

Le moteur brushless

Référentiel National Qualité

Audit par
BUREAU VERITAS
Certification



Qualiopi
processus certifié
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

AFPI LYON certifiée : Actions de Formation & Bilans de compétences

Les différents types de moteurs électriques

1. GENERALITES

3

2. LE MOTEUR A COURANT CONTINU

4

3. LE MOTEUR PAS A PAS

7

4. LE MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASE

13

5. LE MOTEUR ASYNCHRONE MONOPHASE

16

6. LA MACHINE SYNCHRONE

17

7. LE MOTEUR UNIVERSEL

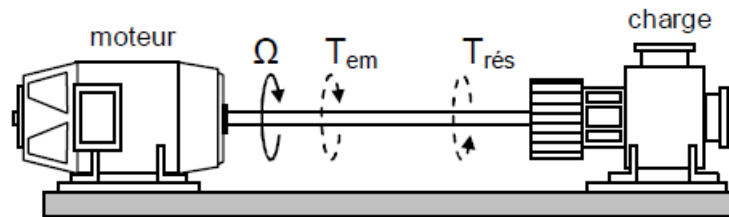
22

Les différents types de moteurs électriques

1. GENERALITES

❑ Fonction d'un moteur électrique

- ✓ Le moteur est un convertisseur d'énergie électrique en énergie mécanique.
- ✓ Un moteur est un élément qui permet de transformer une énergie Electrique (Tension, Courant) en énergie Mécanique (Rotation) caractérisée par son couple utile (T) et sa vitesse (Ω).



- **Tem:** moment du couple électromécanique
 - **Ω:** pulsation rotorique mécanique
 - **Très:** couple résistant.
- ✓ Il faut donc agir sur le couple pour agir sur la vitesse

❑ Les différents types de moteurs électriques

✓ Le moteur à courant continu:

- C'est un moteur que l'on alimente avec une tension continue.
- Il peut être de 2 types :
 - ❖ **moteur à aimant permanent** (le stator est constitué par un aimant).
 - ❖ **moteur universel** (le stator est constitué par un bobinage alimenté en série avec l'induit. Ce moteur fonctionne aussi en alternatif).

✓ Le moteur pas à pas :

- Le moteur pas à pas est un moteur qui tourne en fonction d'impulsions électriques reçues dans ses bobinages. L'angle de rotation minimal entre deux modifications des impulsions électriques s'appelle un pas.

✓ Le moteur asynchrone:

- Le stator bobiné est composé de trois bobines qui créent 3 champs magnétiques. Ces bobines étant alimentées par un système de courants triphasés créent chacune un champ magnétique variable. La composition de ces trois champs magnétiques crée un champ magnétique tournant qui entraîne le rotor en rotation par la création d'une force électromagnétique.

✓ La machine synchrone:

- L'inducteur alimenté en courant continu est au rotor. Le stator est alimenté en courant alternatif. **La machine fonctionne en moteur.**
- Si ce moteur est entraîné par une turbine, il produit de l'électricité. On parle d'un alternateur. **La machine fonctionne en génératrice.**

2. LE MOTEUR A COURANT CONTINU

❑ Constitution

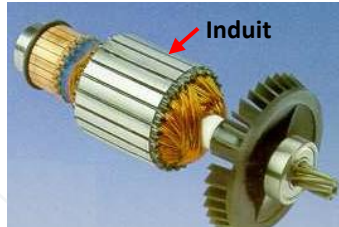
- ✓ Le moteur à courant continu est composé de trois parties principales :
 - l'inducteur
 - l'induit
 - le dispositif collecteur / balais

- ✓ **L'inducteur:**



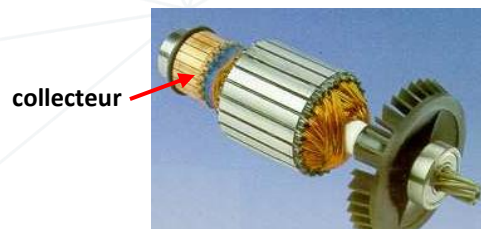
- C'est un aimant ou un électroaimant qui constitue le circuit d'excitation.
 - Il est situé sur la partie fixe (stator).
 - Il sert à créer un champ magnétique (champ "inducteur") dans le rotor.

- ✓ **L'induit:**



- L'induit est situé au rotor (partie tournante).
 - C'est un bobinage parcouru par un courant continu appelé « courant d'induit ».
 - L'induit est le circuit de puissance.

- ✓ **Le collecteur et les balais:**

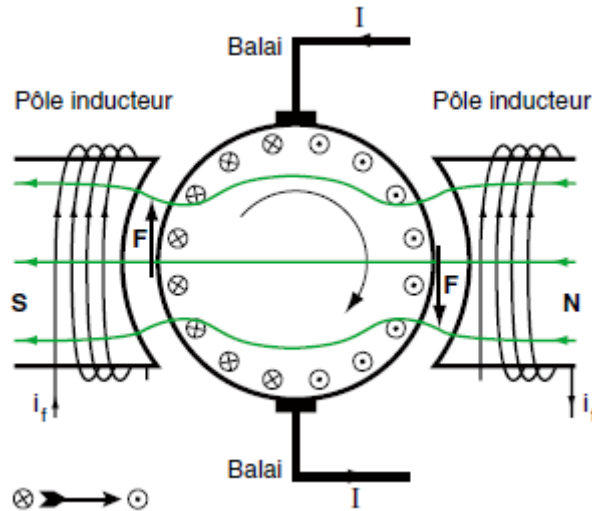


- Le collecteur est un ensemble de lames de cuivre où sont reliées les extrémités du bobinage de l'induit.
 - Les balais (ou charbons) sont situés au stator et frottent sur le collecteur en rotation.
 - Le dispositif collecteur / balais permet donc de faire circuler un courant dans l'induit.

