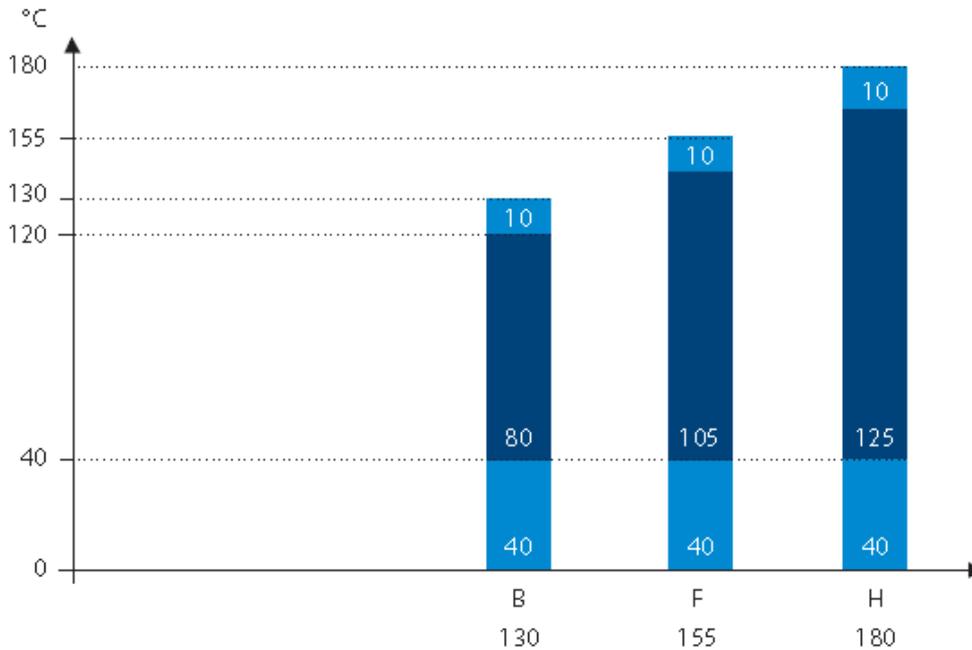
3000 H : Périodicité de relubrification (en heures) pour θ amb indiquée, à fréquence 60 Hz

UNIREX N3 : Type de graisse

5.2 Caractéristiques spécifiques : classe d'isolement - classe de rendement - Services types

5.2.1 Classe d'isolement

On peut distinguer 3 classes d'isollements différents définis par la norme EN 60034-30 , à savoir B, F et H



Classe de température 130 (B)

- Température ambiante nominale 40 °C
- Échauffement maxi. admissible 80 °C
- Réserve thermique 10 °C

Classe de température 155 (F)

- Température ambiante nominale 40 °C
- Échauffement maxi. admissible 105 °C
- Réserve thermique 10 °C

Classe de température 180 (H)

- Température ambiante nominale 40 °C
- Échauffement maxi. admissible 125 °C
- Réserve thermique 10 °C

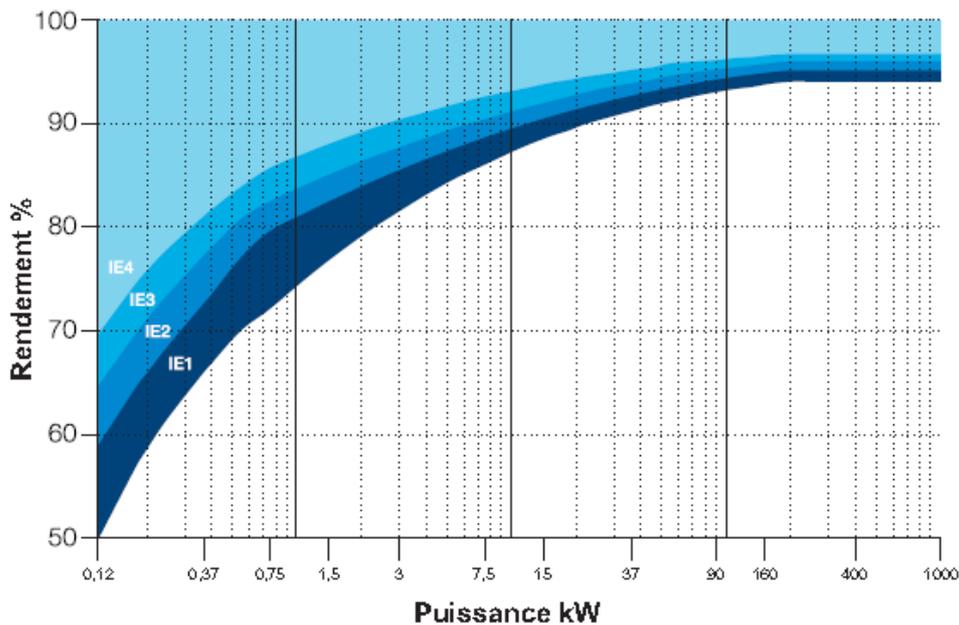
Les moteurs peuvent ainsi être exploités à des températures ambiantes ou des altitudes supérieures, ou avec des tolérances supérieures de tension et de fréquence. La durée de vie de l'isolant peut également être ainsi prolongée. Ainsi, une réduction de 10 °C de la température prolongera la durée de vie de l'isolant.

5.2.2 Classe de rendement

La norme CEI/EN 60034-30-1:2014 définit quatre classes de rendement international (IE) pour les moteurs électriques mono conçus pour un fonctionnement à tension sinusoïdale.

4 types sont définis:

- IE4 = Super Premium
- IE3 = Rendement Premium
- IE2 = Rendement élevé
- IE1 = Rendement standard



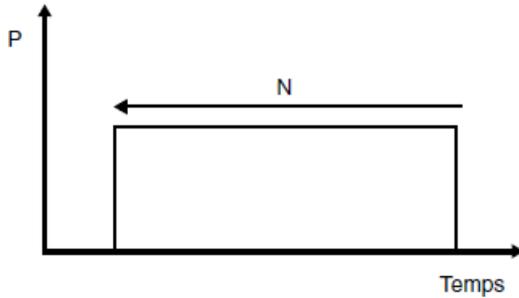
Classes IE - moteurs 4 pôles

5.2.3 Services types

Selon les normes IEC 60034-1 et VDE 0530 Partie 1, les services types sont désignés par S1 à S9. Les valeurs de puissance figurant dans les catalogues sont basées sur un service continu S1 à puissance nominale. Lorsqu'aucun type n'est spécifié, on suppose un service continu.

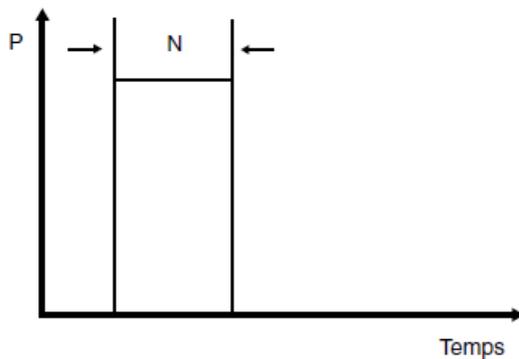
- S1 Service continu

Fonctionnement à charge constante d'une durée suffisante pour que l'équilibre thermique soit atteint. Désignation : S1.



- S2 Service temporaire

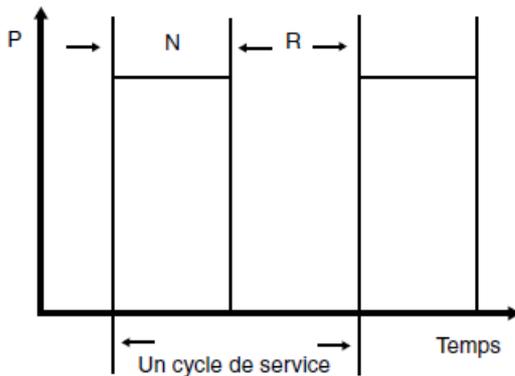
Temps plus court que celui requis pour atteindre l'équilibre thermique, suivi d'un temps de repos et de désexcitation d'une durée suffisante pour ramener la température du moteur à la température ambiante ou à la température de refroidissement. Les valeurs préconisées de durée nominale de cycle de service sont 10, 30, 60 et 90 minutes. Exemple de désignation : S2 60 min.



- S3 Service intermittent

Suite de cycles de service identiques comprenant chacun un temps de fonctionnement à charge constante et un temps de repos et de désexcitation. Le cycle est trop court pour atteindre l'équilibre thermique. Le courant de démarrage n'affecte par l'échauffement de manière significative. Les valeurs préconisées pour le facteur de durée de cycle sont 15, 25, 40 et 60 %. La durée d'un cycle de service est de 10 min. Exemple de désignation : S3 25 %.

$$\text{Facteur de durée de cycle} = \frac{N}{N + R} \times 100 \%$$



Explication des symboles utilisés sur les figures

P = puissance utile

D = accélération

N = fonctionnement à charge nominale

F = freinage électrique

V = fonctionnement à vide

R = à l'arrêt et désexcité

P_N = charge maxi

- Il y a également d'autres services types définis par la norme ; ci-après leur liste :
 - S4 Service intermittent à démarrage
 - S5 Service intermittent à démarrage et freinage électrique
 - S6 Service ininterrompu périodique
 - S7 Service ininterrompu périodique à freinage électrique
 - S8 Service ininterrompu à changement de vitesse périodique
 - S9 Service à changement de vitesse et de charge non-périodique
 - S10 Service avec des charges et des vitesses constantes discrètes

5.3 Bilan de puissance et rendement d'un moteur électrique (cas du moteur asynchrone)

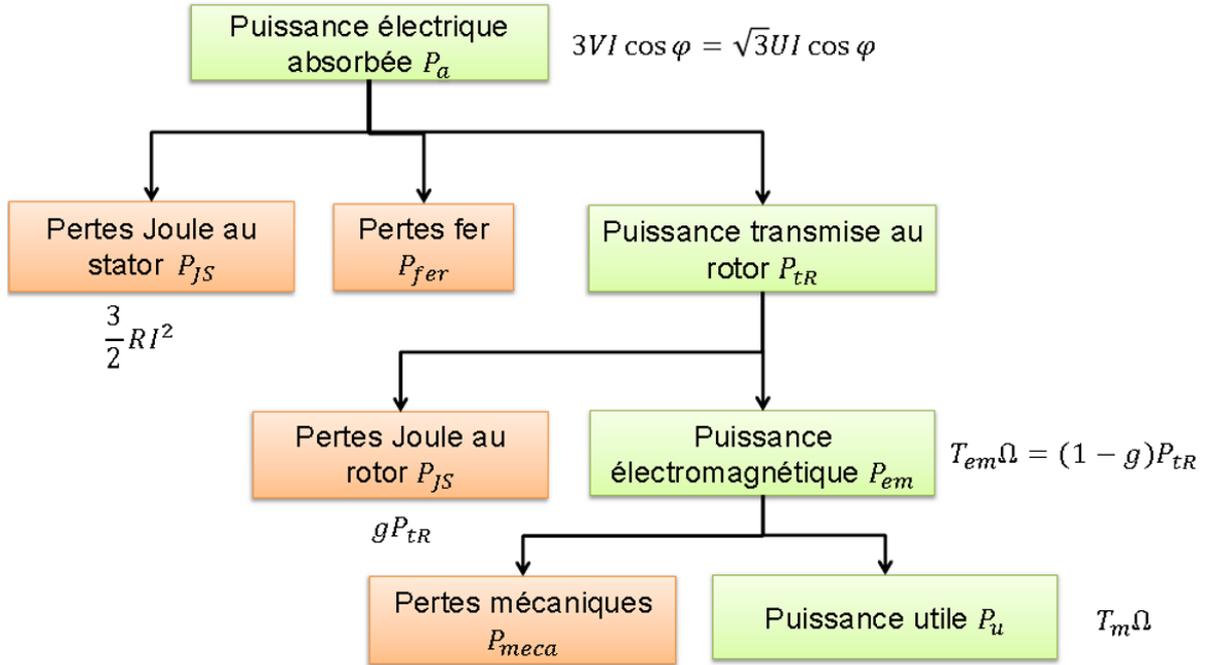
5.3.1 Rendement et types de pertes

Le rendement d'un moteur est une mesure de sa capacité à convertir une énergie électrique en un travail mécanique. L'énergie perdue est émise sous forme de chaleur. Pour augmenter le rendement, les pertes doivent être réduites.

Les pertes du moteur peuvent être réparties en cinq catégories. La première catégorie concerne les pertes de fer dans le noyau, la seconde les pertes dans les enroulements et de frottement. Les pertes de charge, qui varient selon la charge, sont classées comme suit : pertes de cuivre dans le stator, pertes du rotor et pertes de charge variable. Toutes les pertes peuvent être influencées par les solutions de conception et de construction du moteur.

5.3.2 Bilan des puissances

Le bilan des puissances et des pertes dans un moteur asynchrone est reporté sur la figure suivante



Le moteur asynchrone absorbe sur le réseau une puissance électrique active triphasée P_a .

Une partie P_{JS} de cette puissance est dissipée par effet Joule dans les enroulements du stator. Par la suite, le champ magnétique inducteur entraîne des pertes dans le fer P_f , par hystérésis et par courant de Foucault.

Le reste de la puissance P_{tr} est transmis au rotor à travers l'entrefer. La majeure partie de cette puissance est alors utilisée pour produire une puissance électromagnétique P_{em} , tandis que la présence d'un courant induit dans le rotor provoque des pertes par effet Joule P_{JR} .

La puissance électromagnétique fournie par le stator est responsable de la mise en mouvement du rotor, qui produit la puissance mécanique utile P_u qui sera par la suite transmise à la charge par le biais d'un arbre de transmission ou d'une courroie de distribution. Toutefois, dans le mouvement du rotor, une partie de la puissance est perdue par divers mécanismes de frottements, c'est ce que l'on appelle les pertes rotationnelles P_{rot} .

Nous donnons par la suite les différentes relations permettant de calculer les pertes et les puissances impliquées dans le moteur asynchrone, lorsqu'elles sont calculables.

▪ La puissance absorbée

Puissance absorbée par un moteur asynchrone est une puissance active électrique. Lorsque le moteur est connecté à un réseau triphasé, P_a vérifie la relation :

$$P_a = \sqrt{3}UI \cos \varphi$$

où U est la tension composée aux bornes du moteur, I le courant de ligne, et $\cos \varphi$ le facteur de puissance du moteur. Remarquons que U et I sont accessibles directement sur la ligne et peuvent par conséquent être mesurés de la même manière quel que soit le couplage du moteur avec le réseau électrique. En TP, nous utiliserons la méthode des deux wattmètres pour faire la mesure de la puissance absorbée.

▪ Les pertes par effet Joule au stator P_{JS}

Le stator peut être câblé en étoile ou en triangle. Puisque le moteur constitue un récepteur triphasé équilibré, alors :

$$P_{JS} = 3/2RI^2$$

où R est la résistance entre deux bornes.

- Dans le montage étoile, la résistance entre deux bornes R est reliée à la résistance de chaque enroulement r par la relation : $R = 2r$
- Dans le montage triangle, cette relation devient : $R = (2/3)r$

▪ Les pertes fer

Les pertes fer sont fonctions du flux magnétique. Elles ne dépendent donc que de la tension d'alimentation et de la fréquence des courants statoriques. Or, en régime de fonctionnement, ces grandeurs ne varient pas et, par conséquent, les pertes fer peuvent être considérées comme constantes quelle que soit la charge du moteur.

Dans la pratique, les pertes fer sont mesurées lors d'un essai à vide, en même temps que les pertes rotationnelles.

▪ La puissance transmise dans l'entrefer P_{tr}

La puissance transmise au rotor à travers l'entrefer P_{tr} est la partie de puissance absorbée qui n'est pas perdue dans les enroulements du stator et dans le fer. Aussi :

$$P_{tr} = P_a - (P_{JS} + P_f)$$

- Pertes Joule au rotor P_{JR}

Les pertes Joule au rotor sont fonctions de la puissance transmise à celui-ci. On peut par ailleurs montrer qu'elles sont aussi fonctions du glissement.

En effet, les grandeurs P_{JR} et P_{tr} sont liées par la relation : $P_{JR} = g \cdot P_{tr}$

- Puissance électromagnétique P_{em} et moment du couple électromagnétique T_{em}

La puissance électromagnétique P_{em} transmise au rotor est égale à : $P_{em} = P_{tr} - P_{JR} = (1 - g) \cdot P_{tr}$

Le rotor, tournant à la vitesse Ω , est soumis à un couple électromagnétique T_{em} et reçoit par conséquent une puissance électromagnétique égale à : $P_{em} = T_{em} \cdot \Omega$

On déduit alors que :

$$T_{em} = P_{em} / \Omega = P_{tr} / \Omega_s$$

- Pertes mécaniques rotationnelles

Les pertes rotationnelles dépendent uniquement de la vitesse de rotation du moteur. Or, nous l'avons vu précédemment, la vitesse du moteur ne varie que relativement peu avec la charge, la vitesse de décrochage étant relativement proche de la vitesse de synchronisme.

Dans un moteur asynchrone, les pertes rotationnelles seront par conséquent considérées comme constantes, et déterminées à l'aide d'un essai à vide.

- Puissance mécanique et couple utiles P_u et T_u

Le rotor déploie un couple utile T_u à la vitesse Ω . Il délivre alors la puissance utile P_u telle que

$$P_u = T_u \cdot \Omega$$

5.3.3 Rendement

Le rendement η du moteur asynchrone est le rapport entre la puissance utile mécanique qu'il fournit et la puissance électrique qu'il absorbe, de sorte que : $\eta = P_u / P_a$

Autrement-dit

$$\eta = \frac{Pu}{Pa} = \frac{C \times \Omega}{U \times I \times \sqrt{3} \times \cos\varphi}$$

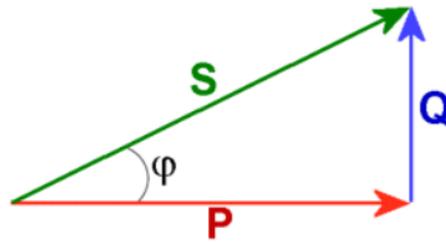
5.4 Facteur de puissance

5.4.1 Définition du facteur de puissance

Un moteur consomme de la puissance active (convertie en travail mécanique) et de la puissance réactive (nécessaire pour la magnétisation, mais ne produit aucun travail).

Les puissances active et réactive, symbolisées dans le schéma (ci-dessous) par les lettres P et Q, donnent ensemble la puissance apparente S. Le rapport entre la puissance active, mesurée en kW, et la puissance apparente, mesurée en kVA, est appelé facteur de puissance. L'angle entre P et S est généralement symbolisé par φ . Le facteur de puissance est égal au $\cos \varphi$.

Le facteur de puissance se situe en général entre 0,7 et 0,9. Il est plus faible pour les petits moteurs et plus élevé pour les gros moteurs.



Le facteur de puissance est déterminé par mesure de la puissance absorbée, de la tension et du courant à puissance nominale.

Une tolérance de $(1 - \cos \varphi) / 6$ s'applique aux valeurs de facteur de puissance énoncées.

Dans une installation avec de nombreux moteurs, beaucoup de puissance réactive sera consommée et le facteur de puissance sera alors plus faible.

C'est la raison pour laquelle les fournisseurs d'électricité exigent parfois du consommateur qu'il relève le facteur de puissance de son installation. Pour ce faire, on connecte des condensateurs à l'alimentation pour absorber la puissance réactive et relever le facteur de puissance.

5.4.2 Valeurs de facteur de puissance

Les valeurs de facteur de puissance à puissance nominale figurent dans les tableaux des caractéristiques techniques des catalogues produits.

Le tableau suivant donne les valeurs types de facteur de puissance de moteurs ABB

Comme le montre le tableau, un moteur avec un facteur de puissance de 0,85 a une valeur de 3/4 de charge de 0,81, à 1/2 charge de 0,72 et à 1/4 de charge de 0,54.

Facteur de puissance $\cos \phi$				
2 - 12 pôles				
1.25 x PN	1.00 x PN	0.75 x PN	0.50 x PN	0.25 x PN
0.92	0.92	0.90	0.84	0.68
0.91	0.91	0.89	0.83	0.66
0.90	0.90	0.88	0.82	0.64
0.89	0.89	0.87	0.81	0.62
0.88	0.88	0.86	0.80	0.60
0.88	0.87	0.84	0.76	0.58
0.87	0.86	0.82	0.73	0.56
0.86	0.85	0.81	0.72	0.54
0.85	0.84	0.80	0.71	0.52
0.84	0.83	0.78	0.70	0.50
0.84	0.82	0.76	0.66	0.46
0.84	0.81	0.74	0.63	0.43
0.83	0.80	0.73	0.60	0.40
0.82	0.79	0.72	0.59	0.38
0.82	0.78	0.71	0.58	0.36
0.81	0.77	0.69	0.55	0.36
0.81	0.76	0.68	0.54	0.34
0.80	0.75	0.67	0.53	0.34
0.79	0.74	0.66	0.52	0.32
0.78	0.73	0.65	0.51	0.32
0.78	0.72	0.62	0.48	0.30
0.78	0.71	0.61	0.47	0.30
0.77	0.70	0.60	0.46	0.30

5.4.3 Compensation de la puissance réactive

En compensation de phase, les condensateurs sont en général connectés en parallèle avec le moteur ou le groupe de moteurs. Toutefois, dans certains cas, une surcompensation peut provoquer l'auto-excitation d'un moteur à induction qui se met à fonctionner en générateur. Ainsi, pour éviter les problèmes, il est de pratique courante de ne pas compenser plus que le courant à vide du moteur.

Les condensateurs ne doivent pas être connectés en parallèle avec chacune des phases de l'enroulement ; en effet, si tel était le cas, il serait difficile, voire impossible, de démarrer le moteur en mode étoile/triangle.

La formule suivante permet de calculer la taille (par phase) d'un condensateur pour une fréquence réseau de 50 Hz :

$$C = 3,2 \cdot 10^6 \cdot \frac{Q}{U_2}$$

Où : C = capacité, μF - U = tension du condensateur, V - Q = puissance réactive, kvar.

La puissance réactive est calculée avec la formule suivante :

$$Q = K \cdot P \frac{P}{\eta}$$

Où :

K = constante reprise du tableau ci-après

P = puissance nominale du moteur, kW

η = rendement du moteur

cos φ sans compensation	Constante K Compensation à cos φ =			
	0.95	0.90	0.85	0.80
0.50	1.403	1.248	1.112	0.982
0.51	1.358	1.202	1.067	0.936
0.52	1.314	1.158	1.023	0.892
0.53	1.271	1.116	0.980	0.850
0.54	1.230	1.074	0.939	0.808
0.55	1.190	1.034	0.898	0.768
0.56	1.150	0.995	0.859	0.729
0.57	1.113	0.957	0.822	0.691
0.58	1.076	0.920	0.785	0.654
0.59	1.040	0.884	0.748	0.618
0.60	1.005	0.849	0.713	0.583
0.61	0.970	0.815	0.679	0.548
0.62	0.937	0.781	0.646	0.515
0.63	0.904	0.748	0.613	0.482
0.64	0.872	0.716	0.581	0.450
0.65	0.841	0.685	0.549	0.419
0.66	0.810	0.654	0.518	0.388
0.67	0.779	0.624	0.488	0.358
0.68	0.750	0.594	0.458	0.328
0.69	0.720	0.565	0.429	0.298
0.70	0.692	0.536	0.400	0.270

cos φ sans compensation	Constante K Compensation à cos φ =			
	0.95	0.90	0.85	0.80
0.71	0.663	0.507	0.372	0.241
0.72	0.635	0.480	0.344	0.214
0.73	0.608	0.452	0.316	0.186
0.74	0.580	0.425	0.289	0.158
0.75	0.553	0.398	0.262	0.132
0.76	0.527	0.371	0.235	0.105
0.77	0.500	0.344	0.209	0.078
0.78	0.474	0.318	0.182	0.052
0.79	0.447	0.292	0.156	0.026
0.80	0.421	0.266	0.130	
0.81	0.395	0.240	0.104	
0.82	0.369	0.214	0.078	
0.83	0.343	0.188	0.052	
0.84	0.317	0.162	0.026	
0.85	0.291	0.135		
0.86	0.265	0.109		
0.87	0.238	0.082		
0.88	0.211	0.055		
0.89	0.184	0.027		
0.90	0.156			

5.5 Tableau comparatif des différents types de moteurs électriques

	Moteur à courant continu	Moteur synchrone	Moteur asynchrone
Dénomination condensée	MCC	MS	MAS
Constitution du stator	<ul style="list-style-type: none"> • Enroulements inducteurs (machines de forte puissance jusqu'à plusieurs MW). • Aimants (machines jusqu'à quelques kW). 	<ul style="list-style-type: none"> • Enroulements statoriques triphasés pour la production du champ tournant. 	<ul style="list-style-type: none"> • Enroulements statoriques triphasés pour la production du champ tournant.
Constitution du rotor	<ul style="list-style-type: none"> • Enroulements rotoriques d'induit constitués de conducteurs de forte section car les courants d'induit sont importants (limitation en augmentant le nbre de voie d'enroulements) 	<ul style="list-style-type: none"> • Enroulements d'excitation (électroaimant) pour les machines de forte puissance (moteurs ou alternateurs). • Aimants (machines jusqu'à quelques kW). 	<ul style="list-style-type: none"> • Enroulements rotoriques (machines à bagues) : forte puissance, circuit électrique accessible pour modifier le comportement de la machine (pilotage par le rotor). • Rotor à cage pour des machines simples, robustes pilotables par le stator.
Vitesse du rotor	<ul style="list-style-type: none"> • Variable suivant la tension d'induit, mais limitée en raison des commutations de courant au niveau du collecteur. 	<ul style="list-style-type: none"> • Variable de l'arrêt jusqu'à une vitesse maximale réglée par la fréquence des grandeurs statoriques (directement proportionnelle). 	<ul style="list-style-type: none"> • Variable de l'arrêt jusqu'à une vitesse maximale réglée par la fréquence des grandeurs statoriques (au glissement près).

Conséquence d'une augmentation du couple de charge	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution de la vitesse rotorique. • Limitation par le dépassement du courant maximal d'induit. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de diminution de la vitesse rotorique (synchronisme) en contrôlant l'angle interne. • Perte de contrôle au-delà d'une limite 	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation du glissement provoquant une diminution de la vitesse de rotation.
Rendement	<ul style="list-style-type: none"> • Moyen 	<ul style="list-style-type: none"> • Bon (98,5% pour les gros alternateurs) 	<ul style="list-style-type: none"> • Moins bon que la MS (pertes rotoriques).
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Entretien du système balais-collecteur (forte dégradation en particulier en atmosphère corrosive). • Limité en vitesse du fait du collecteur • Puissance massique <<MS • Inertie >>MS • Bande passante mécanique << MS 	<ul style="list-style-type: none"> • Entretien des bagues pour les moyens/gros moteurs (électro-aimant). • Décrochage si trop de couple demandé. • Démarrage direct sur le réseau impossible. • Électronique interne • Alimentation et régulation complexe mais maîtrisée • Prix élevés mais en baisse • À basse vitesse les harmoniques peuvent créer des ondulations de couple 	<ul style="list-style-type: none"> • Dépendance entre la vitesse et la charge. • Pointe de courant au démarrage.
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Pas d'électronique interne • Faible cout • Commande simple du couple et de la vitesse de manière indépendante donc variateur simple • Faciles à miniaturiser • Adapté aux basses vitesses, où la régularité de marche est excellente 	<ul style="list-style-type: none"> • Vitesse fixée (invariante avec la charge) • Possibilité de vitesse élevée • Si le moteur est brushless (à aimant) pas de collecteur donc pas d'entretien, utilisable en atmosphère explosive corrosive • Bonne dissipation des pertes thermiques (elles n'existent quasiment qu'au stator) • Bon rendement • On peut l'alimenter sous des tensions élevées. • Bon facteur de puissance. • Peut fournir ou absorber de l'énergie 	<ul style="list-style-type: none"> • Robuste • peu d'entretien • faible coût

		<p>réactive au réseau.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Puissance massique élevée • Faible inertie (forte accélération) donc bonne bande passante mécanique (rotor saucisson) 	
Utilisations	<ul style="list-style-type: none"> • Production d'énergie (génératrices). • Application nécessitant une vitesse stable en fonction de la charge. • Moteurs brushless, pas à pas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Production d'énergie (alternateurs). • Application nécessitant une vitesse stable en fonction de la charge. • Moteurs simples : brushless, pas à pas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Grand standard industriel. • Entraînements divers. • Alternateurs en site isolé (éolienne, micro- centrale hydraulique)

Auto-Evaluation : A3**QCM**

1 Par définition, le facteur de puissance est :

- a puissance réactive / puissance active
- b puissance réactive / puissance apparente
- c puissance active / puissance apparente

2

Pour le cas d'un moteur asynchrone triphasé ϕ désigne le déphasage de la tension par rapport au courant.

