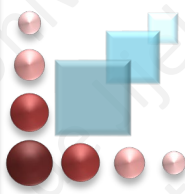


Introduction

Comme pour tous les moteurs, La rotation des moteurs synchrones est établie par l'interaction d'un champ rotorique et d'un champ statorique. Les moteurs synchrones se caractérisent alors par une vitesse du rotor égale à la vitesse du champ tournant statorique ; d'où le nom "Moteurs synchrones"



Le synchro-transmetteur

La transmission d'une information analogique tel un angle de rotation peut être réalisée à l'aide d'un synchro transmetteur.

Principe

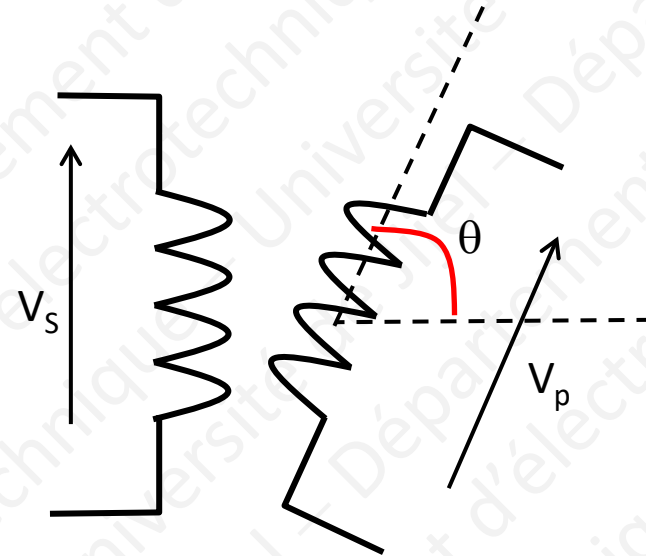
Si on considère un transformateur à deux enroulements dont l'un est libre de tourner suivant un axe de rotation.

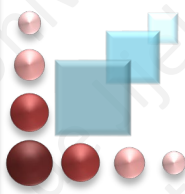
Si le primaire est alimenté à travers une tension alternative

$$V_p = \sqrt{2}V \sin(\omega_p t)$$

La tension induite au secondaire dépend du coefficient de couplage qui lui varie avec l'angle de rotation

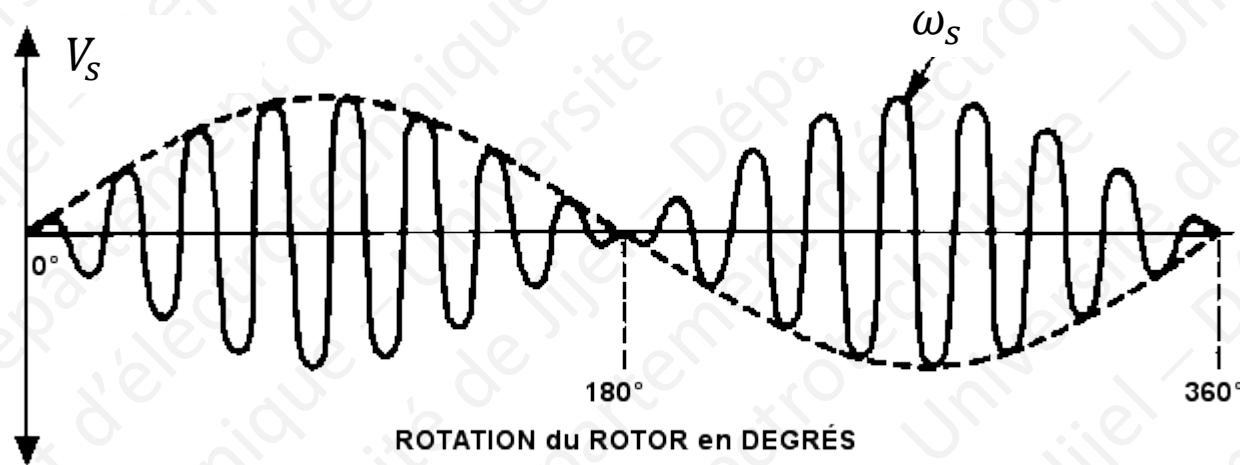
$$V_s = \sqrt{2}VK \sin(\theta) \sin(\omega_p t)$$





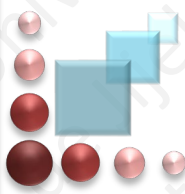
Le synchro-transmetteur

L'amplitude de la tension de sortie est modulée par la position du primaire.



On remarque que l'amplitude de la tension du secondaire donne une image de la position du rotor. On peut remarquer cependant, que le secondaire ne fait pas la différence entre les angles situés dans la plage $0^\circ - 180^\circ$ et ceux situés dans la plage $180^\circ - 360^\circ$

Pour résoudre ce problème on utilise trois enroulements secondaires décalés de 120°



Le synchro-transmetteur

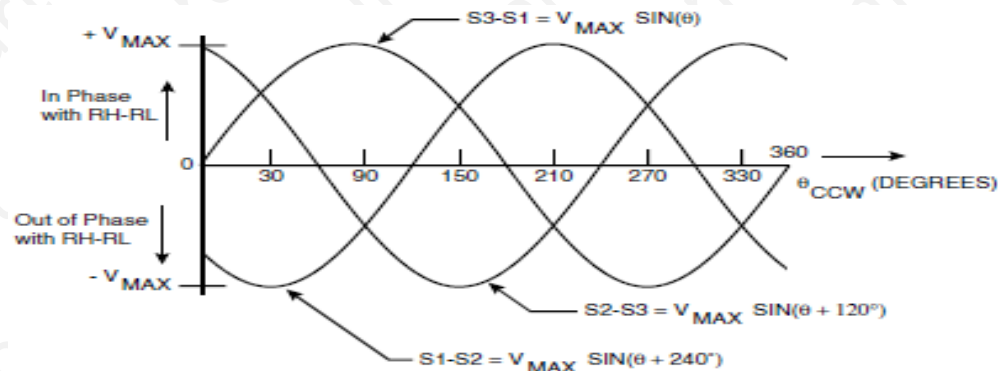
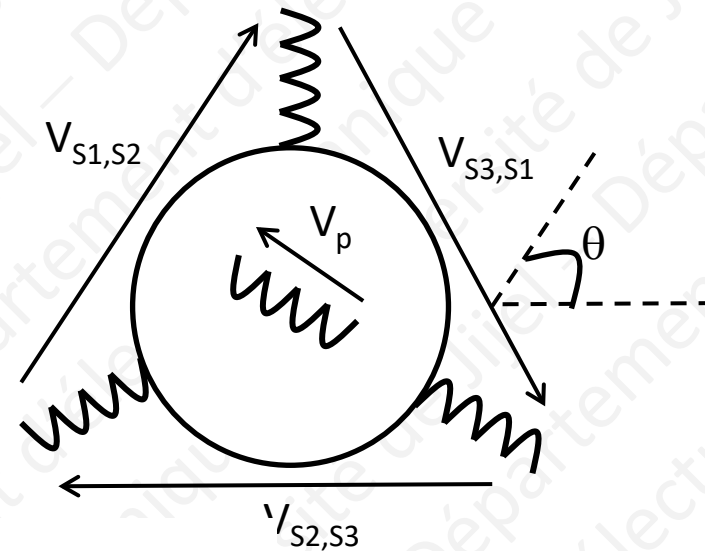
Dans ce cas, le synchro ressemble à un moteur éclectique dont le primaire est composé d'un rotor bobiné alimenté, à travers des bagues, par une tension alternative dont la fréquence est généralement importante (400 Hz). Le secondaire est représenté par le stator composé de trois enroulements décalé physiquement d'un angle de 120° .