Les différents types de moteurs électriques

2. LE MOTEUR A COURANT CONTINU

❑ Fonctionnement



- ✓ Lorsque l'inducteur est alimenté, il crée un champ magnétique (flux d'excitation) dans l'entrefer, dirigé suivant les rayons de l'induit.
- ✓ Ce champ magnétique « rentre » dans l'induit du côté du pôle Nord de l'inducteur et « sort » de l'induit du côté du pôle Sud de l'inducteur.
- ✓ Quand l'induit est alimenté, ses conducteurs situés sous un même pôle inducteur (d'un même côté des balais) sont parcourus par des courants de même sens et sont soumis à une force.
- ✓ Les conducteurs situés sous l'autre pôle sont soumis à une force de même intensité et de sens opposé.
- ✓ Les deux forces créent un couple qui fait tourner l'induit du moteur.
- ✓ Le fonctionnement d'un moteur à courant continu est réversible :
 - si la charge s'oppose au mouvement de rotation (charge dite résistante), le moteur fournit un couple et fonctionne en « moteur »,
 - si la charge est telle qu'elle tend à faire tourner le moteur (charge dite entraînante) ou qu'elle s'oppose au ralentissement (phase d'arrêt d'une charge présentant une certaine inertie), le moteur fournit de l'énergie électrique et fonctionne en « génératrice ».

❑ Variation de vitesse

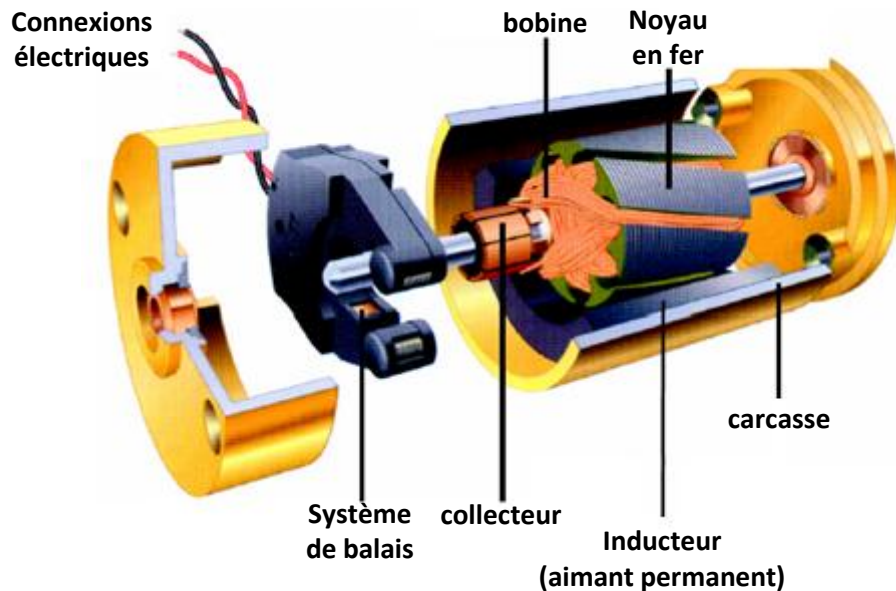
- ✓ Deux méthodes permettent de faire croître la vitesse:
 - soit augmenter la tension d'alimentation à excitation constante : c'est le fonctionnement dit « à couple constant » ;
 - soit diminuer le flux d'excitation, donc le courant d'excitation, en maintenant la tension d'alimentation constante : c'est le fonctionnement dit en régime « défluxé » ou « à puissance constante ». Ce fonctionnement impose que le couple soit décroissant avec l'augmentation de vitesse .

Les différents types de moteurs électriques

2. LE MOTEUR A COURANT CONTINU

❑ Exemple

- ✓ Moteur à courant continu conventionnel



❑ Avantages

- ✓ Faible coût.
- ✓ 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

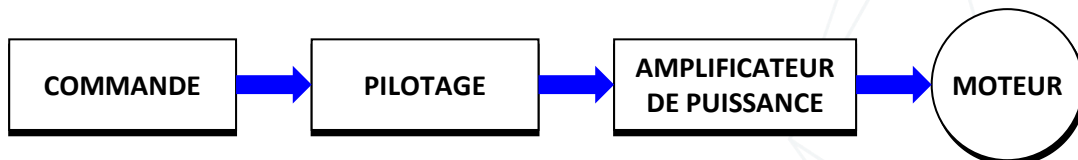
- ✓ Faible puissance.
- ✓ Usure des balais.

Les différents types de moteurs électriques

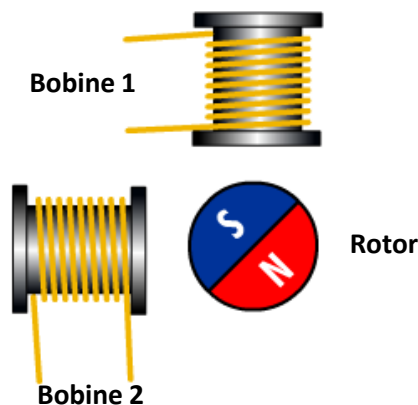
3. LE MOTEUR PAS A PAS

□ Introduction

- ✓ Un moteur pas à pas transforme des impulsions de commande en une rotation de n° pas du rotor : il permet donc un positionnement précis sans boucle d'asservissement (via potentiomètre, codeur ...).
- ✓ **Principe de commande d'un moteur pas à pas:**



- ✓ Les moteurs pas à pas sont généralement constitués de deux bobines et d'un rotor.