À quoi correspond alors le facteur de puissance ?

- a $\cos\phi$
- b $\sin\phi$
- c $\tan\phi$

3

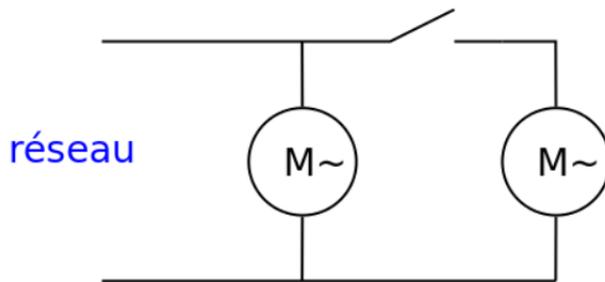
On donne les caractéristiques électriques d'une pompe pour système de chauffage urbain : 230 V 50 Hz monophasé - 4 pôles - Puissance utile : 1,1 kW - 6,8 A - $\cos\phi = 0,96$ - 1425 tr/min

Quel est le rendement énergétique de la pompe ?

- a 42 %
- b 70 %
- c 73 %
- d 96 %

4

Un réseau monophasé 230 V 50 Hz alimente un moteur de 2 kW et de facteur de puissance 0,8.



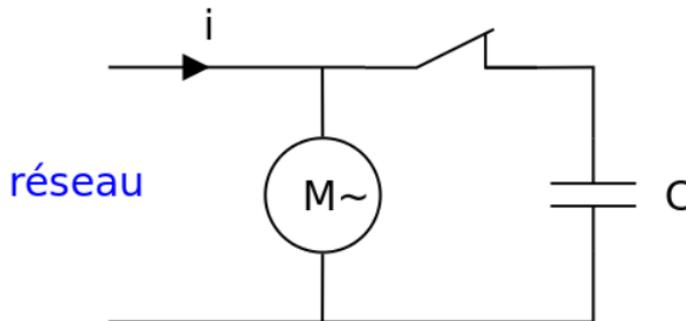
On ferme l'interrupteur, ce qui alimente un second moteur de 1 kW et de facteur de puissance 0,9.

Que vaut alors le facteur de puissance de l'installation ?

- a $\cos\varphi < 0,8$
- b 0,8
- c $0,8 < \cos\varphi < 0,9$
- d 0,9
- e $0,9 < \cos\varphi \leq 1$

5

Un réseau monophasé 230 V 50 Hz alimente un moteur (3 kW, 2 kvar) et un condensateur (0,5 kvar).



On ouvre l'interrupteur, la valeur efficace du courant i :

- a augmente
- b diminue
- c ne change pas
- d 239 kW

6. Autres types de moteurs électriques

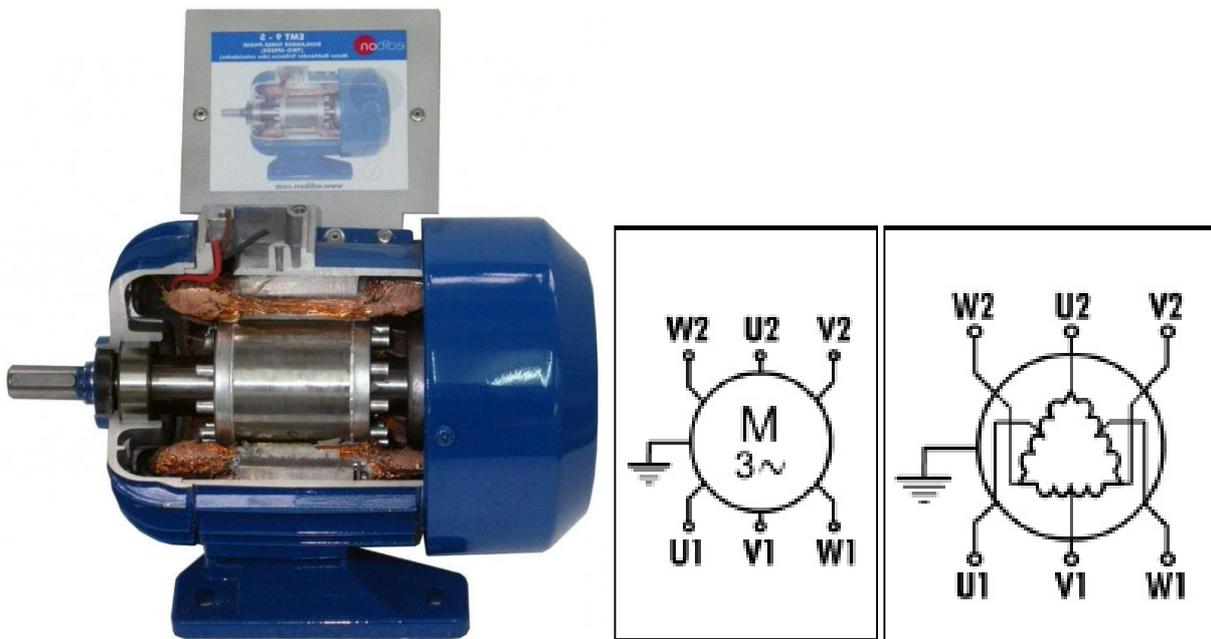
6.1 Moteur asynchrone à deux vitesses (moteur DALHANDER)

Le schéma de câblage DALHANDER s'applique pour un moteur ayant des enroulements spécifiques du même nom.

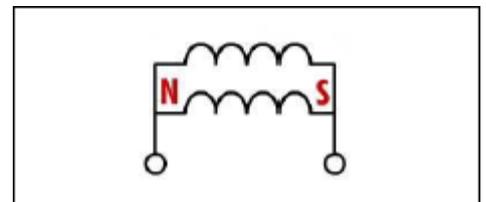
Ce type de câblage permet d'avoir deux vitesses (50 %, 100 %), utilisés pour les hottes de cuisine, les extracteurs, les centrales de traitement d'air.

Robert DALHANDER ingénieur électromécanicien né en Suède en 1870, a donné son nom au moteur asynchrone à deux vitesses qu'il a inventé avec son compatriote LINDSTRÖM en 1897.

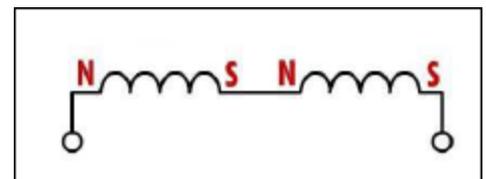
Ces moteurs ont 6 bobinages, avec chaque fois deux bobinages consécutifs qui peuvent être connectés dans le même sens ou dans le sens inverse :



Si les deux bobinages sont connectés dans le même sens (en parallèle), l'action des deux bobinages va se superposer comme s'il s'agissait d'un seul bobinage et on obtient en fait un seul pôle large. Le moteur a alors 3 pôles magnétiques et le moteur tourne à sa vitesse élevée, par exemple 2900 tours.



Si les deux bobinages sont connectés en série, chaque bobinage produit un champ inverse et on obtient deux pôles, donc 6 pôles magnétiques en tout. Le moteur tourne à sa vitesse basse, par exemple 1450 tours.



- Couplage d'un moteur DALHANDER

Tensions et couplage	Schémas des connexions internes	Schémas de principe des bobinages	Schémas des connexions externes	
			Démarrage direct	Par commutateur
<i>Moteur de type mono tension (6 bornes)</i>				
Dahlander « Couple constant » ou « usage courant » 6 bornes (Δ intérieur) $\Delta - Y Y$		Vitesse inférieure (PV) 		
		Vitesse supérieure (GV) 		
Dahlander ou PAM machines centrifuges 6 bornes (Y intérieure) $Y - Y Y$		Vitesse inférieure (PV) 		
		Vitesse supérieure (GV) 		

6.2 Moteur universel

6.2.1 Définition d'un moteur universel

Le moteur universel est un type de moteur électrique qui peut fonctionner à la fois en courant continu et en courant alternatif monophasé.

Sa constitution est similaire à celle d'un moteur série à courant continu, avec toutefois quelques modifications :

Les noyaux polaires et l'ensemble du circuit magnétique sont constitués de tôles de fer au silicium isolées et empilées pour réduire les pertes d'énergie dues aux courants de Foucault. Ces courants sont produits en raison de variations de flux magnétique lorsqu'ils sont connectés à un réseau de courant alternatif.

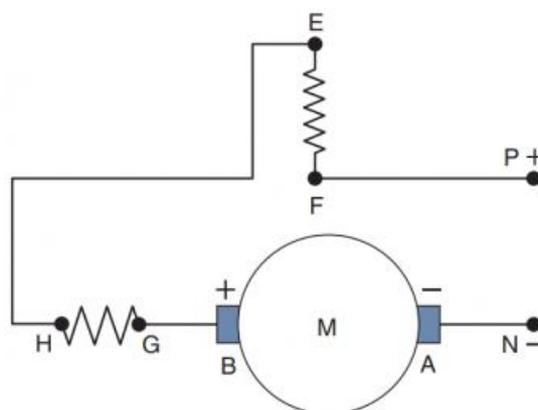


Il a un plus petit nombre de tours dans l'inducteur afin de ne pas saturer magnétiquement le noyau et ainsi réduire les pertes dues aux courants de Foucault et à l'hystérésis, augmenter l'intensité du courant et donc le couple moteur et améliorer le facteur de puissance. Le moteur universel a un plus grand nombre de tours dans l'induit pour compenser la diminution de flux due au moins grand nombre de tours dans l'inducteur.

6.2.2 Fonctionnement d'un moteur universel

Le moteur universel est un type de moteur monophasé qui peut fonctionner à la fois en courant continu et en courant alternatif. Sa constitution est essentiellement celle d'un moteur série à courant continu et ses caractéristiques de fonctionnement sont analogues.

Ce qui suit est une représentation schématique du schéma moteur universel :



Le moteur série à courant continu se caractérise par un fort couple de démarrage et sa vitesse est en fonction inverse de la charge. Cela permet d'atteindre facilement des vitesses très élevées au ralenti. Au moment où le moteur universel fonctionne en courant alternatif, cet inconvénient est réduit car son application est généralement dans les moteurs de petite puissance et les pertes dues au frottement, aux roulements, etc., sont élevées par rapport au total, il n'est donc pas Ils présentent le danger d'accélérer autant, bien qu'ils atteignent des vitesses allant jusqu'à 20 000 tours par minute (tr/min). Pour cette raison, ils sont tout à fait adaptés aux petits appareils électriques.

Pour qu'un moteur électrique de ce type puisse fonctionner en courant alternatif, il faut que l'empilement de son inducteur (le noyau des électro-aimants) soit en plaque magnétique pour éviter les pertes dans le fer.

L'enroulement d'inducteur des moteurs universels est généralement bipolaire, avec deux bobines d'inducteur. Le moteur universel fonctionne en courant continu exactement de la même manière qu'un moteur série. Si le moteur est alimenté en courant alternatif, il démarre tout seul, car le courant qui traverse l'enroulement inducteur présente cent vibrations par seconde, le même que le courant qui traverse l'enroulement induit, de sorte que le moment de rotation et le sens de rotation reste constant.

6.2.3 Caractéristiques d'un moteur universel

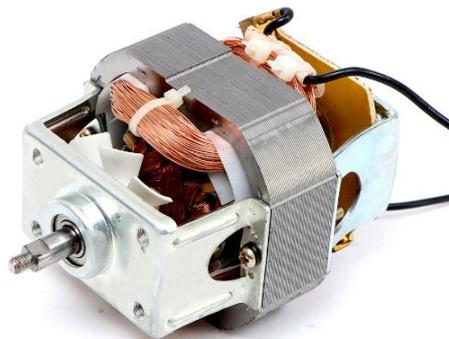
En courant continu c'est un moteur série normal avec les mêmes caractéristiques.

En courant alternatif, il se comporte de manière similaire à un moteur série à courant continu.

Comme chaque fois que le sens du courant est inversé, il le fait à la fois dans l'inducteur et dans l'induit, de sorte que le couple moteur conserve son sens.

Puissance inférieure en courant alternatif en courant continu, car en courant alternatif le couple est Pulsateur.

Les moteurs universels fonctionnent avec des tensions en courant continu ou en courant alternatif. Un tel moteur électrique, appelé universel, est utilisé dans les scies électriques, les perceuses, les ustensiles de cuisine, les ventilateurs, les soufflantes, les mélangeurs et autres applications où une vitesse de rotation élevée est requise avec de faibles charges ou de faibles forces résistantes. Ces moteurs à courant alternatif et continu, y compris universels, se distinguent par leur collecteur bobiné et leurs balais.



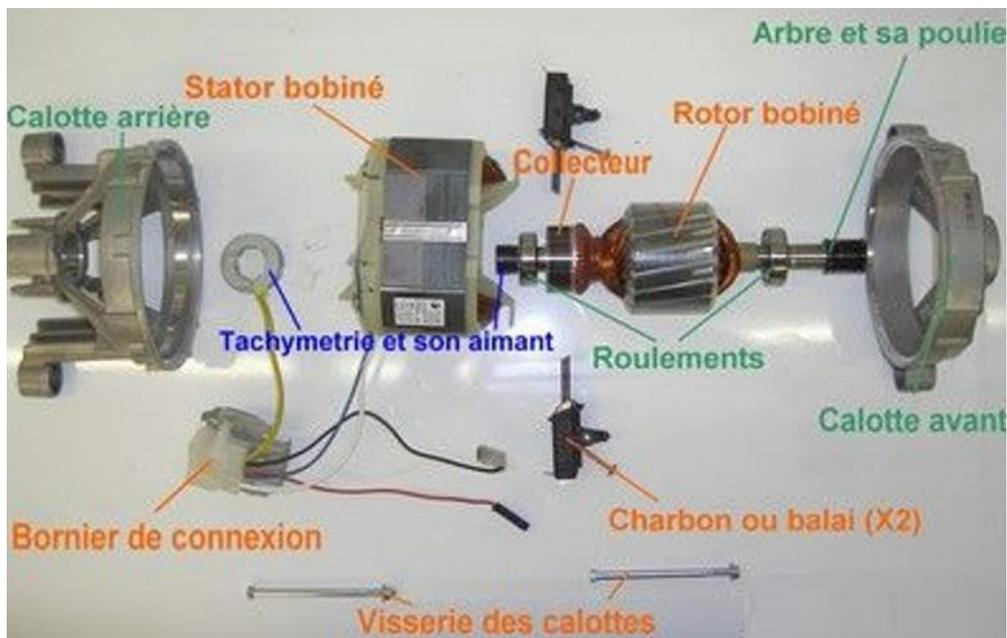
Le circuit électrique est très simple, il n'a qu'un seul chemin pour le passage du courant, car le circuit est connecté en série. Son potentiel est plus grand car il a une plus grande souplesse pour surmonter l'inertie lorsqu'il est au repos, c'est-à-dire qu'il a un excellent couple de démarrage, mais il a une difficulté, c'est qu'il n'est pas construit pour un usage continu ou permanent (pendant de longues périodes du temps).

Une autre difficulté des moteurs universels est les émissions électromagnétiques. Les étincelles du collecteur ("craquements") ainsi que son propre champ magnétique génèrent des interférences ou du bruit dans l'espace radio. Cela peut être réduit au moyen de condensateurs pas à pas, 0,001 F à 0,01 F, connectés des balais au boîtier du moteur et reliant le boîtier du moteur à la terre. Ces moteurs ont l'avantage d'atteindre des vitesses élevées, mais avec peu de force. Il existe également des moteurs à courant alternatif triphasé qui fonctionnent à 380 V et à d'autres tensions.

6.2.4 Composants du moteur universel

Les composants de ce moteur sont :

- Les champs (stator)
- Masse (rotor)
- Les balais (les excitateurs)
- Les capots (les capots côté moteur)



Le circuit électrique est très simple, il n'a qu'un seul chemin pour le passage du courant, car le circuit est connecté en série. Son potentiel est plus grand car il a une plus grande souplesse pour surmonter l'inertie lorsqu'il est au repos, c'est-à-dire qu'il a un excellent couple de

démarrage, mais il a une difficulté, c'est qu'il n'est pas construit pour un usage continu ou permanent (pendant de longues périodes du temps).

6.2.5 Utilisation des moteurs universels

L'utilisation de ces moteurs en courant alternatif est très répandue en raison du couple de démarrage plus élevé par rapport à celui des moteurs asynchrones et en raison de leur vitesse de rotation élevée, ce qui permet de réduire leur encombrement et leur prix. Le moteur universel est sans aucun doute le moteur électrique le plus utilisé dans l'industrie de l'électroménager.

Il est généralement utilisé dans les machines-outils portables de toutes sortes, les petits appareils tels que les scies électriques, les perceuses, les ustensiles de cuisine, les ventilateurs, les souffleurs, les mélangeurs et autres applications où une vitesse de rotation élevée est requise avec de faibles charges ou de petites forces résistantes. Ces moteurs à courant alternatif et continu, y compris universels, se distinguent par leur collecteur bobiné et leurs balais.

6.2.6 Avantages et Inconvénients du moteur universel

▪ Avantages du moteur universel

Le moteur universel à courant alternatif présente les avantages suivants :

- Le moteur universel a un couple de démarrage élevé lors du démarrage.
- Ce type de moteur électrique peut atteindre des vitesses plus élevées (jusqu'à environ 25 000 tr/min) par rapport aux vitesses possibles qu'avec des moteurs asynchrones à la fréquence du réseau.
- Comme avec un moteur à courant continu normal, la vitesse peut être facilement ajustée en faisant varier la tension du moteur.

▪ Inconvénients du moteur électrique universel

En revanche, ce type de moteur présente les inconvénients suivants :

- Le collecteur présent dans le moteur électrique est sujet à l'usure et provoque souvent des étincelles sous l'influence de la réaction d'ancrage qui en résulte. Pour limiter les perturbations CEM, le moteur peut être équipé de condensateurs de suppression, placés en parallèle de l'ancre et d'inductances série couplées sur les lignes d'alimentation du collecteur.
- Le moteur universel présente un faible rendement d'environ 80 %, ce qui entraîne une production de chaleur importante. Pour éviter les pertes élevées dues aux courants de Foucault, non seulement le rotor mais aussi le stator doit être feuilletés.
- L'utilisation de machines à moteur universel nécessite un entretien régulier. En utilisation normale, il serait bon de souffler périodiquement le carter du moteur avec un compresseur. Cela peut prolonger considérablement la durée de vie.

- En raison du couple d'impulsions, ce type de moteur électrique produit beaucoup de vibrations et donc beaucoup de bruit.

6.3 Moteur pas à pas

6.3.1 Définition d'un moteur pas à pas

Un moteur pas à pas est un moteur électrique synchrone sans frotteurs qui convertit les impulsions numériques en rotation de l'arbre mécanique. Chaque révolution du moteur pas à pas est divisée en un nombre de pas distincts, 200 pas dans la majorité des cas, et le moteur doit recevoir une impulsion distincte pour chaque pas. Le moteur pas à pas ne peut avoir qu'un seul pas à la fois, et chaque pas est de la même taille. Puisque chaque impulsion fait tourner le moteur à un angle précis, généralement de $1,8^\circ$, la position du moteur peut être contrôlée sans aucun mécanisme de rétroaction. Lorsque les impulsions numériques augmentent en fréquence, le mouvement de pas se transforme en rotation continue, avec une vitesse de rotation directement proportionnelle à la fréquence des impulsions.

Les moteurs pas à pas sont utilisés quotidiennement dans les applications industrielles et commerciales en raison de leur faible coût, de leur haute fiabilité, de leur couple élevé à basse vitesse et de leur construction simple et robuste qui fonctionne dans presque n'importe quel environnement.

Les nombreuses applications de la commande numérique ont remis en faveur le moteur pas à pas, appelé aussi moteur à impulsions qui était utilisé depuis déjà longtemps. Les moteurs pas à pas ont été créés en 1930. Leurs développements ont commencé au début des années soixante grâce à l'apparition des microprocesseurs, microcontrôleurs et aux énormes progrès de l'électronique de puissance à transistor. Et encore, pendant des années, l'apparition essentielle fût celle de la commande numérique des machines outil ayant besoin d'un tel type de moteur. Puis avec le développement de la recherche spatiale, de nouveaux moteurs pas à pas firent leur apparition (dimensions réduites et pas angulaires plus grand) et furent largement utilisés grâce à leurs avantages importants de fiabilité et de simplicité de commande qu'ils offraient sur les autres moteurs. Les moteurs pas à pas sont très utilisés dans toutes les applications mécaniques où on doit contrôler la position ou la vitesse d'un système. Ces moteurs sont par exemple utilisés en robotique (positionnement des axes, vitesse variable du robot), en informatique (déplacement d'une tête de lecture d'une lecture, déplacement de la tête d'impression, avance du papier pour les imprimantes), en astronomie (positionnement du télescope pour suivre un astre) et dans la réception TV par satellites (positionnement d'une parabole).

Les moteurs pas à pas permettent essentiellement d'obtenir un positionnement très précis : à chaque fois que le moteur reçoit une impulsion électrique de commande, son axe effectue une rotation d'un angle déterminé. Il peut avoir une valeur comprise entre $0,9^\circ$ et 90° . Les valeurs les plus couramment rencontrées sont :

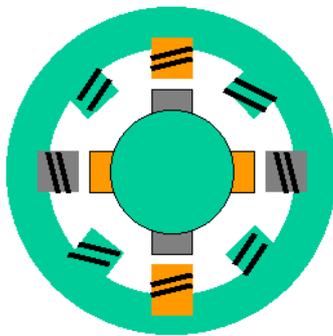
- 0,9° : soit 400 pas par tour
- 1,8° : soit 200 pas par tour
- 3,6° : soit 100 pas par tour
- 7,5° : soit 48 pas par tour
- 15° : soit 24 pas par tour



La vitesse de rotation est fonction de la fréquence des impulsions. On distingue 3 groupes de moteur pas à pas :

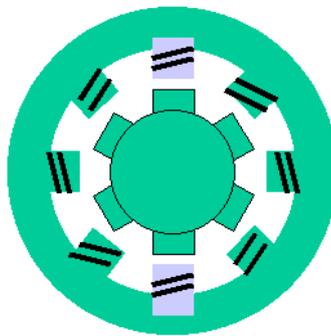
- les moteurs à aimant permanent
- les moteurs à réluctance variable
- les moteurs hybrides

Aimant permanent



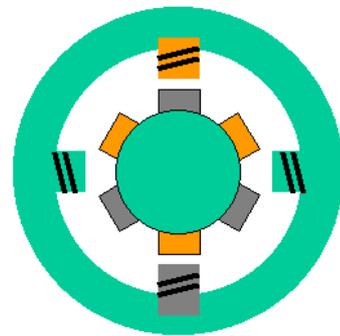
8 pas
2 phases
bipolaire
4 fils

Réluctance variable



24 pas
4 phases
unipolaire
8 fils

Hybride



12 pas
2 phases
bipolaire
4 fils

Au point de vue électrotechnique, le moteur pas à pas ressemble à la machine synchrone, dont le stator (le plus souvent à pôles saillants) porte les enroulements de pilotage et le rotor (presque toujours à pôles saillants) est soit muni d'aimants permanents (structure dite polarisée ou active), soit constitué par une pièce ferromagnétique dentée (structure dite réluctante ou passive). Entre le moteur et son alimentation, sont intercalés trois éléments essentiels (Figure ci-dessous)

- une unité de calcul, qui élabore les impulsions de commande ;
- un modulateur PWM, qui génère les commandes des contacteurs électroniques de commutation ;
- une électronique de commutation (puissance), qui, à partir d'une alimentation, fournit l'énergie vers les enroulements appropriés du moteur.

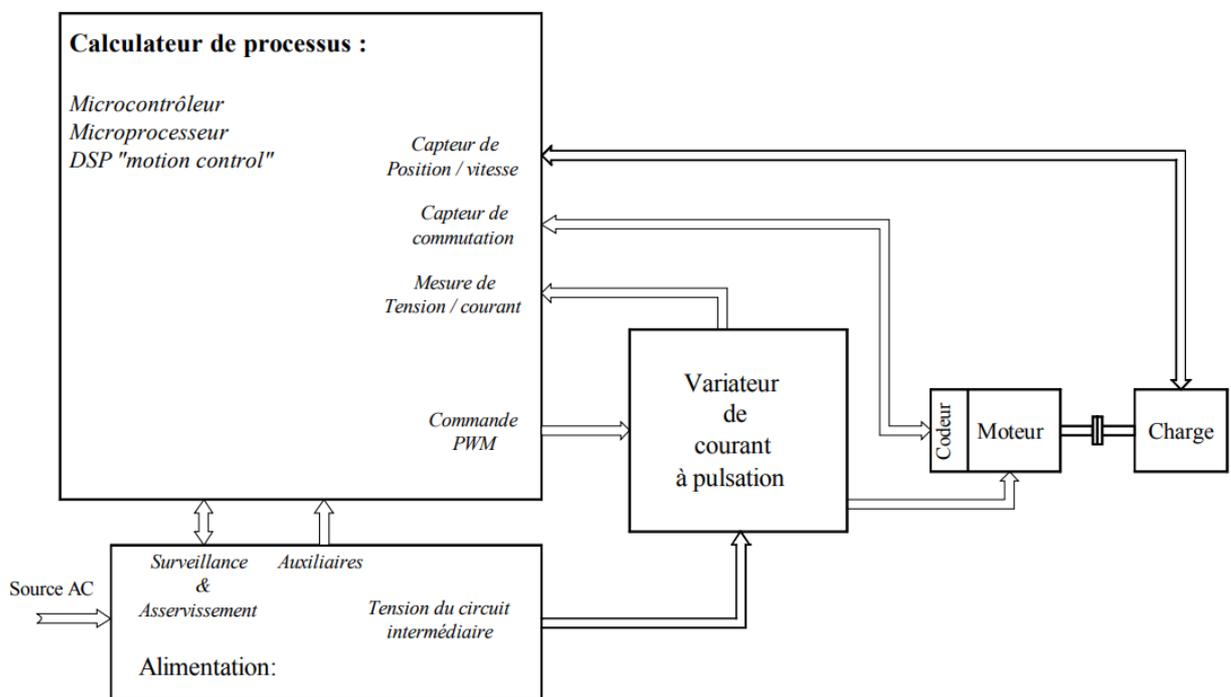
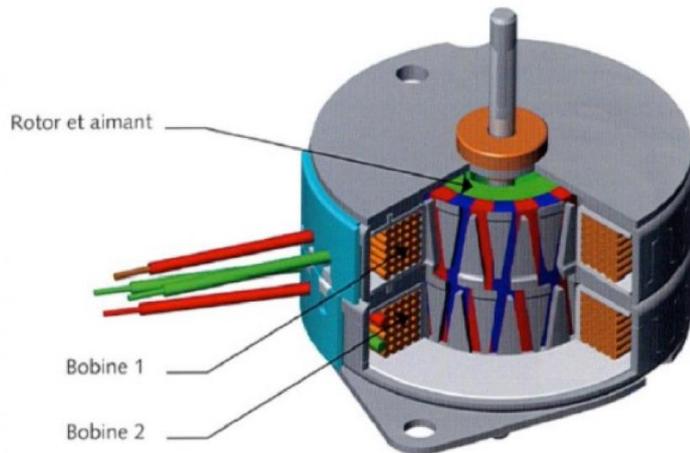


Schéma bloc de principe du contrôle d'un moteur pas-à-pas

6.3.2 Moteurs pas à pas à aimants permanents

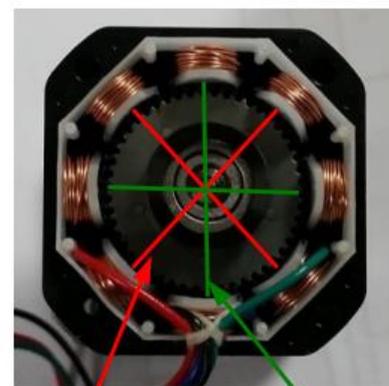
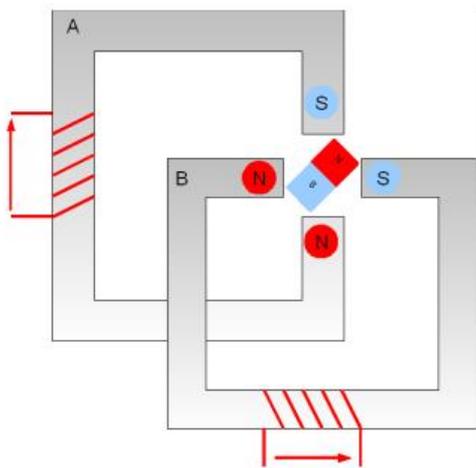
Dans la famille des moteurs pas à pas à aimants permanents, on distingue les moteurs pas à pas bipolaires qui contiennent deux enroulements (bobines). Chaque enroulement est commandé en courant positivement ou négativement. Le rotor aimanté possède plusieurs pôles Nord-Sud. Ces moteurs possèdent 4 fils (2 par bobine).

