

Actionneurs électriques : Moteurs à courant continu et pas à pas

2.1. Introduction

Les actionneurs électriques sont conçus généralement à base des moteurs électriques, à courant continu ou alternatif. Ce type d'actionneurs est très sollicité dans le monde industriel à cause de leur simplicité à mettre en œuvre et la disponibilité de l'énergie électrique. Il existe deux types d'actionneurs électriques : les actionneurs linéaires et les actionneurs rotatifs. Les actionneurs linéaires utilisés pour générer des mouvements de translation ; quant aux actionneurs rotatifs, ils produisent des rotations par rapport à un axe. Le principe de fonctionnement est le même pour les deux type, cependant les actionneurs rotatifs sont les plus courants.

2.2. Rappel sur l'électromagnétisme

Le fonctionnement des actionneurs électriques, que ce soit linéaires ou rotatifs, repose sur trois principe généraux de l'électromagnétisme.

A.1^{er} principe - Induction magnétique

En 1819 le savant danois Oersted découvrit qu'un conducteur rectiligne parcouru par un courant électrique crée un champ magnétique dans l'espace qui l'entoure capable de faire dévier l'aiguille d'une boussole. Le champ magnétique est d'autant plus fort que l'intensité du courant est importante et que la ligne de force est proche du conducteur. La relation entre l'induction magnétique $\vec{B}$ (en tesla T), le courant $\vec{I}$ et le rayon $\vec{r}$ est donnée par

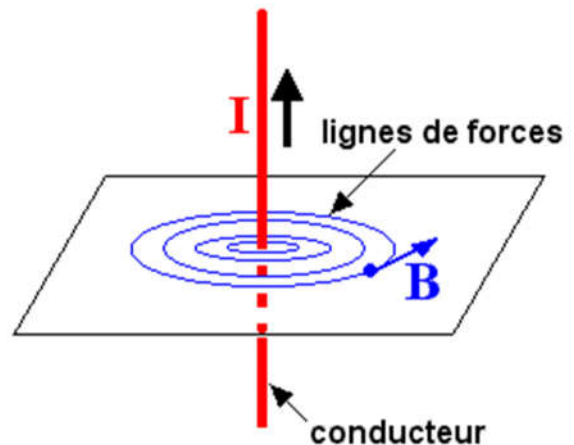


Figure 2.1. Induction magnétique.

$$\vec{I} = \frac{2\pi}{\mu} \cdot \vec{r} \wedge \vec{B} \quad (2.1)$$

Notons que l'induction est orientée selon la règle du tire-bouchon (**pouce** - sens du **vecteur champ magnétique**, index ou les **quatre doigts autre que le pouce** - sens du **courant**). Lorsque les trois vecteurs sont perpendiculaires deux à deux, nous obtenons

$$B = \frac{\mu I}{2\pi.r} \quad (2.2)$$

I est l'intensité du courant en [A] ; la distance entre le point considéré et le conducteur en [m] ;
est μ la perméabilité magnétique du matériau considéré.

Induction magnétique dans une spire

Nous appelons un conducteur en forme de boucle une "spire". Le champ magnétique qui apparaît autour du conducteur est concentré à l'intérieur de la spire. Le sens du vecteur induction B est déterminé par la règle connue par le nom "tire-bouchon".

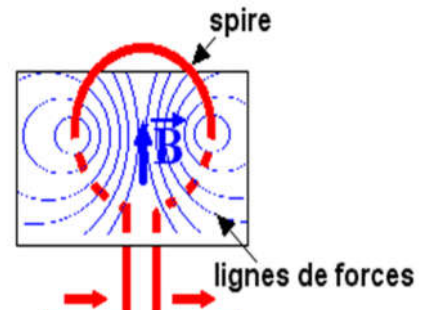


Figure 2. 2. Induction magnétique dans une spire.

L'induction dans la spire est en fonction de son diamètre D et de l'intensité I du courant qui parcourt la spire,

$$B = \frac{\mu I}{D} \quad (2.3)$$

Induction magnétique dans un solénoïde

Un solénoïde est un conducteur électrique enroulé en forme de ressort et communément appelé "bobine". Une bobine se compose de spires très proches les unes des autres. L'induction B à l'intérieur de la bobine est proportionnelle au nombre de spires qu'elle contient mais elle est inversement proportionnelle à la longueur de la bobine :

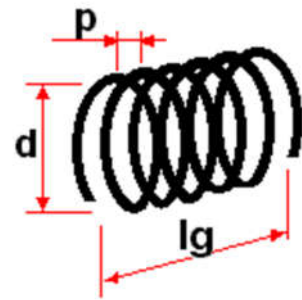


Figure 2.3. Induction magnétique dans un solénoïde.

$$B = \mu \frac{N I}{l_g} \quad (2.4)$$

Où, N représente le nombre de spires ; l_g : la longueur de la bobine en m ; I : l'intensité du courant électrique en A.

Un barreau ferromagnétique entouré par une bobine et parcouru par un courant peut se comporter comme un aimant. C'est le principe des électro-aimants utilisés dans les électrovannes et les relais.

B. 2^{ème} principe – force électromagnétique

Un conducteur placé dans **un champ magnétique** et parcouru par **un courant**, subit une force appelée **force de Laplace**. Cette force est perpendiculaire à la direction du courant et celle du champ magnétique. Le sens de cette force est déterminé par la règle des trois doigts de la main droite.

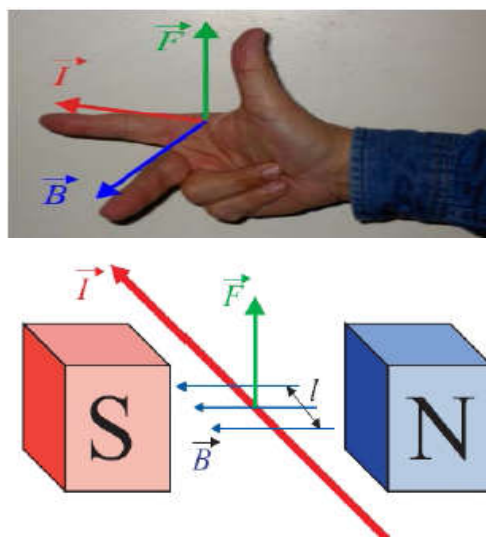


Figure 2.4. Force électromagnétique.

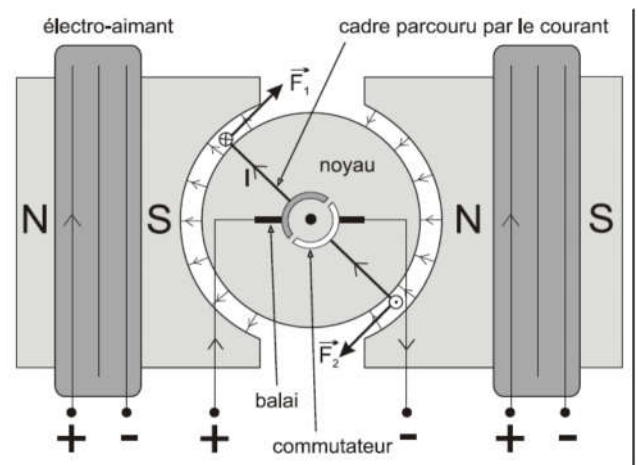


Figure 2.5. Force électromagnétique et les moteurs.

Lorsque le conducteur est rectiligne et soumis à une induction magnétique uniforme $\vec{B}$ sur une distance l , la force de Laplace, en [N], est donnée par

$$\vec{F} = (\vec{I} \wedge \vec{B}) \cdot l \quad (2.5)$$

Ainsi, sa norme est $F = I \cdot B \cdot l \cdot \sin(\alpha)$, avec α est l'angle entre $\vec{I}$ et $\vec{B}$.

C. 3^{ème} principe – Tension induite par variation du flux magnétique

Flux magnétique :

Le flux magnétique Φ représente la quantité d'induction magnétique intercepté par un circuit fermé. Sur la figure 2.6, nous présentons le cas d'un circuit électrique plan soumis à un champ magnétique homogène.