- ✓ Le moteur pas à pas est un moteur qui tourne en fonction d'impulsions électriques reçues dans ses bobinages.
- ✓ A chaque impulsion du signal de commande correspond au niveau du rotor un déplacement angulaire défini appelé « pas » ou « incrément mécanique ».
- ✓ On caractérise un moteur par le nombre de pas par tour (c'est à dire pour 360°). Les valeurs courantes sont 48, 100 ou 200 pas par tour.
- ✓ L'électronique actuelle permet de piloter la chronologie de ces impulsions avec beaucoup de précision et d'en comptabiliser le nombre.
- ✓ Le moteur pas à pas et son circuit de commande permettent donc la rotation d'un axe avec beaucoup de précision en vitesse et en amplitude.
- ✓ On distingue 3 groupes de moteur pas à pas :
 - les moteurs à aimant permanent
 - les moteurs à reluctance variable
 - les moteurs hybrides

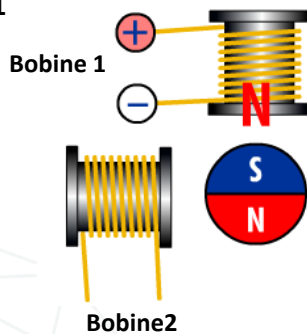
Les différents types de moteurs électriques

3. LE MOTEUR PAS A PAS

❑ Principe de fonctionnement

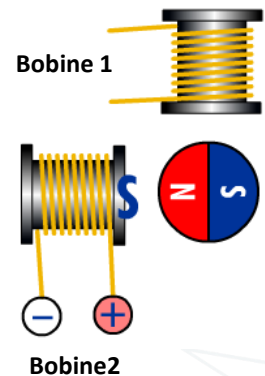
- ✓ Les deux bobines peuvent créer un champ magnétique dont l'orientation dépend de leur alimentation.
- ✓ Le passage d'un courant, successivement dans chaque bobinage, fait tourner l'aimant.
- ✓ Le principe de fonctionnement des moteurs pas à pas repose sur la commutation successive des enroulements stator (ou phase). Pour cela, une impulsion électrique est traduite par un séquenceur agissant sur une électronique de commutation (drivers ou transistors de puissance) qui distribue les polarités dans les enroulements.
- ✓ Une seule commutation provoque un seul pas quelle que soit la durée de l'impulsion (supérieure à une valeur minimale).
- ✓ **Exemple:** moteur de 4 pas par tour.

a) PAS n°1



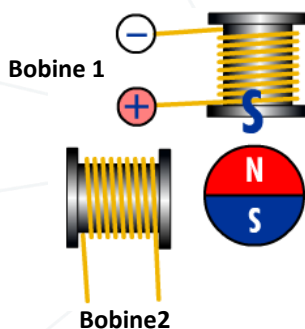
- ❖ La bobine 1 est alimentée afin de présenter le pôle Nord au rotor.
- ❖ La bobine 2 n'est pas alimentée
- ❖ Le rotor tourne pour s'orienter vers ce pôle Nord

b) PAS n°2



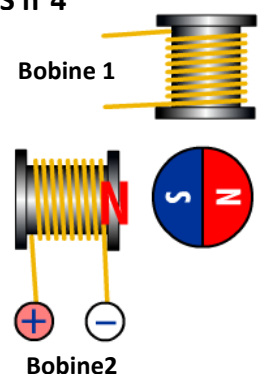
- ❖ La bobine 2 est alimentée afin de présenter le pôle Sud au rotor.
- ❖ La bobine 1 n'est pas alimentée
- ❖ Le rotor tourne pour s'orienter vers ce pôle Sud

c) PAS n°3



- ❖ La bobine 1 est alimentée avec une polarité inverse afin de présenter le pôle Sud au rotor.
- ❖ La bobine 2 n'est pas alimentée
- ❖ Le rotor tourne pour s'orienter vers ce pôle Sud

d) PAS n°4



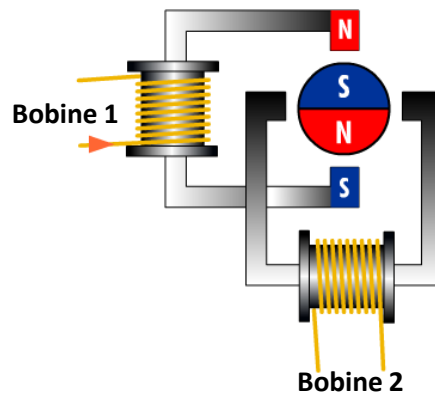
- ❖ La bobine 2 est alimentée avec une polarité inverse afin de présenter le pôle Nord au rotor.
- ❖ La bobine 1 n'est pas alimentée
- ❖ Le rotor tourne pour s'orienter vers ce pôle Nord

Les différents types de moteurs électriques

3. LE MOTEUR PAS A PAS

❑ Le moteur à aimant permanent

- ✓ Un aimant permanent est solidaire de l'axe du moteur (rotor). Des bobines excitatrices sont placées sur la paroi du moteur (stator) et sont alimentées chronologiquement. Le rotor s'oriente suivant le champ magnétique créé par les bobines.

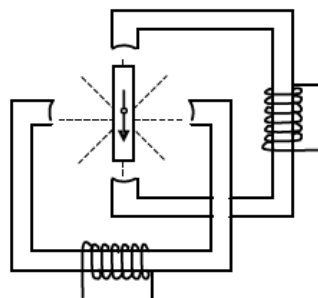


✓ Caractéristiques:

- Faible résolution : nombre de pas / tour peu important (jusqu' à 100 pas/tour).
- Couple d'utilisation plus élevé par rapport au moteur à reluctance variable.
- Présence d'un couple résiduel lorsque le moteur est hors tension.

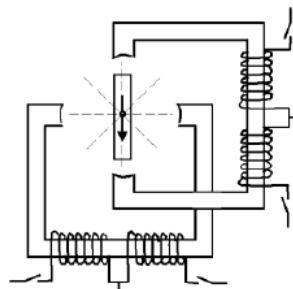
✓ Le moteur bipolaire:

- Les enroulements du stator n'ont pas de point milieu. Chaque borne de chaque enroulement est alimentée par une polarité positive puis négative (d'où le terme bipolaire).



✓ Le moteur unipolaire:

- Les enroulements sont à point milieu. Les bornes sont toujours alimentées par une polarité de même signe (d'où le terme unipolaire).