À aimant permanent «tin can»



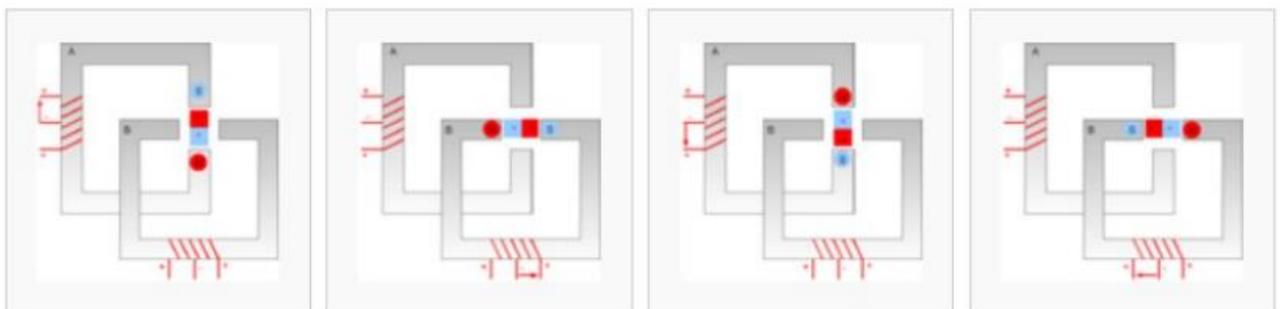
Vue d'un moteur à aimants permanents

La photo de la structure interne du moteur pas à pas montre deux enroulements répartis en croix ainsi qu'un rotor constitué de nombreux pôles



Enroulement B Enroulement A

Les moteurs pas à pas unipolaires possèdent 6 fils correspondant à 4 demi-bobines. Chaque demi-bobine est alimentée toujours de la même manière ce qui permet de ne jamais avoir besoin d'inverser le sens du courant dans une bobine. Ils possèdent davantage d'enroulements et sont donc plus compliqués à réaliser



Pas n° 1

Pas n° 2

Pas n° 3

Pas n° 4

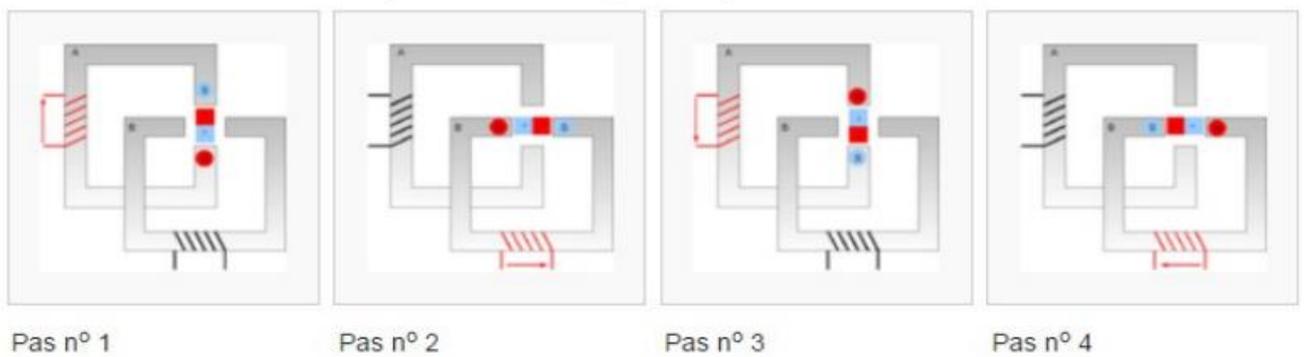
➤ **Cas particulier : Fonctionnement du moteur pas à pas bipolaire**

Modes pas entier – demi-pas

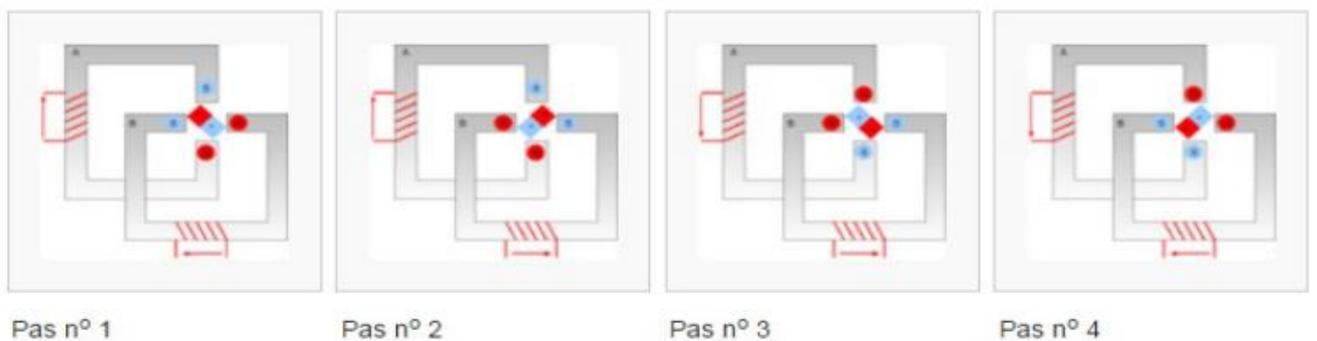
Plusieurs fonctionnements sont possibles pour les moteurs pas à pas en fonction de l'alimentation des bobines.

Le premier mode est le mode à pas complet (« full step » en anglais) qui consiste à alimenter successivement les bobines pour faire avancer le moteur d'une dent à chaque fois. L'illustration simplifiée suivante suppose que deux enroulements sont disponibles et que le rotor n'est constitué que d'un seul aimant. Le principe est exactement le même avec des enroulements répartis différemment et plus de pôles sur le rotor, le couple sera plus grand et la précision plus grande.

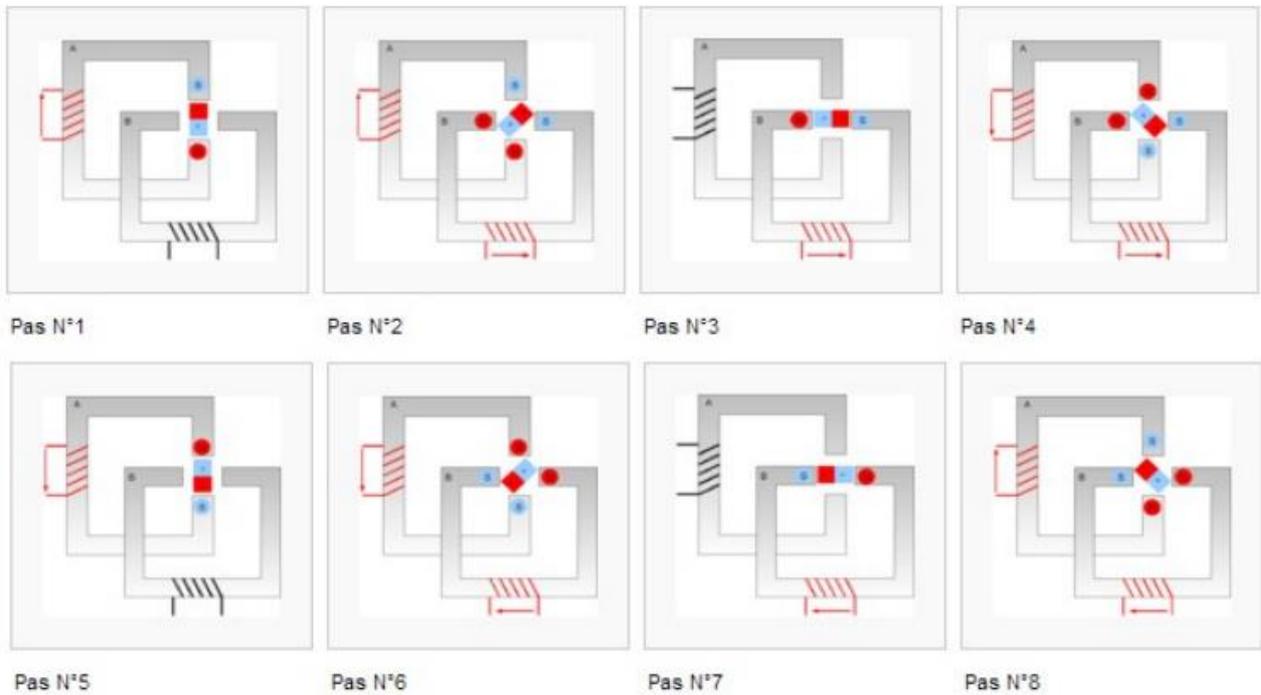
La flèche rouge indique que le courant circule dans une bobine dans un sens donné. On représente en noir la bobine non alimentée. L'aimant s'aligne selon le champ B créé par la bobine



Le mode pas entier suivant est appelé fonctionnement à couple maximal. Dans ce cas, le champ magnétique est toujours plus grand ($\sqrt{2}$ fois plus important) et donc le couple est plus important.



En modifiant l'alimentation des bobines, il est possible d'obtenir des déplacements beaucoup plus petits. Le mode demi-pas correspond au schéma suivant et permet d'obtenir 2 fois plus de pas.



Les différences de construction des deux types de moteurs sont présentées de manière simplifiée sur les figures suivantes :

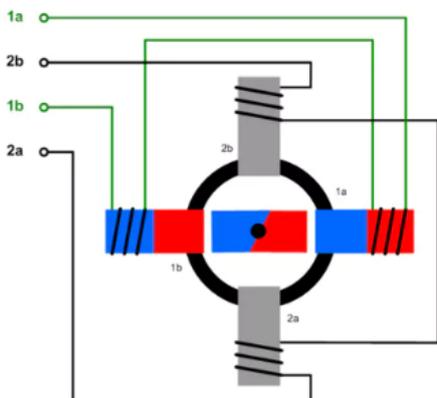


Fig. . Moteur bipolaire et la manière de connexion de ses enroulements

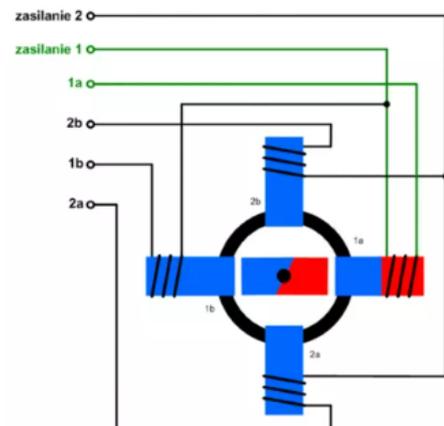
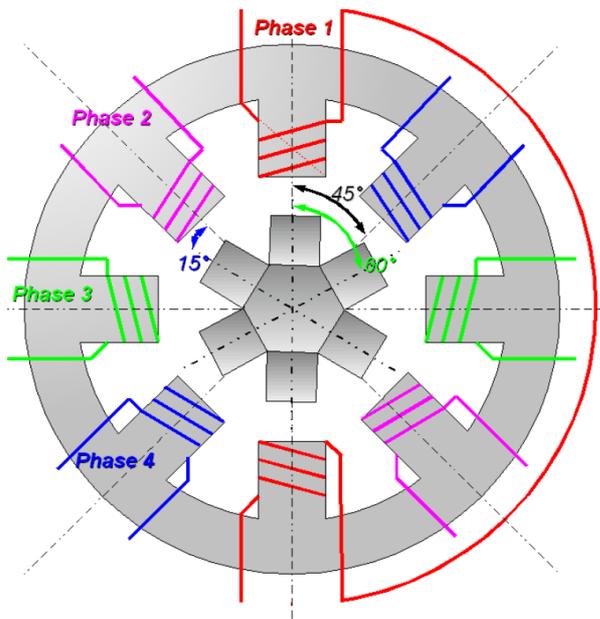


Fig. . Dessins conceptuels du moteur unipolaire et la manière de connexion de ses enroulements

6.3.3 Moteurs pas à pas à réluctance variable

Les moteurs à réluctance variable ont été parmi les premiers modèles de moteurs pas à pas. Actuellement, ils sont rencontrés et utilisés assez rarement. Dans ce type de moteur, le rotor est constitué de plusieurs dents en fer doux. Lorsque les bobines du stator sont alimentées en courant continu, la dent du rotor est attirée par le champ magnétique. Grâce à la commutation séquentielle, le rotor tourne selon l'angle déterminé par la structure du moteur.

Les moteurs de ce type, bien que de leur construction soit simple et bien qu'ils soient faciles à contrôler, ont une faible résolution et un faible couple.



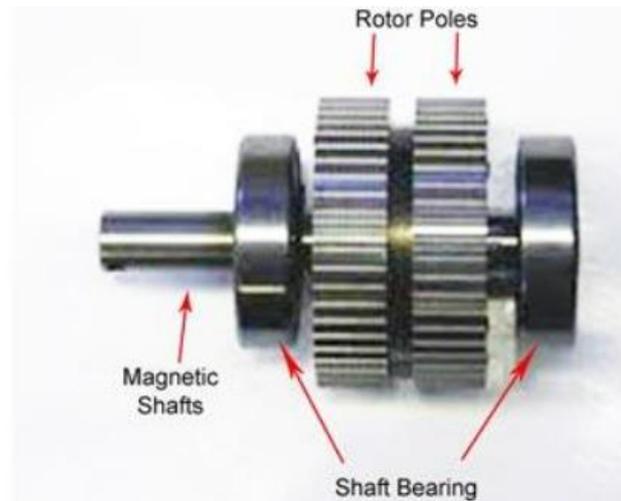
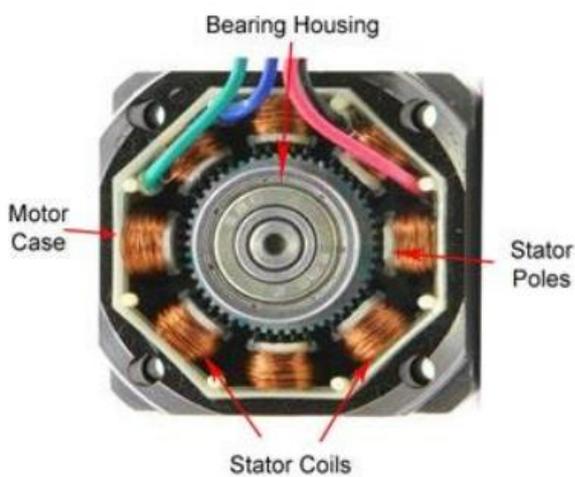
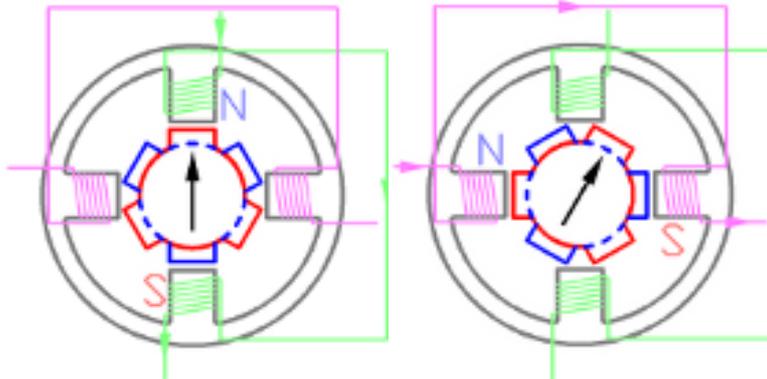
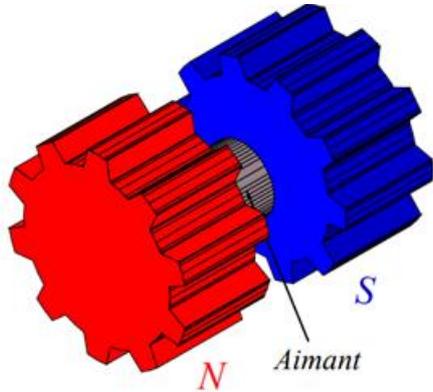
6.3.4 Moteur pas à pas hybride

Le moteur hybride est l'un des types de moteurs pas à pas les plus utilisés dans l'industrie. Il se caractérise par une haute résolution – son rotor effectue des courses de $0,9^\circ$ à $3,6^\circ$ (de 400 à 100 pas). Ce type de moteur est meilleur que les autres moteurs en ce qui concerne la fiabilité, le couple, le couple de maintien et la vitesse atteinte.

➤ **Composition d'un moteur pas à pas hybride :**

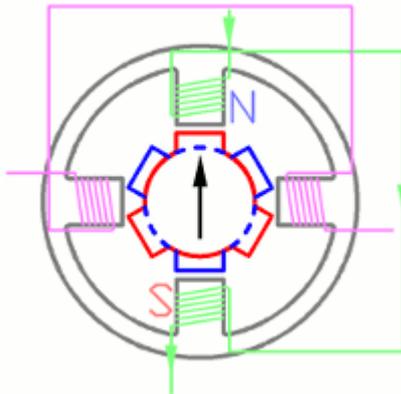
Le rotor présente plusieurs dents comme pour un moteur pas à pas à réluctance variable, mais chaque dent est polarisée comme pour un moteur pas à pas à aimants permanents. Physiquement le rotor est composé de deux éléments identiques à un rotor de moteur à réluctance variable (rouge et bleu ici), reliés ensemble par un aimant permanent (noir), avec un déphasage d'une 1/2 dent. De ce fait ces deux éléments ont une polarisation différente (nord et sud) et vont réagir à la polarisation de chacune des dents du stator. C'est cette

polarisation qui permet de n'utiliser que 2 bobines, qui forment en réalité 4 états différents puisque le sens du courant entre ici en jeu.



➤ **Fonctionnement d'un moteur pas à pas hybride :**

En mode pas entier, les bobines sont alimentées une par une alternativement, dans un sens puis dans l'autre. On voit bien ici l'intérêt d'avoir un rotor polarisé : quand on coupe l'alimentation de la bobine verte et qu'on alimente la bobine rose, en l'absence de polarisation du rotor on n'aurait aucun contrôle sur le sens de rotation, les deux dents bleues et rouges étant attirés de la même façon par la bobine. Avec un rotor polarisé, on peut choisir une de ces deux dents en agissant sur le sens du courant dans la bobine. Il en résulte le mouvement décrit sur l'animation suivante :



Moteur pas à pas hybride en fonctionnement

6.3.5 Comparaison des différents types de moteurs pas à pas

	Aimant permanent	Hybride	Reluctance variable
Coût	Bas	Haut	Moyen/Haut
Vitesse	Bas	Très haut	Haut
Couple résiduel	Haut	Moyen	Minimum
Amortissement	Bon	Moyen /Bon	Mauvais
Inertie rotor	Haut	Bas	Bas
Rendement	Moyen	Très haut	Moyen
Angle de pas	7.5°/15°/18°	0.9°/1.8°	1.8°
N^{brs} de pas/tour	48/24/20	400/200	200
Précision du pas	Bas	Haut	Moyen

Chapitre II

Schémas de câblage des moteurs électriques

7. Rappel sur les composantes principales d'une installation électrique industrielle

7.1 Constitution des installations électriques industrielles

Les installations industrielles des automatismes sont constituées de deux parties distinctes appelées : circuit de commande et circuit de puissance.

7.1.1 Circuit de commande

Il comporte l'appareillage nécessaire à la commande des récepteurs de puissance. On trouve :

La source d'alimentation

- Un appareil d'isolement (sectionneur).
- Une protection du circuit (fusible, disjoncteur).
- Un appareil de commande ou de contrôle (bouton poussoir, détecteur de grandeur physique).
- Organes de commande (bobine du contacteur).

La source d'alimentation et l'appareillage du circuit de commande ne sont pas nécessairement celle du circuit de puissance, elle dépend des caractéristiques de la bobine.

7.1.2 Circuit de puissance

Il comporte l'appareillage nécessaire aux fonctionnements des récepteurs de puissance suivant un automate bien défini. On trouve :

- Une source de puissance (généralement réseau triphasé)
- Un appareil d'isolement (sectionneur).
- Une protection du circuit (fusible, relais de protection).
- Appareils de commande (les contacts de puissance du contacteur).
- Des récepteurs de puissances (moteurs).

7.2 Les appareils de commande, de signalisation et de protection

Pour réaliser un départ-moteur de façon correcte, il faut assurer les fonctions suivantes :

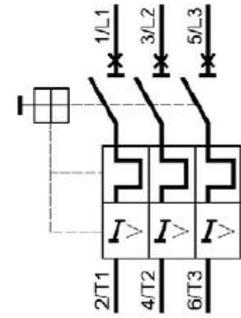
- **Isoler** c'est le rôle du sectionneur.
- **Protéger** la puissance contre les courts-circuits, pour cela on utilise des cartouches fusibles de type aM.
- **Commander** l'arrivée de l'énergie au moteur, c'est le rôle du contacteur.
- **Protéger** le moteur contre les surcharges, fonction assurée par le relais thermique.

7.2.1 Disjoncteur

C'est un appareil de protection qui comporte deux relais, relais magnétique qui protège contre les courts-circuits et un relais thermique qui protège contre les surcharges.



Disjoncteurs



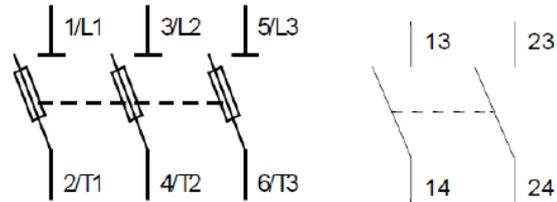
Symbole

7.2.2 Sectionneur

Sa fonction : Assurer le sectionnement (séparation du réseau) au départ des équipements. Dans la plupart des cas il comporte des fusibles de protection.



Sectionneur fusible



Symboles : en circuit de puissance et en circuit de commande

Le pouvoir de coupure est le courant maximal qu'un appareil de sectionnement peut interrompre sans aucun endommagement.

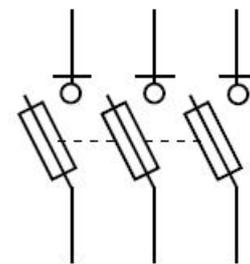
Le sectionneur n'a pas de pouvoir de coupure, il doit être manipulé à vide.

7.2.3 Interrupteur sectionneur

L'interrupteur sectionneur a un pouvoir de coupure, peut être manipulé en charge.



Interrupteur sectionneur



Symbole

7.2.4 Fusible

C'est élément comportant un fil conducteur, grâce à sa fusion, il interrompt le circuit électrique lorsqu'il est soumis à une intensité du courant qui dépasse la valeur maximale supportée par le fil.



Cartouche fusible cylindrique et à couteaux



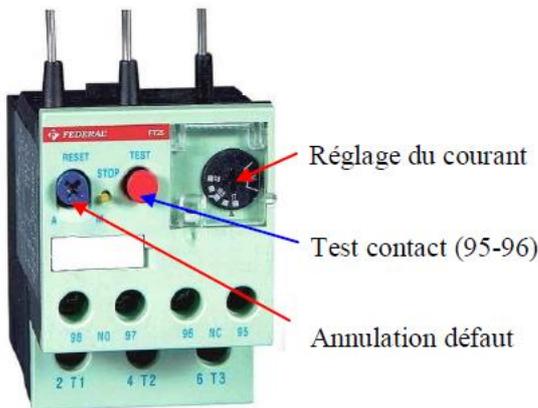
Symbole

Il existe plusieurs types de fusibles :

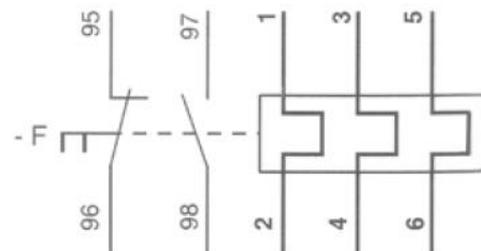
- gF : fusible à usage domestique, il assure la protection contre les surcharges et les courts-circuits.
- gG : fusible à usage industriel. Protège contre les faibles et fortes surcharges et les courts-circuits. Utilisation : éclairage, four, ligne d'alimentation, ...
- aM : cartouche à usage industriel, pour l'accompagnement moteur, commence à réagir à partir de $4I_n$ (I_n est le courant prescrit sur le fusible), protège uniquement contre les courts-circuits.

7.2.5 Relais thermique

Le relais de protection thermique protège le moteur contre les surcharges.



Relais thermique



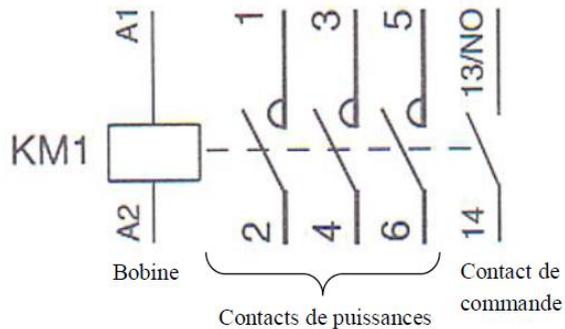
Symbole

7.2.6 Le contacteur

Le contacteur est un appareil de commande capable d'établir ou d'interrompre le passage de l'énergie électrique. Il assure la fonction COMMUTATION. En Technologie des Systèmes Automatisés ce composant est appelé Préactionneur puisqu'il se trouve avant l'actionneur dans la chaîne des énergies.



Contacteur



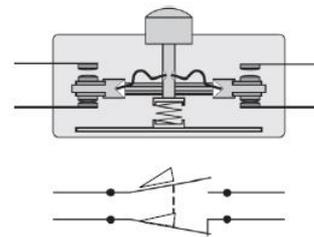
Symbole

7.2.7 Capteur de fin de course

Les interrupteurs de position mécanique ou capteur de fin de course coupent ou établissent un circuit lorsqu'ils sont actionnés par un mobile



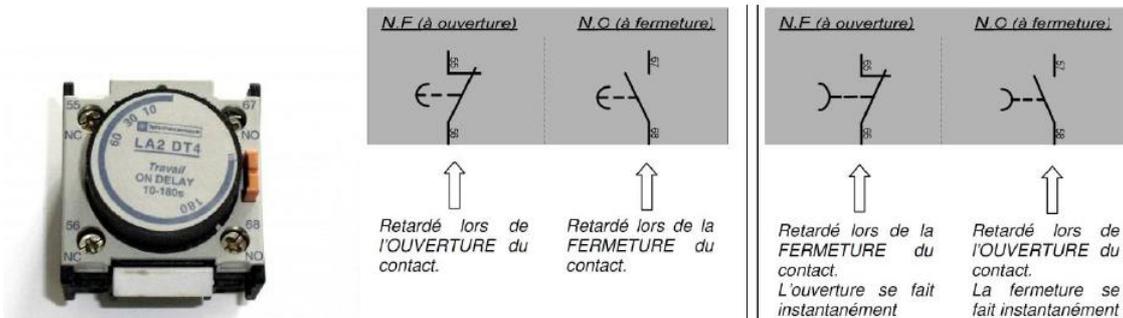
Interrupteur de position



Symbole

7.2.8 Bloc auxiliaire temporisé

Les blocs auxiliaires temporisés servent à retarder l'action d'un contacteur (lors de sa mise sous tension ou lors de son arrêt)



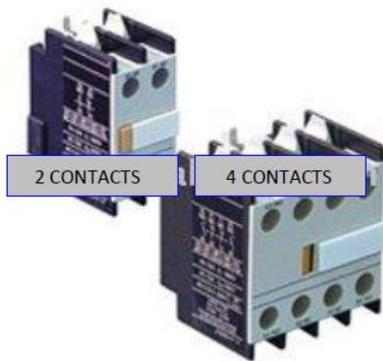
Bloc auxiliaire temporisé

Symboles

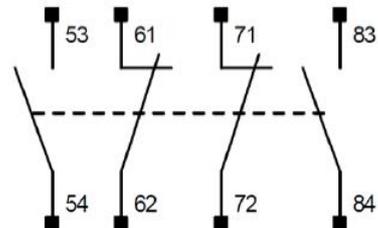
7.2.9 Bloc de contacts auxiliaires

Le bloc de contact auxiliaire est un appareil mécanique de connexion qui s'adapte sur les contacteurs.

Il permet d'ajouter de 2 à 4 contacts supplémentaires au contacteur. Les contacts sont prévus pour être utilisés dans la partie commande des circuits. Ils ont la même désignation et repérage dans les schémas que le contacteur sur lequel ils sont installés (KA, KM...).