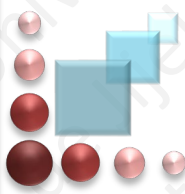
On a alors

$$V_{s3,s1} = \sqrt{2}VK \sin(\theta) \sin(\omega_p t)$$

$$V_{s1,s2} = \sqrt{2}VK \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \sin(\omega_p t)$$

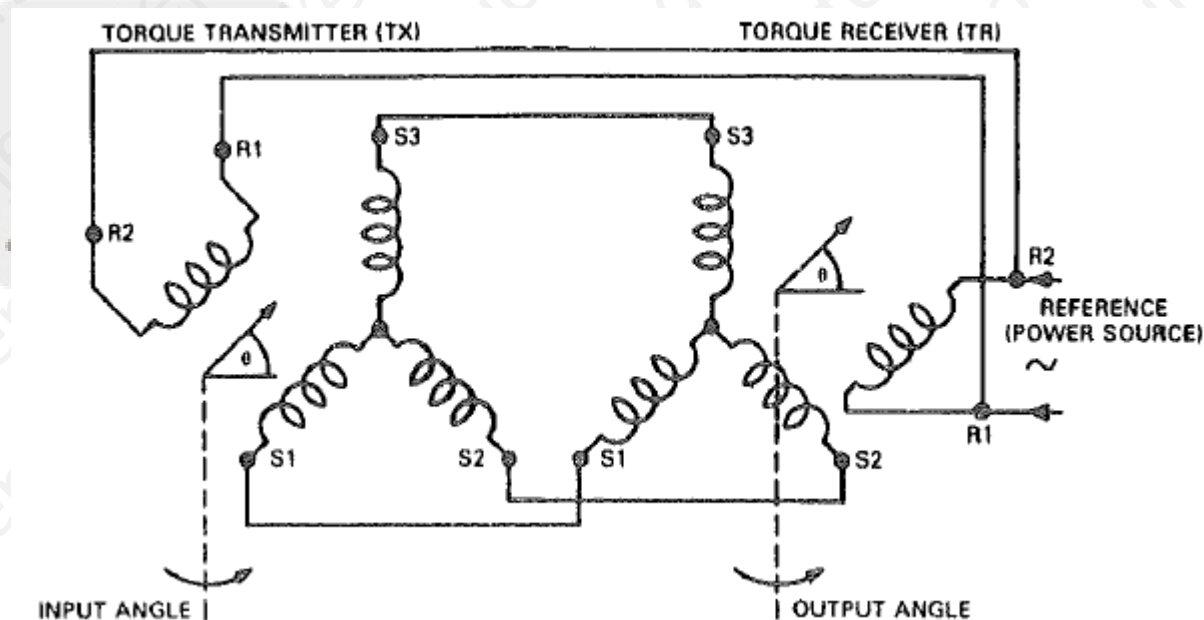
$$V_{s2,s3} = \sqrt{2}VK \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \sin(\omega_p t)$$



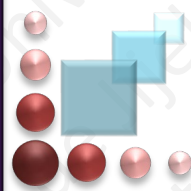


Le synchro-transmetteur

On peut alors utiliser deux synchro montés en cascade. L'un constitue le transmetteur et l'autre le récepteur

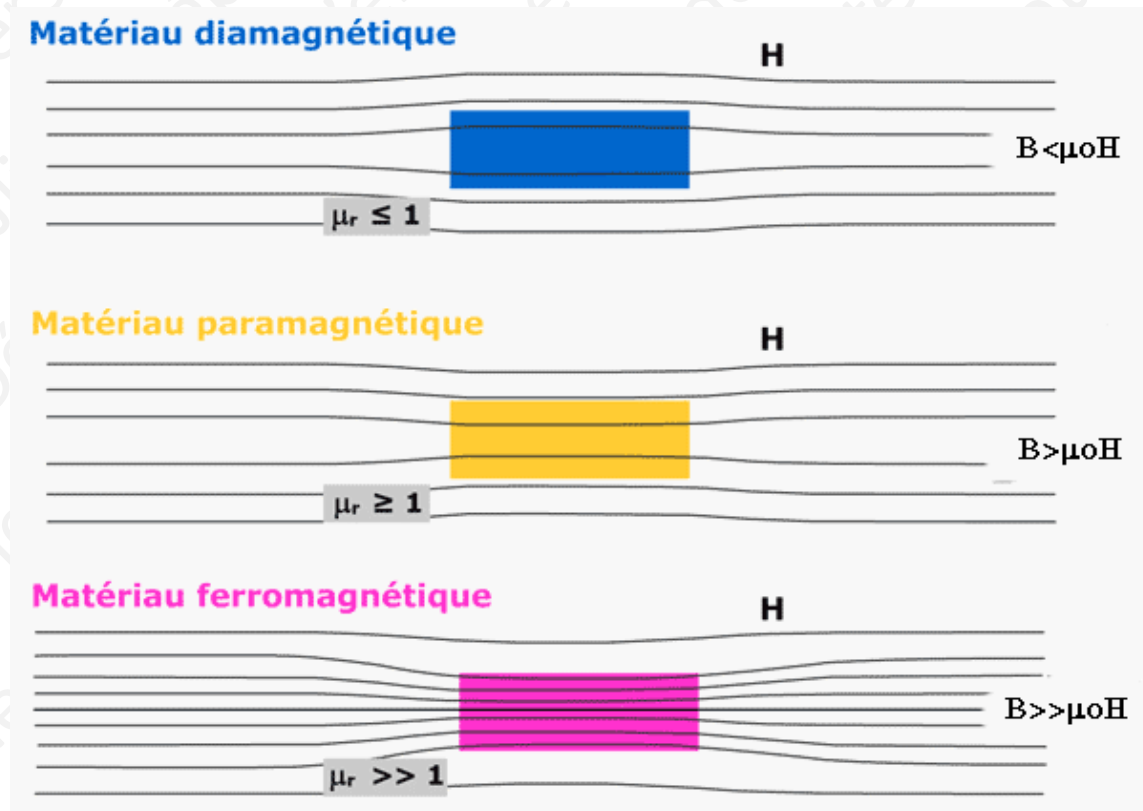


Quand le transmetteur tourne d'un angle θ le récepteur tournera également du même angle θ pour avoir le même état.