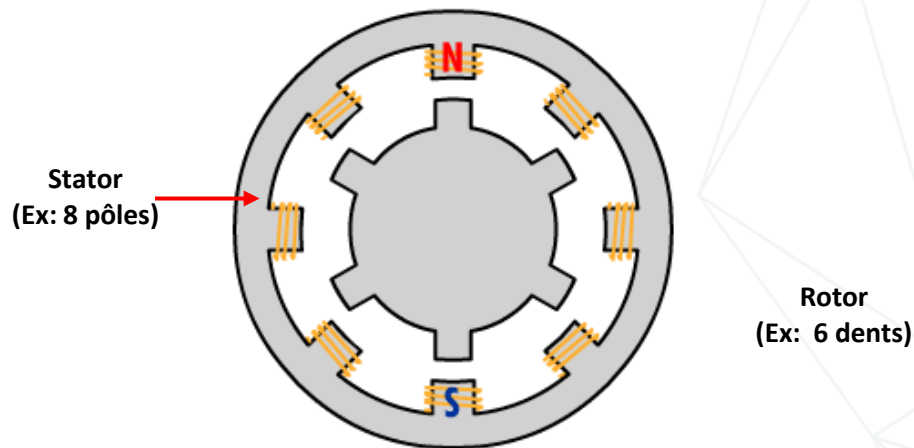


Les différents types de moteurs électriques

3. LE MOTEUR PAS A PAS

❑ Le moteur à réluctance variable

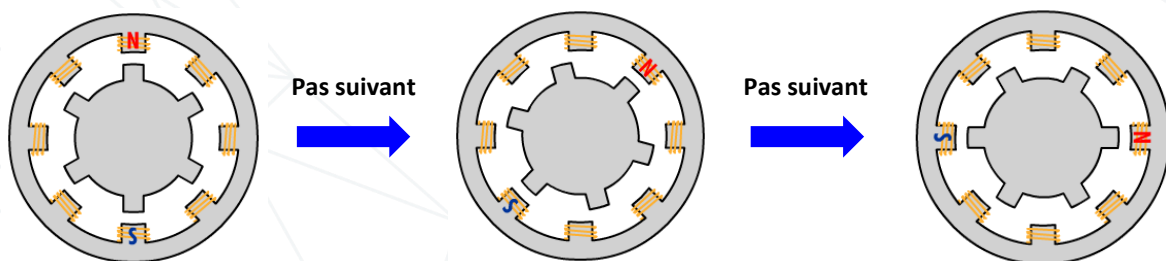
- ✓ Le rotor n'est pas constitué d'un aimant permanent mais est en acier doux.
- ✓ Le rotor possède un nombre de dents inférieur au nombre de pôles du stator.



✓ Fonctionnement:

- A chaque impulsion de la commande, la phase suivante du stator est alimentée.
- Les dents du rotor vont chercher à s'aligner avec la bobine alimentée qui crée le champ magnétique.

➤ Exemple:



✓ Caractéristiques:

- Bonne résolution.
- Construction simple mais délicate.
- Couple développé faible.
- Absence de couple résiduel avec le moteur hors tension.

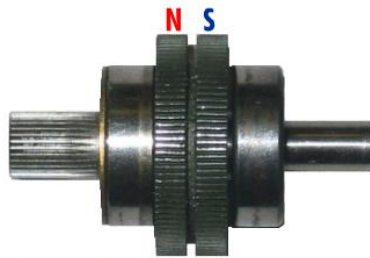
3. LE MOTEUR PAS A PAS

❑ Le moteur hybride

- ✓ C'est un moteur qui superpose le principe de fonctionnement des moteurs à aimant permanent et à réluctance variable et combine leurs avantages.
- ✓ Le stator est toujours constitué de bobinages répartis autour du rotor.

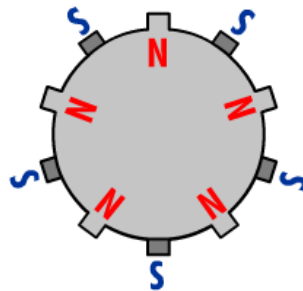


- ✓ Le rotor est constitué de l'assemblage de deux pièces dentées renfermant entre elles un aimant créant ainsi un pôle Nord sur l'une et un pôle Sud sur l'autre.



✓ **Fonctionnement:**

- En faisant tourner l'alimentation des bobines du stator, la paire de pôles du rotor la plus proche du nouveau champ magnétique va chercher à s'aligner avec lui, provoquant la rotation, selon le même principe que dans le moteur à réluctance variable.
- **Exemple:** rotor à 5 paires de pôles.



✓ **Caractéristiques:**

- Bonne résolution.
- Couple d'utilisation élevé.
- Grande fréquence de commande.

3. LE MOTEUR PAS A PAS

❑ Le couple

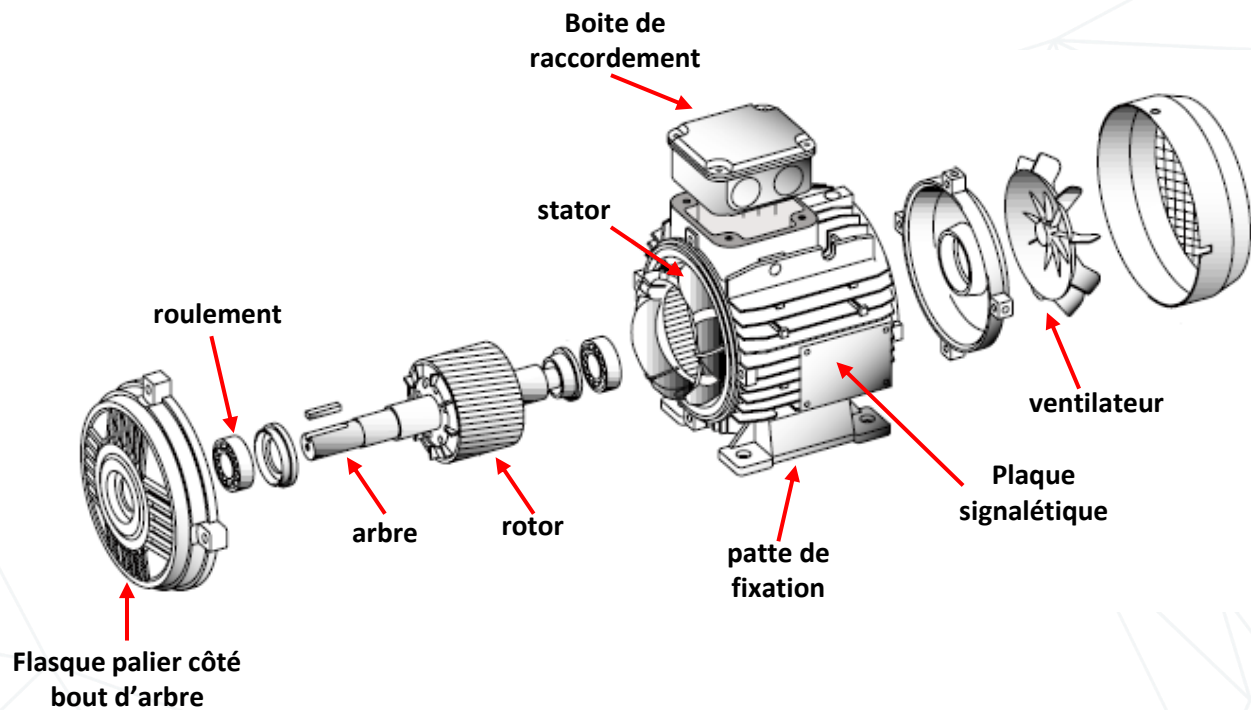
- ✓ **Le couple du moteur dépend:**
 - de l'intensité traversant les bobines,
 - de sa position angulaire à un instant donné quand il passe d'une bobine à l'autre,
 - de la vitesse de pilotage.
- ✓ Le couple de maintien est le couple mesuré à l'arrêt, les bobines étant alimentées.
- ✓ Le couple de détente est le couple quand les bobines ne sont pas alimentées.
- ✓ Le couple dépend aussi du mode fonctionnement. En mode biphasé, le champ créé dans les bobines est 1,4 fois plus grand quand mode monophasé, le couple résultant est donc plus grand.