L'unité de mesure du flux magnétique est le **Weber [wb]**. Le flux magnétique pour une géométrie simple (comme dans la figure ci-contre) est calculé par la relation suivante :

$$\Phi = B \cdot S \cdot \sin(\alpha) \quad [\text{Wb}]$$

Avec B est l'induction magnétique en [T], S la surface du circuit en [M²] et α est l'angle entre l'induction magnétique et le plan du circuit

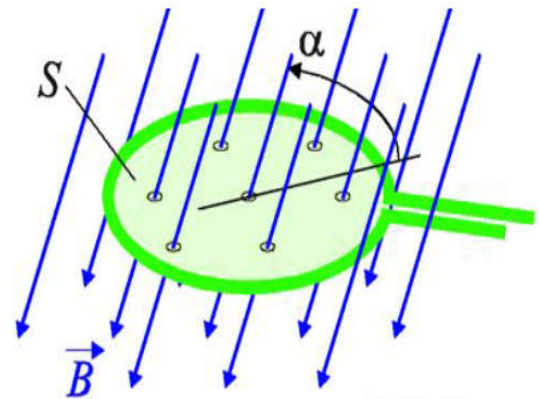


Figure 2.6. Flux magnétique intercepté par un circuit électrique.

Tension induite par variation du flux magnétique

Lorsque un circuit électrique se trouve sous l'effet d'un flux magnétique variable, il est le siège d'une **tension induite** :

$$u_i(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt} \quad [\text{V}]$$

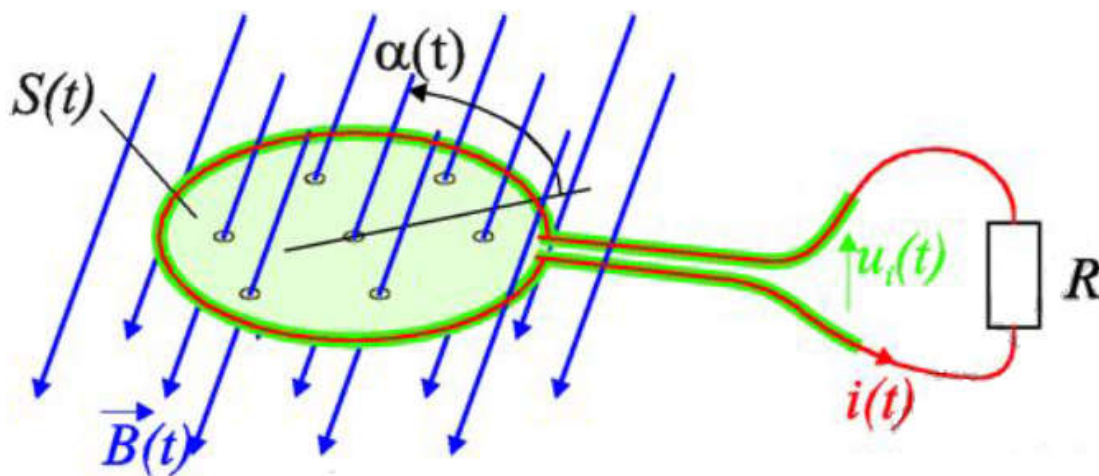


Figure 2.7. Tension induite aux bornes d'un circuit.

Si on ferme le circuit sur une résistance R , un courant se met à circuler dans ce circuit. En utilisant les formules précédentes, la tension induite s'exprime comme suit

$$u_i(t) = \frac{d[B(t) \cdot S(t) \cdot \sin \alpha(t)]}{dt} \quad [\text{V}]$$

Donc il est possible de varier la tension induite en variant soit l'induction magnétique, soit la surface du circuit électrique, soit l'angle formé entre eux, ou toute combinaison de ces actions.

Loi de Lenz

Le **sens** d'une tension induite est tel que le courant électrique et les forces électromagnétiques qui en résultent tendent, par leurs effets, à **s'opposer à la variation de flux**.

Dans tout circuit fermé soumis à une variation de flux, il se crée des courants qui s'oppose aux phénomènes qui les ont créés.

Exemple1:

Lorsqu'on approche le pôle Nord d'un'aimant (comme il est illustrée sur la figure 2.8), ça va donner naissance à un courant dans la bobine. Le courant résultant va créer un pôle magnétique qui repousse ce pôle Nord. Donc, le courant va circuler dans le circuit de manière à créer un pôle Nord en face du pôle Nord de l'aimant.



Figure 2.8. Illustration de la loi de Lenz magnétique uniforme.

Dans le deuxième cas, la bobine "voit un pôle Nord qui s'en va", il va alors se créer un courant qui circule de manière à attirer l'aimant, (elle crée de ce fait un pôle Sud).

Exemple2:

Si l'on fait pivoter une spire dans un milieu soumis à un champ magnétique ça donne naissance à une tension induite à ses bornes (spire). En effet, on fait ainsi varier l'angle α entre le plan de la spire et l'induction magnétique. Plus la rotation est rapide, moins il faut de temps pour faire passer $\sin(\alpha)$ de 1 à -1 et réciproquement. De ce fait, l'amplitude de la tension induite est proportionnelle à l'induction magnétique et à la vitesse de rotation de la spire.

Si nous connectons cette spire sur une résistance, un courant induit apparaît dans ce circuit. A son tour, le courant crée un couple électromagnétique (selon le deuxième principe vu précédemment). Le couple résultant s'oppose à la rotation de la spire (en vertu de la loi de Lenz), cherchant ainsi à réduire la vitesse, donc l'amplitude de la tension induite.

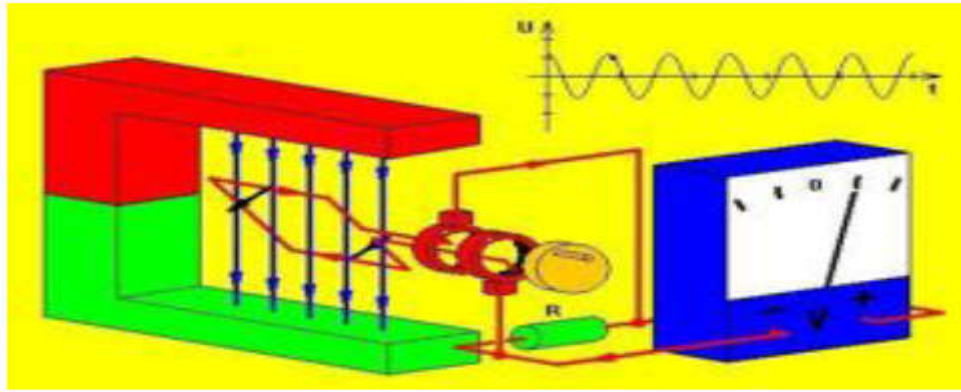


Figure 2.9. Tension induite aux bornes d'une spire tournant dans un champ magnétique uniforme.

2.3. Les actionneurs électriques les plus utilisés

Un actionneur électrique permet de convertir l'énergie électrique (courant continu ou alternatif) en rotation mécanique. Nous présentons dans le tableau 2.1 les actionneurs électriques les plus utilisés.

Principales caractéristiques d'un moteur électrique :

Parmi les caractéristiques des moteurs électriques, nous pouvons citer : 1) le type de tension : continue (Moteur à courant continu) ou alternative (moteur asynchrone, synchrone) ; 2) Tension d'alimentation en volts (12V continu, 24V continu, 230V alternatif, 400V alternatif...) ; 3) Puissance nominale (en Watts).