Principe de réluctance

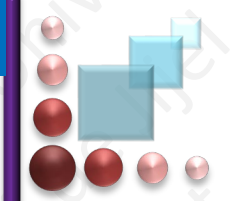
Un matériau ferromagnétique sert à canaliser les lignes de flux produites par un champ extérieur.



[1]

Le flux magnétique cherche donc à parcourir le chemin qui propose une perméabilité magnétique la plus importante.

Hopkinson a proposé une analogie entre circuit magnétique et circuit électrique



Principe de réluctance

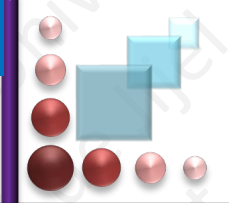
ELECTRIQUE	MAGNETIQUE
Courant électrique I	Flux magnétique φ
Résistance électrique R	Réluctance magnétique $\mathfrak{R}$
Tension électrique E	Force magnétomotrice $\mathfrak{T}$
Conductivité électrique σ	Perméabilité magnétique μ
Loi d'ohm $E = R I$	Loi d'Hopkinson $\mathfrak{T} = \mathfrak{R} \varphi$

[1]

L'expression de la réluctance magnétique d'un circuit peut être calculée par :

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu S}$$

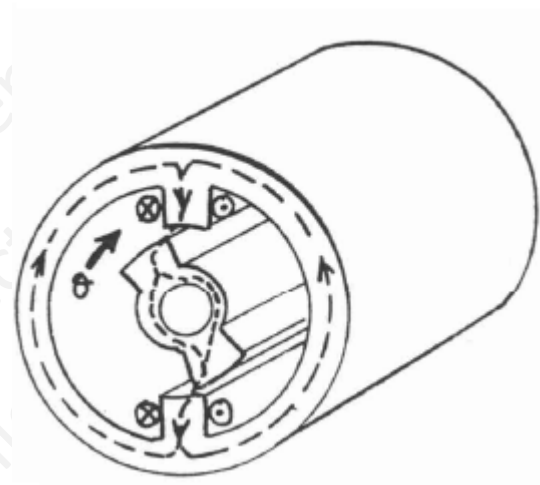
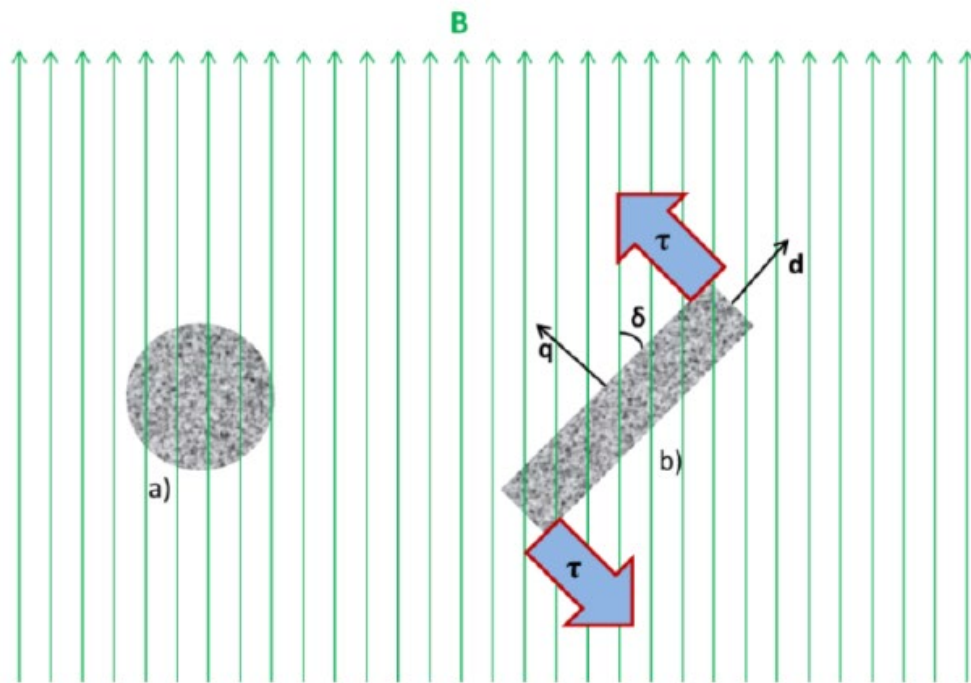
- L : longueur du circuit magnétique
- S : la section du circuit magnétique
- μ : perméabilité du matériau

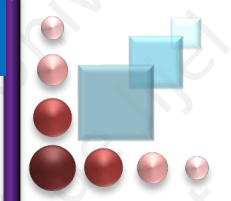


Principe du moteur à réluctance variable

Lorsqu'on soumet un matériau ferromagnétique libre de mouvement à un champ magnétique extérieur il se place dans une position qui permet un réluctance la plus faible. On dit que le flux magnétique suit le chemin le moins réluctant.

[1]

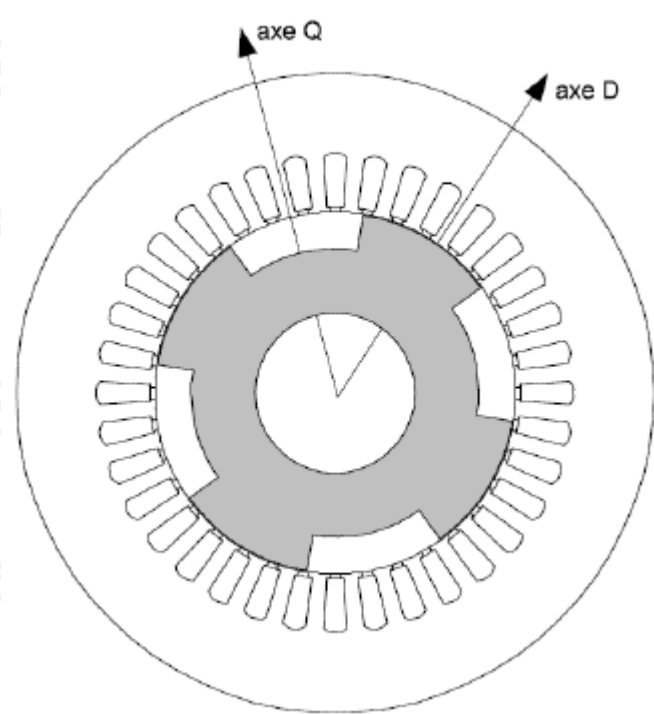


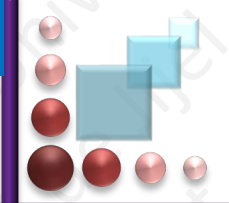


Principe du moteur à réluctance variable

Le moteur synchrone triphasé à réluctance variable est composé d'un stator identique à celui d'un moteur à induction triphasé créant donc un champ tournant Et un rotor constitué d'un matériau ferromagnétique dont une direction a été favorisé (machine à deux pôles).