❑ La vitesse

- ✓ La vitesse de rotation est fonction de la fréquence des impulsions.
- ✓ On définit une vitesse limite au démarrage et une vitesse limite de fonctionnement, vitesses au-delà desquelles le moteur décroche. Cette limitation de vitesse est surtout due à l'effet de self des bobines.
- ✓ Le positionnement angulaire présente une oscillation à chaque pas. Le rotor dépasse la position souhaitée puis revient en oscillant de part et d'autre de la position. Ce défaut est gênant à certaines vitesses.

4. LE MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASE

❑ Constitution



- ✓ Un moteur asynchrone triphasé comporte deux parties principales :
 - un inducteur ou stator,
 - un induit ou rotor.

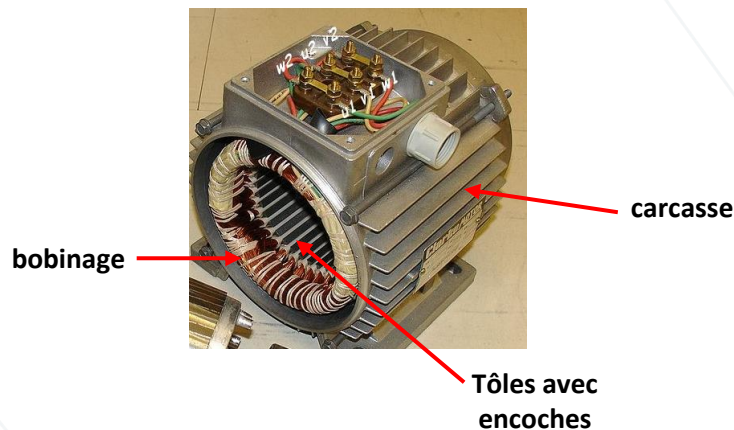
Les différents types de moteurs électriques

4. LE MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASE

❑ Constitution

✓ Le stator

- C'est la partie fixe du moteur. Une carcasse en fonte ou en alliage léger renferme une couronne de tôles minces en acier au silicium. Les tôles sont isolées entre elles par un vernis isolant.
- Le « feuilletage » du circuit magnétique réduit les pertes magnétiques
- Les tôles sont munies d'encoches dans lesquelles prennent place les enroulements statoriques destinés à produire le champ tournant.
- Chaque enroulement est constitué de plusieurs bobines. Le mode de couplage de ces bobines entre elles définit le nombre de paires de pôles du moteur, donc la vitesse de rotation.



✓ Le rotor

- C'est l'élément mobile du moteur. Comme le circuit magnétique du stator, il est constitué d'un empilage de tôles minces isolées entre elles et formant un cylindre claveté sur l'arbre du moteur.
- Cet élément, de par sa technologie, permet de distinguer deux familles de moteurs asynchrones :
 - ❖ ceux dont le rotor est dit « à cage » :



- ❖ et ceux dont le rotor bobiné est dit « à bagues » :

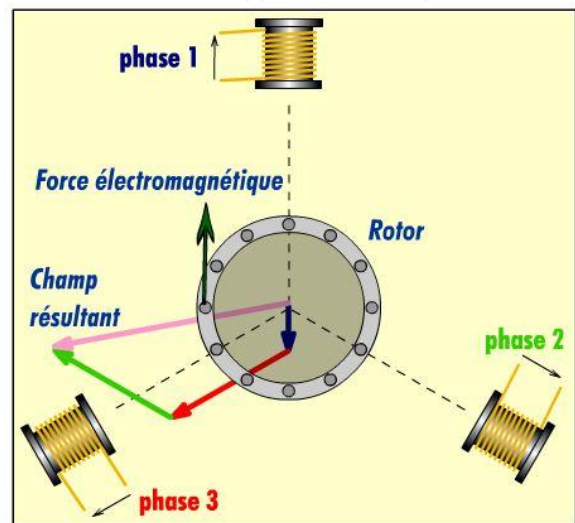
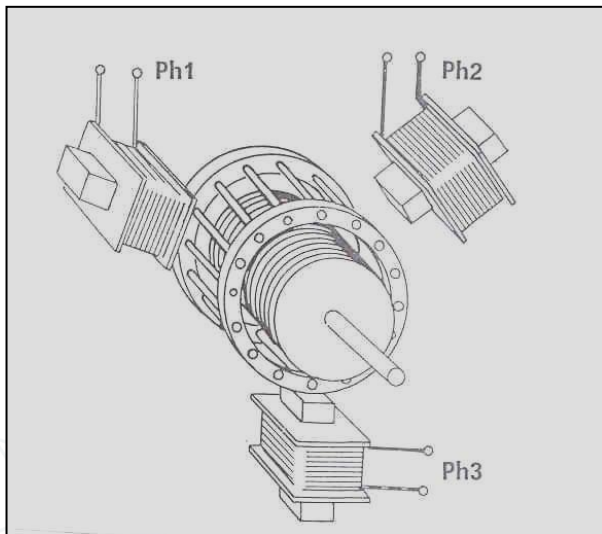