2.4. Moteur à courant continu

Un moteur à courant continu est un convertisseur électromécanique permettant la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique. Le premier moteur à courant continu a été réalisé en 1836. La vitesse et le couple de ce type de moteurs sont facilement réglables (ne nécessitent pas beaucoup d'électronique de commande). **Un moteur à courant continu est utilisé dans les applications de faibles et moyennes puissances.**

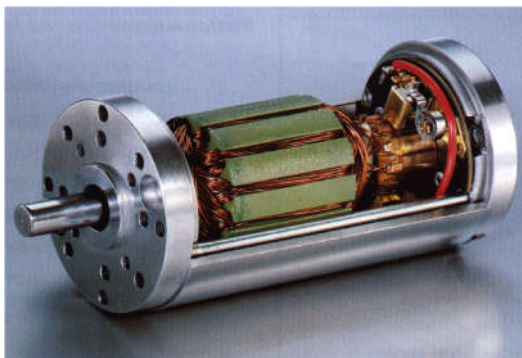


Figure 2.10. Moteur à courant continu .

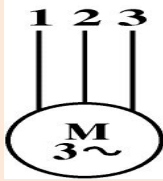
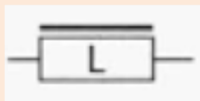
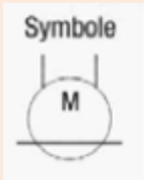
Moteur asynchrone triphasé		(Rotation continue)
		• Actionneur très utilisé dans les applications industrielles ; • Très grande fiabilité et facilité de mise en œuvre (raccordement direct au réseau triphasé); • Très fortes puissances (Plusieurs MW) ; • Utilisé sur les convoyeurs, les machines-outils.
Moteur à courant continu		(Rotation continue)
		• Actionneur apprécié pour sa souplesse • Variation de vitesse facile à mettre en œuvre • Utilisé sur tous les systèmes autonomes (automobile, jouets, outillage...) • Utilisé sur les véhicules électriques.
Moteur pas à pas		(Rotation discontinue)
		• Actionneur convenable aux mouvements rotatifs discontinus, précis, de faible puissance ; • Le nombre de pas par tour peut atteindre 400 ; • Utilisé sur les imprimantes, les micros mécanismes, les mini-manipulateurs, les axes de machines de faible puissance.
électro-aimant		(Translation)
		• Actionneur électrique linéaire convenable aux mouvements de faible amplitude ; • Adéquat aux applications de faible puissance ; • On l'utilise pour tirer, pousser, enclencher, déclencher, libérer, maintenir, verrouiller, indexer, motoriser.
Vérin électrique		(Translation)
		• Il peut générer des mouvements de translation (moteur et mécanisme de transformation) • faible encombrement et intégration simple

Tableau 2.1. Actionneurs électriques linéaires et rotatifs.

2.4.1. Principe de fonctionnement

Le fonctionnement des moteurs à courant continu est basé sur deux principes de l'électromagnétisme :

- ✓ Lorsqu'un conducteur parcouru par un courant $i(t)$ et soumis à un champ magnétique constant, il se crée une force proportionnelle $F(t)$ qui tend à faire bouger ce conducteur.
- ✓ Lorsqu'une spire de fil de cuivre est soumise à l'effet d'un champ magnétique qui varie au cours du temps, il apparaît à ses bornes une tension $u_i(t)$, appelée tension induite. Cette tension est proportionnelle à la variation du champ magnétique.

Le stator (des aimants ou des électro-aimants) crée un champ magnétique. Le passage du courant (**courant d'induit**) dans les spires du rotor crée un champ magnétique. La force qui apparaît dans ces conditions fait tourner chaque spire autour de son axe.

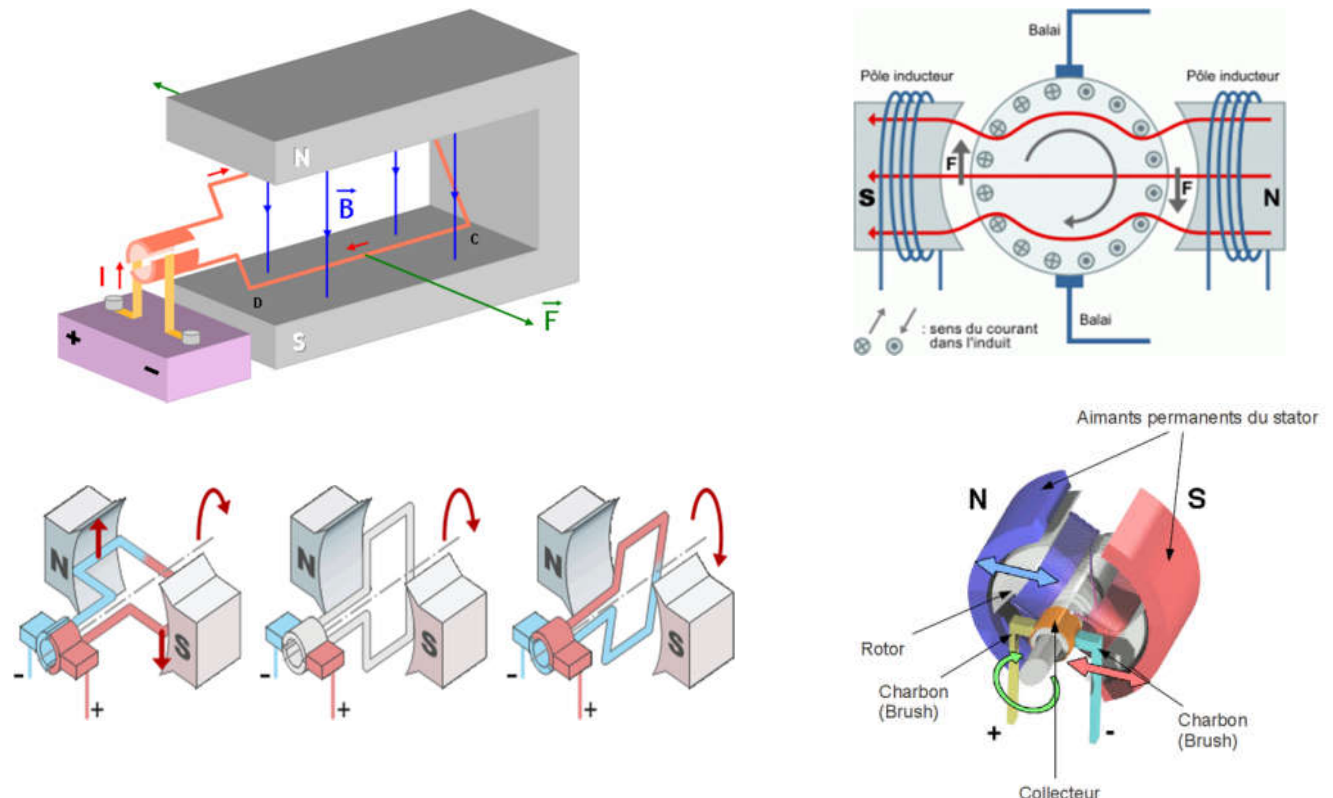


Figure 2.11. Schémas illustratifs du fonctionnement d'un moteur à courant continu .

La machine à courant continu est composée de trois parties principales :

- l'inducteur (**stator**)
- l'induit (**rotor**)
- le dispositif collecteur / balais

Le stator est la partie fixe du moteur et il constitue son enveloppe extérieure

Le **stator** d'un moteur à courant continu est constitué d'une ou plusieurs sources de champ magnétique continu. Pour les moteurs de faibles puissances, **des aimants permanents** peuvent être utilisés pour créer le champ magnétique. Pour les moteurs de fortes puissances, le champ magnétique est généré par **des électro-aimants (bobines)**, le courant qui y circule est communément appelé **courant d'excitation** du moteur.