[2]

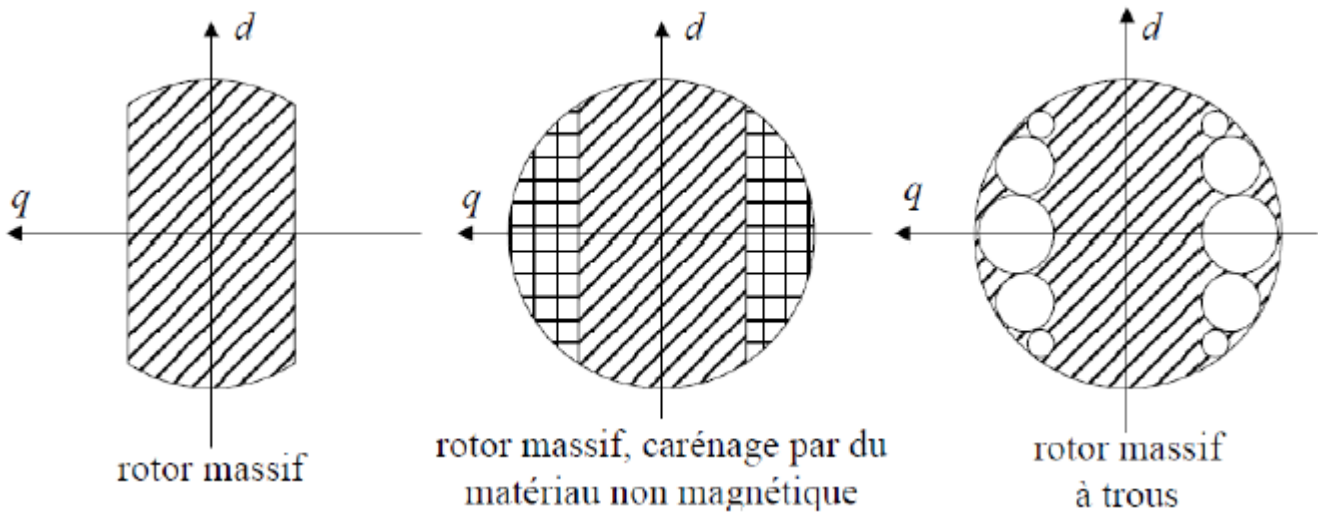


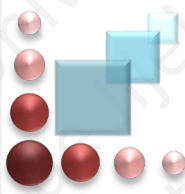


Principe du moteur à réluctance variable

Le rotor doit alors être dissymétrique pour présenter une réluctance variable suivant l'axe.