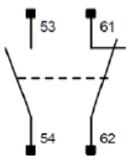
Bloc de contacts auxiliaires



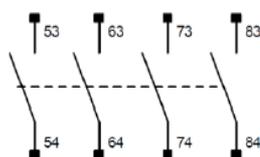
Symbole

On trouve d'autres modèles d'association de contacts :

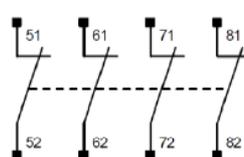
1 NO et 1 NC



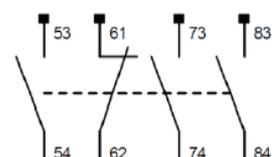
4 NO



4 NC



3 NO et 1 NC

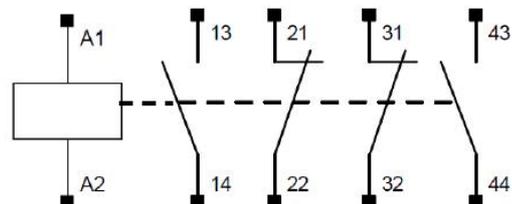


7.2.10 Contacteur auxiliaire

Il ne comporte que des contacts de commandes.



Contacteur auxiliaire



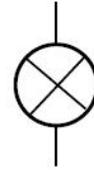
Symbole

7.2.11 Lampes de signalisations

Signalisation visuelle du fonctionnement normal du système, ou défauts.



Lampe de signalisation



Symbole

8. Schémas de montage des moteurs électriques

8.1 Limitations aux démarrages

➤ Temps de démarrage

Le temps de démarrage est fonction du couple de la charge, de l'inertie et du couple moteur. Le courant de démarrage étant toujours très supérieur au courant nominal, un temps de démarrage trop long provoque un échauffement nuisible du moteur. Par ailleurs, un courant élevé impose des contraintes électromécaniques au moteur.

➤ Temps de démarrage admissible

Pour éviter tout échauffement, le temps de démarrage ne doit pas dépasser les valeurs du tableau ci-dessous. Ces valeurs s'appliquent à des démarrages à température de service normale. Elles sont multipliées par deux pour des démarrages du moteur à partir de l'état froid.

Sur les paragraphes qui suivent on présente les modes de démarrage les plus courants : démarrage direct, démarrage étoile/triangle, et démarrage avec un démarreur progressif ou un variateur de vitesse, etc....

8.2 Démarrage direct (DOL)

La méthode la plus simple pour démarrer un moteur à cage consiste à le raccorder directement au réseau d'alimentation. Dans ce cas, il suffit d'installer un appareil tel qu'un contacteur. Toutefois, ce mode de démarrage présente l'inconvénient d'engendrer un courant de démarrage élevé, souvent plusieurs fois équivalent au courant nominal du moteur. Le couple de démarrage est également très élevé et peut entraîner des contraintes importantes sur les accouplements et l'application entraînée. Il reste cependant la méthode la plus couramment utilisée sauf raison particulière.

Ce qu'on peut retenir de ce mode de démarrage est qu'il est réservé aux moteurs de faible puissance devant celle du réseau, ne nécessitant pas une mise en vitesse progressive. Le couple est énergique, l'appel de courant est important (5 à 8 fois le courant nominal).

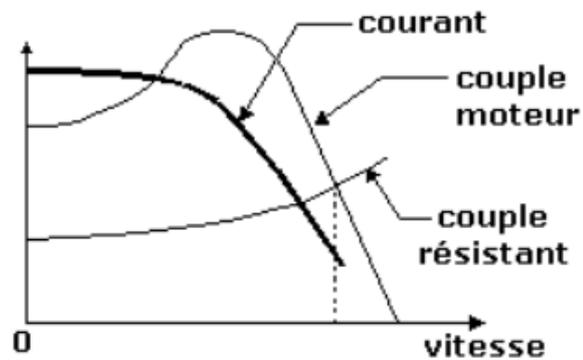
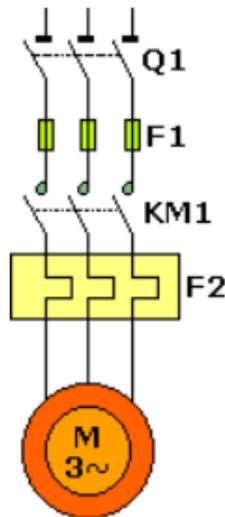
La fiche technique suivante donne un exemple du courant de démarrage d'un moteur asynchrone d'une puissance de 7,5Kw.

4
pôles
1500 min⁻¹

IP 55 - 50 Hz - Classe F - 400 V Δ - S1

Type	Puissance nominale à 50 Hz P_N kW	Vitesse nominale N_N min ⁻¹	Couple nominal C_N N.m	Intensité nominale $I_N(400V)$ A	Facteur de puissance $\cos \varphi$	Rendement η %	Courant démarrage / Courant nominal I_D / I_N	Masse IM B3 kg
LS 100 L	3	1437	20.1	6.5	0.81	82.6	6	22.5
LS 112 M	4	1438	26.8	8.3	0.83	84.2	7.1	24.9
LS 132 S	5.5	1447	36.7	10.9	0.85	85.7	6.5	36.5
LS 132 M	7.5	1451	49.4	15.2	0.82	87	7	54.7
LS 132 M	9	1455	59.3	18.1	0.82	87.7	6.9	59.9
LS 160 MP	11	1456	72.2	21.1	0.85	88.4	7.7	70
LS 160 LR	15	1456	98.8	28.8	0.84	89.4	8.3	78
LS 180 MT	18.5	1456	121	35.2	0.84	90.3	7.6	100
LS 180 LR	22	1456	144	41.7	0.84	90.7	7.9	112
LS 200 LT	30	1460	196	56.3	0.84	91.5	6.6	165
LS 225 ST	37	1468	241	68.7	0.84	92.5	6.3	205
LS 225 MR	45	1468	293	83.3	0.84	92.8	6.3	235
LS 250 MP	55	1480	355	101	0.84	93.6	7.1	340
LS 280 SP	75	1482	483	137	0.84	94.2	7.3	445

Ci-après les différentes courbes de fonctionnement d'un moteur électrique asynchrone au moment du démarrage direct



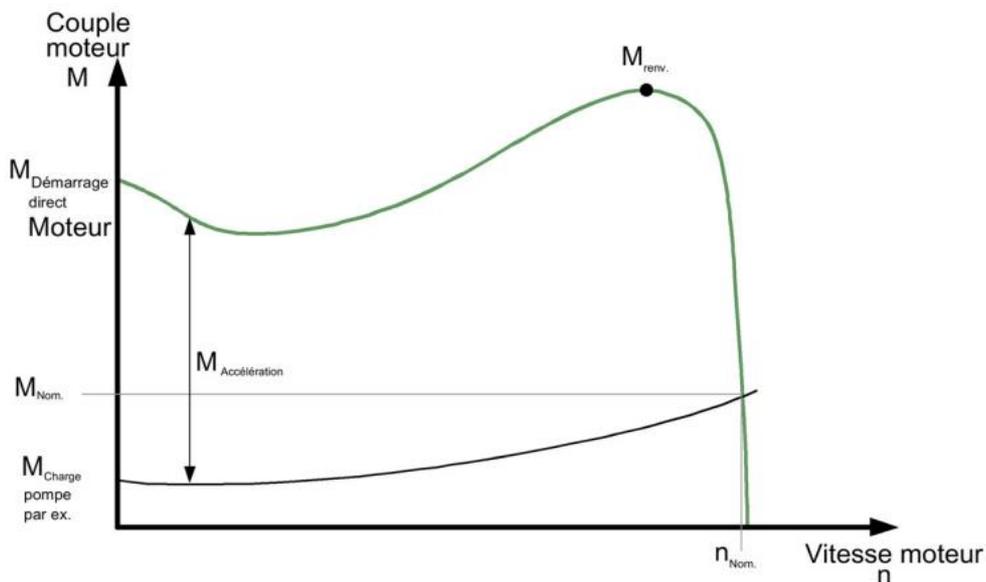
➤ **Inconvénients**

Ceci présente les inconvénients suivants :

- Une sollicitation plus élevée du réseau d'alimentation électrique. Cela signifie que pour le démarrage du moteur, le dimensionnement du réseau d'alimentation doit être adapté à cette puissance plus élevée.
- Couple à rotor bloqué : Le couple à rotor bloqué et le couple de décrochage sont généralement compris entre 2 et 4 fois le couple assigné. Cela signifie pour la machine que les forces de démarrage et d'accélération apparaissant par rapport au régime de fonctionnement nominal exercent une sollicitation mécanique plus élevée sur la machine et sur le produit transporté.

Ceci peut engendrer les conséquences suivantes :

- Le système mécanique de la machine est plus fortement sollicité
- Les coûts engendrés par l'usure et l'entretien de l'application augmentent

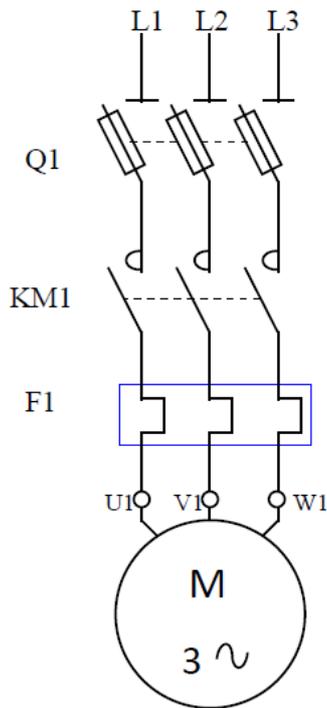


Comportement typique du couple d'un moteur asynchrone triphasé lors du démarrage

8.2.1 Schéma de démarrage direct semi-automatique à un seul sens de marche

On veut démarrer un moteur asynchrone triphasé dans un sens de marche avec un bouton poussoir S1 et l'arrêter par l'arrêter avec un bouton poussoir S0.

➤ **Circuit de puissance**



L1, L2, L3 : alimentation triphasée

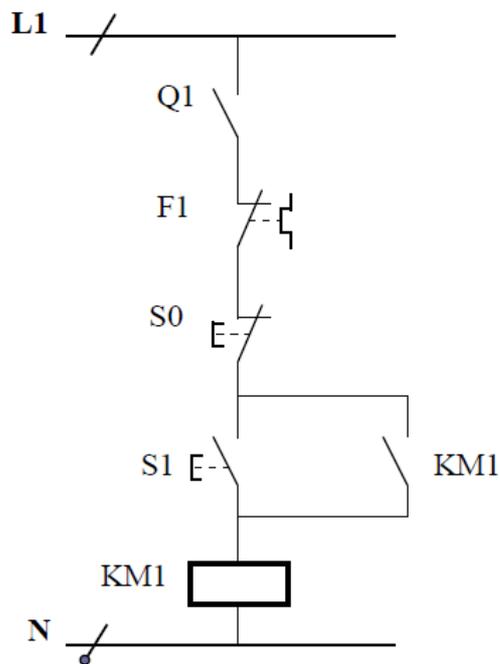
Q1 : sectionneur fusible

KM1 : contacteur principal 1

F1 : relais thermique

M : moteur triphasé

➤ **Circuit de commande**



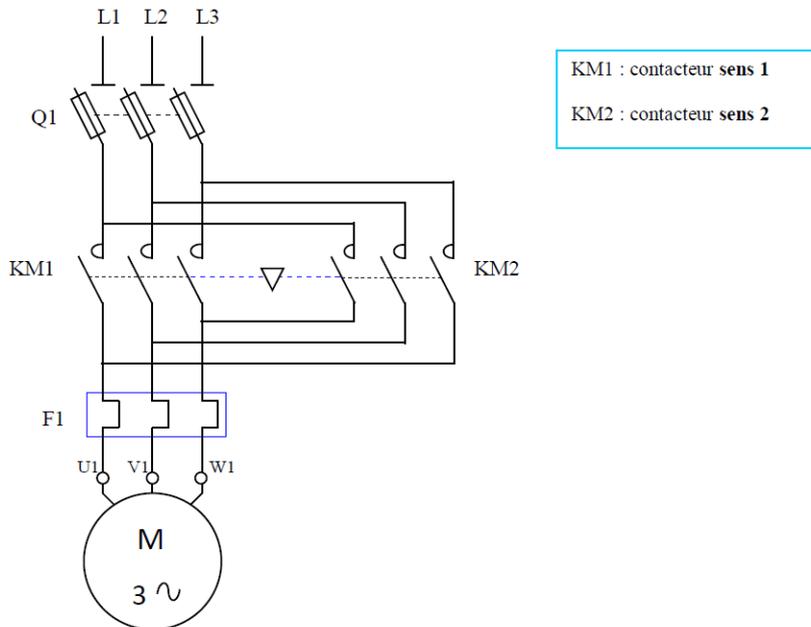
➤ Schéma de montage complet avec circuits de puissance, commande et signalisation



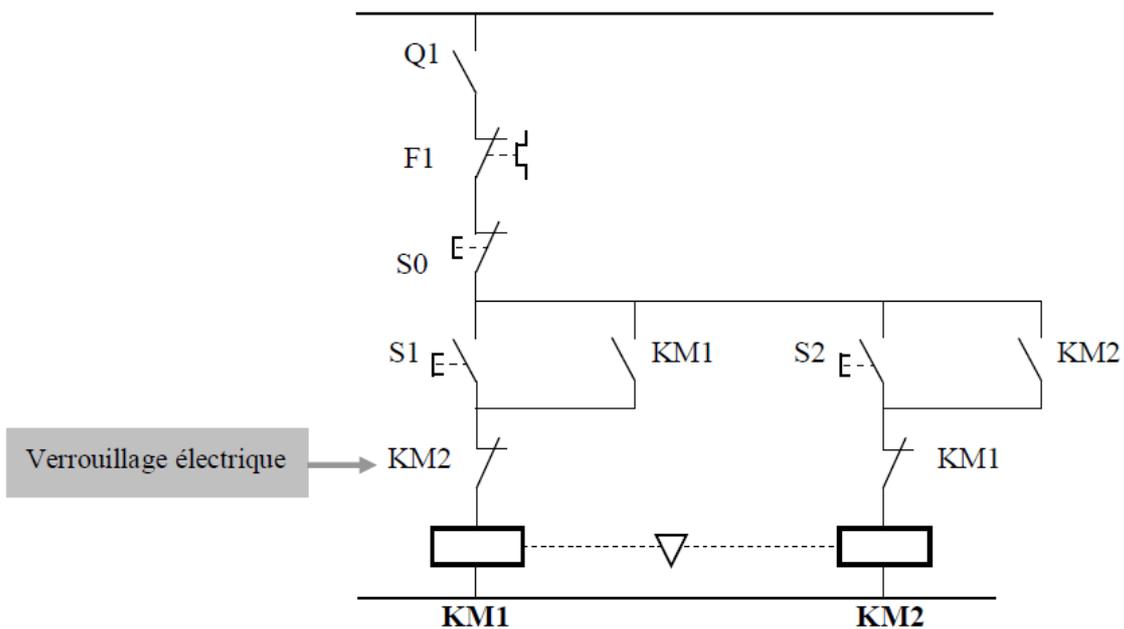
8.2.2 Schéma de démarrage direct semi-automatique à deux sens de marche

On veut démarrer un moteur asynchrone triphasé dans deux sens de rotation, par un bouton poussoir S1 pour le sens 1, par un bouton poussoir S2 pour le sens 2 et un bouton poussoir S0 pour l'arrêt.

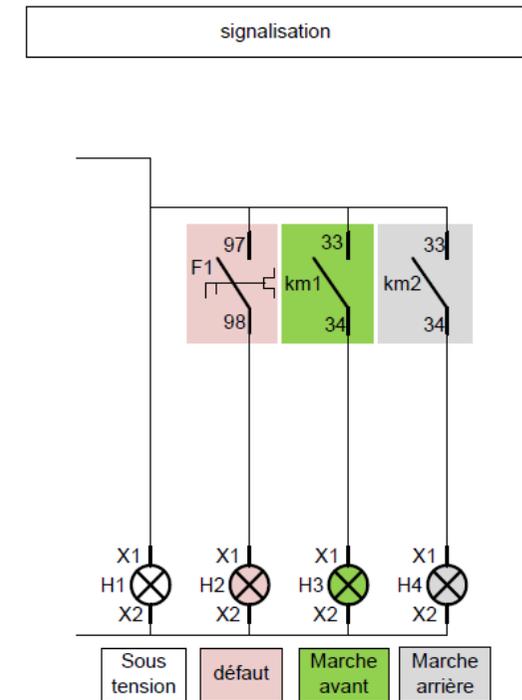
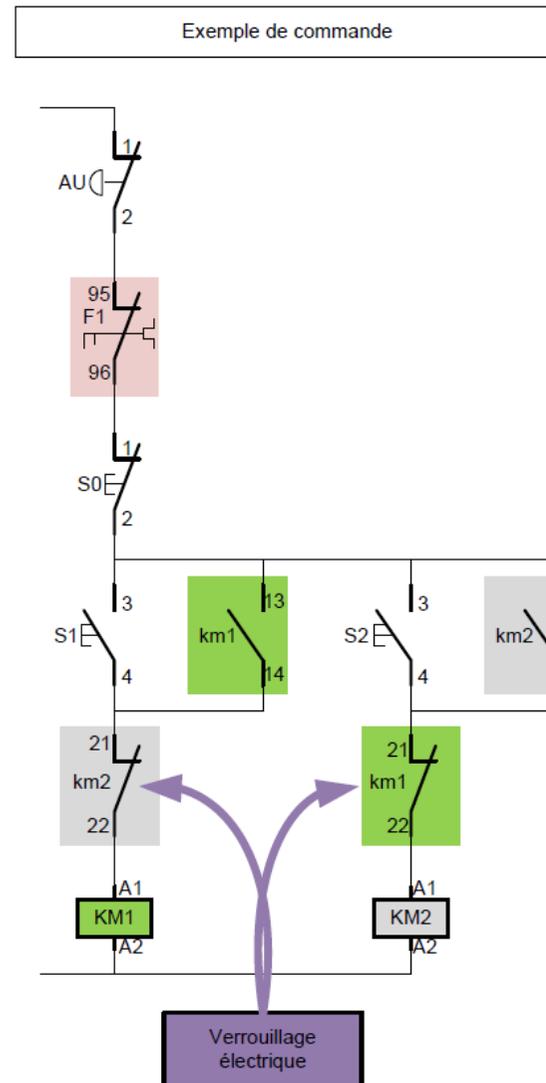
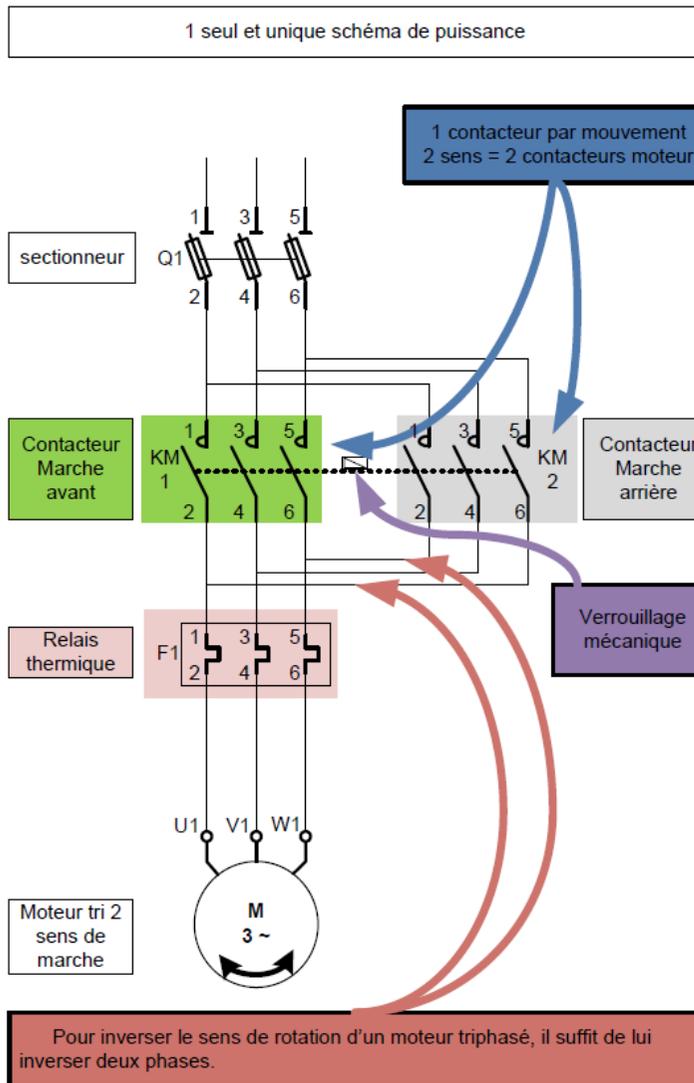
➤ Circuit de puissance



➤ Circuit de commande



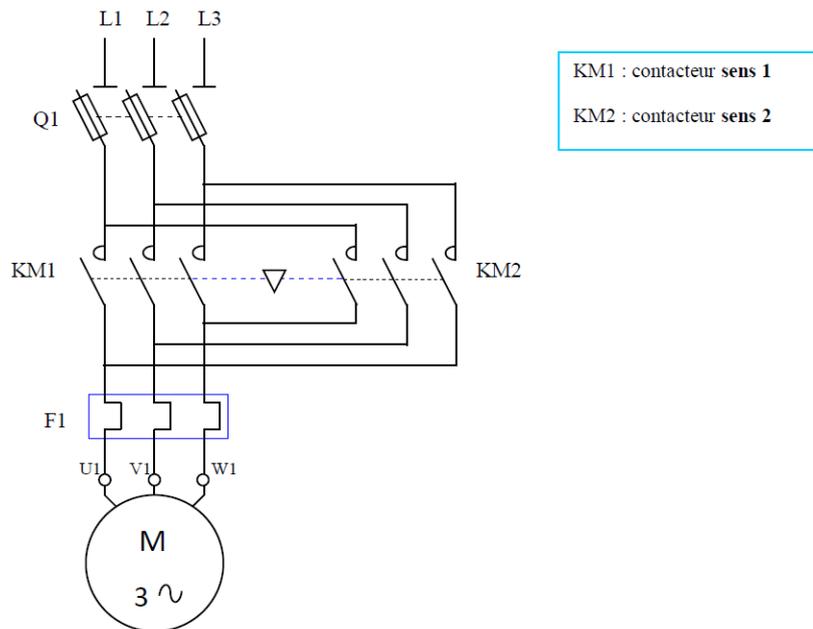
➤ Schéma de montage complet avec circuits de puissance, commande et signalisation



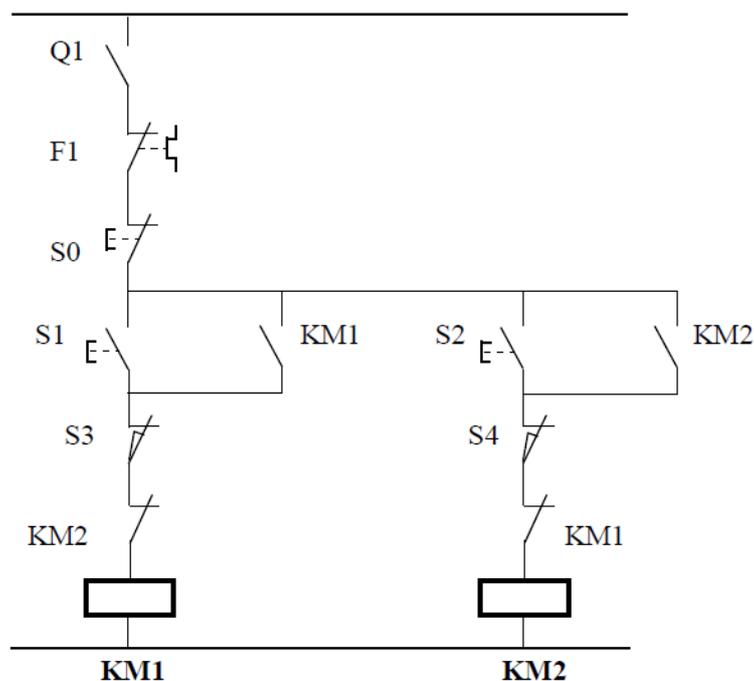
8.2.3 Schéma de démarrage direct semi-automatique à deux sens de marche avec butées de fin de course

On veut démarrer un moteur asynchrone triphasé dans deux sens de rotation par l'action de deux boutons poussoirs, S1 pour le sens 1, S2 pour le sens 2. Chaque sens est arrêté par une butée de fin de course, respectivement S3 pour le sens 1 et S4 pour le sens 2. Un bouton poussoir S0 arrête le moteur à n'importe quel instant.

➤ Circuit de puissance :



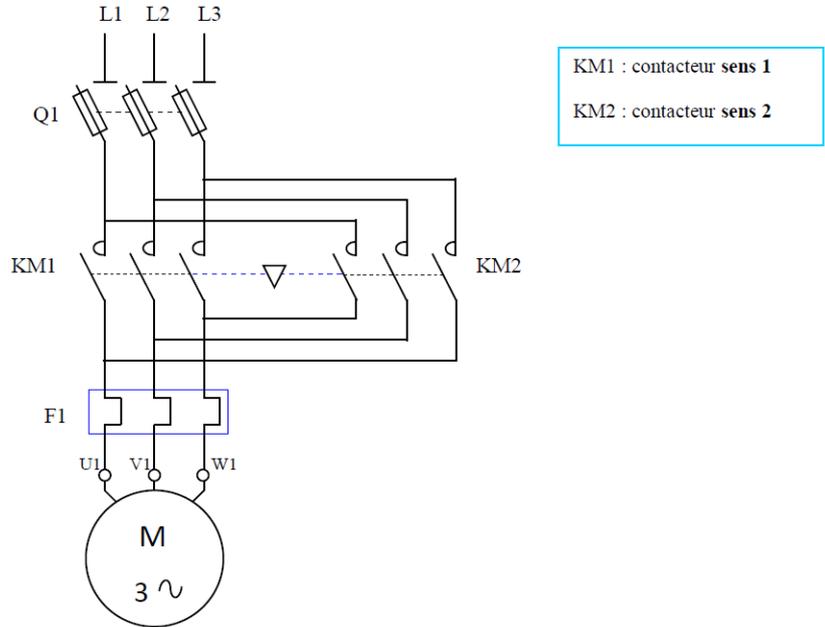
➤ Circuit de commande



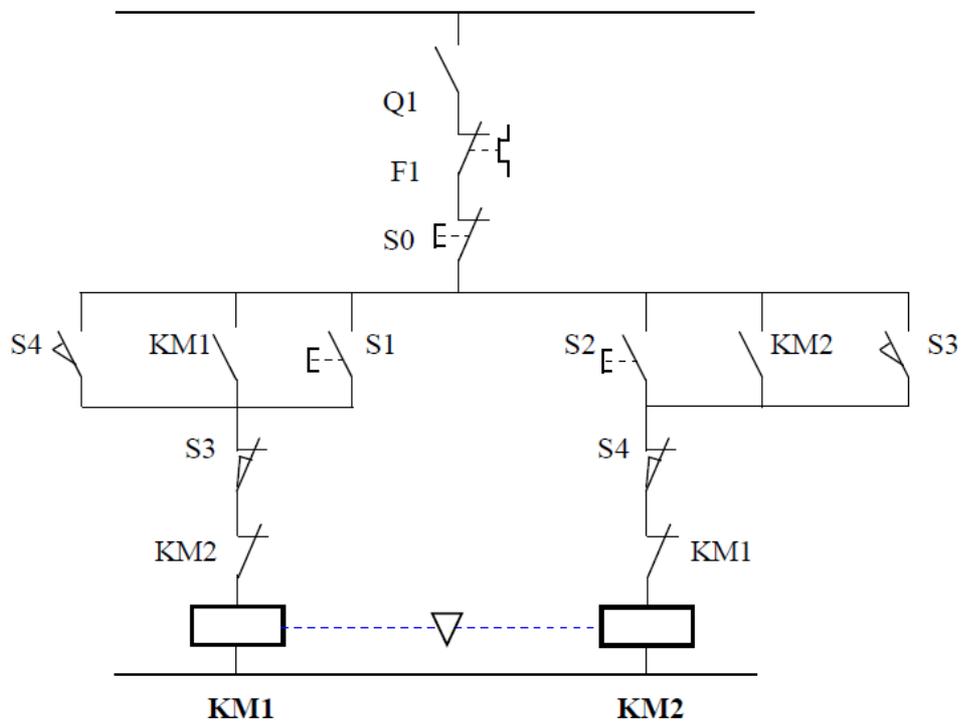
8.2.4 Schéma de démarrage direct semi-automatique à deux sens de marche avec butées de fin de course et inversion de sens de rotation

Dans ce cas de démarrage, la butée S3 ou S4, une fois actionnée, elle change le sens de marche du moteur.