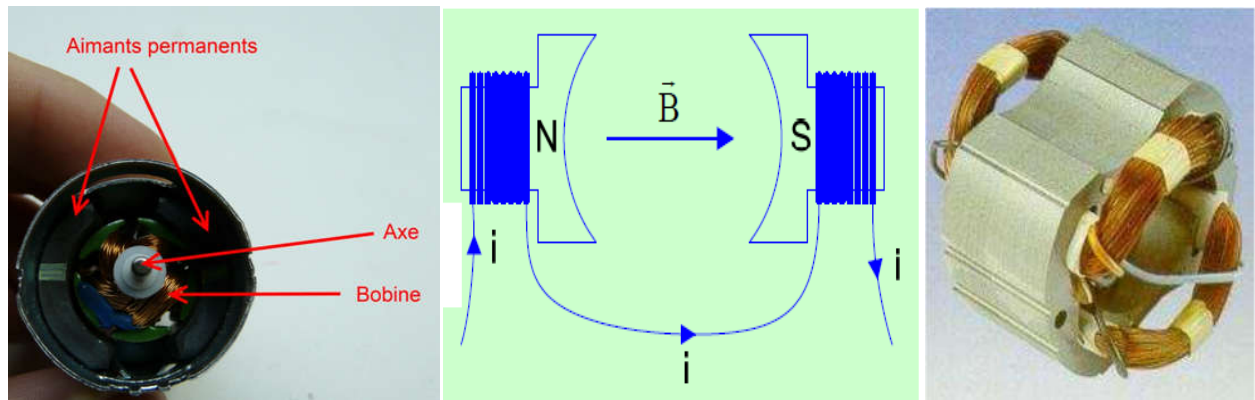


Figure 2.12. Le stator d'un moteur à courant continu.

Le rotor est la partie mobile du moteur qui génère le couple utile à la charge par l'intermédiaire de son arbre.

Le **rotor** d'un moteur à courant continu intègre **des bobines** formées par **plusieurs spires**. On appelle le courant qui y circule **le courant d'induit** du moteur.

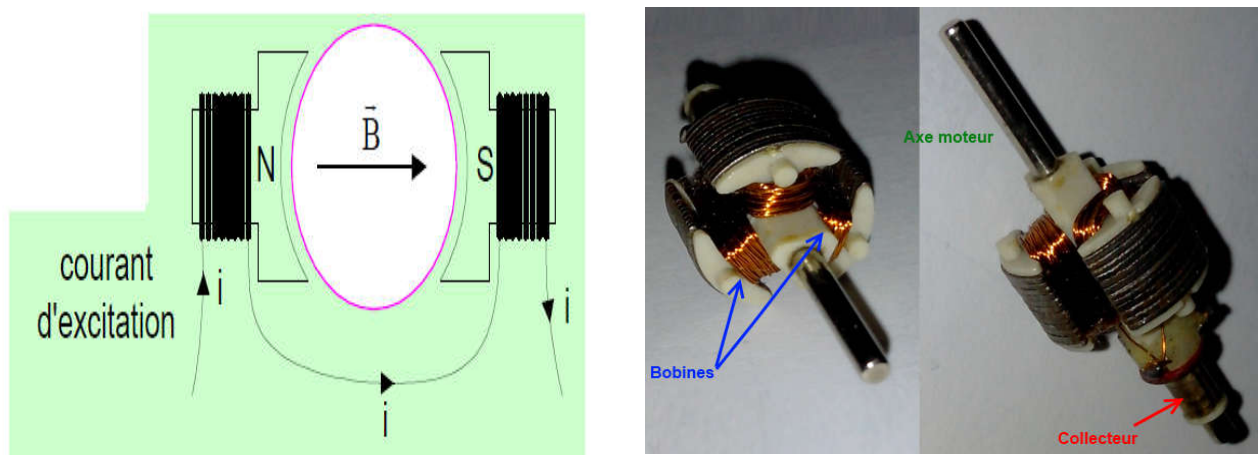


Figure 2.13. Le rotor d'un moteur à courant continu.

Le **collecteur** avec des **balais** (charbons) est utilisé pour transmettre l'énergie électrique au rotor. Il permet aussi de commuter le courant de manière à ce qu'il circule de manière optimale dans les spires du rotor.

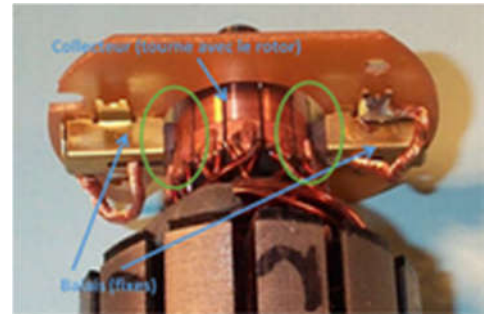
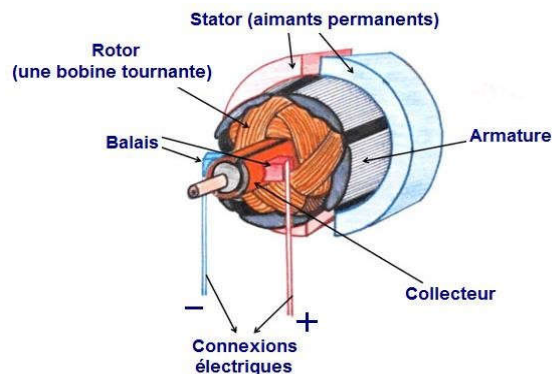


Figure 2.14. Dispositif Balais – collecteur.

2.4.2. Lecture d'une plaque signalétique

Nous pouvons lire les caractéristiques électriques et mécaniques nominales sur une plaque lisible sur le moteur (exemple ci-dessous):

En fonctionnement normal (nominal), ce moteur a les caractéristiques suivantes :

- Puissance mécanique : 36,3kW (1150tr/min et 301N.m).
- Alimentation rotor : 440V et 95,5A (soit 42kW).
- Alimentation stator : 360V et 3A (soit 1,08kW).

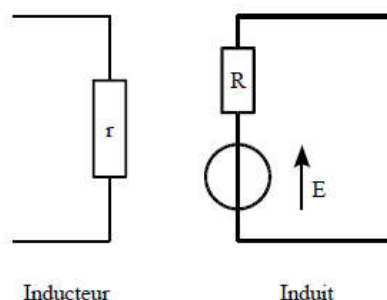
On peut en déduire le rendement :

$$\eta = \frac{P_m}{P_E} = \frac{36,3}{42 + 1,08} \approx 84\%$$

IEC 34.1.1990		 LEROY SOMER		MADE IN FRANCE			
		MOTEUR A COURANT CONTINU DIRECT CURRENT MOTOR					
TYPE: LSK 1604 S 02		N° 700000/10		9/1992		M 249 kg	
Classe / Ins class H		IM 1001		IP 23		IC 06	
M _{nom} / Rated torque		301 N. m		Altit. 1000 m		Temp. 40 °C	
	kW	min ⁻¹		V		A	
Norm./Rat.	36,3	1150		440		95,5	
	3,63	115		44		9,55	
	36,3	1720		440		95,5	
T		système peinture: I		Induit / Arm.		Excit. / Field	
○ Service / Duty S1		DE 6312 2RS C3		NDE 6312 2RS C3		○	

Figure 2.15. Exemple d'une plaque signalétique.

2.4.3. Modèle électrique d'une machine à courant continu



La force électromotrice (f.e.m.) E :

Soit Φ le flux magnétique créé par l'inducteur (en Weber [Wb].), et N le nombre de conducteurs dans le rotor et Ω sa vitesse de rotation

la f.e.m. E est donnée par : $E = \frac{N \Phi \Omega}{2\pi}$.

Si on pose $K = \frac{N}{2\pi}$ (constante sans dimension), donc $E = K \Phi \Omega$, avec Φ en [Wb], Ω en [rad/s] et E f.e.m induite en [V].

Si le flux magnétique Φ est constant, la f.e.m. induite E est proportionnelle à la vitesse de rotation Ω soit : $E = k \Omega$.

Le couple électromagnétique :

Si un courant d'intensité I circule dans l'induit, la puissance électromagnétique est $P_E = E \cdot I$.

Soit Ω la vitesse de rotation du rotor, il existe alors un couple électromagnétique tel que $P_E = T_{EM} \cdot \Omega$. De ce qui précède, l'expression du couple électromagnétique est

$$T_{EM} = K \cdot \Phi \cdot I$$

Ce qui implique que le couple électromagnétique est proportionnel à l'intensité qui circule dans l'induit.