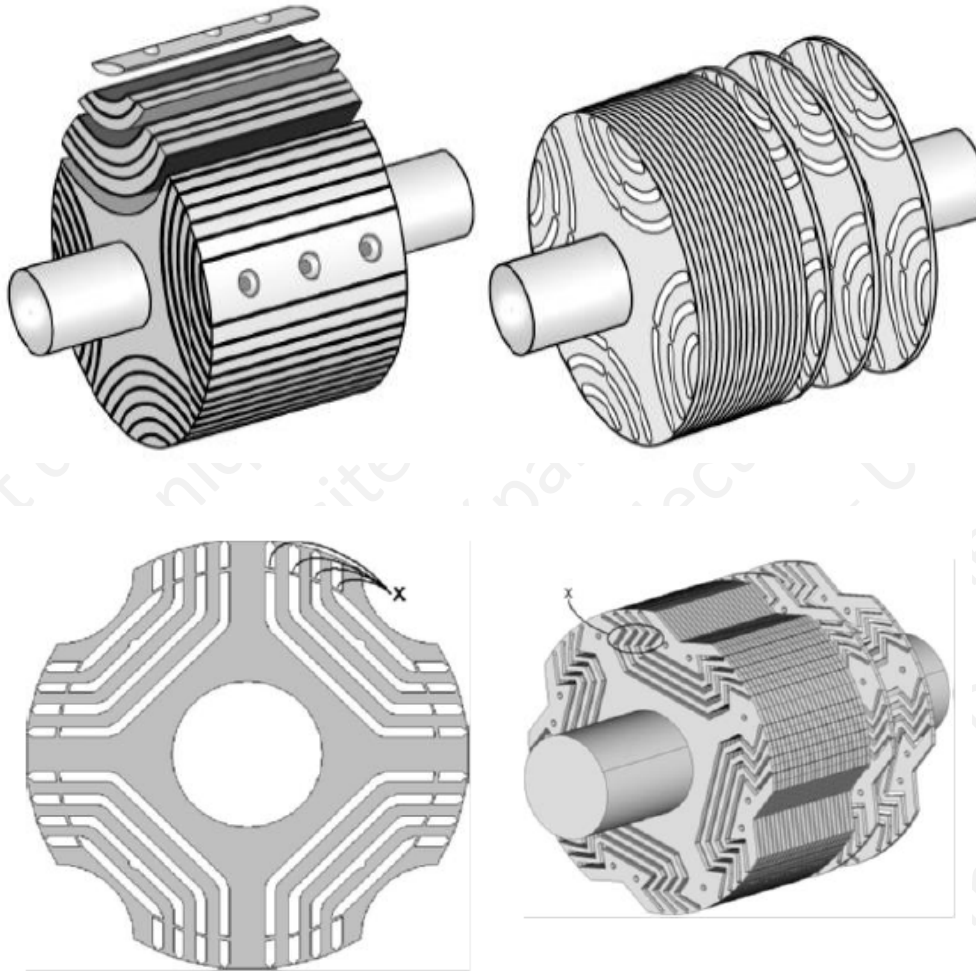
Rotor massif

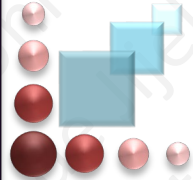




Principe du moteur à réluctance variable

Rotor avec barrière de flux



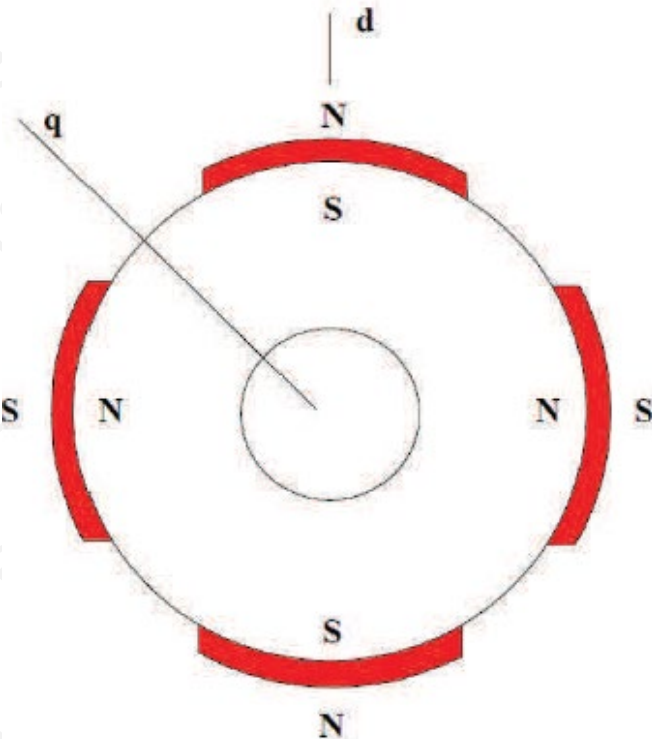


Principe du moteur à aimants permanents

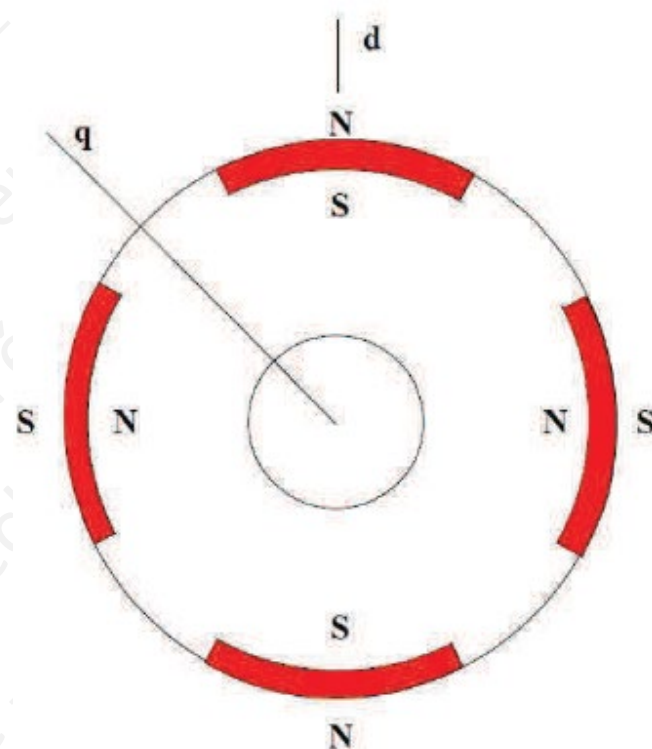
Le stator de la machine est identique à celui des machines alternatives : bobinage triphasé symétrique

Le rotor est composé d'aimants permanents fournissant un flux d'excitation permanent et constant

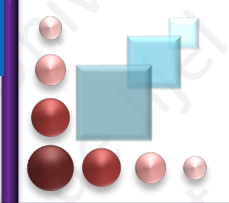
Plusieurs structures du rotor sont utilisées



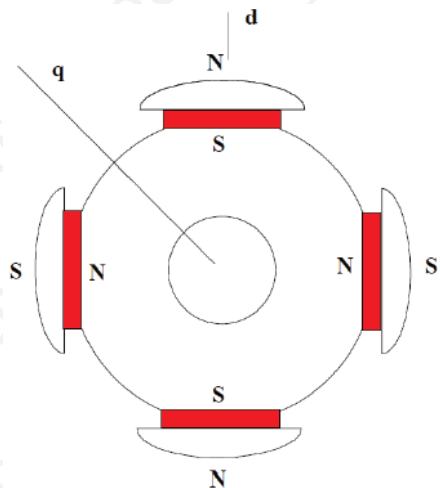
Aimants montés en surface



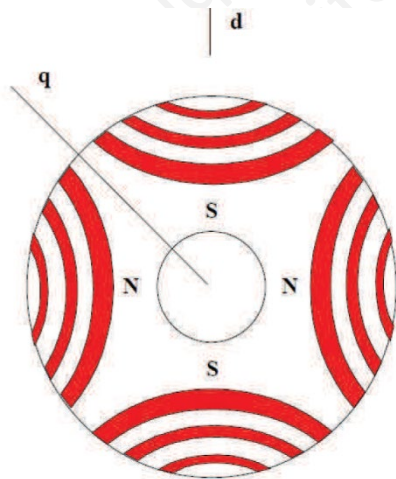
Aimants insérés à la surface



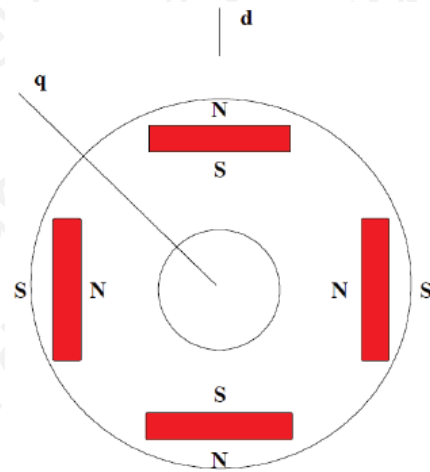
Principe du moteur à aimants permanents



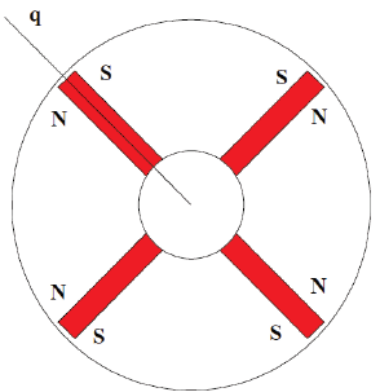
Aimants montés en surface
Avec épanouissement
polaire



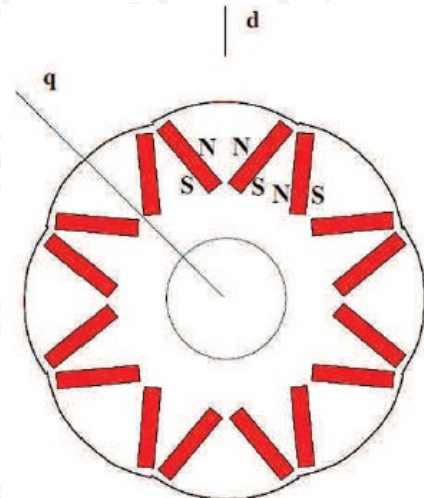
À réluctance variable assisté
par des Aimants Enterrés



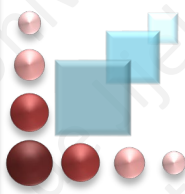
Aimants Enterrés tangentiels



Aimants Enterrés radiaux
À concentration de flux



Aimants Enterrés en V avec
entrefer variable



Principe du moteur à aimants permanents

Le fonctionnement de la machine est le même que celui de toute machine synchrone:

Le stator triphasé à p paires de pôles crée un champ tournant à une vitesse

$$\Omega = \frac{2\pi f}{p}$$

Le rotor composé de $2p$ aimants permanents va s'aligner sur le champ statorique et donc tourner à la même vitesse

Comme pour toute machine synchrone, le démarrage n'est pas possible de manière autonome. Et le fonctionnement ne peut se faire qu'à la vitesse de synchronisme ; tout décalage conduit à un décrochage de la machine.