➤ **Circuit de puissance**



➤ **Circuit de commande**

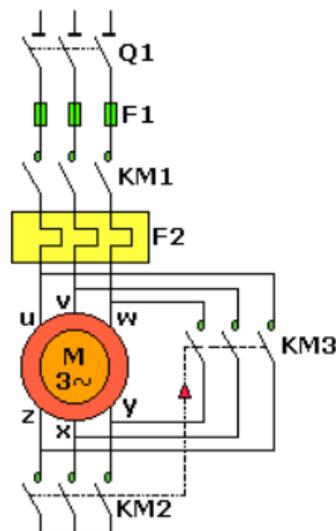
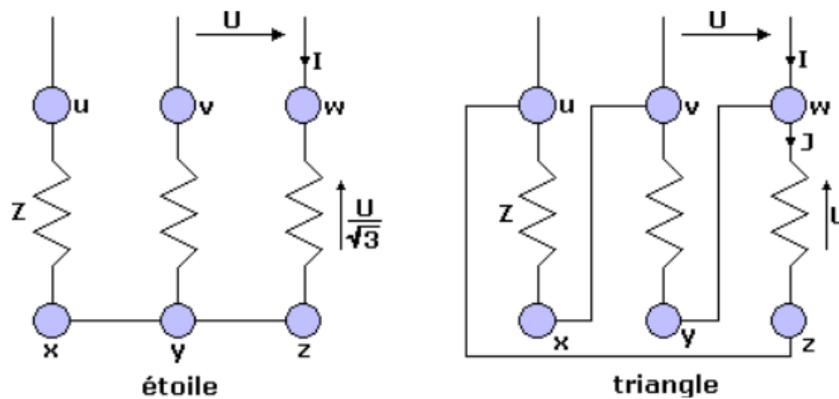


8.3 Démarrage étoile/triangle

8.3.1 Caractéristiques du démarrage étoile/triangle

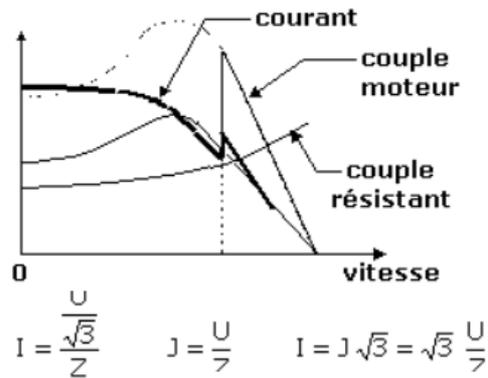
S'il faut limiter le courant de démarrage d'un moteur du fait des caractéristiques de l'alimentation, la méthode de démarrage Y/ Δ peut être utilisée. Dans le cas, par exemple, d'un moteur bobiné 400 V/ Δ démarré en couplage Y, le courant de démarrage est réduit d'environ 30 % par rapport à un démarrage direct et le couple de démarrage est inférieur de 25 % environ à celui d'un démarrage direct.

Toutefois, avant d'utiliser cette méthode, l'utilisateur doit s'assurer que le couple moteur réduit est suffisant pour accélérer la charge sur toute la plage de vitesse.



Démarrage en 3 temps
 1 : fermeture de KM1 et KM2
 2 : ouverture de KM2
 3 : fermeture de KM3

Ci-après les différentes courbes de fonctionnement d'un moteur électrique asynchrone au moment du démarrage Etoile/triangle



Le tableau suivant illustre le temps de démarrage maximum en secondes pour un type de moteurs mono-vitesse à démarrage occasionnel

Hauteur d'axe	Mode de démarrage	Nombre de pôles			
		2	4	6	8
56	DOL	25	40	NA	NA
63	DOL	25	40	NA	NA
71	DOL	20	20	40	40
80	DOL	15	20	40	40
90	DOL	10	20	35	40
100	DOL	10	15	30	40
112	DOL	20	15	25	50
	Y/D	60	45	75	150
132	DOL	15	10	10	60
	Y/D	45	30	30	20
160	DOL	15	15	20	20
	Y/D	45	45	60	60
180	DOL	15	15	20	20
	Y/D	45	45	60	60

8.3.2 Principe

Le démarrage s'effectue en deux temps :

1er temps : chaque enroulement du stator est alimenté sous une tension réduite en utilisant le couplage Y. Il est le temps nécessaire pour que la vitesse du moteur atteigne environ 80% de sa vitesse nominale.

2ème temps : chaque enroulement du stator est alimenté par sa tension nominale changeant le couplage au triangle.

Ce type de démarrage est utilisé pour les moteurs à couplage Δ lors de leur fonctionnement normal.

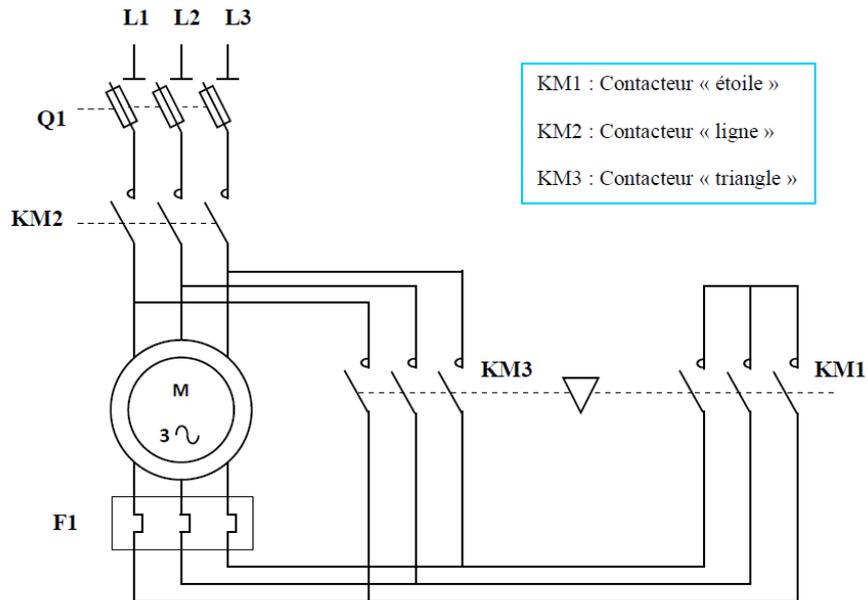
Exemple :

Un moteur 400V/690V sur un réseau 230V/400V

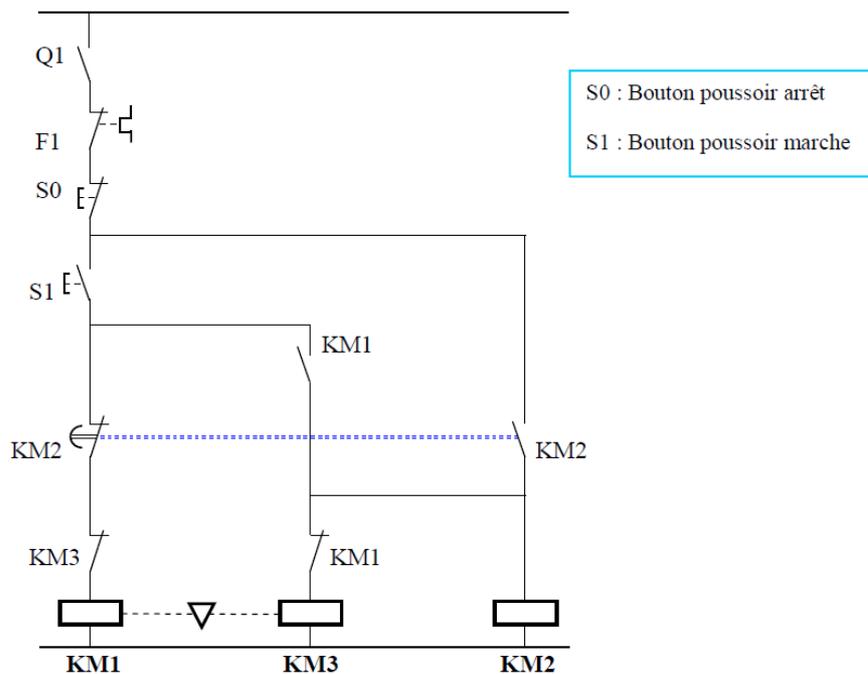
8.3.3 Schéma de Démarrage étoile-triangle semi-automatique à un sens de marche

On veut démarrer un moteur asynchrone triphasé en étoile-triangle dans un sens de rotation par un bouton poussoir S1 et arrêter par un bouton poussoir S0.

➤ **Circuit de puissance**

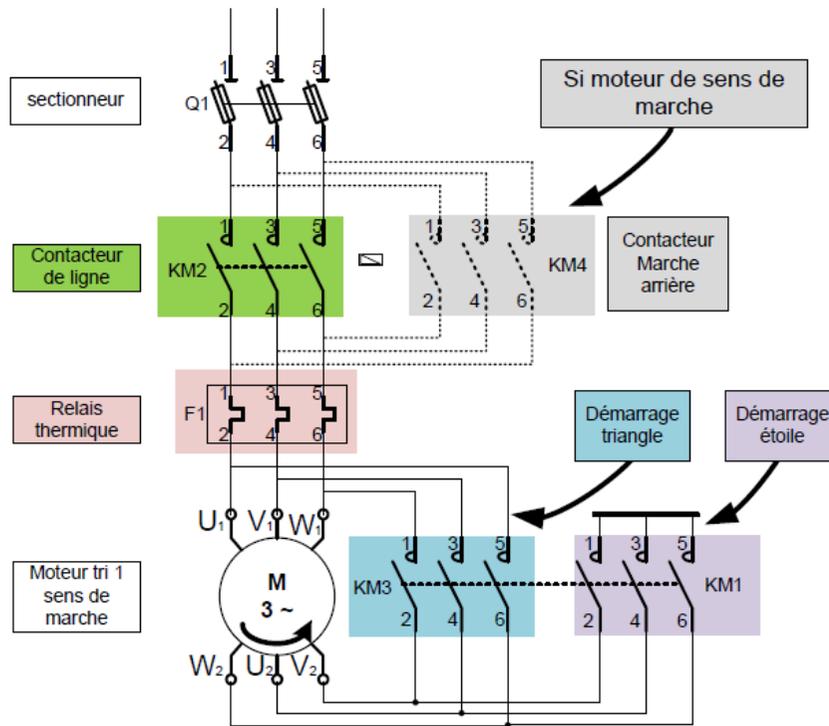


➤ **Circuit de commande**



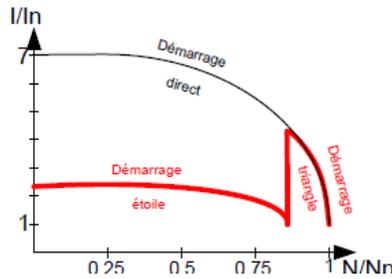
➤ Schéma de montage complet avec circuits de puissance, commande et signalisation

1 seul et unique schéma de puissance

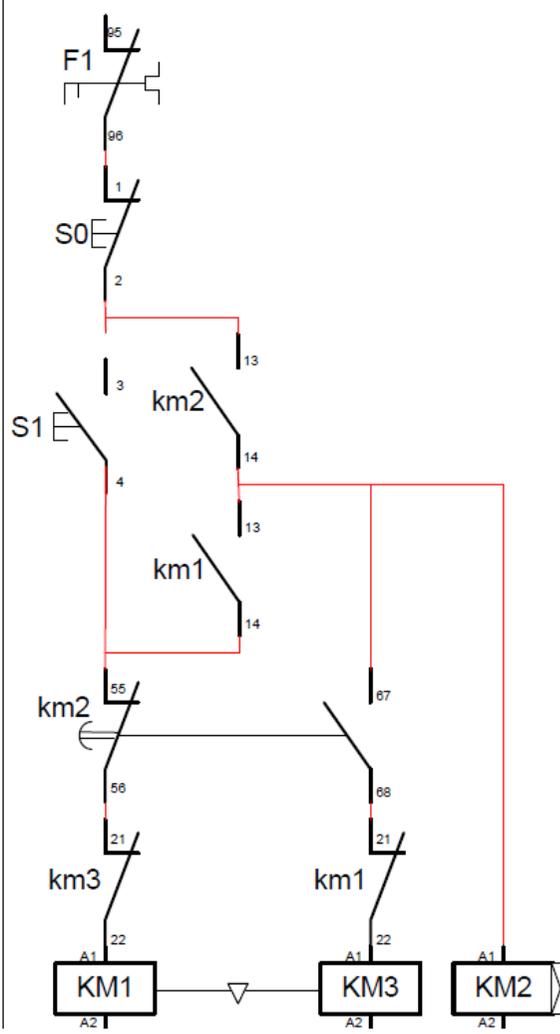


Le moteur triphasé asynchrone démarre tout d'abord en étoile (ce qui permet d'avoir un pic d'intensité plus faible au démarrage), puis au bout d'un temps de réglage prédéterminé, le moteur passe en triangle pour son bon fonctionnement

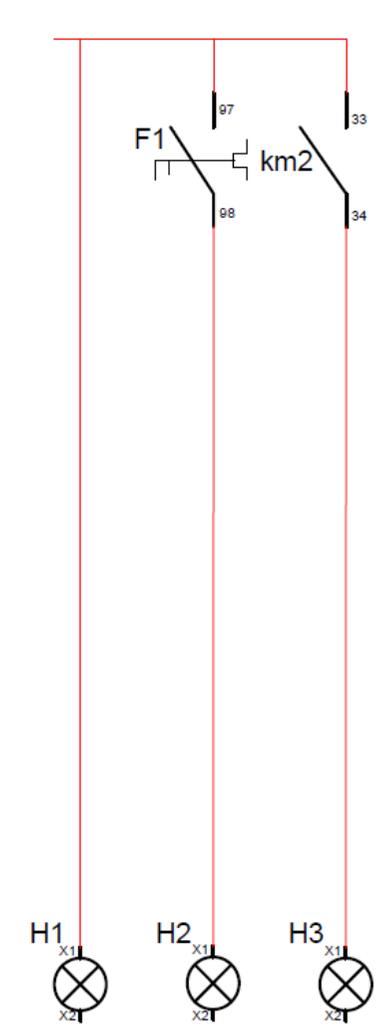
Donc pour un réseau 230/400V obligation de choisir un moteur 400/700V.



Exemple de commande

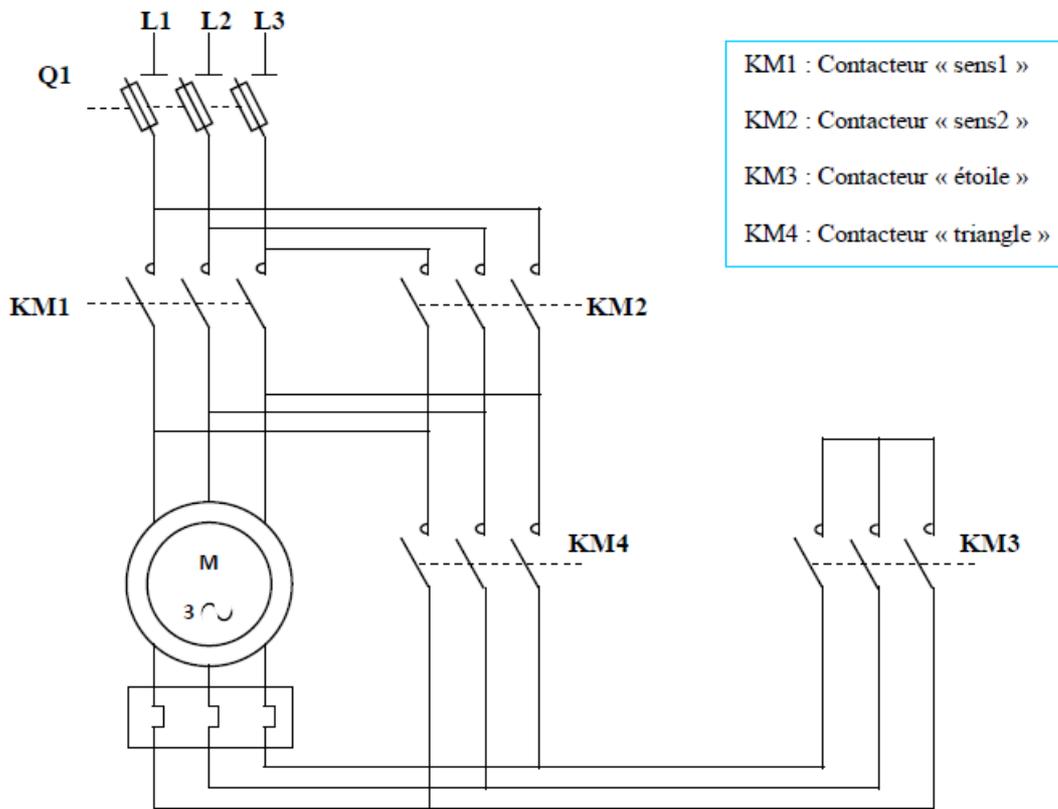


Exemple de signalisation

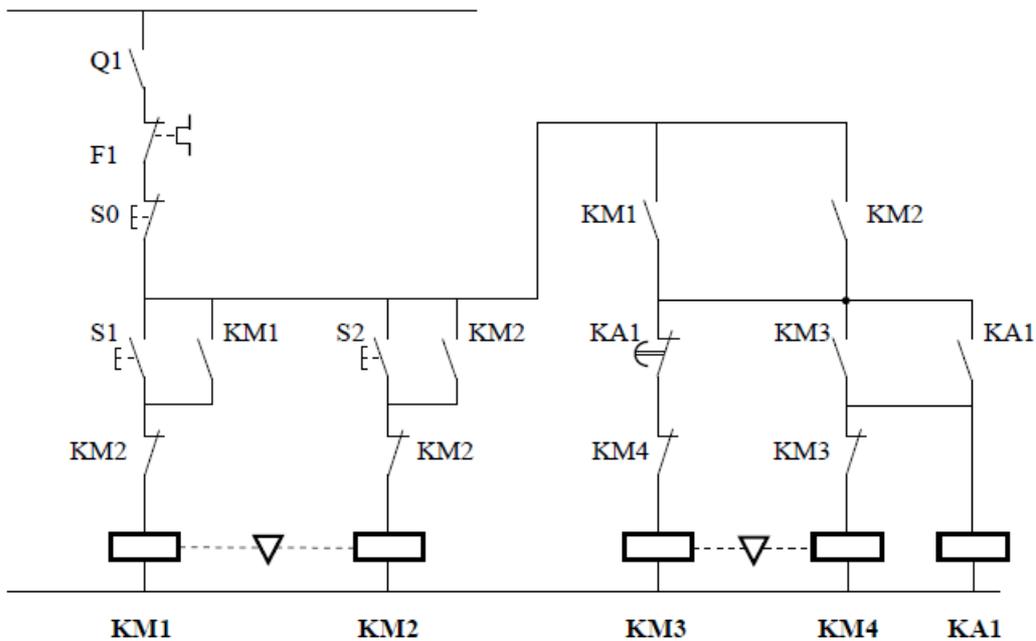


8.3.4 Schéma de Démarrage étoile-triangle semi-automatique à deux sens de marche

➤ Circuit de puissance



➤ Circuit de commande



8.4 Démarrage par élimination de résistances statoriques

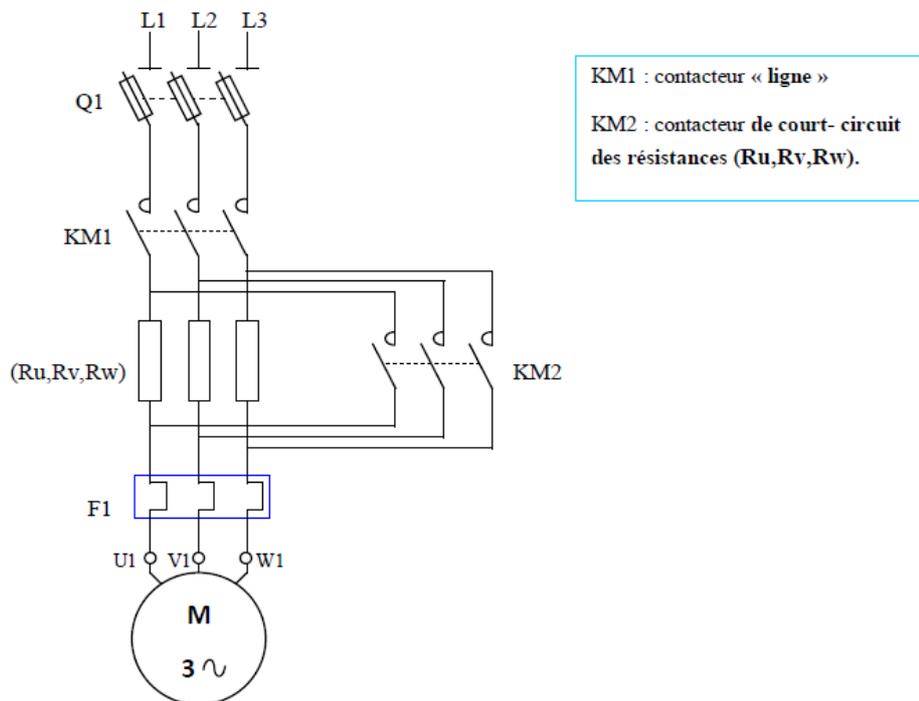
8.4.1 Principe

Le démarrage statorique, comme le démarrage étoile triangle, a pour principe de sous-alimenter le moteur durant presque toute la durée du démarrage en le mettant en série avec des résistances.

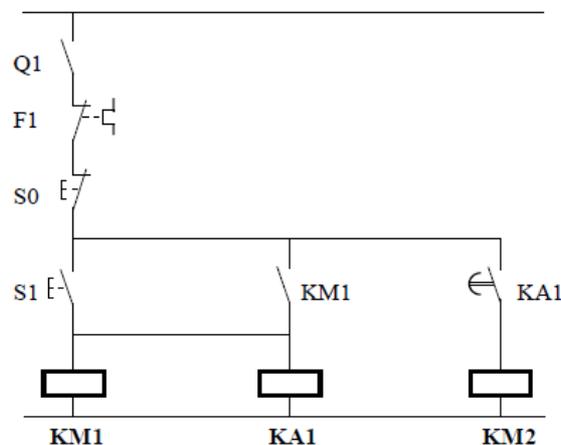
Utilisation du démarrage statorique : Il convient aux machines dont le couple de démarrage est plus faible que le C_n (Couple nominal). Ex : machine à bois ventilateur...

8.4.2 Schéma de démarrage par élimination de résistances statoriques à un seul sens de marche

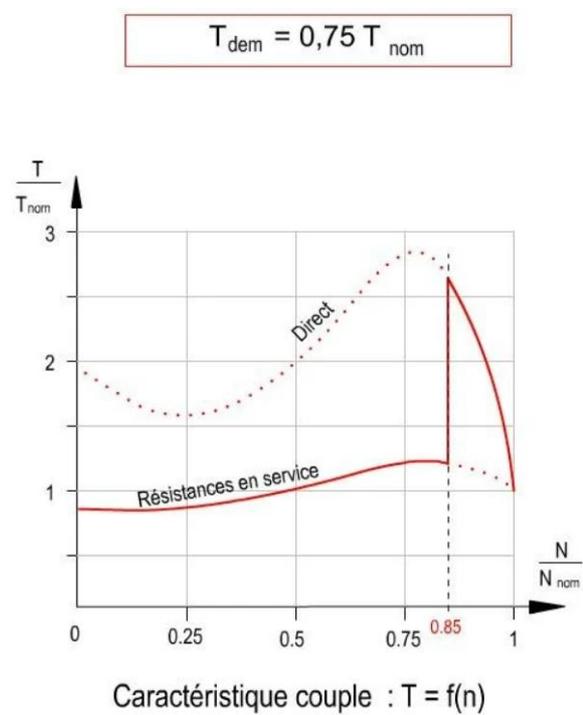
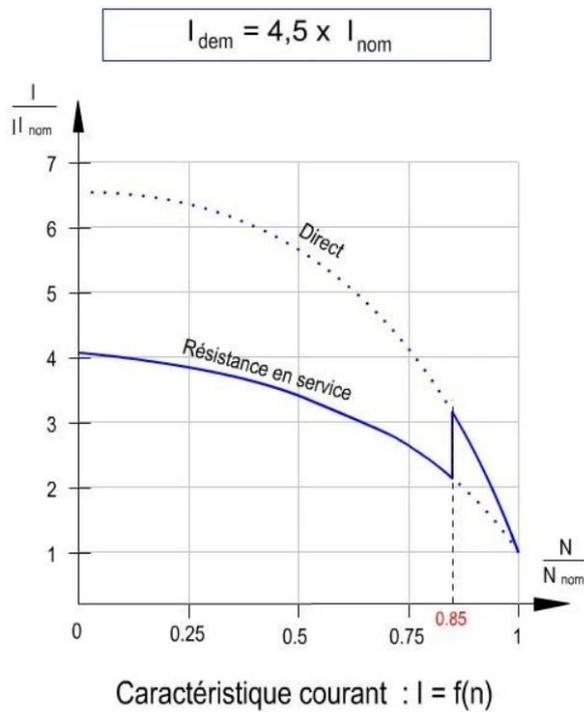
➤ Circuit de puissance



➤ Circuit de commande



➤ **Courbes :**



➤ **Avantages :**

- L'avantage dans ce mode de démarrage est qu'il n'y a pas de coupure d'alimentation pendant le démarrage.
- La caractéristique de couple est sensiblement identique à celle obtenue avec un démarrage étoile triangle. Par contre le courant au moment du démarrage reste élevé.
- Possibilité de choisir le couple de démarrage
- Choix du courant de démarrage avec précision
- Passage entre phases de démarrage sans interruption du courant

➤ **Inconvénients :**

- Si le courant est divisé par 3 alors le couple est divisé par 9

8.5 Démarrage par élimination de résistances rotoriques

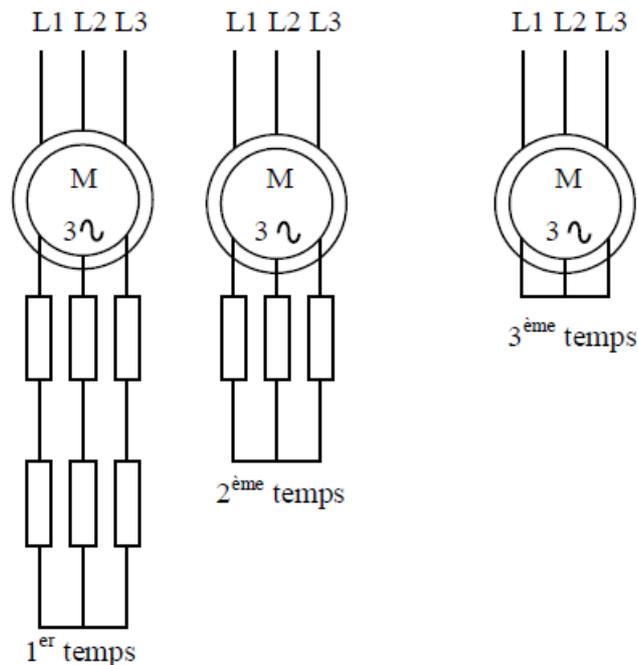
8.5.1 Principe

Ce type de démarrage est utilisé pour les moteurs à rotor bobiné dont les enroulements sont couplés en Y, et les trois sorties sont soudés à des bagues fixées sur l'arbre du moteur auxquels on peut insérer des résistances à l'aide de balais frotteurs. Ce démarrage consiste à alimenter le stator du moteur par la tension nominale et éliminer les résistances rotoriques en plusieurs temps (3 temps au minimum).

1er temps : On insère la totalité des résistances dans les enroulements du rotor.