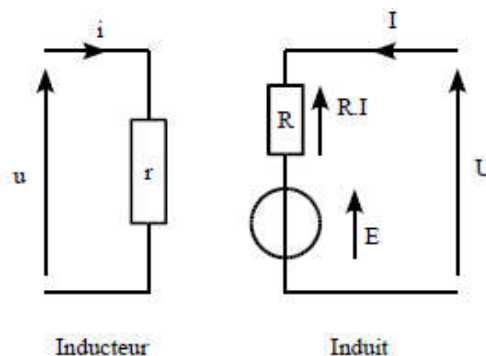
A. Le moteur à excitation indépendante

Modèle électrique :

Une tension continue u alimente l'inducteur et il est parcouru par un courant continu i (si l'inducteur n'est pas à aimants permanents).

L'induit est alimenté par une tension continue U et il est parcouru par une intensité I .

Modèle électrique du moteur à excitation indépendante :



Avec ce montage, le flux ϕ est directement proportionnel au courant d'excitation i .

Équation de fonctionnement pour l'induit $U = E + R \cdot I$

Bilan énergétique et rendement:

La puissance électrique absorbée par le moteur est $P_A = u \cdot i + U \cdot I$ (Si le moteur est à aimant permanent, $u \cdot i = 0$).

Les pertes par effet Joule au niveau de l'excitation (l'inducteur) sont données par $P_{JE} = u \cdot i = r i^2$

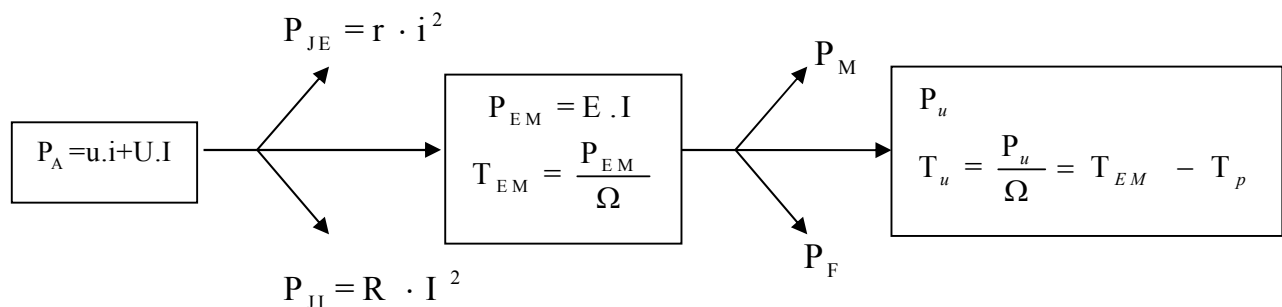
Les pertes par effet Joule au niveau de l'induit, sont $P_{JI} = R I^2$

La puissance électromagnétique $P_{EM} = P_A - P_{JE} - P_{JI} = E \cdot I$

Pour un essai à vide, nous avons $P_V = R \cdot I_V^2 + P_C$, les pertes collectives P_C qui représentent les pertes magnétiques ou pertes fer P_F ainsi que les pertes mécaniques P_M peuvent être déterminés par : $P_C = P_F + P_M$.

Le couple de pertes est défini par $T_p = T_{EM} - T_u$

La puissance utile disponible sur l'arbre du moteur est $P_u = P_A - P_{JE} - P_{JI} - P_C$

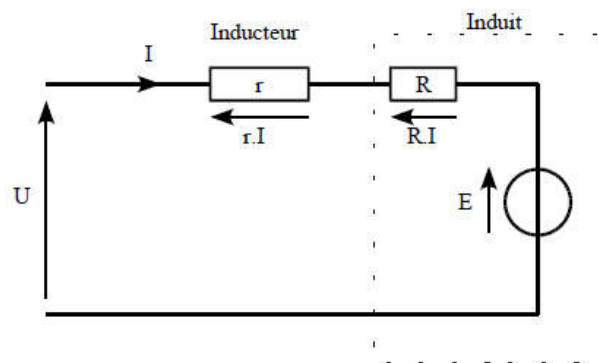


Le rendement du moteur à courant continu est $\eta = \frac{P_u}{P_A} = \frac{P_u}{P_u + u \cdot i + R \cdot I^2 + P_C}$

B. Le moteur à excitation série :**Modèle électrique :**

L'inducteur et l'induit sont parcourus par la même intensité I (L'inducteur est placé en série avec l'induit).

Modèle électrique du moteur à excitation série



Équation de fonctionnement : $U = E + (r + R) \cdot I$

Bilan des puissances et rendement :

Le moteur absorbe la puissance électrique $P_A = U \cdot I$

Les pertes par effet Joule au niveau de l'excitation (l'inducteur) sont données par $P_{JE} = r \cdot I^2$

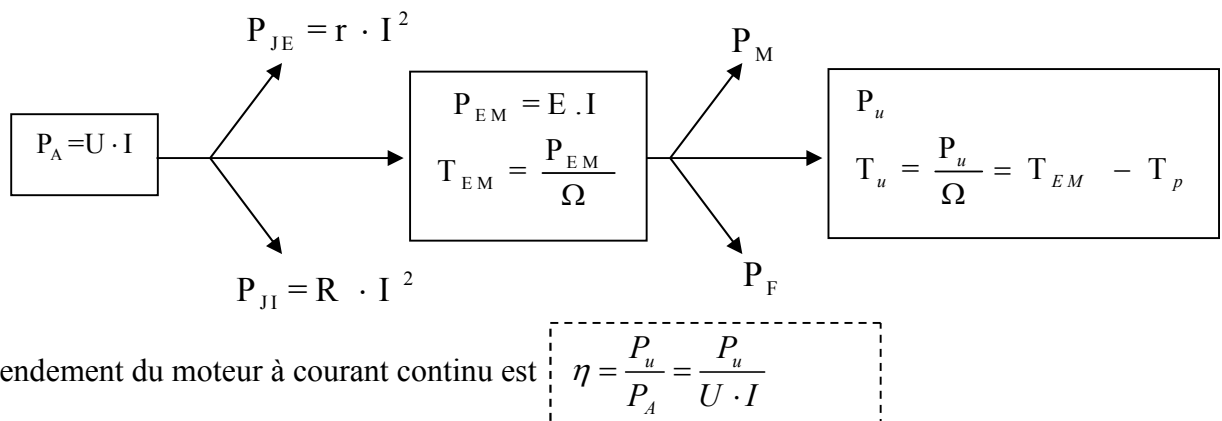
Les pertes par effet Joule pour l'induit sont $P_{JI} = R \cdot I^2$

La puissance électromagnétique est donnée par $P_{EM} = P_A - P_{JE} - P_{JI} = E \cdot I$

Lors d'un essai à vide, on peut déterminer les pertes collectives P_C qui représentent les pertes magnétiques ou pertes fer P_F ainsi que les pertes mécaniques P_M soit : $P_C = P_F + P_M$

Nous définissons le couple de pertes par $T_p = T_{EM} - T_u$

La puissance utile disponible sur l'arbre du moteur est $P_u = P_A - P_{JE} - P_{JI} - P_C$



Le rendement du moteur à courant continu est

2.4.4. Quelques considérations pour le moteur à courant continu :**Démarrage des moteurs à courant continu :**

Nous avons vu précédemment que la f.e.m. $E = k \cdot \Omega$. Or, au démarrage, $\Omega = 0$ donc $E = 0$.

Pour un moteur à excitation séparée, $U = R \cdot I_D \Rightarrow I_D = \frac{U}{R}$. D'où, le courant de démarrage est très

important. En effet, ce courant est source de détérioration du moteur, pour cela on essaie de limiter ce courant soit par adjonction d'une résistance de démarrage qu'on diminue progressivement soit par augmentation progressive de la tension d'induit. Dès que le moteur

commence à tourner, $I_D = \frac{U - E}{R}$ et décroît rapidement jusqu'à sa valeur nominale I .