Les différents types de moteurs électriques

4. LE MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASE

❑ Principe de fonctionnement

- ✓ Le stator bobiné est composé de trois bobines qui créent 3 champs magnétiques.
- ✓ Ces bobines étant alimentées par un système de courants triphasés créent chacune un champ magnétique variable.
- ✓ La composition de ces trois champs magnétiques crée un champ magnétique tournant qui entraîne le rotor en rotation par la création d'une force électromagnétique.



❑ Avantages

- ✓ Robuste, peu d'entretien.
- ✓ Alimentation par le réseau triphasé.

❑ Inconvénients

- ✓ Pointe de courant au démarrage.
- ✓ Dépendance entre la vitesse et la charge

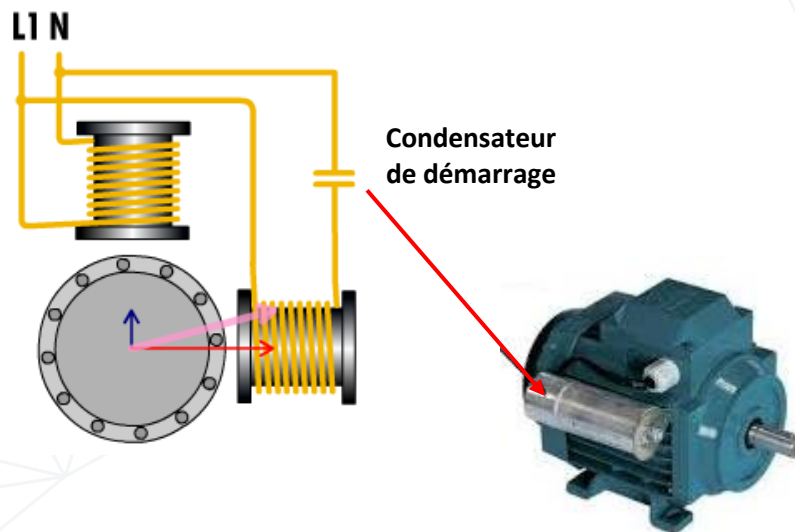
5. LE MOTEUR ASYNCHRONE MONOPHASE

❑ Constitution

- ✓ Le moteur asynchrone monophasé, bien que l'industrie que son homologue triphasé, représente néanmoins une part d'applications non négligeable dans les petites puissances et dans les applications du bâtiment qui utilisent le réseau monophasé 230 V.
- ✓ Ce moteur est très similaire au moteur asynchrone, sauf qu'il ne comporte qu'un seul enroulement au stator et qu'il est alimenté en tension monophasée.
- ✓ **Le stator:**
 - Il comporte un nombre pair de pôles et ses bobinages sont raccordés sur le réseau d'alimentation.
- ✓ **Le rotor:**
 - Il est le plus souvent à cage d'écureuil.

❑ Principe de fonctionnement

- ✓ Le champ magnétique produit par le stator est un champ pulsant, et non pas un champ tournant. Le rotor est donc incapable de démarrer.
- ✓ Dans les moteurs industriels, on installe au stator un 2^{ème} enroulement perpendiculaire à l'enroulement principal et alimenté en série avec un condensateur, appelé « condensateur de démarrage ».



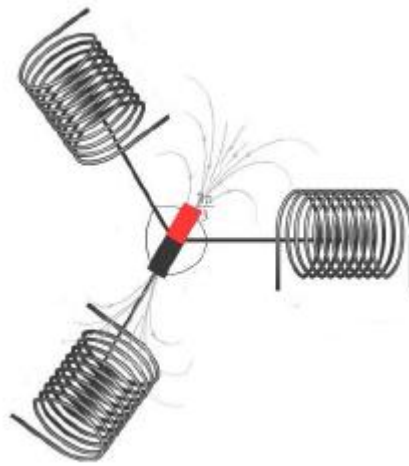
- ✓ **Démarrage:**
 - L'alimentation du 2^{ème} enroulement est donc déphasé de 90° par rapport à l'enroulement principal et permet de créer un couple de démarrage.
 - Lorsque le moteur a atteint sa vitesse nominale l'enroulement auxiliaire n'est plus utile, il peut toutefois rester sous tension (moteur à condensateur permanent) ou être éliminé par contact centrifuge.

6. LA MACHINE SYNCHRONE

❑ Constitution

- ✓ Autrefois utilisés quasi exclusivement en alternateur, le développement de l'électronique de puissance et la généralisation des aimants comme inducteur permettent aujourd'hui d'employer les machines synchrones en tant que moteurs dans une large gamme de puissance.
- ✓ Comme tout moteur, la machine synchrone est constituée d'une partie mobile : le rotor et d'une partie fixe : le stator.
- ✓ Le moteur synchrone se compose, comme le moteur asynchrone, d'un stator et d'un rotor séparés par l'entrefer. Il s'en différencie par le fait que le flux dans l'entrefer n'est pas dû qu'à une composante du courant statorique : il est créé par des aimants ou par le courant inducteur fourni par une source à courant continu extérieure qui alimente un enroulement placé dans le rotor.

- ✓ **Le stator (induit):**



- Le stator est habituellement **l'induit** (siège de la transformation de puissance).
- Le stator comprend une carcasse et un circuit magnétique généralement constitués de tôles d'acier au silicium et d'un bobinage triphasé analogue à celui d'un moteur asynchrone alimenté en courant alternatif triphasé pour produire un champ tournant à la fréquence de rotation $n = f/p$ et entraîne en rotation le rotor (avec f la fréquence de l'alimentation des bobinages et p le nombre de paires de pôles).
- Les bobinages sont insérés dans des encoches au sein de culasse en ferrite.