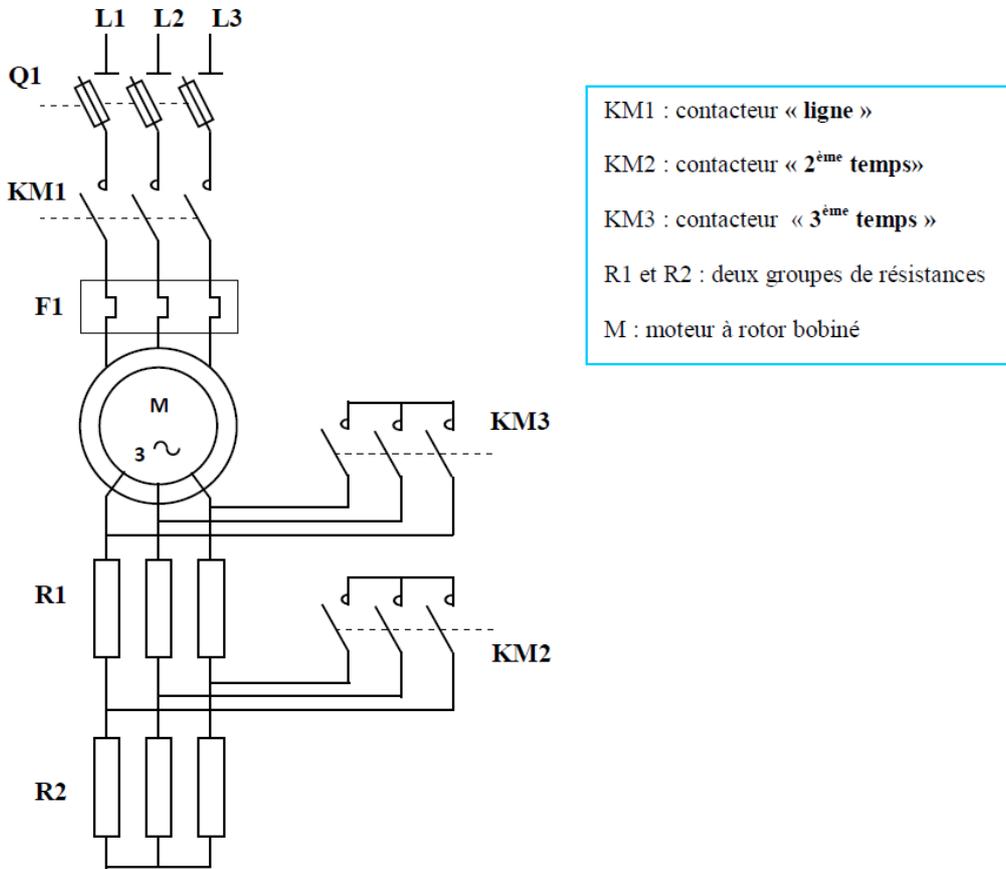
2ème temps : On diminue la résistance du circuit rotor en éliminant une partie des résistances insérées.

3ème temps : On élimine toutes les résistances rotoriques en court-circuitant les enroulements du rotor.

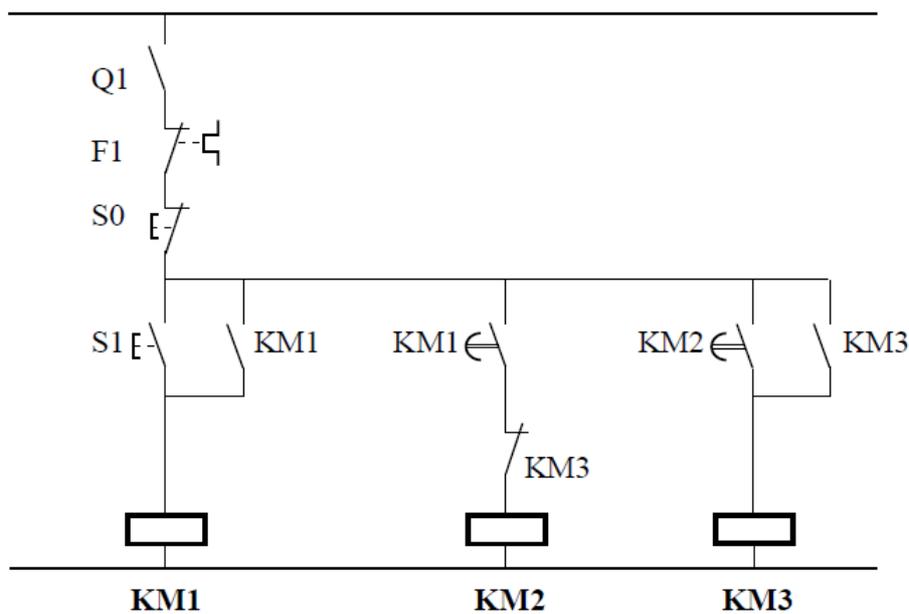


8.5.2 Schéma de démarrage par élimination de résistances rotoriques à un seul sens de marche

➤ Circuit de puissance



➤ Circuit de commande



8.6 Démarreurs progressifs

Un démarreur progressif limite le courant de démarrage du moteur tout en assurant un démarrage sans à-coup. La valeur du courant de démarrage dépend directement du couple statique requis au démarrage et de la masse de la charge à accélérer. Les réglages des démarreurs progressifs peuvent être modifiés pour répondre aux exigences des applications.

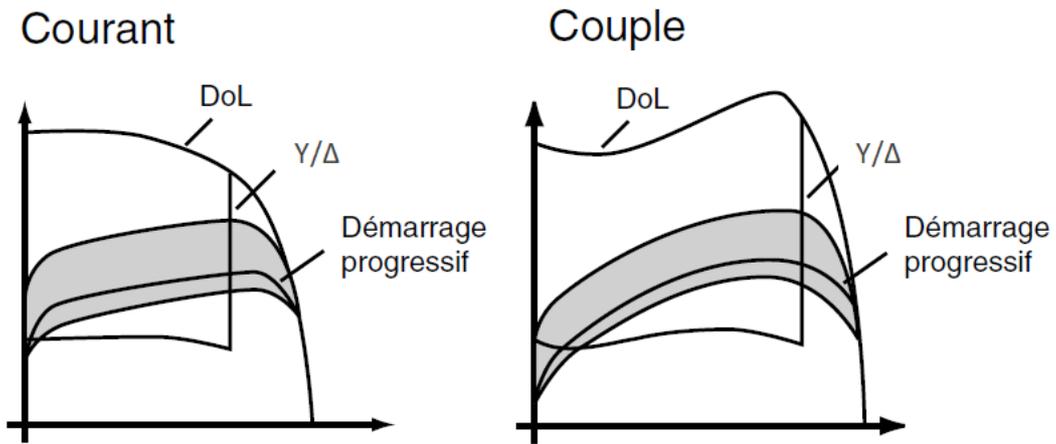
En augmentant progressivement la tension du moteur, et ainsi le couple, le démarrage sera très doux. Lorsque le moteur est à la bonne vitesse, il est courant d'ignorer le démarreur progressif pour éviter une perte de puissance des semiconducteurs en fonctionnement continu. Pour ignorer le démarreur, il est courant d'utiliser un contacteur monté en externe.

On prend l'exemple de démarreur progressif type ABB, le circuit principal est commandé par des semiconducteurs, au lieu de contacts mécaniques. Chaque phase est dotée de deux thyristors montés en opposition, ce qui permet la commutation du courant en tout point au cours des demi-périodes négatives et positives.

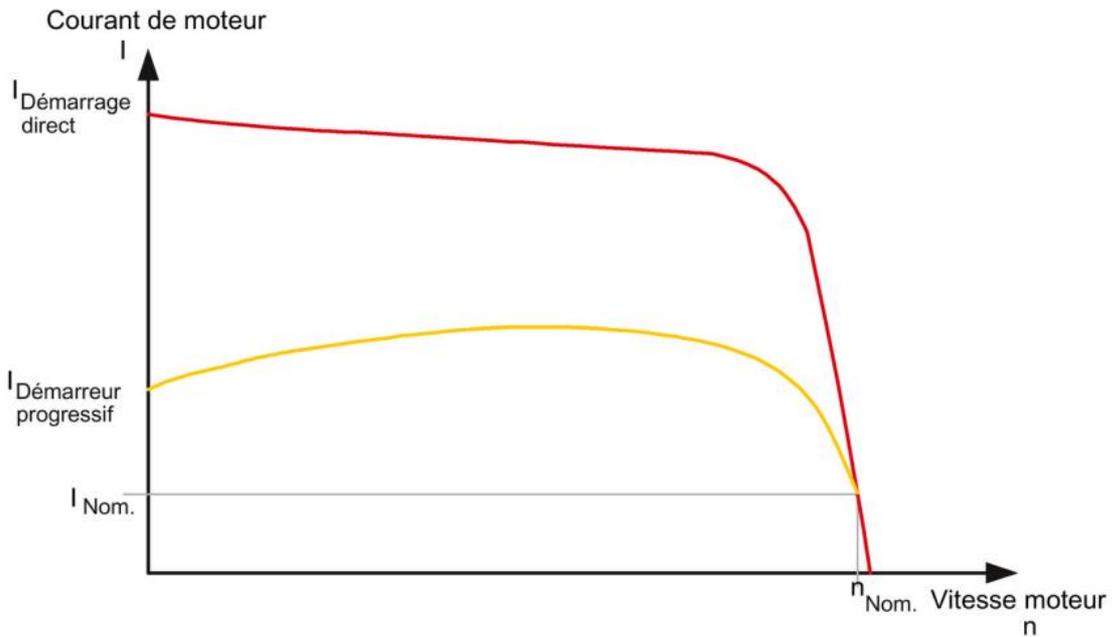
La durée de conduction est commandée par l'angle d'allumage du thyristor qui est lui-même commandé par la carte électronique intégrée.



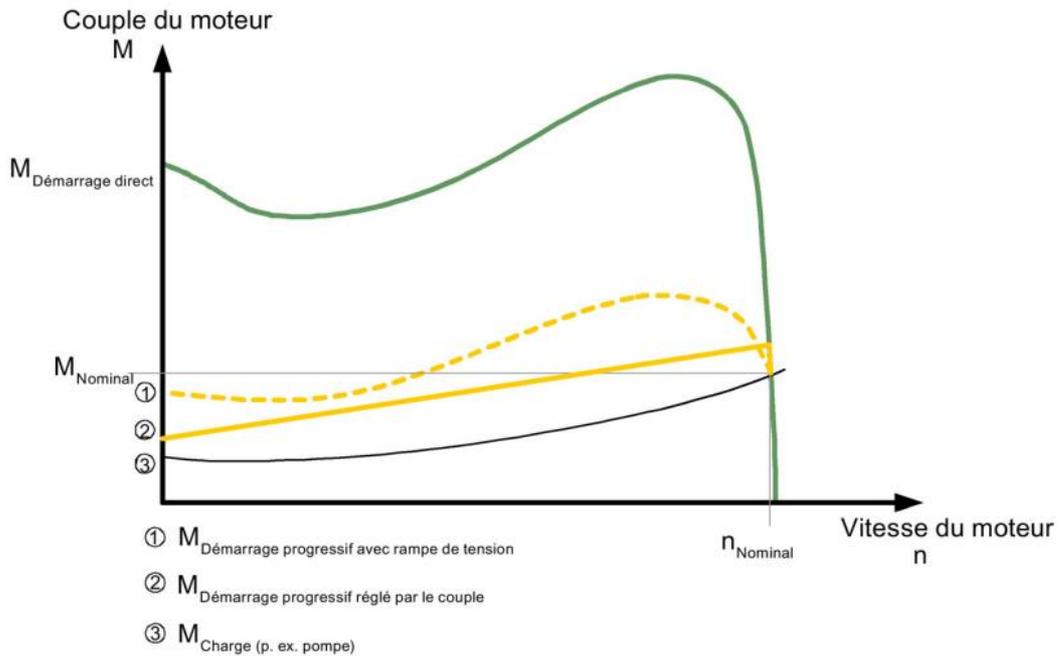
Sur la figure suivante on montre l'impact des démarreurs progressifs sur le courant et le couple du moteur par rapport aux autres types de démarrage :



Les graphiques suivants représentent l'allure du courant et du couple de démarrage d'un moteur asynchrone triphasé en liaison avec un démarreur progressif :



Comportement du courant d'un moteur asynchrone triphasé réduit lors du démarrage par un démarreur progressif



Comportement du couple d'un moteur asynchrone triphasé réduit lors du démarrage par un démarreur progressif

8.7 Démarrage avec un variateur de vitesse

La régulation de la vitesse par un variateur de vitesse présente un grand avantage car la vitesse ne nécessite aucun réglage en fonctionnement continu, mais ce n'est généralement pas la solution optimale quand il s'agit juste de démarrer et d'arrêter le moteur.

Avec un convertisseur de fréquence, le couple nominal du moteur est déjà disponible à basse vitesse, et le courant de démarrage est bas, entre 0,5 et 1 fois le courant nominal du moteur, et 1,5 fois maximum le courant nominal.

Une autre fonctionnalité disponible dans les variateurs est le « softstop », très utile quand un arrêt en douceur est nécessaire, par exemple avec les pompes à eau ou les courroies de convoyeur.



Chapitre III

Procédures et normes d'installation des moteurs électriques

9. Procédures d'installation des moteurs électriques

9.1 Consignes de sécurité



Le moteur doit être débranché de l'alimentation électrique et mis complètement à l'arrêt avant l'exécution de toute procédure d'installation ou de maintenance. Des mesures supplémentaires doivent être prises pour éviter le démarrage accidentel du moteur



Les professionnels travaillant avec les installations électriques dans le cadre du montage, de l'opération ou de la maintenance doivent utiliser des outils convenables et être instruits sur l'application des normes et des exigences de sécurité, y compris l'utilisation d'un Équipement de Protection Individuelle (EPI), qui doivent être soigneusement observées en vue de réduire le risque de blessure personnelle lors de ces services.



Les moteurs électriques ont des circuits sous tension, des pièces rotatives et des surfaces chaudes exposées qui peuvent provoquer des blessures corporelles graves pendant le fonctionnement normal. Il est recommandé que les services de transport, d'entreposage, d'installation, d'exploitation et de maintenance soient toujours effectués par un personnel qualifié.

9.2 Préparation préalable

9.2.1 Contrôle de réception

- A la livraison, vérifiez l'état de l'équipement. Tout dommage doit être immédiatement signalé au transporteur.
- Vérifiez les valeurs de la plaque signalétique, plus particulièrement la tension et le couplage (étoile ou triangle).
- Démontez l'éventuel dispositif d'immobilisation, et tournez l'arbre à la main pour vérifier qu'il tourne librement.
- Paliers :
 - Paliers à roulement : les paliers oxydés doivent être remplacés. Si aucune oxydation n'est détectée, lubrifiez les paliers comme décrit à l'Article 8.2. Si le moteur est stocké pour une période de plus de deux ans, les paliers devront être remplacés avant le démarrage du moteur.
 - Palier lisse : si des moteurs à paliers lisses sont stockés pour une durée plus longue que l'intervalle recommandé, l'huile doit être renouvelée avant le démarrage de la machine. N'oubliez pas d'enlever les dessiccateurs quand vous videz l'huile du moteur et de refaire le plein d'huile neuve avant de démarrer la machine. Pour plus de détails, voir
- Conditions de fonctionnement des condensateurs de démarrage : Si les moteurs monophasés sont stockés pour une période de plus de deux ans, il est recommandé de changer les condensateurs de démarrage avant de démarrer le moteur car ils perdent leurs caractéristiques.

- Boîte à bornes :
 - a. l'intérieur de la boîte de bornes doit être propre et sec.
 - b. les contacts doivent être correctement raccordés et sans corrosion.
 - c. les entrées de câbles doivent être bien hermétiques et le couvercle de la boîte de bornes doit être correctement monté en vue de garantir le degré de protection indiqué sur la plaque signalétique du moteur.
- Refroidissement : les ailettes de refroidissement, les ouvertures d'entrée et de sortie d'air doivent être propres et libres.
 La distance entre les ouïes d'entrée d'air et le mur ne devra être supérieure à $\frac{1}{4}$ (un quart) du diamètre de l'entrée d'air.
 Prévoyez un espace suffisant pour exécuter le nettoyage.

9.2.2 Mesure de la résistance d'isolement

La résistance d'isolement du moteur doit être mesurée avant sa mise en service ou si les enroulements sont susceptibles d'être humides.

La résistance, corrigée à 25 °C, doit être supérieure à la valeur de référence, 10 M Ω (mesuré sous 500 V ou 1000 V DC). La résistance d'isolement est réduite de moitié pour chaque augmentation de 20°C de la température de l'enroulement.



Il est recommandé d'isoler et de tester chaque phase séparément. Cette procédure permet la comparaison de la résistance d'isolement entre chaque phase. Lors de la mesure d'une phase, les autres phases doivent être mises à la terre.

La mesure de toutes les phases évalue simultanément la résistance d'isolement à la terre, mais ne permet pas d'avoir la résistance d'isolement entre les phases.

Les câbles d'alimentation électrique, les interrupteurs, les condensateurs et autres appareils externes raccordés au moteur peuvent influencer la mesure de la résistance d'isolement. Tous les appareils externes doivent donc être débranchés et mis à la terre pendant la mesure de la résistance d'isolement.

❖ **ATTENTION** : la carcasse du moteur doit être reliée à la terre et les enroulements

doivent être déchargés par rapport à la carcasse immédiatement après les mesures pour éviter tout risque de choc électrique.

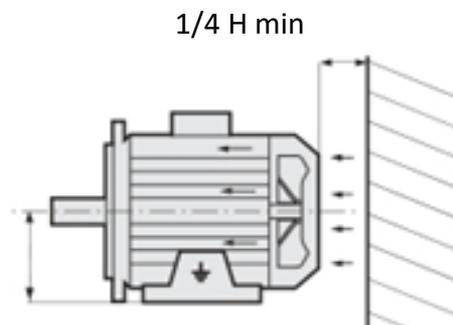
- Si la valeur de résistance de référence n'est pas atteinte, l'enroulement est trop humide et doit être séché en étuve à 90 °C pendant 12 à 16 heures, puis à 105 °C pendant 6 à 8 heures. Les éventuels bouchons de trou de purge doivent toujours être retirés avant le séchage en étuve, et les vannes de fermeture, le cas échéant, doivent être ouvertes.
- Les enroulements humides du fait de l'eau de mer doivent généralement être rebobinés.

9.2.3 Équilibrage

Les machines non équilibrées produisent des vibrations qui peuvent endommager le moteur. Les éléments de transmission, tels que les poulies, les accouplements, etc., doivent être équilibrés avec une demi-clavette avant d'être montés sur l'arbre du moteur.

9.2.4 Emplacement - ventilation

Nos moteurs sont refroidis selon le mode IC 411 (norme CEI 34-6) c'est à dire "machine refroidie par sa surface, en utilisant le fluide ambiant (air) circulant le long de la machine". Le refroidissement est réalisé par un ventilateur à l'arrière du moteur ; l'air est aspiré à travers la grille d'un capot de ventilation (assurant la protection contre les risques de contact direct avec le ventilateur suivant norme CEI 34-5) et soufflé le long des ailettes de la carcasse pour assurer l'équilibre thermique du moteur quel que soit le sens de rotation.



Le moteur sera installé dans un endroit suffisamment aéré, l'entrée et la sortie d'air étant dégagées d'une valeur au moins égale au quart de la hauteur d'axe.

L'obturation même accidentelle (colmatage) de la grille du capot est préjudiciable au bon fonctionnement du moteur.

En cas de fonctionnement vertical bout d'arbre vers le bas il est recommandé d'équiper le moteur d'une tôle parapluie pour éviter toute pénétration de corps étranger.

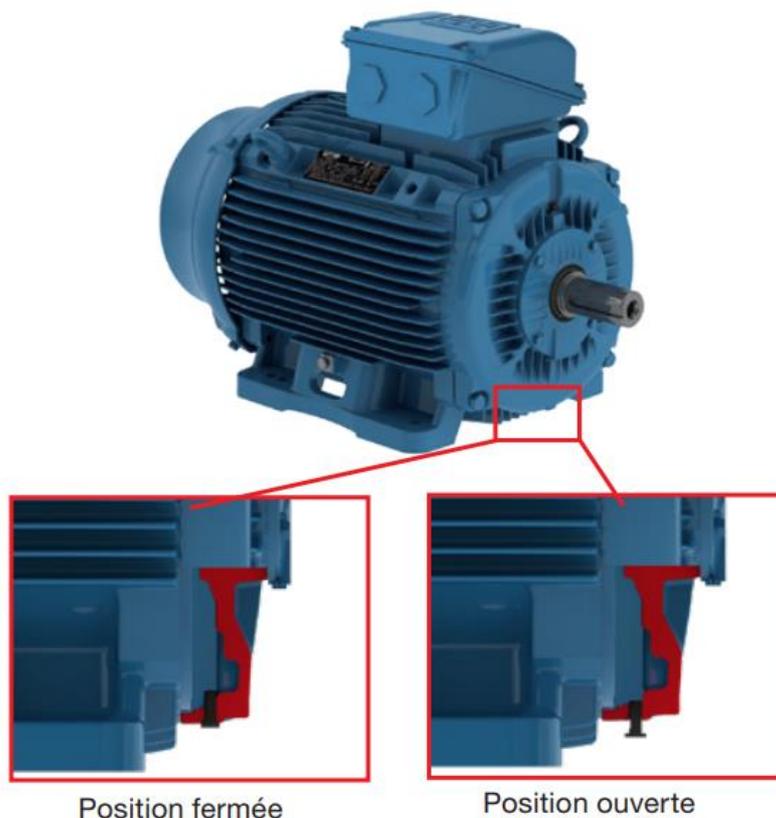
Il est nécessaire également de vérifier qu'il n'y a pas recyclage de l'air chaud ; s'il en était autrement, pour éviter un échauffement anormal du moteur, il faut prévoir des canalisations d'amenée d'air frais et de sortie d'air chaud. Dans ce cas et si la circulation de

l'air n'est pas assurée par une ventilation auxiliaire, il faut prévoir les dimensions des canalisations pour que les pertes de charge y soient négligeables vis à vis de celles du moteur.

9.2.5 Trou de purge

Le moteur doit toujours être placé de manière à ce que le trou de purge soit à la position la plus basse (S'il y a une flèche d'indication sur le drainage, ce dernier doit être installé de façon à ce que la flèche pointe vers le bas).

Les moteurs fournis avec des bouchons de purge en caoutchouc, filetés ou d'un autre type doivent être ouverts périodiquement pour vidanger l'eau condensée. Pour les environnements avec des niveaux de condensats élevés et le moteur avec le degré de protection IP55, les bouchons de vidange peuvent être montés en position ouverte



Détail du bouchon de vidange en caoutchouc monté en position fermée et en position ouverte.

Pour les moteurs avec le degré de protection IP56, IP65 ou IP66, les bouchons de vidange doivent rester en position fermée. Ils ne seront ouverts que lors des procédures de maintenance du moteur.

Le système de drainage des moteurs dotés du système de lubrification à brouillard d'huile doit être connecté à un système collecteur spécifique.

9.3 Techniques de mise en place

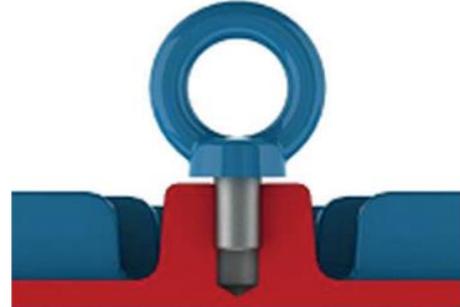
9.3.1 Levage

Avant de soulever le moteur, assurez-vous que tous les anneaux de levage sont serrés correctement et que les épaulements des anneaux sont en contact avec la base à soulever, comme l'illustre les figures suivantes montre un serrage incorrect de l'anneau de levage.

Assurez-vous que la machine de levage dispose de la capacité de levage requise pour le poids indiqué sur la plaque signalétique du moteur.



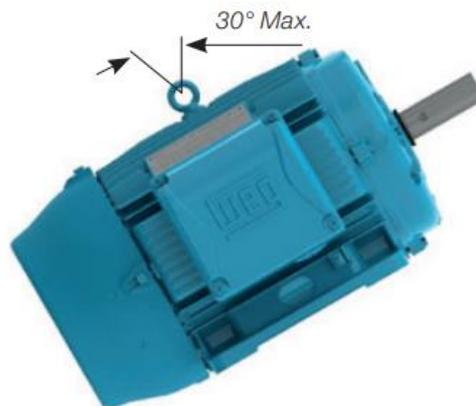
Serrage correct de l'anneau de levage



Serrage incorrect de l'anneau de levage.

- Exemple de Moteurs horizontaux avec un anneau de levage

Pour les moteurs horizontaux munis d'un seul anneau de levage, l'angle d'inclinaison maximal autorisé lors du processus de levage ne devrait pas excéder 30° par rapport à l'axe vertical, comme l'illustre la Figure suivante



Angle d'inclinaison maximal autorisé pour un moteur avec un anneau de levage.

- Exemple de Moteurs horizontaux avec deux anneaux de levage

Quand les moteurs sont munis d'au moins deux anneaux de levage, tous les anneaux de levage fournis doivent être utilisés simultanément pour la procédure de levage.

Il y a deux dispositions possibles des anneaux de levage (verticale et inclinée), comme il est montré ci-dessous :

Pour les moteurs munis d'anneaux de levage verticaux, comme le montre la Figure suivante, l'angle maximal de levage ne doit pas dépasser 45° par rapport à l'axe vertical. Nous recommandons d'utiliser une barre d'écartement pour maintenir les éléments de levage (chaîne ou corde) en position verticale et, ce faisant, protéger la surface du moteur contre

tout risque d'endommagement.



9.3.2 Fondations

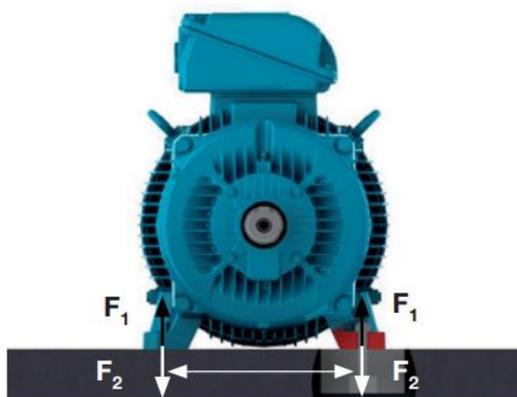
La préparation du support de montage du moteur (fondations) incombe à l'utilisateur final. Les fondations doivent être lisses, de niveau et, si possible, exemptes de vibrations. Des fondations en béton sont donc préconisées. Les fondations métalliques doivent être traitées au revêtement anticorrosion.

Les fondations doivent être suffisamment stables pour supporter les efforts imposés en cas de court-circuit. Le couple de court-circuit est principalement une oscillation de type sinusoïdale amortie, qui peut donc prendre des valeurs positives ou négatives. Les efforts imposés aux fondations peuvent être calculés au moyen des tableaux de valeurs du catalogue moteur.

Les moteurs peuvent être montés sur :

Bases en béton : sont les plus utilisés pour les moteurs de grande taille ;

Bases métalliques : sont généralement utilisés pour les moteurs de petite taille ;



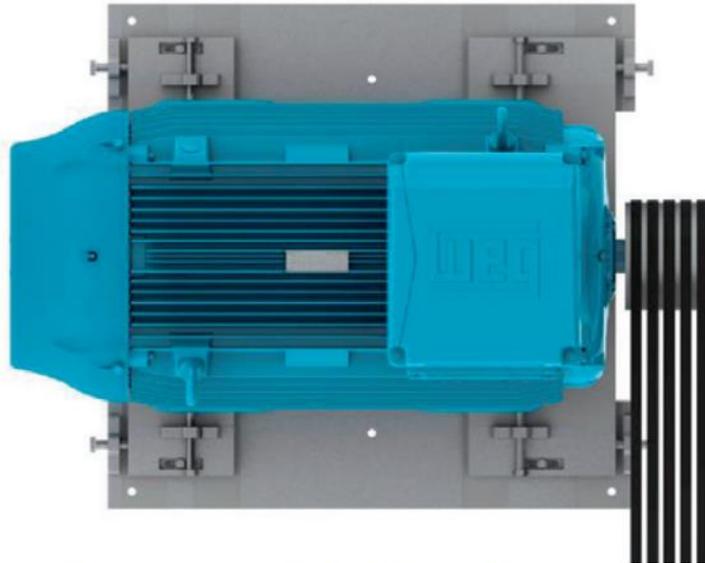
Moteur installé sur une base en béton



Moteur installé sur une base métallique

Les bases métalliques et en béton peuvent être équipées d'un système à glissières. Ces types de fondations sont généralement utilisés la transmission de puissance se fait par un système poulies courroies. Ce système est plus facile à monter/démonter et permet d'ajuster la tension de courroie. L'autre aspect important de ce type de fondation est l'emplacement des

vis de blocage de la base qui doivent être diagonalement opposées. La traverse la plus proche de la poulie d'entraînement est placée d'une telle façon que le boulon de positionnement se situe entre le moteur et la machine entraînée. L'autre traverse doit être placée avec le boulon sur le côté opposé (diagonalement opposé),



Moteur installé sur une base coulissante

Pour faciliter l'assemblage, les bases peuvent avoir les caractéristiques suivantes :

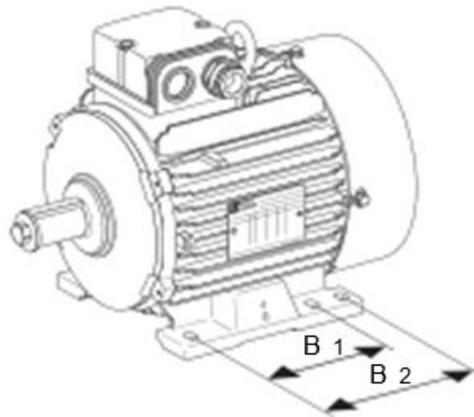
- épaules et/ou encoches ;
- boulons d'ancrage avec plaques desserrées ;
- boulons coulés dans le béton ;
- vis de mise de niveau ;
- vis de positionnement ;
- blocs en acier & en fonte, plaques avec les surfaces plates

Une fois l'installation terminée, il est recommandé d'enduire toutes les surfaces usinées exposées d'un moyen approprié de protection contre la rouille.