Si nous démarrons le moteur en charge avec une charge qui présente un couple résistant T_R ,

l'intensité de démarrage doit être $I_D > \frac{T_R}{K \Phi}$.

2.5. Moteur pas à pas

Le moteur pas à pas est un actionneur qui transforme des impulsions (en provenance d'un circuit de commande) en une rotation de "n" pas du rotor, ce qui permet de réaliser un positionnement ou une vitesse précise et sans boucle d'asservissement (un positionnement précis en boucle ouverte). La constitution d'un moteur pas à pas est très simple, et sa rotation est obtenue en contrôlant l'alimentation des bobines et le sens du courant dans celles-ci.

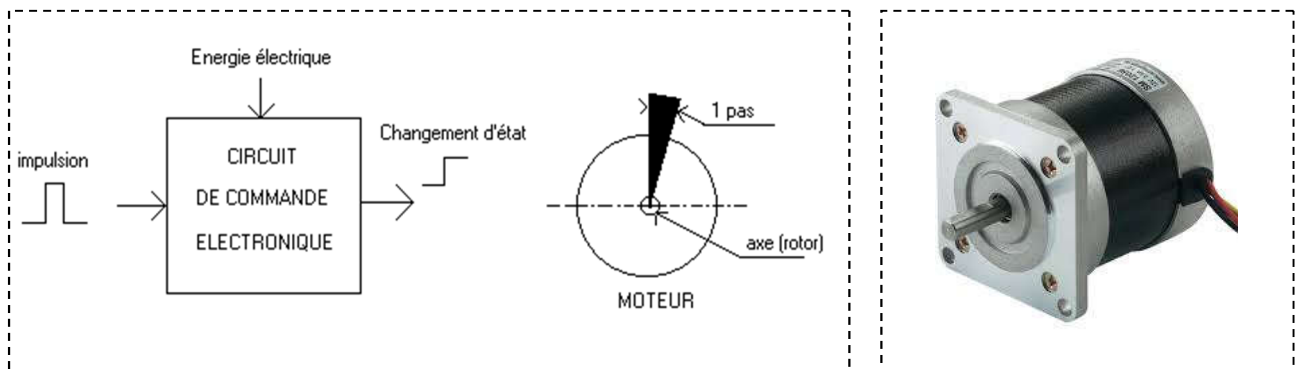


Figure 2.16. Moteur pas à pas.

Dans un fonctionnement normal, la vitesse de rotation de ces moteurs ne dépend que de la fréquence des impulsions électriques f_{pulse} et du nombre de pas par tour N_{pas}

$$\omega = \frac{2\pi \cdot f_{pulse}}{N_{pas}} [rad / sec] \quad \text{ou} \quad N = \frac{60 \cdot f_{pulse}}{N_{pas}} [r / sec]$$

Le fonctionnement d'un moteur pas à pas est basé sur la commutation successive des enroulements stator (ou phase). Pour cette raison, l'impulsion électrique envoyée au moteur est traduite par un séquenceur et elle va agir ainsi sur l'électronique de commutation (drivers ou transistors de puissance) qui distribue les polarités dans les enroulements. Notons que, quelle que soit la durée de l'impulsion envoyée (supérieur à une valeur minimale), **une seule commutation** provoque **un seul pas**.

2.5.1. Le domaine d'application des moteurs pas à pas.

Les moteurs pas à pas sont utilisés pour positionner un objet précisément. L'avantage de ce type de moteur est de tourner avec la possibilité de s'arrêter dans une position désirée, avec une très grande précision (sans frein). Pour cette raison, ce type de moteur est très sollicité, par exemple dans :

La robotique : les moteurs pas à pas sont très utilisés comme des actionneurs dans le domaine de la robotique.

L'informatique. Le déplacement d'une tête de lecture d'un lecteur de disquette requiert une bonne précision, sous peine de ne pas retrouver l'information à lire sur le support. De même pour certains disques durs d'ancienne génération. Les imprimantes utilisent aussi ces moteurs, le déplacement de la tête d'impression, l'avance du papier, et même sur certains modèles, l'avance du ruban, sont pilotés par des moteurs pas à pas.

En réception. Les moteurs pas à pas utilisés pour faire le positionnement d'une parabole motorisée.

Astronomie. Certaines montures sont animées aussi par ces moteurs.

Il existe d'autres domaines d'application des moteurs pas à pas.

2.5.2. Principe de fonctionnement

Si un **aimant permanent** est placé sur un axe de rotation, entre **deux bobines** à axes perpendiculaires, nous remarquons que :

- Si on alimente **une seule bobine**, l'aimant se positionne parallèlement à son axe ;
- Si le **courant** dans la bobine **est inversé**, l'aimant fait un 1/2 tour (90°) et reste parallèle à l'axe de la bobine ;
- Si on alimente **les deux bobines**, l'aimant se positionne suivant la bissectrice des deux axes.

On dit que l'aimant se positionne de façon qu'il soit traversé par le maximum de flux : **règle de flux maximal**.

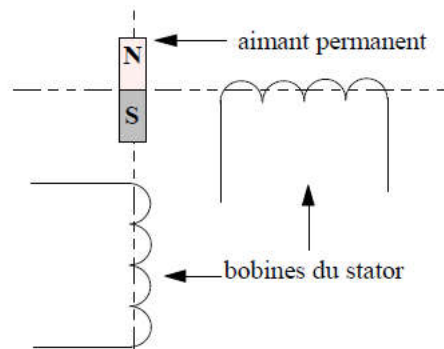


Figure 2.17. Principe de fonctionnement d'un moteur pas à pas.

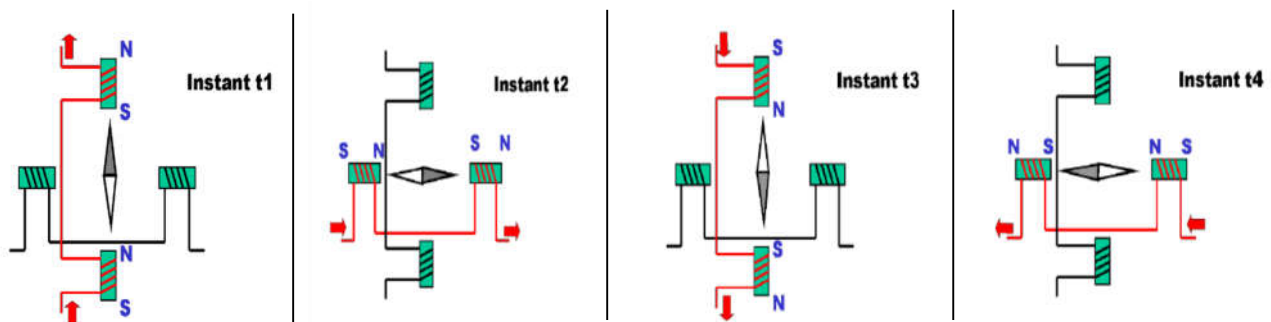


Figure 2.18. Illustration de fonctionnement d'un moteur pas à pas.

Considérons le moteur pas à pas (**théorique**) de la **Figure 2.17** composé d'un aimant permanent (boussole) et de 2 bobinages constitués chacun de 2 bobines. Le passage d'un courant, successivement dans chaque bobinage, fait tourner l'aimant. Ainsi, nous avons créé un moteur de 4 pas par tour.

Les bobines diamétralement opposées forment les phases. Elles sont connectées de façon à créer deux pôles : un pôle sud et un pôle nord. En inversant le sens du courant dans une phase, il est possible de permuter les pôles engendrés par une bobine. De ce fait, le rotor se déplace alors et prend une nouvelle position d'équilibre stable.

2.5.3. Constitution d'un moteur pas à pas

Un moteur pas à pas est constitué par (comme la majorité des moteurs) :

- Une **partie fixe** : C'est le **stator**, constitué d'un circuit magnétique et des bobines (phases) commutées en courant par une électronique de commande, ce qui génère un flux magnétique à directions multiples ;
- Une **partie mobile** : C'est le rotor, placé dans le flux du stator, il se positionne selon le flux maximum.