Avantage :

Pas de pertes au rotor

Pas de balais pas de bobinage au rotor

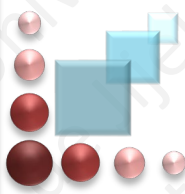
Rotor plus léger

inconvénients :

Pas d'autonomie de démarrage

Excitation fixe

Contrôle obligatoire



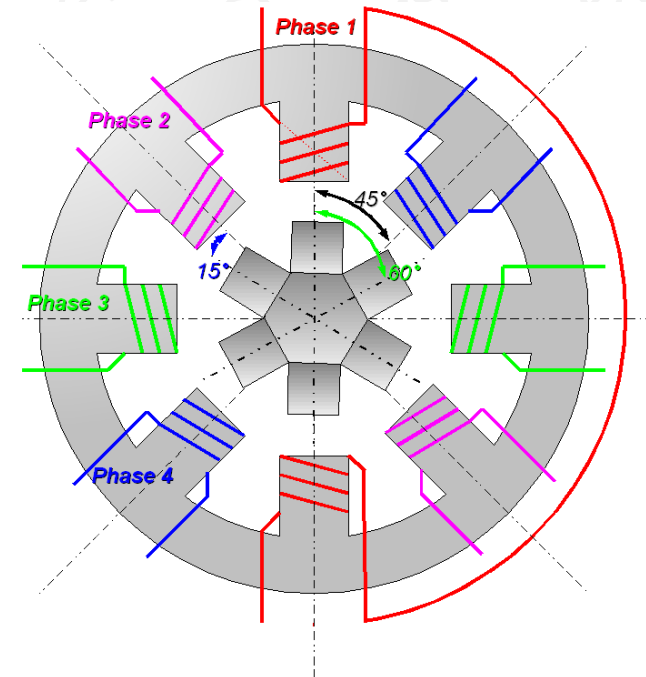
Constitution

Le moteur pas à pas possède un fonctionnement particulier. L'objectif est d'obtenir un déplacement élémentaire en position à chaque *alimentation* (impulsion).

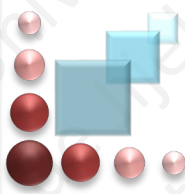
Le stator est donc **toujours** composé d'un ensemble d'enroulements de commande (généralement à pôles saillants)

Le rotor est soit composé d'aimants permanents (structure active) soit à réluctance variable (structure passive) soit par une combinaison des deux (structure hybride)

L'intérêt du moteur pas à pas se trouve dans le fait qu'il peut être commandé de manière très précise en position même en boucle ouverte, qu'il peut fournir un couple de maintien important et qu'il peut être aussi commandé en vitesse.



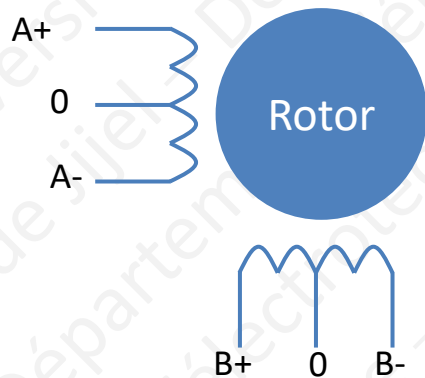
[3]



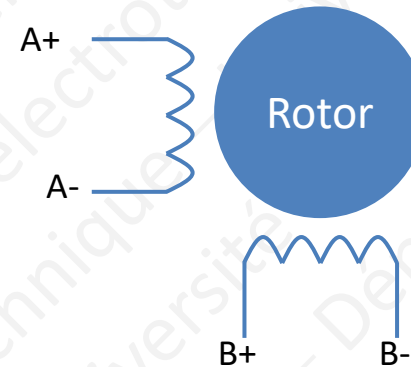
Constitution

Les enroulements statoriques peuvent être **unipolaires** ou **bipolaires**

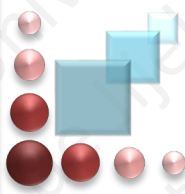
- Les moteurs unipolaires sont caractérisés par trois bornes pour chaque phase, on peut alors inverser le champ produit par la phase sans inverser le courant.
- Les moteurs bipolaires sont caractérisés par deux bornes pour chaque phase de sorte que pour inverser le champ produit par la phase, on doit inverser le courant.



Moteur unipolaire



Moteur bipolaire



Différents types : rotor à réluctance

Le stator est composé de dents dont le nombre est multiple de 3. Les deux dents opposées forment une phase statorique. **Chaque phase est alimentée seule en courant continu à un instant donné.**

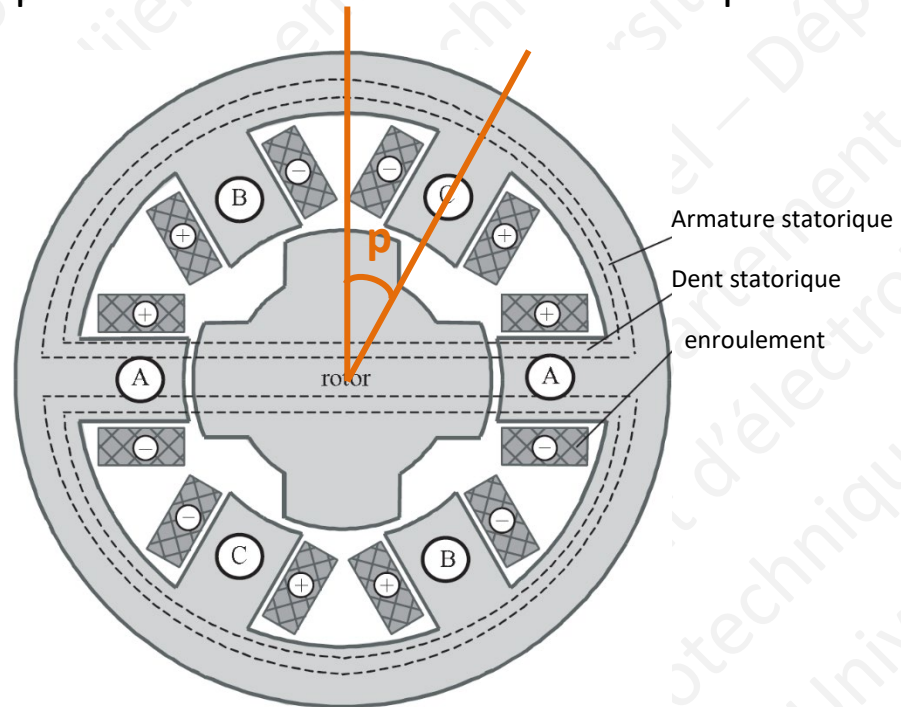
Le rotor est aussi composé de dents dont le nombre est proche mais différent de celui du stator de sorte que si une phase statorique est alimentée, uniquement deux dents rotoriques seront alignées avec celles du stator. Les autres dents rotoriques se trouvent alors dans des positions intermédiaires entre deux phases statoriques.