9.3.3 Mise en place

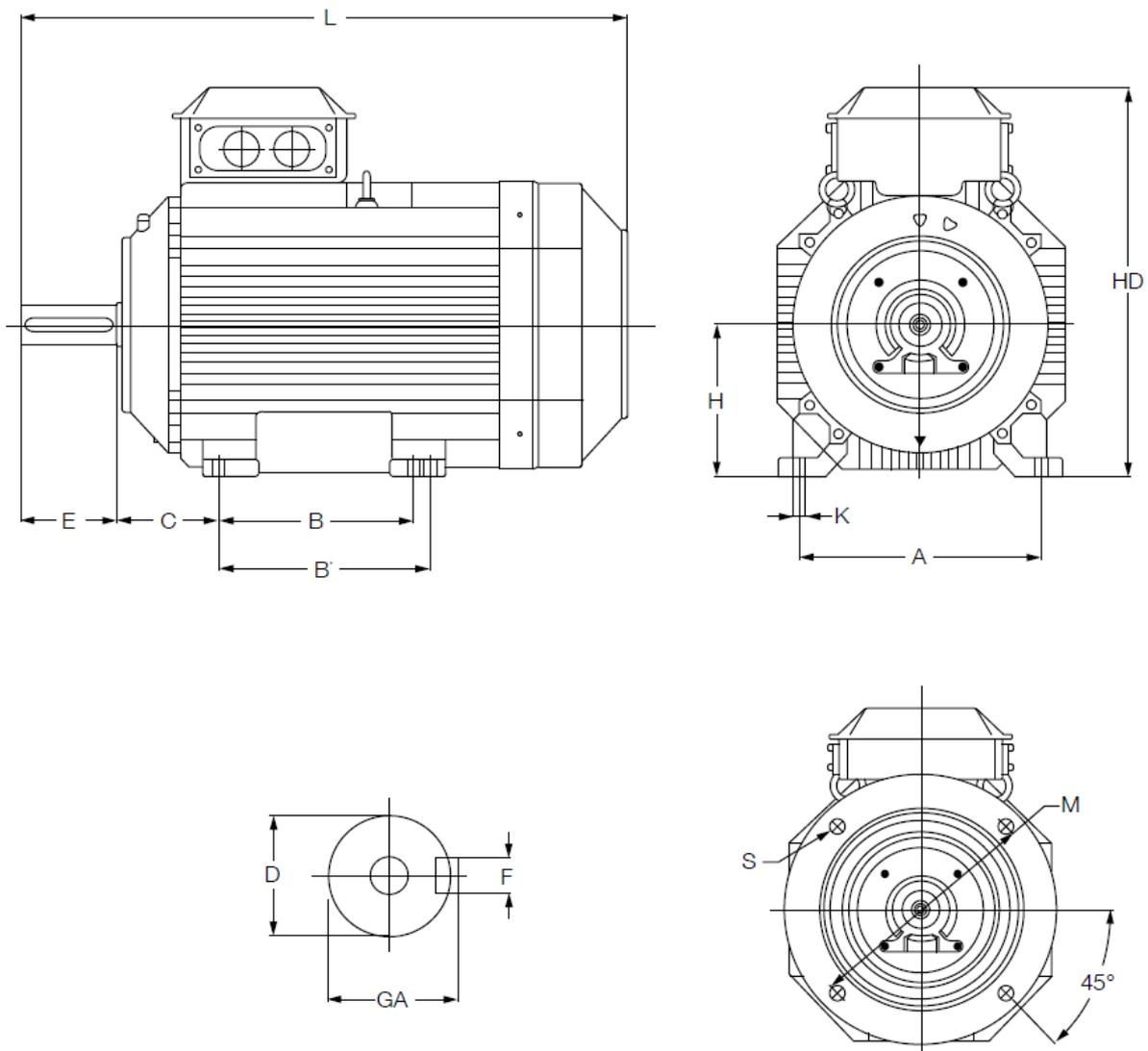
Le moteur sera monté, dans la position prévue à la commande, sur une assise suffisamment rigide pour éviter les déformations et les vibrations.

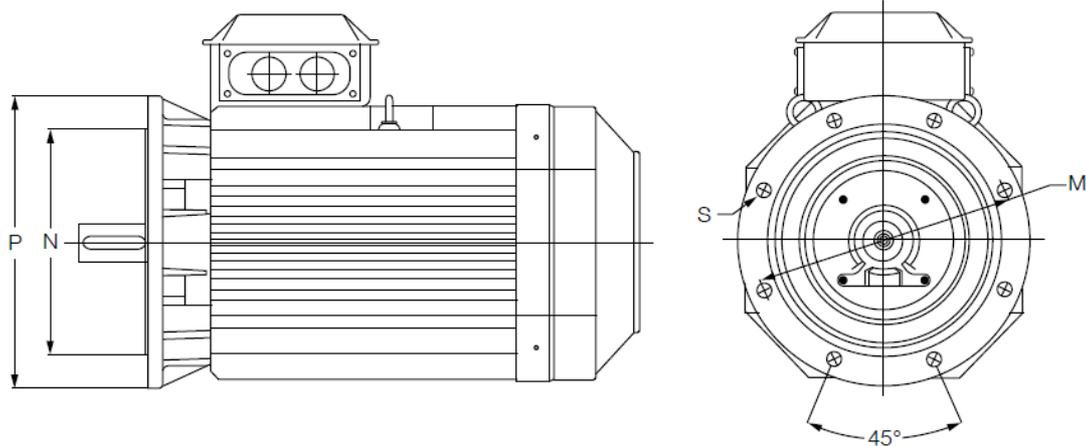
Lorsque les pattes du moteur sont pourvues de six trous de fixation, il est préférable d'utiliser ceux qui correspondent aux cotes normalisées de la puissance (se référer au catalogue technique des moteurs asynchrones) ou à défaut à ceux correspondant à B2.



Prévoir un accès aisé à la boîte à bornes, aux bouchons d'évacuation des condensats et selon le cas aux graisseurs. Utiliser des appareils de levage compatibles avec la masse du moteur (indiquée sur la plaque signalétique).

Ci-après un exemple de schéma d'encombrement type moteur ABB





Lettres symbolisant les cotes d'encombrement les plus couramment représentées :

A = distance entre les axes médians des trous de fixation (vue du bout d'arbre)

B = distance entre les axes médians des trous de fixation (vue de côté)

B' = distance entre les axes médians des trous de fixation des auxiliaires

C = distance entre l'épaulement de l'arbre côté accouplement et l'axe médian des trous de montage des pattes les plus proches

D = diamètre du bout d'arbre côté accouplement

E = longueur du bout d'arbre à partir de l'épaulement côté accouplement

F = largeur de la rainure de clavette du bout d'arbre côté accouplement

GA = distance entre le haut de la clavette et la surface opposée du bout d'arbre côté accouplement

H = distance entre l'axe médian de l'arbre et le bas des pattes

HD = distance entre le haut de l'anneau de levage, de la boîte à bornes ou d'un autre dispositif saillant monté sur le dessus du moteur et le bas des pattes

K = diamètre des trous ou largeur des encoches des pattes du moteur

L = longueur totale du moteur avec bout d'arbre unique

M = diamètre du cercle primitif des trous de fixation

N = diamètre du raccord

P = diamètre externe de la bride ou dans le cas d'un plan non circulaire, deux fois la dimension radiale maximale

S = diamètre des trous de fixation dans la bride de montage ou diamètre nominal du taraudage.

9.3.4 Accouplements

Les accouplements sont utilisés pour transmettre le couple de l'arbre du moteur à l'arbre de la machine entraînée.

Les aspects suivants doivent être pris en considération lorsque des accouplements sont montés :

Utilisez des outils convenables pour l'assemblage & le démontage d'accouplements afin d'éviter d'endommager le moteur et les paliers.

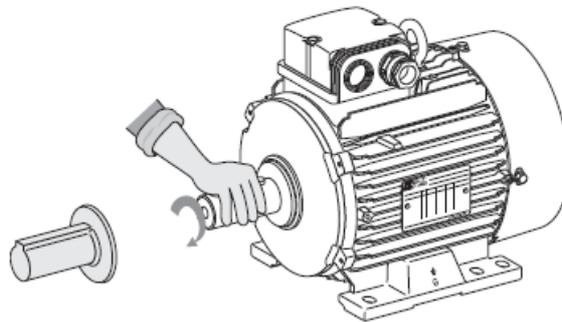
Dans la mesure du possible, utilisez des accouplements flexibles car ils sont en mesure d'absorber les éventuelles différences d'alignement résiduelles lors du fonctionnement de la machine.

Les charges et les limitations de vitesse maximales spécifiées dans les catalogues des fabricants d'accouplements et de moteurs ne peuvent pas être dépassées.

- Préparation

Faire tourner le moteur à la main avant accouplement afin de déceler une éventuelle avarie due aux manipulations.

Enlever l'éventuelle protection du bout d'arbre.



- Accouplement direct

Il y a accouplement direct lorsque l'arbre du moteur est directement couplé avec l'arbre de la machine entraînée sans éléments de transmission. Dans la mesure du possible, utilisez l'accouplement direct parce qu'il y a une baisse du coût, moins d'espace exigé pour l'installation et plus de sécurité contre les accidents



N'utilisez pas de roulements à rouleaux pour l'accouplement direct à moins qu'une charge radiale suffisante ne soit attendue

- Accouplement réducteur

L'accouplement réducteur est typiquement utilisé là où la réduction de vitesse est requise. Assurez-vous que les arbres sont parfaitement alignés, strictement parallèles (en cas de réducteurs à roues droites) et dans le bon angle d'engrènement (en cas d'engrenages conique et hélicoïdal).

Dans le but de prévenir les accidents, retirez ou fixez la clavette d'arbre fermement quand le moteur fonctionne sans accouplement.

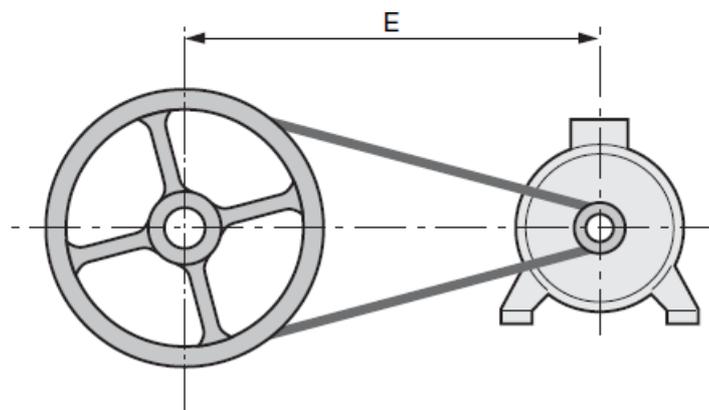
▪ Accouplement poulie courroie

Les poulies et les courroies sont utilisées quand une augmentation ou une réduction de vitesse entre l'arbre du moteur et la charge entraînée est requise.

Pour permettre une mise en place correcte des courroies, prévoir une possibilité de réglage de plus ou moins 3% par rapport à l'entraxe E calculé.

Il ne faut jamais monter les courroies en force.

Pour les courroies crantées positionner les crans dans les rainures des poulies.



Une tension de courroie excessive endommagera les paliers et provoquera des accidents inattendus tels que la rupture de l'arbre du moteur.



Pour prévenir l'accumulation d'électricité statique dans le système d'entraînement par courroie, utilisez uniquement des courroies correctement mises à la terre dans la construction conductrice

9.3.5 Mise à niveau

Le moteur doit être mis à niveau dans le but de corriger tout écart de planéité émanant du processus de fabrication et du réarrangement de la structure des matériaux. La mise à niveau peut être réalisée par une vis de mise à niveau fixée sur la patte du moteur ou sur la bride ou au moyen de fines cales de compensation. Après le processus de mise à niveau, la hauteur de nivellement entre la base de montage du moteur et le moteur ne peut pas excéder 0,1 mm.

Si une base métallique est utilisée pour niveler la hauteur du bout d'arbre du moteur et le bout d'arbre de la machine entraînée, nivelez seulement la base métallique se rapportant à la base en béton.

Enregistrez les écarts maximaux de mise à niveau dans le rapport d'installation.

9.4 Protections des moteurs

9.4.1 Protections en ligne

➤ **Réglage de la protection thermique**

Elle doit être réglée à la valeur de l'intensité relevée sur la plaque signalétique du moteur pour la tension et la fréquence du réseau raccordé.

➤ **Protection magnétothermique**

La protection des moteurs doit être assurée par un dispositif magnétothermique, placé entre le sectionneur et le moteur.

Ces équipements de protection assurent une protection globale des moteurs contre les surcharges à variation lente. Ce dispositif peut être accompagné de coupe-circuits à fusibles.

➤ **Protections thermiques directes incorporées**

Pour les faibles courants nominaux, des protections de type bilames, traversées par le courant de ligne, peuvent être utilisées. Le bilame actionne alors des contacts qui assurent la coupure ou l'établissement du circuit d'alimentation. Ces protections sont conçues avec réarmement manuel ou automatique.

9.4.2 Protections thermiques indirectes incorporées

Les moteurs peuvent être équipés en option de sondes thermiques; ces sondes permettent de suivre l'évolution de la température aux "points chauds" :

- détection de surcharge,
- contrôle du refroidissement,
- surveillance des points caractéristiques pour la maintenance de l'installation.

Il faut souligner qu'en aucun cas, ces sondes ne peuvent être utilisées pour réaliser une régulation directe des cycles d'utilisation des moteurs.

9.4.3 Protection contre la condensation : résistances de réchauffage

Repérage : 1 étiquette rouge

Une résistance en ruban tissé avec de la fibre de verre est fixée sur 1 ou 2 tête(s) de bobines et permet de réchauffer les machines à l'arrêt donc d'éliminer la condensation à l'intérieur des machines.

Alimentation : 230V monophasé sauf spécifications contraires demandées par le client.

Si lors de l'installation, les bouchons de purge situés au point bas du moteur n'ont pas été retirés, ils doivent être ouverts tous les 6 mois environ.



Attention : s'assurer que les résistances de réchauffage sont hors tension avant toute intervention dans la boîte à bornes ou dans l'armoire.

9.5 Connexion électrique

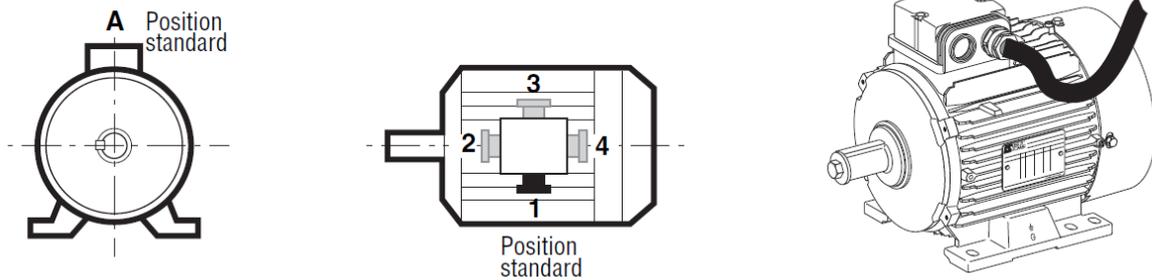
9.5.1 Presse étoupe (Normes NFC 68 311 et 312)

La position standard du presse-étoupe (1) est à droite vue du bout d'arbre moteur.

Un presse-étoupe ne doit jamais être ouvert vers le haut.

S'assurer que le rayon de courbure d'arrivée des câbles évite à l'eau de pénétrer par le

presse-étoupe.

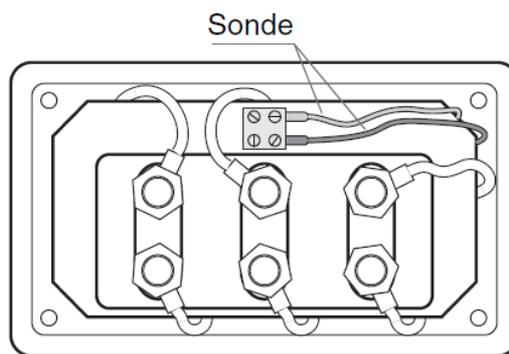


9.5.2 Schéma de branchement plaque à bornes

Tous les moteurs sont livrés avec un schéma de branchement placé dans la boîte à bornes*. Les barrettes nécessaires à la réalisation du couplage sont disponibles à l'intérieur de la boîte à bornes.

Les moteurs monovitesse sont équipés d'une planchette à 6 bornes conforme à la norme NFC 51 120,

Lorsque le moteur comporte des accessoires (protection thermique ou résistance de réchauffage), ceux-ci sont raccordés sur des dominos à vis ou des planchettes par des fils repérés



9.5.3 Procédure de raccordement

Prenez en considération le courant nominal du moteur, le facteur de service, le courant de démarrage, les conditions de l'environnement et d'installation, la chute de tension maximale, etc. pour choisir des câbles d'alimentation électrique et les dispositifs de commutation et de protection appropriés.

Tous les moteurs doivent être installés avec des dispositifs de protection contre les surcharges. Les moteurs triphasés doivent être équipés de systèmes de protection contre la défaillance de phase.



Avant de raccorder le moteur, vérifiez si la tension de réseau électrique et la fréquence sont conformes aux données de la plaque signalétique du moteur. Toute l'installation électrique doit être faite selon le schéma des connexions sur la plaque signalétique du moteur.

En vue de prévenir des accidents, vérifiez si le moteur a été solidement mis à la terre conformément aux normes applicables



Même lorsque le moteur est à l'arrêt, des tensions dangereuses peuvent être présentes à l'intérieur de la boîte de bornes utilisée pour l'alimentation des résistances de réchauffage ou pour la mise sous tension de l'enroulement quand ce dernier est utilisé comme élément de chauffage. Les condensateurs du moteur maintiendront une charge même après coupure de l'alimentation. Ne touchez pas aux condensateurs et/ou aux bornes du moteur avant d'avoir complètement déchargé les condensateurs.



Une fois que la connexion du moteur est terminée, assurez-vous qu'aucun outil ou corps étranger n'a été oublié à l'intérieur la boîte de bornes.



Prenez les mesures nécessaires pour assurer le degré de protection indiqué sur la plaque signalétique du moteur :

- les trous d'entrée de câbles non utilisés dans les boîtes de raccordement doivent être correctement bouchés à l'aide de bouchons filetés ;
- les composants fournis séparément (par exemple, les boîtes de raccordement montées séparément) doivent être correctement fermés et scellés.

Les entrées de câbles utilisées pour l'alimentation et les commandes doivent être équipées de composants (par exemple, des presse-étoupes et des conduits) conformes aux normes et réglementations en vigueur dans chaque pays.

Tous les dispositifs de protection, y compris la protection contre les surintensités, doivent être réglés selon les conditions nominales de la machine. Ces dispositifs de protection doivent protéger la machine contre le court-circuit, la défaillance de phase ou le blocage du rotor

➤ **Borne de masse et mise à la terre**

Elle est située sur un bossage à l'intérieur de la boîte à bornes ; dans certains cas, la borne de masse peut être située sur une patte ou sur une ailette (moteurs ronds). Elle est repérée par

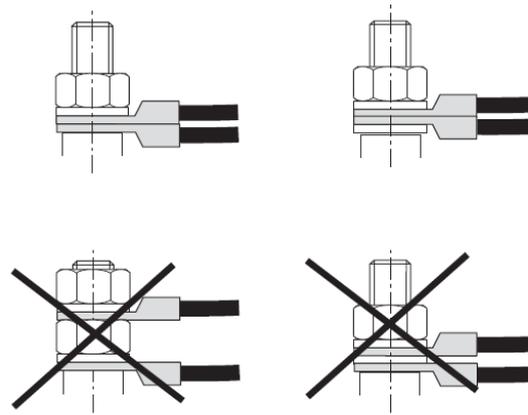
le sigle : 

➤ **Branchement des câbles d'alimentation à la plaque à bornes**

Les câbles doivent être équipés de cosses adaptées à la section du câble et au diamètre de la borne.

Elles doivent être serties conformément aux indications du fournisseur de cosses.

Le raccordement doit s'effectuer cosse sur cosse (voir schémas ci-dessous) :



➤ **Couple de serrage (N.m) sur les écrous des planchettes à bornes**

Borne	M4	M5	M6	M8	M10	M12	M14	M16
Acier	2	3,2	5	10	20	35	50	65
Laiton	1	2	3	6	12	20	-	50

Dans le cas du raccordement des câbles sans cosse, mettre des étriers.

Sur les planchettes à bornes en laiton si des écrous de planchette s'égarer, il ne faut pas les remplacer par des écrous en acier mais impérativement par des écrous en laiton.

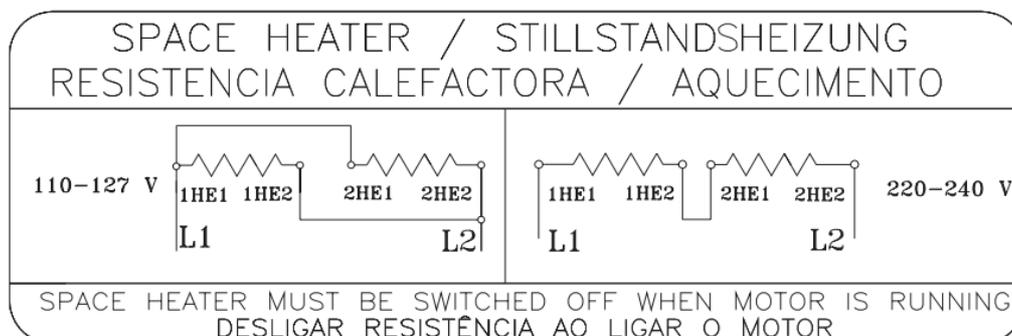
A la fermeture de la boîte, veiller à la mise en place correcte du joint.



D'une façon générale s'assurer que ni écrou, ni rondelle, ni autre corps étranger n'est tombé et ne soit entré en contact avec le bobinage.

9.5.4 Connexion des résistances de réchauffage

Avant de mettre les résistances de réchauffage en marche, vérifiez si elles ont été raccordées selon le schéma des connexions montré sur la plaque signalétique. Pour les moteurs fournis avec des résistances de réchauffage à double tension (110-127/220-240 V), (figure suivante)





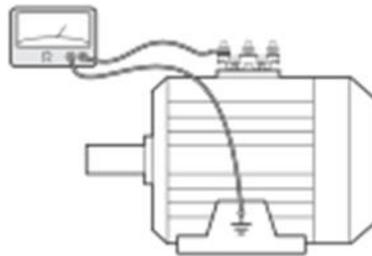
Les résistances de réchauffage ne doivent jamais être alimentées en courant lorsque le moteur est en service.

10. Vérification de la qualité des travaux d'installation des moteurs électriques

10.1 Mesure d'isolement

Cette vérification est indispensable si le moteur a été stocké pendant plus de 6 mois ou s'il a séjourné dans une atmosphère humide.

Cette mesure s'effectue avec un mégohmmètre sous 500V continu (attention de ne pas utiliser un système à magnéto).



Il est préférable d'effectuer un premier essai sous 30 ou 50 volts et si l'isolement est supérieur à 1 mégohm effectuer une deuxième mesure sous 500 volts pendant 60 secondes. La valeur d'isolement doit être au minimum de 10 mégohms à froid. Dans le cas où cette valeur ne serait pas atteinte, ou d'une manière systématique si le moteur a pu être soumis à des aspersion d'eau, des embruns, à un séjour prolongé dans un endroit à forte hygrométrie ou s'il est recouvert de condensation, il est recommandé de déshydrater le stator pendant 24 heures dans une étuve à une température de 110° à 120°C.

S'il n'est pas possible de traiter le moteur en étuve :

- alimenter le moteur, rotor bloqué, sous tension alternative triphasée réduite à environ 10% de la tension nominale, pendant 12 heures (utiliser un régulateur d'induction ou un transformateur abaisseur à prises réglables). Pour les moteurs à bagues, cet essai doit être réalisé avec le rotor en court-circuit.

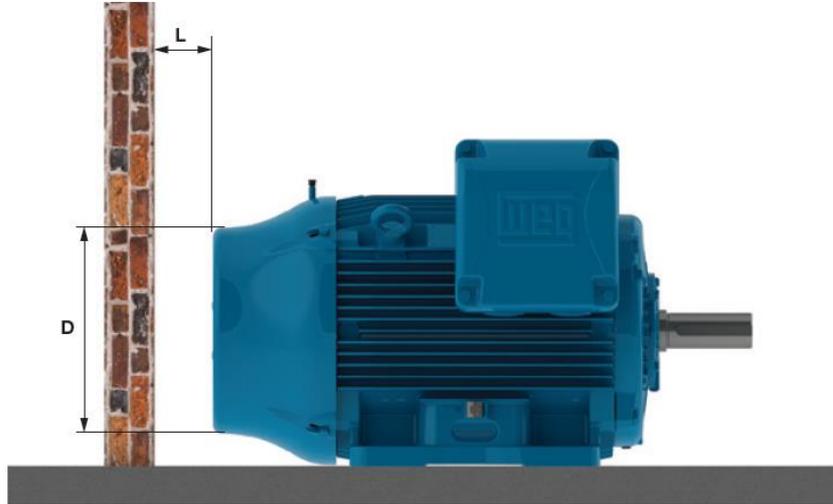
- ou l'alimenter en courant continu, les 3 phases en série, la valeur de la tension étant de 1 à 2% de la tension nominale (utiliser une génératrice à courant continu à excitation séparée ou des batteries pour des moteurs de moins de 22kW).

- **NB:** Il convient de contrôler le courant alternatif à la pince ampèremétrique, le courant continu avec un ampèremètre à shunt. Ce courant ne doit pas dépasser 60% du courant nominal. Il est recommandé de mettre un thermomètre sur la carcasse du moteur : si la température dépasse 70°C, réduire les tensions ou courants indiqués de 5% de la valeur primitive pour 10° d'écart.

Pendant le séchage toutes les ouvertures du moteur doivent être dégagées (boîte à bornes, trous de purge).

10.2 Vérification des conditions de ventilation

Assurez-vous que les ouïes d'entrée et de sortie d'air ne sont pas bloquées. La distance minimale de sécurité par rapport au mur le plus proche (L) doit être d'au moins $\frac{1}{4}$ du diamètre du capot de ventilation (D), voir la Figure suivante :

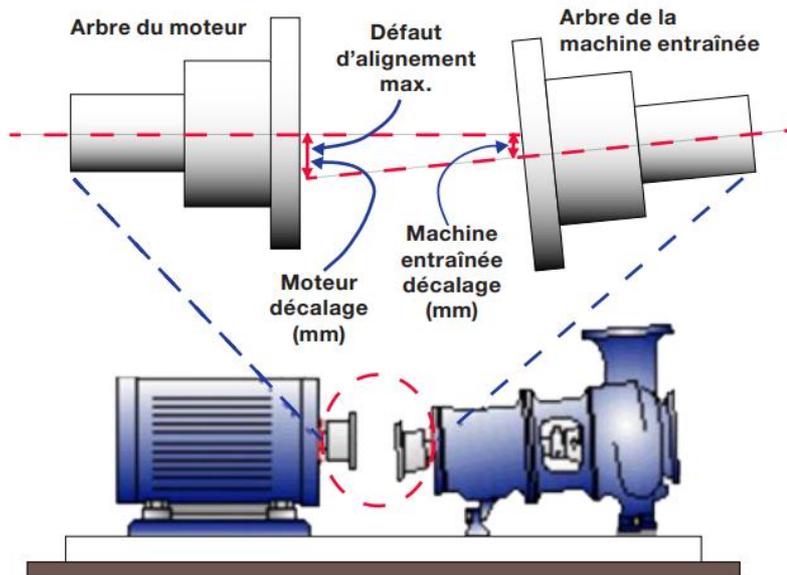


La température de l'air d'admission doit être à égale à la température ambiante.
Le tableau suivant montre les valeurs de référence des distances minimales à prendre en considération

Taille de carcasse		Distance entre le capot de ventilation et le mur (L)	
CEI	NEMA	mm	pouces
63	-	25	0.96
71	-	26	1.02
80	-	30	1.18
90	143/5	33	1.30
100	-	36	1.43
112	182/4	41	1.61
132	213/5	50	1.98
160	254/6	65	2.56
180	284/6	68	2.66
200	324/6	78	3.08
225	364/5	85	3.35
250	404/5		
280	444/5	108	4.23
	445/7		
	447/9		
315	L447/9	122	4.80
	504/5		
	5006/7/8		
	5009/10/11		
355	586/7	136	5.35
	588/9		
	5807/8/9		
	5810/11/12		
400	6806/7/8	147	5.79
	6809/10/11		
450	7006/10	159	6.26
500	8006/10	171	6.73
560	8806/10	185	7.28
630	9606/10	200	7.87

10.3 Alignement

L'alignement correct entre le moteur et la machine entraînée est l'une des variables les plus importantes qui allonge la durée de vie utile du moteur. Un alignement incorrect produit des charges et des vibrations élevées qui réduisent la durée de vie utile des paliers et causent même des ruptures d'arbres. La Figure suivante illustre le défaut d'alignement entre le moteur et la machine entraînée.