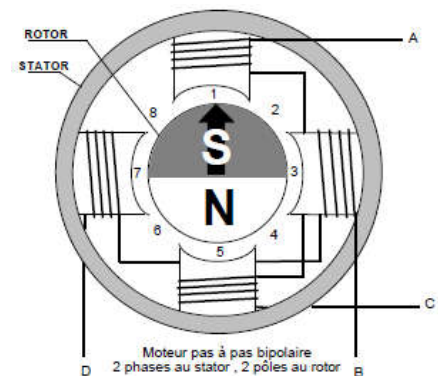
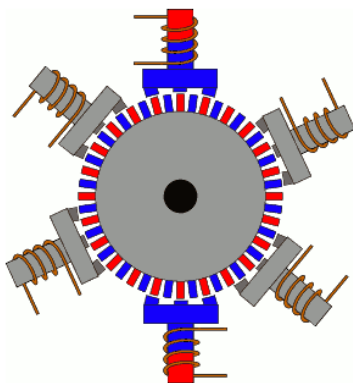


Figure 2.19. Constitution d'un moteur pas à pas.

Nous pouvons trouver trois technologies pour les rotors d'un moteur pas à pas, ce qui donne trois familles de ce type de moteurs:

1. Moteur à aimant permanent : **Il utilise le principe de l'action d'un champ magnétique sur un aimant ;**
2. Moteur à réluctance variable : **Il utilise le principe du flux maximum ;**
3. Moteur hybride : **c'est la superposition des deux principes ci-dessus.**

Pour les bobines, nous pouvons faire leur alimentation soit avec une tension unique soit avec deux tensions symétriques :

1. Moteur unipolaire (bobines à point milieu, **une seule tension**);
2. Moteur bipolaire (pas de point milieu donc **deux tensions symétriques**).

Remarque : Dans un moteur pas à pas, le nombre de pas est dépend de deux caractéristiques du moteur :

1. Le nombre de phase (partie commande) ;
2. Le nombre de paires de pôles (partie rotor).

Nombre de pas par tour = nombre de phase x nombre de paires de pôles du rotor

Le moteur bipolaire

Il n'existe pas un point de milieu dans Les enroulements du stator. La borne de chaque enroulement est alimentée par une polarité positive puis négative (d'où le terme bipolaire).

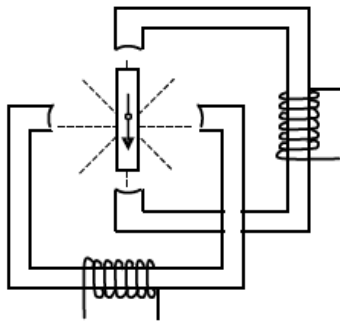


Figure 2.20. Moteur bipolaire

Le moteur unipolaire

Il existe un point milieu dans les enroulements. Les bornes sont toujours alimentées par une polarité de même signe (d'où le terme unipolaire).

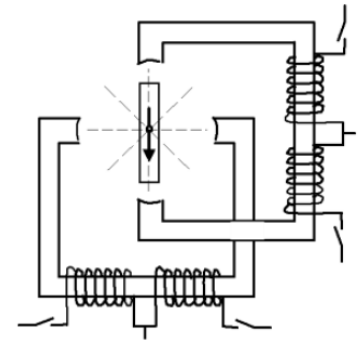
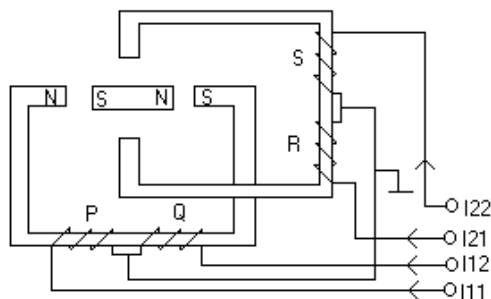


Figure 2.21. Moteur unipolaire

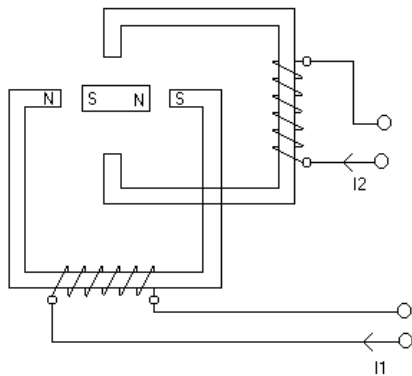
Exemple 1 : Moteur pas à pas unipolaire

Nous alimentons successivement chaque demi-enroulement.



Séquence	Phase P I11	Phase Q I12	Phase R I21	Phase S I22	Angle
1	1	0	0	0	0
2	0	0	1	0	90°
3	0	1	0	0	180°
4	0	0	0	1	270°

Nous alimentons les enroulements à point milieu avec une polarité de même signe. Le nombre de phases est égal au nombre de demi-enroulements. Pour cet exemple, nous avons donc un moteur à 4 phases (P, Q, R, S).

Exemple 2 : Moteur pas à pas bipolaire

Nous alimentons un enroulement à la fois :

Séquence	$I1 > 0$	$I1 < 0$	$I2 > 0$	$I2 < 0$	Angle
1	1	0	0	0	0
2	0	0	1	0	90°
3	0	1	0	0	180°
4	0	0	0	1	270°

On alimente 2 enroulements à la fois :

Séquence	$I1 > 0$	$I1 < 0$	$I2 > 0$	$I2 < 0$	Angle
1	1	0	1	0	45°
2	0	1	1	0	135°
3	0	1	0	1	225°
4	1	0	0	1	315°

Le sens de rotation d'un moteur pas à pas de type bipolaire est dépend du sens du courant et de l'ordre d'alimentation des bobinages. Le nombre de pas par tour d'un moteur bipolaire: **$N_p = \text{nombre de phases} * \text{nombre de pôles au rotor}$** . Dans l'exemple ci-dessus, on a 2 phases et 2 pôles au rotor, d'où $N_p = 4$ pas/ tour.

2.5.4. Le moteur pas à pas à aimant permanent

Le rotor d'un moteur pas à pas à aimant permanent est constitué **d'un aimant permanent**, et le stator comporte **2 bobinages** (ou 2 groupes de bobinages). Le fonctionnement de ce modèle est simple. En contrôlant l'alimentation des bobines, et le sens du courant qui circule dans les bobines, on peut faire varier le champ dans le moteur.

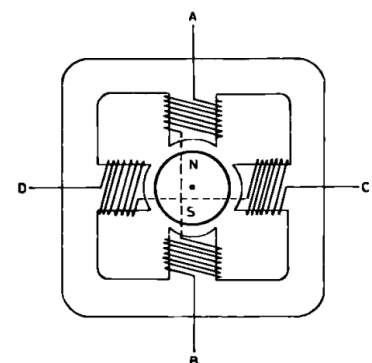


Figure 2.22. Structure d'un moteur pas à pas à aimant permanent.

A. Les modes de commande d'un moteur pas à pas à aimant permanent

- **Fonctionnement en pas entier :**

Pour ce mode de fonctionnement, les bobines sont alimentées l'une après l'autre dans un sens puis dans l'autre. L'aimant permanent suit le déplacement du champ magnétique généré par ces bobines et s'oriente selon une de ses 4 positions stables. Comme le rotor est aimanté, lorsque le moteur n'est pas alimenté le flux magnétique du à l'aimant permanent va à lui seul créer un couple résiduel ou couple de détente, en se mettant dans l'axe de l'une des bobines.

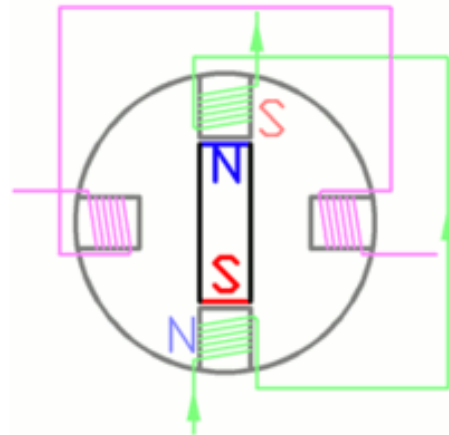


Figure 2.23. Fonctionnement en pas entier.