Si une autre phase est alimentée, le rotor tourne alors d'un pas dans un sens ou dans l'autre (selon la phase alimentée) pour aligner deux autres dents avec celles de la phase alimentée

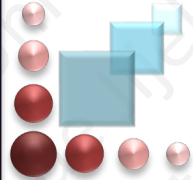
$$p = \frac{360}{N_s N_r}$$

N_s : nombre de phases statoriques

N_r : nombre de dents rotoriques



[4]



Différents types : rotor à réluctance

Exemple : moteur 3 phases
12 dents statoriques
8 dents rotoriques
4 pôles
 $p = 15^\circ$
24 pas /tour

p_s : pas dentaire statorique
 p_r : pas dentaire rotorique

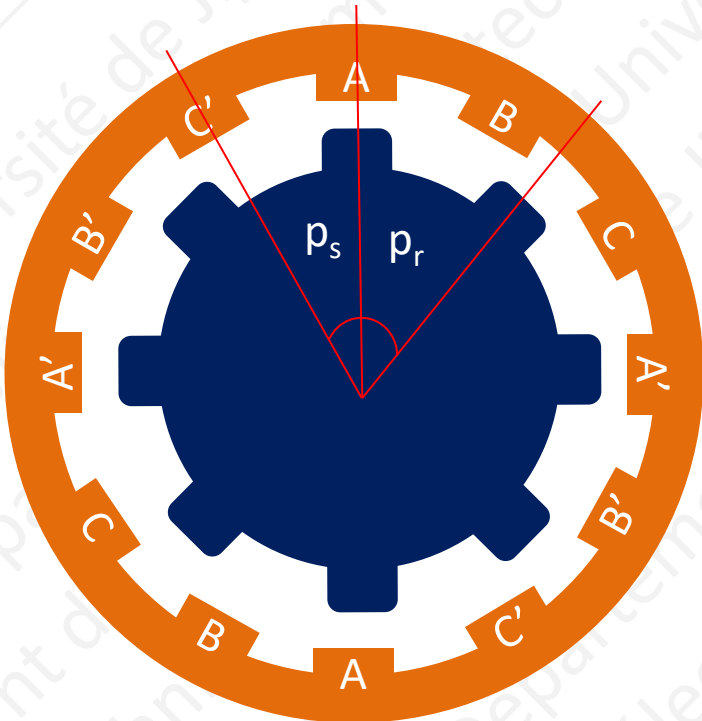
Rotation sens horaire :

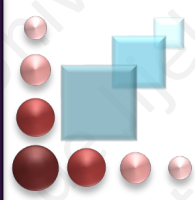
A C B A C B...

Rotation sens anti-horaire

A B C A B C...

Le sens du courant dans le bobinage statorique n'a pas d'importance





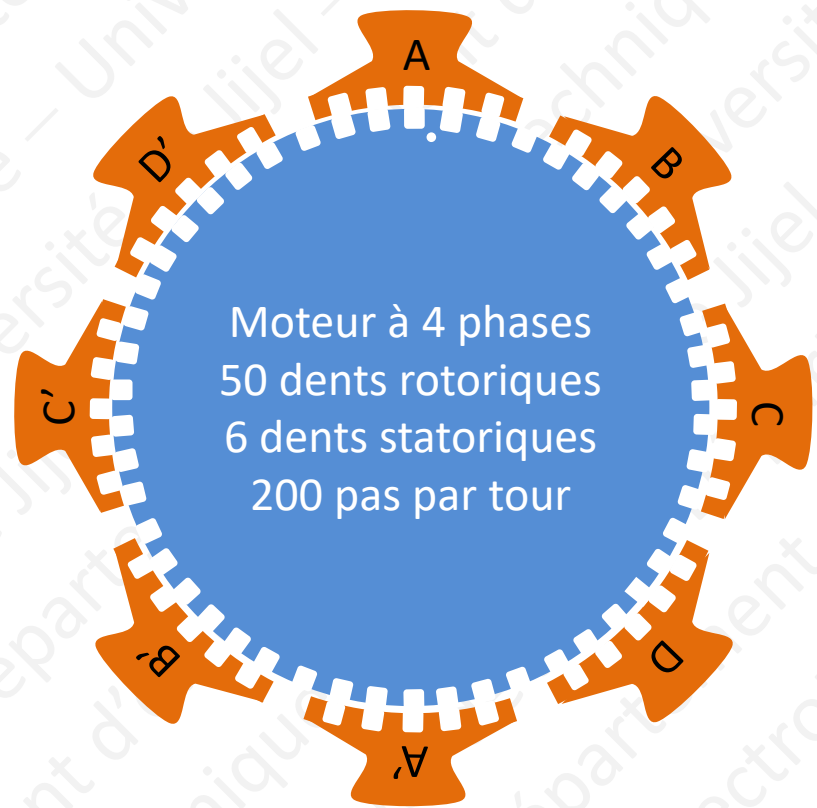
Différents types : rotor à réluctance

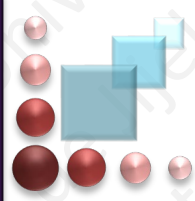
Pour augmenter le nombre de pas par tour, on réalise des pôles statoriques dentés (petites dents). Chaque bobine de chaque phase excite plusieurs dents à la fois (bobinage global)

Ce sont généralement des moteur à 4 phases.

Les dents rotoriques seront calculées de telle sorte que la conjunction des dents se fasse uniquement pour une seule phase à chaque pas et pour les autres phases on ait :

- Un décalage d'un quart du pas dentaire dans un sens pour une phase
- Un décalage d'un quart du pas dentaire dans le sens inverse pour une autre phase
- Un décalage d'un demi pas dentaire pour la troisième phase





Différents types : rotor à aimants permanents

Le stator est le même que pour le cas précédent mais le nombre de phases minimum possible n'est plus que de deux au lieu de trois. Chaque phase statorique est composée de p_s pôles.