Les différents types de moteurs électriques

6. LA MACHINE SYNCHRONE

❑ Constitution

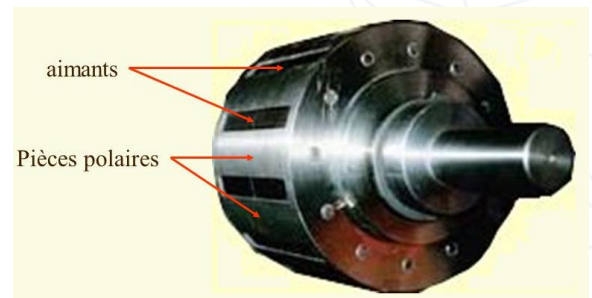
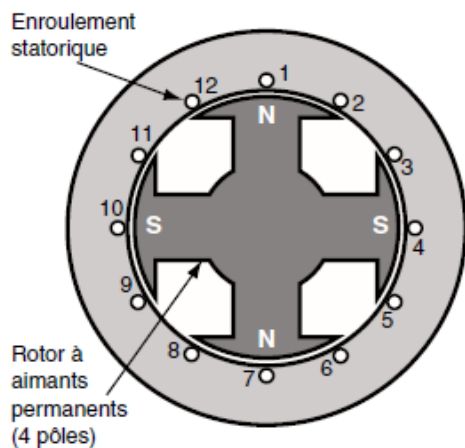
✓ Le rotor (inducteur):

- Le rotor porte des aimants ou des bobines d'excitation parcourues par un courant continu qui créent des pôles Nord et Sud intercalés.
- Le rotor, à la différence des machines synchrones tourne sans glissement à la vitesse du champ tournant.

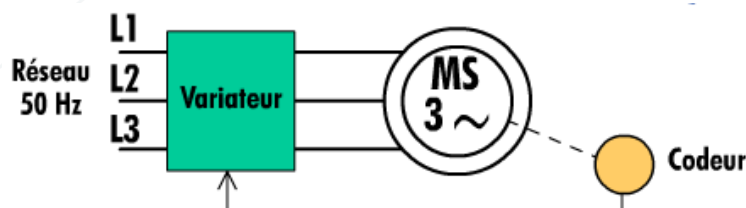
✓ Il existe donc deux types distincts de rotors :

- les rotors à aimants,
- les rotors bobinés.

✓ Les rotors à aimants permanents:



- Aucune alimentation électrique n'est nécessaire pour le rotor.
- le rotor du moteur est équipé d'aimants permanents, en général en terre rare pour obtenir un champ élevé dans un volume réduit.
- Lorsque l'inducteur est à aimant permanent, que le stator est alimenté par un variateur commandé par un capteur placé sur l'arbre (codeur) ; on parle d'un moteur brushless.

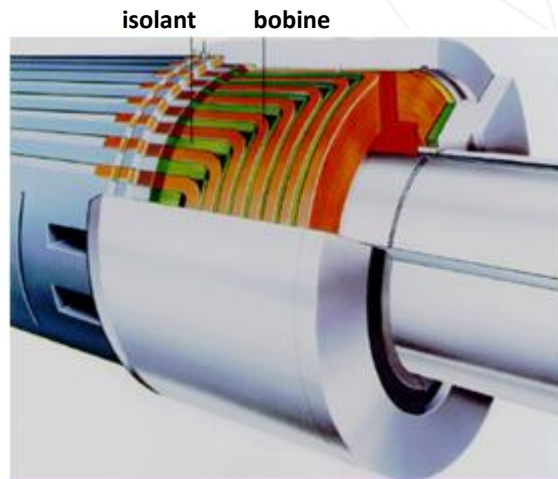
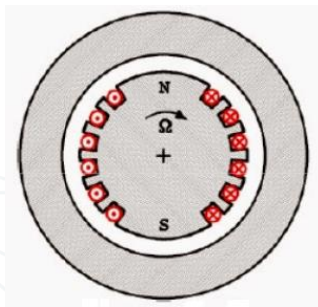


6. LA MACHINE SYNCHRONE

❑ Constitution

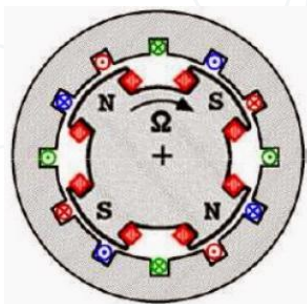
✓ les moteurs à rotor bobiné:

- Le rotor est également un circuit magnétique circulaire. Un enroulement continu multipolaire est placé dans les encoches.
- Ils sont réversibles et peuvent fonctionner en générateurs (alternateurs) ou en moteurs.
- Pendant longtemps ces machines ont surtout été utilisées en alternateurs. Leur usage en moteur était pratiquement confiné aux applications où il était nécessaire d'entraîner des charges à vitesse fixe en dépit des variations relativement importantes de leur couple résistant.
- **Les rotors à pôles lisses:**



- ❖ Les pôles lisses sont utilisés pour les grandes vitesses (1500t/min, 3000t/min).

➤ Les rotors à pôles saillants:



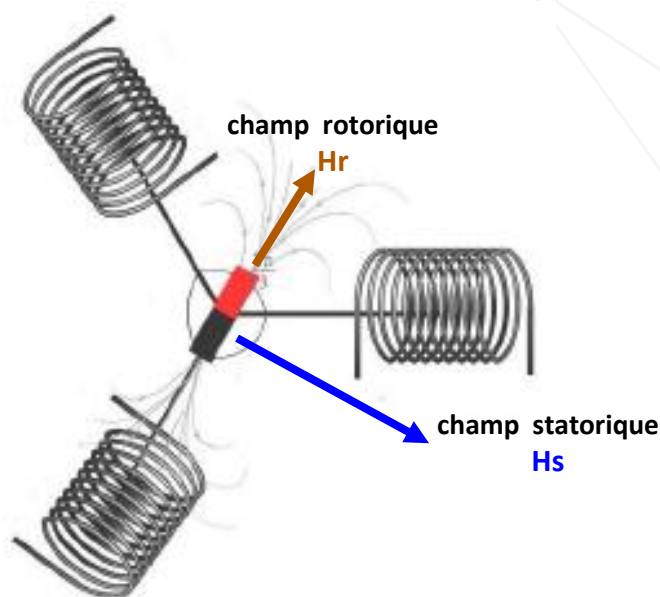
- ❖ Les pôles sont solidaires de l'arbre.
- ❖ Chaque pôle possède un enroulement à courant continu connecté aux bagues.