- **Fonctionnement en mode « High Torque » (fort couple) :**

Pour augmenter l'intensité du flux magnétique généré par le stator, et donc le couple moteur, Nous pouvons alimenter les deux bobines en même temps, en faisant varier uniquement le sens du courant qui circule dans chaque bobine.

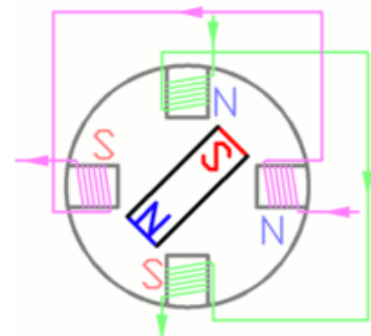


Figure 2.24. Fonctionnement en mode «fort couple».

- **Fonctionnement en mode demi-pas :**

Pour augmenter le nombre de positions stables, autrement le nombre de pas du moteur à aimant permanent, il est possible de combiner les 2 modes précédents dans un mode de commande appelé « **demi-pas** ».

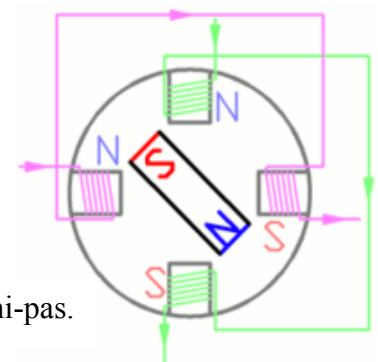


Figure 2.25. Fonctionnement en mode demi-pas.

Remarque. Un moteur pas à pas a un couple moteur important, mais une résolution (nombre de pas par tour) faible, et une fréquence de rotation faible. La commande de ces moteurs pas à pas nécessite de contrôler le sens du courant qui circule dans chaque bobine.

2.5.5. Moteur pas à pas à réluctance variable

Le rotor est conçu en forme d'un cylindre **en fer doux (non aimanté)** dans lequel sont taillées des dents (pôles du rotor). Le stator est un empilage de tôles découpées, encochées où sont logés des enroulements diamétralement opposés. Pour ce type de moteur, le nombre de dents au rotor (N_r) est obligatoirement différent de celui de stator (N_s).

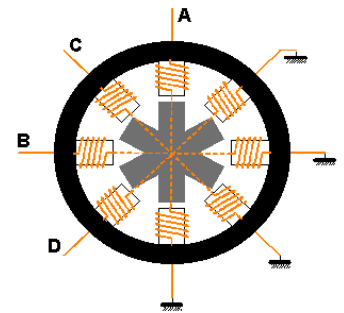


Figure 2.26. Moteur pas à pas à réluctance variable.

Le fait d'alimenter une paire de bobines, le rotor se place de façon à ce que le flux qui le traverse soit maximal (ou réluctance minimale). Comme il est illustré sur la Figure 2.27, le rotor avance d'un pas à chaque impulsion de courant sur une nouvelle paire de bobine (A-A' puis B-B' puis C-C' puis A-A').

Nombre de pas par tour : $N_p = N_s \times N_r / (N_s - N_r)$

Notons que le sens de rotation ne dépend pas du sens du courant qui circule dans les bobines mais de l'ordre d'alimentation de celles ci.

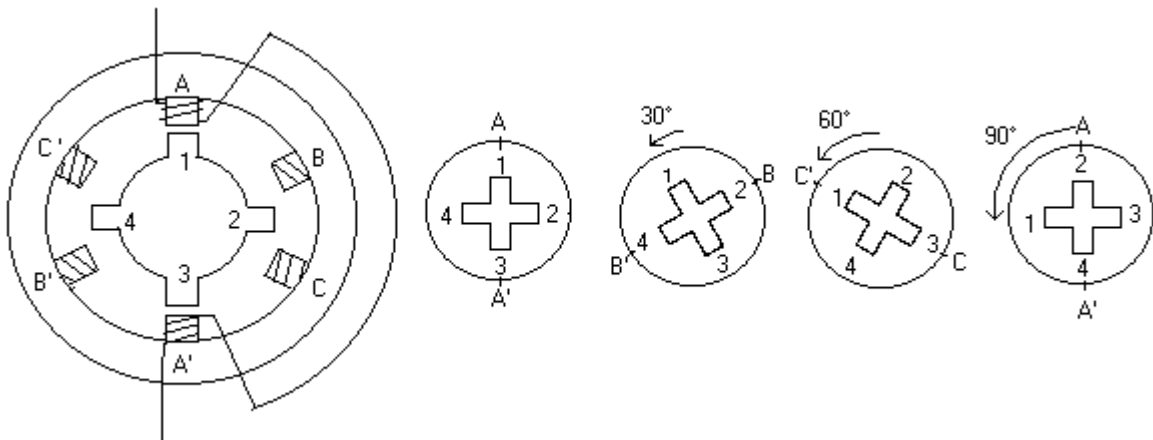


Figure 2.27. Moteur pas à pas à réluctance variable ($N_s = 6$ dents, $N_r = 4$ dents).

Si par exemple $N_s = 6$ et $N_r = 4$, nous n'avons $N_p = (6 \times 4) / (6 - 4) = 12$ pas par tour. Le Déplacement angulaire correspondant à 1 pas = $360^\circ / 12 = 30^\circ$. Donc, le rotor devra donc faire 12 pas (de 30°) pour faire 1 tour.

Remarque : Le moteur à réluctance variable est caractérisé par un nombre de pas élevé et sa construction est simplifiée (pas d'aimant au rotor). Néanmoins, il a deux défauts : un couple de travail faible et un couple nul lorsqu'il n'est plus alimenté.

2.5.6. Le moteur pas à pas hybride

Le moteur hybride est une combinaison des deux types de moteurs vus précédents (à aimant permanent et à réluctance variable). Dans ce type, le rotor est constitué d'aimants dentés ce qui donne un fort couple et un nombre de pas par tour élevé.

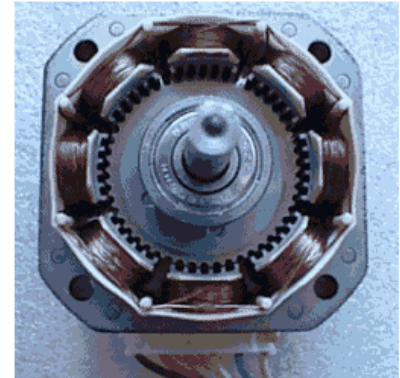
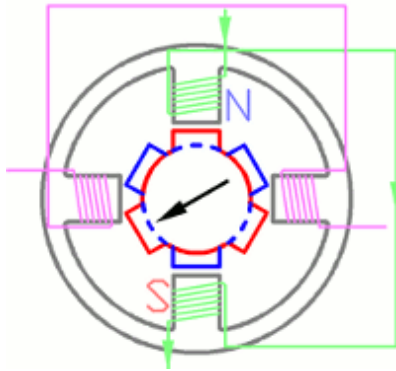


Figure 2.28. Moteur pas à pas hybride.

Type de moteur	Moteur à aimant permanent	Moteur à réluctance variable	Moteur hybride
Résolution (Nb de pas/tour)	Moyenne	Bonne	Elevée
Couple moteur	Elevé	Faible	Elevé
Sens de rotation	Il dépend : - du sens du courant pour le moteur bipolaire - L'ordre d'alimentation des bobines	Il dépend uniquement de l'ordre d'alimentation des bobines	Il dépend : - du sens du courant pour le moteur bipolaire - L'ordre d'alimentation des bobines
Fréquence de travail	Faible	Grande	Grande

Tableau 2.2. Comparaison des 3 catégories de moteurs pas à pas.