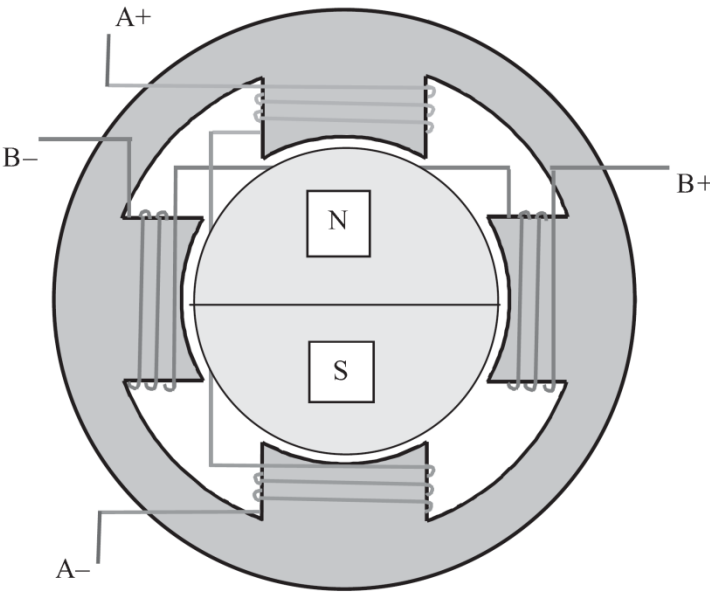
Le rotor est **lisse**, composé d'aimants permanent à p_s pôles également. L'alimentation d'une phase statorique fait tourner le rotor d'un angle égale à :

$$p = \frac{360}{N_s p_s}$$

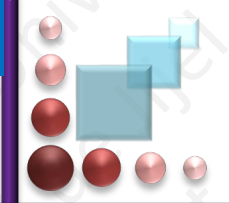
N_s : nombre de phases statoriques

Le sens de rotation dépend de la polarisation de la phase statorique c'est-à-dire du sens de circulation du courant.

Il existe aussi une possibilité de **fonctionnement en demi-pas** en alimentant deux phases en même temps puis une seule phase.



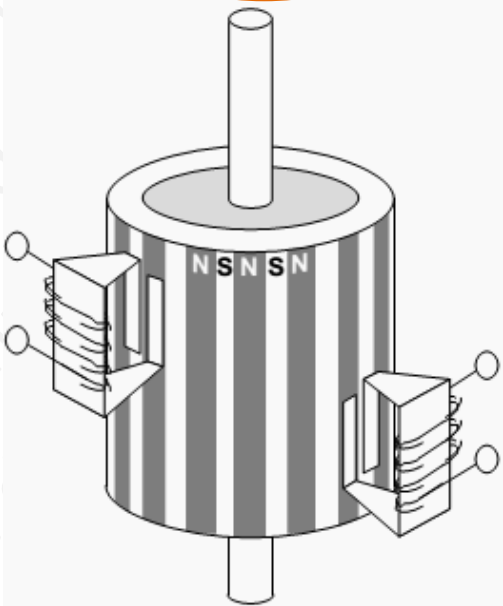
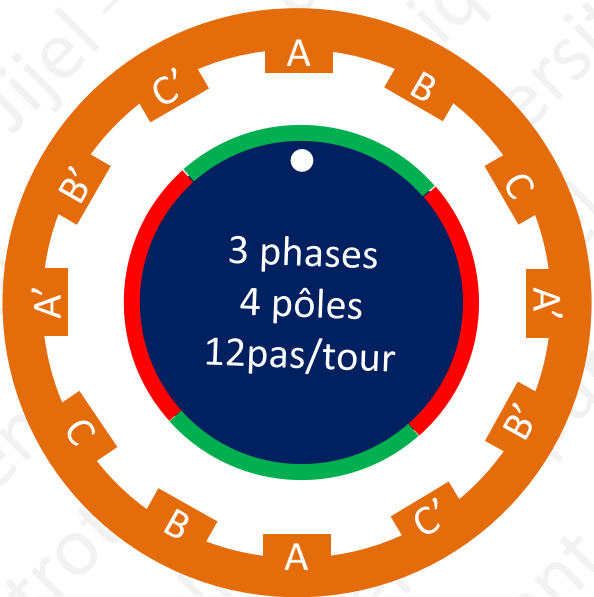
[4]

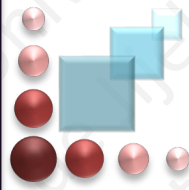


Différents types : rotor à aimants permanents

En pratique, le stator est composé de deux enroulement de type solénoïde disposé en "étage" chaque étage est composé d'un circuit magnétique en griffes alternés composant les pôles statoriques. Moteur "Tin can". Les griffes de l'étage supérieur sont décalés des griffes inférieurs de la moitié du pas polaire. Le rotor est composé d'aimants permanents alternés d'un nombre de pôles égales à celui de stator

Généralement le nombre de pas par tour est de 48





Différents types : rotor à aimants permanents

Fonctionnement :

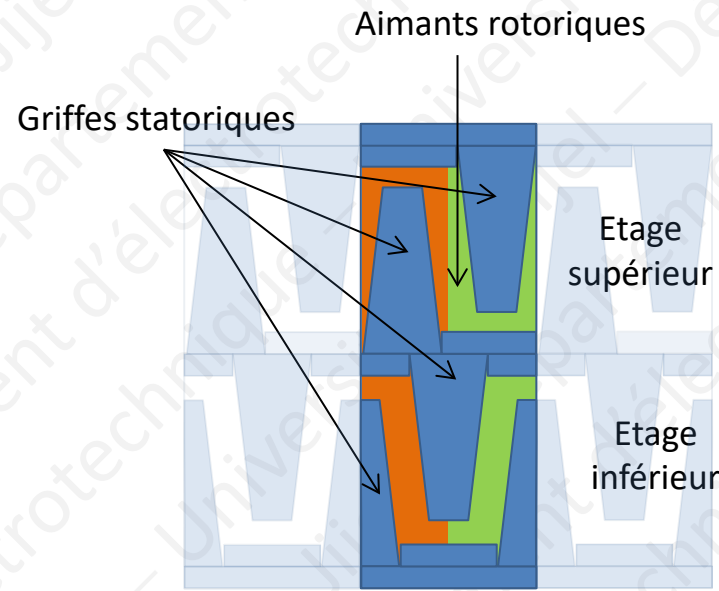
Les pôles rotoriques étant toujours calés sur les griffes de l'enroulement alimenté, ils se retrouvent alors positionnés entre les griffes du second enroulement. En alimentant ce dernier, le rotor tourne alors d'un demi pas polaire dans un sens qui dépend du courant dans l'enroulement.

Si N_r est le nombre de pôles rotoriques, le pas polaire est donné par :

$$p = \frac{360}{N_r}$$

Le nombre de pas par tour est alors :

$$2N_r$$



Déroulement du circuit magnétique
du moteur à aimants permanents