Condition de défaut d'alignement typique

Les procédures d'alignement doivent être réalisées avec des outils et des appareils convenables tels qu'un comparateur à cadran, des instruments d'alignement à laser, etc. L'arbre du moteur doit être aligné axialement et radialement avec l'arbre de la machine entraînée.

L'excentricité maximale permise pour un tour d'arbre complet ne devrait pas excéder 0,03 mm lorsque l'alignement est fait avec des comparateurs à cadran, comme le montre Figure suivante. Prévoyez un jeu dans l'accouplement pour compenser la dilatation thermique des arbres, comme spécifié par le fabricant des couplages.

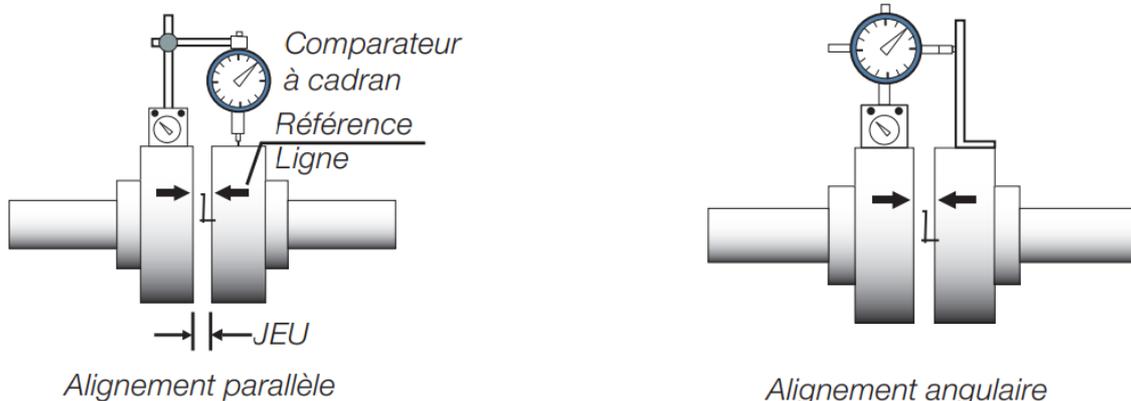


Figure Alignement avec comparateur à cadran.

Si l'alignement est fait au moyen d'un instrument laser, veuillez prendre en considération les instructions et les recommandations du fabricant de l'instrument laser.

L'alignement devrait être vérifié à la température ambiante, avec la machine à la température d'exploitation.

Les transmissions poulies courroies doivent être alignés de façon à ce que le centre de la poulie d'entraînement soit sur le même plan que le centre de la poulie entraînée et que

l'arbre du moteur et l'arbre de la machine entraînée soient tout à fait parallèles.

Après avoir accompli les procédures d'alignement, assurez-vous que les appareils de montage ne modifient pas l'alignement et le nivellement de la machine et du moteur, entraînant l'endommagement de la machine en cours de fonctionnement.

Il est recommandé d'enregistrer l'écart maximal d'alignement dans le rapport d'installation.

11. Procédures de démarrage et de mise en service des moteurs électriques

11.1 Contrôle préliminaire avant le démarrage (Pre- Commissioning)

Après avoir fini les procédures d'installation et avant de démarrer le moteur pour la première fois ou après une longue période d'arrêt, les points suivants doivent être vérifiés et confirmés :

- Les données de la plaque signalétique (tension, courant, schéma des connexions, degré de protection, type de protection, système de refroidissement, facteur de service, etc.) répondent aux exigences de l'application.
- Le groupe de machines (moteur + machine entraînée) a été monté et aligné correctement.
- Le système d'entraînement du moteur garantit que la vitesse du moteur ne dépasse pas la vitesse max. permise
- Mesurez la résistance d'isolation des enroulements en vous assurant qu'elle est conforme aux valeurs indiquées précédemment.
- Vérifiez le sens de rotation du moteur.
- Inspectez la boîte de bornes du moteur pour voir si elle est endommagée puis assurez-vous qu'elle est propre et sèche et que tous les contacts sont sans rouilles, que les joints sont dans des conditions de fonctionnement parfaites et que tous les trous taraudés non utilisés sont correctement fermés, garantissant ainsi le degré de protection et le type de protection du moteur indiqués sur la plaque signalétique du moteur.
- Vérifiez si les câblages du moteur, y compris la mise à la terre et le raccordement des équipements auxiliaires, ont été réalisés correctement
- Vérifiez les conditions de fonctionnement des dispositifs auxiliaires installés (frein, codeur, dispositif de protection thermique, système de refroidissement par ventilation forcée, etc.).
- Vérifiez les conditions de fonctionnement des paliers. Si vous détectez des signes d'oxydation, remplacez les paliers. Si aucun signe d'oxydation n'est détecté, relubrifiez les paliers comme décrit précédemment. Si des moteurs sont stockés depuis plus de deux ans, les paliers devront être remplacés avant le démarrage du moteur.
- Assurez-vous que toutes les pièces rotatives telles que les poulies, les accouplements, les ventilateurs externes, l'arbre, etc. sont protégées contre tout contact accidentel.
- D'autres essais et inspections non inclus dans le manuel peuvent être exigés en fonction de l'installation spécifique, de l'application et/ou des caractéristiques du moteur.

11.2 Démarrage (Commissioning)

Une fois que toutes les inspections précédentes ont été réalisées, procédez comme suit pour démarrer le moteur :

- Démarrez le moteur à vide (si possible) et vérifiez le sens de rotation du moteur. Vérifiez-

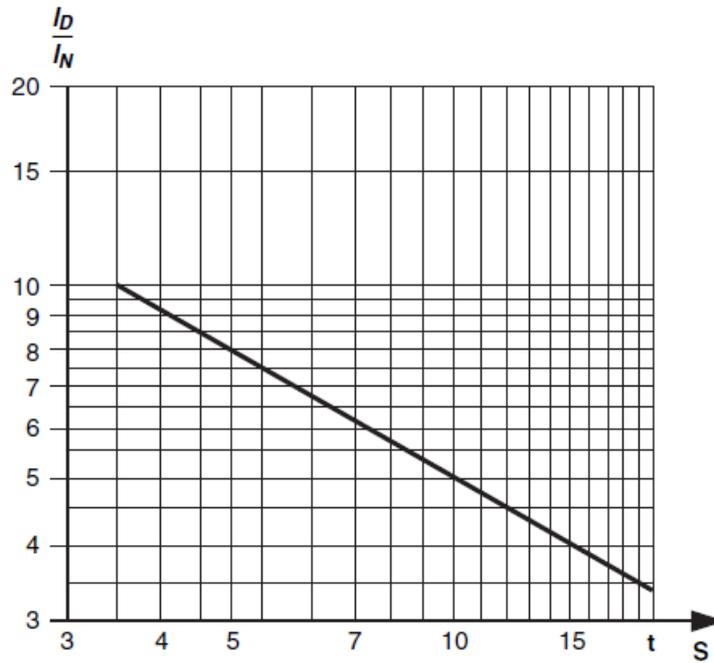
s'il y a un quelconque bruit anormal, une quelconque vibration ou quelques autres conditions de fonctionnement anormales.

- Veillez à ce que le moteur démarre doucement. Si vous décelez une quelconque anomalie de la condition de fonctionnement, coupez le moteur, vérifiez le système d'assemblage et les connexions avant de redémarrer le moteur.
- Si vous remarquez des vibrations excessives, vérifiez si les boulons de montage du moteur sont bien serrés ou si les vibrations ne proviennent pas des équipements adjacents installés. Vérifiez la vibration du moteur périodiquement et assurez-vous que les limites de vibration sont conformes aux normes
- Démarrez le moteur à la charge nominale pendant un temps court et comparez le courant de travail avec le courant nominal indiqué sur la plaque signalétique.
- Continuez à mesurer les variables suivantes du moteur jusqu'à ce que l'équilibre thermique soit atteint : courant, tension, température du palier et de la carcasse du moteur et niveaux de vibration et de bruit.
- Enregistrez le courant et les valeurs de tension mesurés sur le Rapport D'installation pour des comparaisons ultérieures.
- Étant donné que les courants de démarrage des moteurs asynchrones sont élevés, l'accélération des charges d'inertie élevées requiert un temps de démarrage prolongé pour atteindre le plein régime, ce qui entraîne une augmentation rapide de la température du moteur. Des démarrages successifs à des intervalles courts donneront lieu à des augmentations de la température d'enroulement et peuvent entraîner des dommages physiques de l'isolement, ce qui réduirait la durée de vie utile du système d'isolation
- Inspectez la condition de fonctionnement du condensateur, s'il en a un. Si des moteurs sont installés depuis plus de deux ans mais n'avaient jamais été mis en service, il est recommandé de changer les condensateurs de démarrage car ils perdent leurs caractéristiques de fonctionnement.

➤ Temps de démarrage et temps rotor bloqué admissibles

Les temps de démarrage doivent rester dans les limites indiquées ci-dessous à condition que le nombre de démarrages répartis dans l'heure, reste inférieur ou égal à 6.

On admet de réaliser 3 démarrages successifs à partir de l'état froid de la machine, et 2 démarrages consécutifs à partir de l'état chaud



Temps de démarrage admissible des moteurs en fonction du rapport I_D / I_N pour démarrages en partant de l'état froid.

12. Normes applicables aux moteurs électriques

12.1 Définitions

12.1.1 Directive

Acte législatif de l'Union Européenne pour atteindre un résultat particulier dans les états membres de l'UE.

12.1.2 Norme

Document de spécifications établi par consensus entre des experts techniques internationaux travaillant pour une organisation de normalisation, telle que la Commission Électrotechnique Internationale (IEC), le Comité européen de normalisation en électronique et en électrotechnique (CENELEC), ou un organisme de normalisation national (NEMA aux États-Unis, DKE en Allemagne).

L'adoption des normes IEC par un pays ou un fabricant est volontaire, mais privilégiée et obligatoire lors de l'application du schéma IECEx.

12.1.3 Norme harmonisée

Norme assurant une conformité avec les exigences correspondantes d'une directive européenne pour démontrer la conformité avec la législation européenne.

Les normes harmonisées sont publiées en ligne sur le site web de l'Union Européenne ainsi que dans le Journal Officiel (JO) de l'Union Européenne.

Leur application est obligatoire dans la mesure où la directive correspondante l'exige.

12.2 Tableaux de normes

Les tableaux suivants sont des listes de référence pour les normes électriques et mécaniques qui s'appliquent à la plupart des moteurs à induction en fonction du type de moteur et du type de protection.

Principales normes pour les moteurs basse tension

Électrique	Titre
IEC / EN 60034-1	Caractéristiques assignées et caractéristiques de fonctionnement
IEC / EN 60034-2-1	Méthodes normalisées pour la détermination des pertes et du rendement à partir d'essais (à l'exclusion des machines pour véhicules de traction)
IEC / EN 60034-2-2	Méthodes spécifiques pour déterminer les pertes séparées des machines de grande taille à partir d'essais – Complément à la IEC 60034-2-1
IEC 60034-2-3	Machines électriques tournantes – Partie 2-3 : Méthodes d'essai spécifiques pour la détermination des pertes et du rendement des moteurs en courant alternatif alimentés par convertisseur.
IEC / EN 60034-8	Marques d'extrémité et sens de rotation
IEC / EN 60034-12	Caractéristiques de démarrage des moteurs triphasés à induction à cage à une seule vitesse
IEC / TS 60034-25	Machines électriques à courant alternatif utilisées dans les entraînements électriques de puissance - Guide d'application
IEC / EN 60034-26	Effets d'un système de tensions déséquilibrées sur les caractéristiques de fonctionnement des moteurs à cage asynchrones triphasés
IEC / EN 60034-30	Classes de rendement pour les moteurs asynchrones triphasés mono-vitesse (Code IE)
IEC / TS 60034-31 CLC/TS 60034-31	Choix des moteurs éconergétiques incluant les applications à vitesse variable - Guide d'application
IEC 60038	Tensions normales de l'IEC
IEC 60050-411	Vocabulaire Electrotechnique International – Partie 411 : Machines tournantes

Mécanique	Titre
IEC / EN 60034-5	Degrés de protection procurés par la conception intégrale des machines électriques tournantes (code IP) - Classification
IEC / EN 60034-6	Modes de refroidissement (code IC)
IEC / EN 60034-7	Classification des modes de construction, des dispositions de montage et position de la boîte à bornes (code IM)
IEC / EN 60034-9	Limites de bruit
IEC / EN 60034-14	Vibrations mécaniques de certaines machines de hauteur d'axe supérieure ou égale à 56 mm - Mesurage, évaluation et limites de l'intensité vibratoire
IEC / EN 60072-1	Dimensions et séries de puissances des machines électriques tournantes Partie 1 : désignation des carcasses entre 56 et 400 et des brides entre 55 et 1080
IEC / EN 60529	Degrés de protection procurés par les enveloppes (code IP)
EN 50102	Degrés de protection procurés par les enveloppes de matériels électriques contre les impacts mécaniques externes (code IK)
EN 50347	Moteurs à induction triphasés à usage général de dimensions et puissances normales - Désignation des carcasses entre 56 et 315 et des brides entre 65 et 740
ISO 21940-32	Vibrations mécaniques – Équilibrage des rotors – Partie 32 : Convention relative aux clavettes d'arbres et aux éléments rapportés

12.3 Sens de rotation

Le refroidissement des moteurs est indépendant de leur sens de rotation, sauf pour quelques moteurs deux pôles de grosse puissance.

Lorsque l'alimentation réseau est raccordée aux bornes U, V et W du stator d'un moteur triphasé et que l'ordre des phases du réseau est L1, L2, L3, le moteur tourne dans le sens horaire vu côté accouplement. Le sens de rotation peut être inversé en permutant deux des trois conducteurs raccordés au démarreur ou au moteur.



12.4 Degrés de protection : code IP/code IK

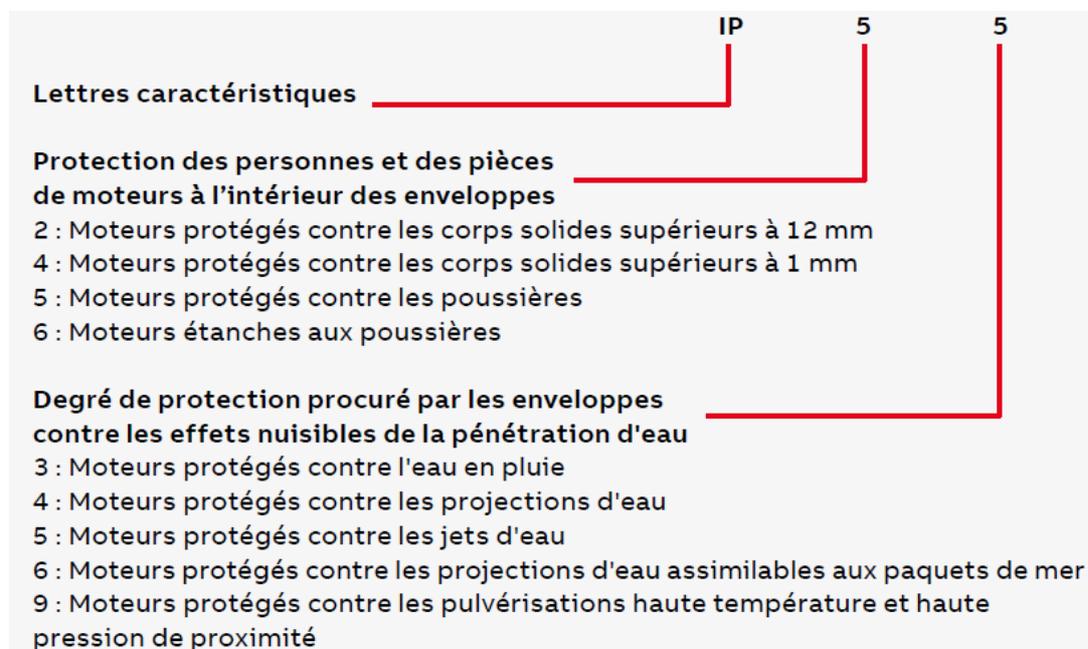
La classification des degrés de protection procurés par les enveloppes des machines tournantes se base sur :

- la norme IEC / EN 60034-5 ou IEC / EN 60529 pour le code IP
- la norme EN 50102 pour le code IK pour les moteurs standard. Essai de choc selon IEC 60079-0 pour les moteurs en atmosphères dangereuses.

Protection IP :

Protection des personnes contre les contacts accidentels avec (ou à proximité) des organes sous tension et contre les contacts accidentels avec les pièces en mouvement à l'intérieur de l'enveloppe. De même, protection de la machine contre la pénétration de corps solides.

Protection des machines contre les effets nuisibles de la pénétration d'eau.



12.5 Tolérances

Conformément à la norme IEC 60034-1, la tolérance est l'écart maximum autorisé entre le

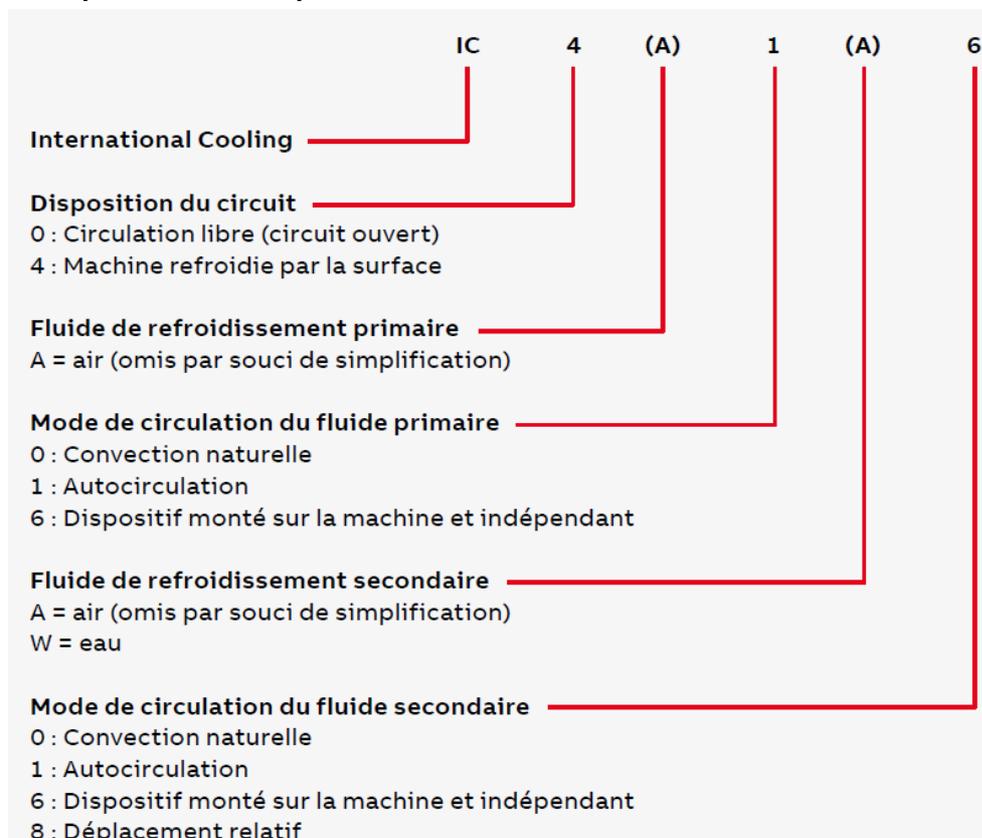
résultat de l'essai et la valeur déclarée sur la plaque signalétique (ou dans le catalogue). Les résultats des essais sont basés sur des procédures d'essai conformes aux normes IEC 60034-2-2 et IEC 60034-2-3.

	Rendement	Facteur de puissance	Courant rotor bloqué	Couple rotor bloqué	Couple minimum	Moment d'inertie	Niveau sonore
PN (kW) ≤ 150	-15 % (1-η)	-1/6 (1-cosφ)	+20 % du courant	[-15 %+25 %] du couple	-15 % de la valeur	± 10 % de la valeur	+3 dB(A)
PN (kW) > 150	-10 % (1-η)	-1/6 (1-cosφ)	+20 % du courant	[-15 %+25 %] du couple	-15 % de la valeur	± 10 % de la valeur	+3 dB(A)
Glissement							
PN (kW) < 1	± 30 %						
PN (kW) ≥ 1	± 20 %						

12.6 Refroidissement

Le système de désignation du mode de refroidissement est spécifié dans la norme IEC 60034-6.

Exemple fiche technique moteur ABB



IC 410 : moteur fermé non ventilé

IC 411 : moteur standard fermé, ventilé, refroidi par la surface

IC 416 : moteur fermé avec motoventilateur auxiliaire

IC 418 : moteur fermé, non ventilé, refroidi par la surface

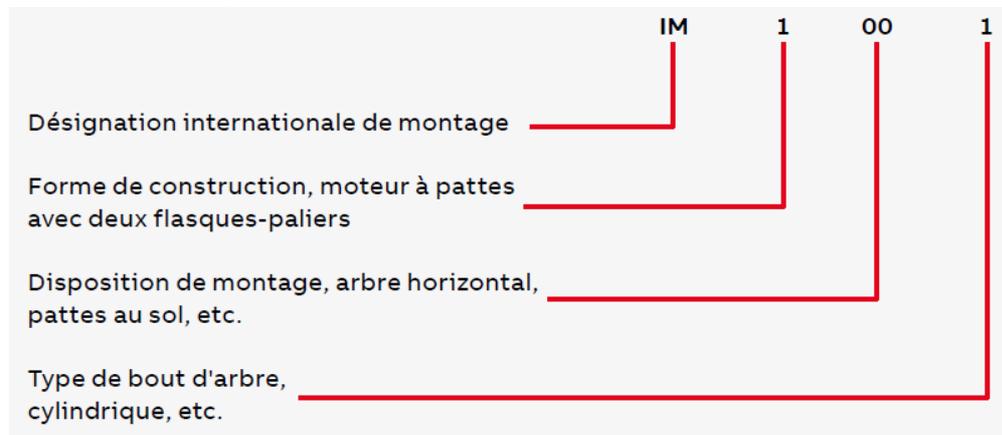
IC 31W : tuyau ou canalisation d'aspiration et de refoulement : refroidi à l'eau

Remarque :

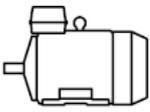
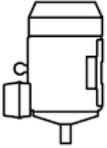
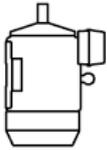
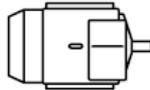
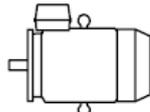
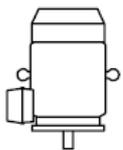
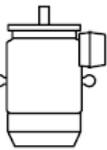
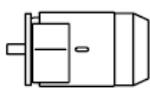
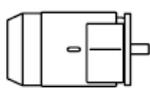
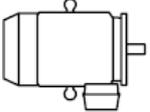
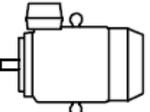
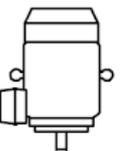
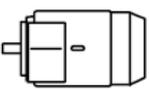
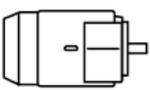
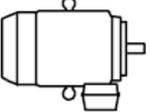
Les moteurs non ventilés peuvent fournir la même puissance de sortie que ceux avec une configuration standard (avec leur propre ventilateur) pour autant qu'ils soient en indice IC 418.

12.7 Dispositions de montage IM

Exemple de désignation selon le code II



Exemples de dispositions de montage courantes

Code I	IM B3	IM V5	IM V6	IM B6	IM B7	IM B8
Code II	IM 1001	IM1011	IM 1031	IM1051	IM 1061	IM 1071
Moteur à pattes.						
Code I	IM B5	IM V1	IM V3	”	”	”
Code II	IM 3001	IM 3011	IM3031	IM 3051	IM 3061	IM 3071
Moteur à bride, large bride à trous lisses.						
Code I	IM B14	IM V18	IM V19	”	”	”
Code II	IM 3601	IM 3611	IM 3631	IM 3651	IM 3661	IM 3671
Moteur à bride, petite bride à trous taraudés.						

” Non spécifié dans IEC 60034-7

12.8 Normes de contrôle vibratoire

12.8.1 Limites de vitesse de vibration

Selon la norme ISO 18616-1, on peut déduire les limites de vitesse de vibration admise relativement à la classe des moteurs électriques. Comme le montre le tableau suivant qui donne plus de détails sur les zones de fonctionnement normales (gris + vert), les zones de fonctionnement temporaires (jaune) et les zones de fonctionnement dangereuses (rouge) :

- A - recently commissioned motor installation
- B - unlimited satisfactory long time operation
- C - short-time operation
- D - vibration level that causes damage to the motor

RMS vibration velocity	Class I	Class II	Class III	Class IV
0.28 mm/s				
0.45 mm/s	A			
0.71 mm/s		A		
1.12 mm/s			A	A
1.8 mm/s	B			
2.8 mm/s		B		
4.5 mm/s	C		B	
7.1 mm/s		C	B	B
11.2 mm/s	D		C	C
18 mm/s		D		
28 mm/s	D		D	
45 mm/s		D		D

12.8.2 Limites d'accélération gE

Sur la base d'un exemple de la notice du constructeur SKF d'un appareil de mesure de vibration et accélération série CMAS 100 SL, on peut connaître l'accélération de la vibration des roulements exprimée en gE.

Afin de bien interpréter l'accélération gE, il est nécessaire de classer les moteurs électriques en 3 catégories différentes : CL1, CL2 et CL3.

Ceci, relativement à leur vitesse de rotation et le diamètre intérieur de l'alésage du roulement ;

Ainsi, on peut donner les seuils d'alarme et de danger de chaque classe CL comme le montre le tableau suivant :

Vitesse Alésage roulement	V < 500 (Tr/min)	500 < V < 1800 (Tr/min)	1800 < V < 3600 (Tr/min)
∅ < 20 (mm)			
20 < ∅ < 150 (mm)			CL3

			Alarme : 4 gE Danger : 10 gE
150 < Ø < 200 (mm)			
200 < Ø < 300 (mm)	CL1 Alarme : 1 gE Danger : 2 gE	CL2 Alarme : 2 gE Danger : 4 gE	
300 < Ø < 500 (mm)			
Ø > 500 (mm)			

Bibliographie

- Document constructeur WEG - Manuel d'installation, d'utilisation et de maintenance de moteurs électriques - 2021
- Document constructeur ABB - Guide moteurs basse tension - Juillet 2019
- Document constructeur SIEMENS - Démarreurs progressif et appareillage à semiconducteurs - 2016
- Document constructeur LEORY SOMER- Moteurs asynchrones triphasés fermés à cage ou à bagues – 2007
- Machines électriques - Cours et Problèmes - Claude CHEVASSU – 2012
- Problèmes corrigés d'électrotechnique – DUNOD - 2012
- Manuel de génie électrique – DUNOD - 2007
- Norme NF C 15-100, Guide 2021, Schneider Electric
- Le guide électricité - Brochure constructeur LE GRAND - 2021
- Installations et équipements électriques sur le terrain, Unités de support technique, MSF et CICR – 2017
- Induction électromagnétique - Luc Tremblay - Collège Mérici, Québec - 2022
- Brochure constructeur MANIERO ELETTRONICA Tableaux de commande et de protection pour les électropompes et les moteurs
- Technique de câblages des coffrets électriques pour les machines industrielles, RUCHE Dominique
- Le grand livre de l'électricité, Thierry Gallauziaux & David Fedullo
- Dessin électrique, Haute École HENALLUX Département bacheliers en électromécanique d'Arlon
- Les systèmes industriels, LP DESCARTES
- Schémas industriels, LP ALFRED DE MUSSET
- Recherches sur sites internet