6. LA MACHINE SYNCHRONES

❑ Principe de fonctionnement

✓ Fonctionnement d'un moteur synchrone à aimants permanents au rotor:

- Le stator alimenté par un système de tensions triphasé crée un champ statorique H_s tournant dans l'entrefer. Ce champ magnétique tourne à la vitesse de f/p tours par secondes avec f fréquence d'alimentation des bobinages, et p le nombre de paires de pôles.
- Le rotor, composé de p aimants permanents, produit un champ rotorique H_r .
- Le rotor va alors s'aligner avec le champ tournant. Le rotor tourne ainsi à la même que le champ tournant.



- Le synchronisme des champs magnétiques induit et inducteur impose une procédure spécifique de démarrage. Un moteur synchrone ne peut démarrer directement à pleine tension depuis le réseau de fréquence 50Hz car le rotor a une vitesse nulle au démarrage.
- Ces moteurs peuvent accepter des courants de surcharge importants pour réaliser des accélérations très rapides. Ils sont toujours associés à un variateur de vitesse et ces ensembles moto-variateurs sont destinés à des marchés spécifiques comme ceux des robots ou des machines-outils pour lesquels un moindre volume des moteurs, les accélérations sont des impératifs.

6. LA MACHINE SYNCHRONE

❑ Principe de fonctionnement

✓ Fonctionnement d'une machine synchrone à rotor bobiné:

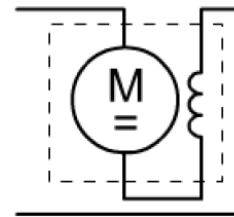
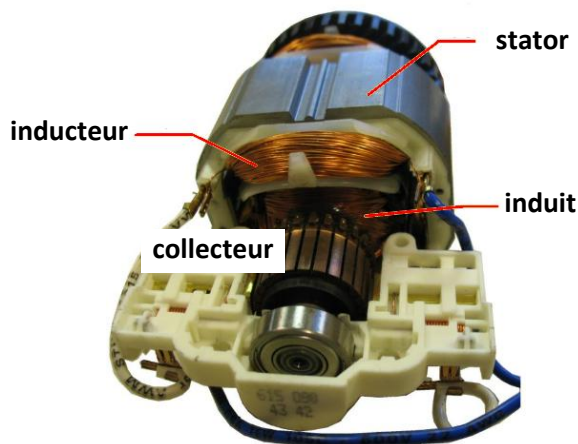
- Les machines synchrones à rotor bobiné sont réversibles et peuvent fonctionner en générateurs (alternateurs) ou en moteurs.
- Pendant longtemps ces machines ont surtout été utilisées en alternateurs. Leur usage en moteur était pratiquement confiné aux applications où il était nécessaire d'entraîner des charges à vitesse fixe en dépit des variations relativement importantes de leur couple résistant.
- Le rotor est alimenté par un courant continu qui génère le flux.
- Le rotor est entraîné à vitesse constante.
- Le champ tournant induit une tension dans les enroulements du stator.
- La fréquence de cette tension induite dépend de la vitesse de rotation.

Les différents types de moteurs électriques

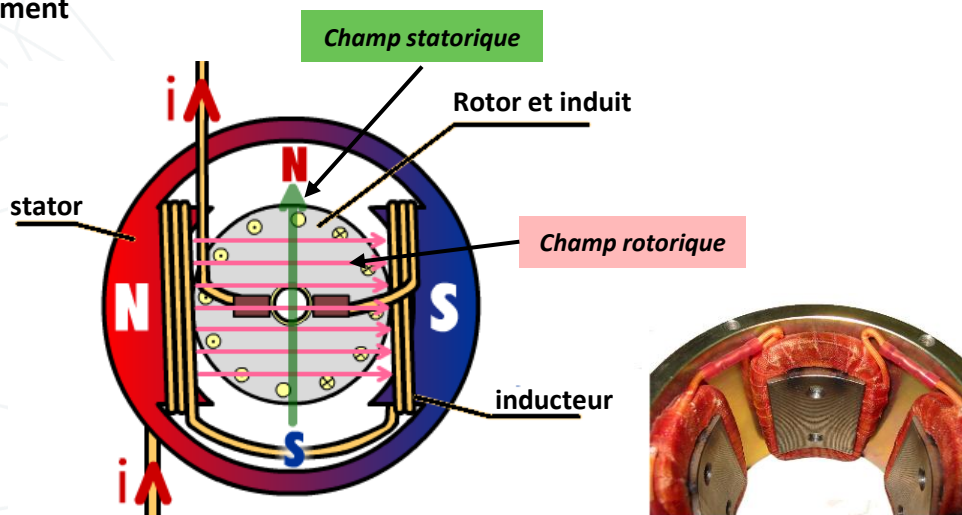
7. LE MOTEUR UNIVERSEL

❑ Description

- ✓ Un moteur universel est un moteur qui peut être alimenté en courant continu ou en courant alternatif.
- ✓ C'est un moteur à courant continu dont l'inducteur est branché en série avec l'induit.
- ✓ Ce moteur est très utilisé dans les jouets et le petit électroménager.



❑ Fonctionnement



- ✓ Lorsque l'inducteur est alimenté, il crée un champ magnétique statorique dans l'entrefer.
- ✓ L'induit est également alimenté puisqu'il est branché en série avec l'inducteur. Ses conducteurs situés sous le même pôle sont parcourus par des courants de même sens. Ils créent un champ magnétique perpendiculaire au champ statorique qui va chercher à s'aligner avec le champ rotorique.
- ✓ Il se crée un couple qui fait tourner l'induit.