

# Principes et caractéristiques des principaux moteurs électriques

## Critères de choix d'un moteur

Le moteur est généralement choisi en fonction de l'utilisation mécanique et de l'alimentation électrique dont on dispose.

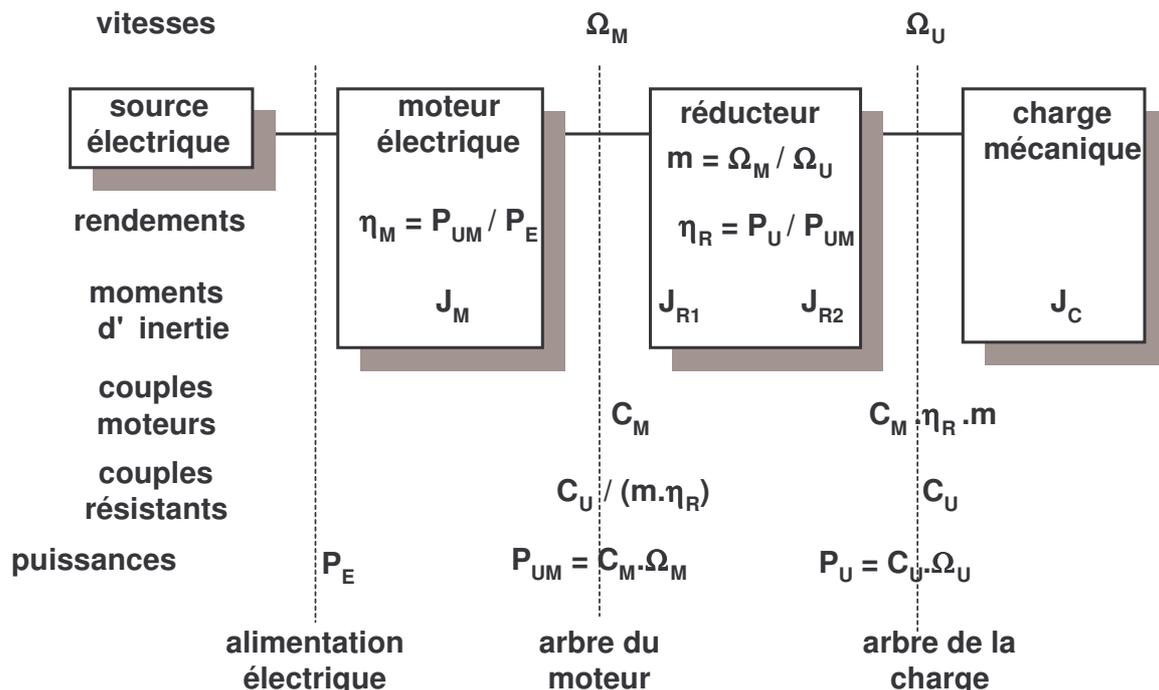
### Cahier des charges

- puissance utile, vitesse de la charge, couple utile ;
- type d'alimentation (continue ou alternative) ;
- vitesse variable ou constante (présence ou non d'un dispositif d'électronique de puissance) ;
- performances dynamique (performances de la commande, inertie du moteur...)

Un réducteur entre la charge et le moteur sera souvent nécessaire.

### Synoptique

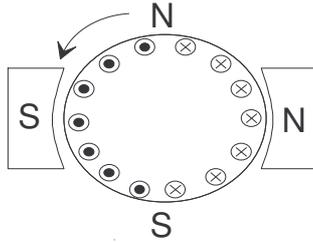
La figure suivante résume les principales grandeurs à prendre en compte pour le choix d'un moteur et la modélisation de l'entraînement :



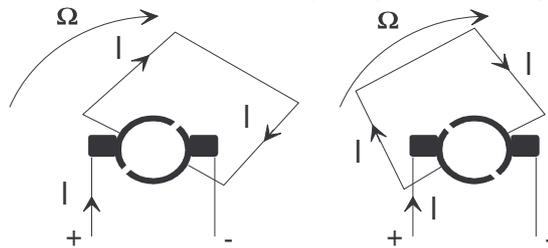
Vitesses, couples, puissances permettent de choisir moteur et réducteur, mais les moments d'inertie ne sont pas à négliger si on souhaite de bonnes performances dynamiques.

## Les moteurs à courant continu (MCC, Brushed motor, DC motor)

Le principe de ce moteur est représenté sur la vue en coupe radiale ci-dessous.

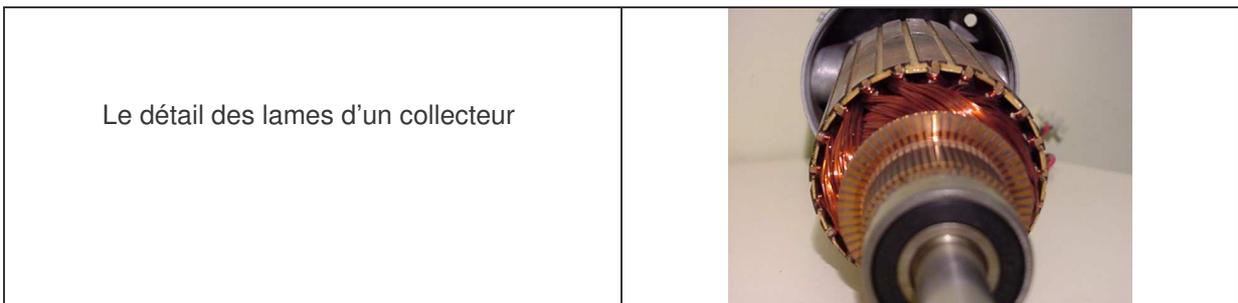
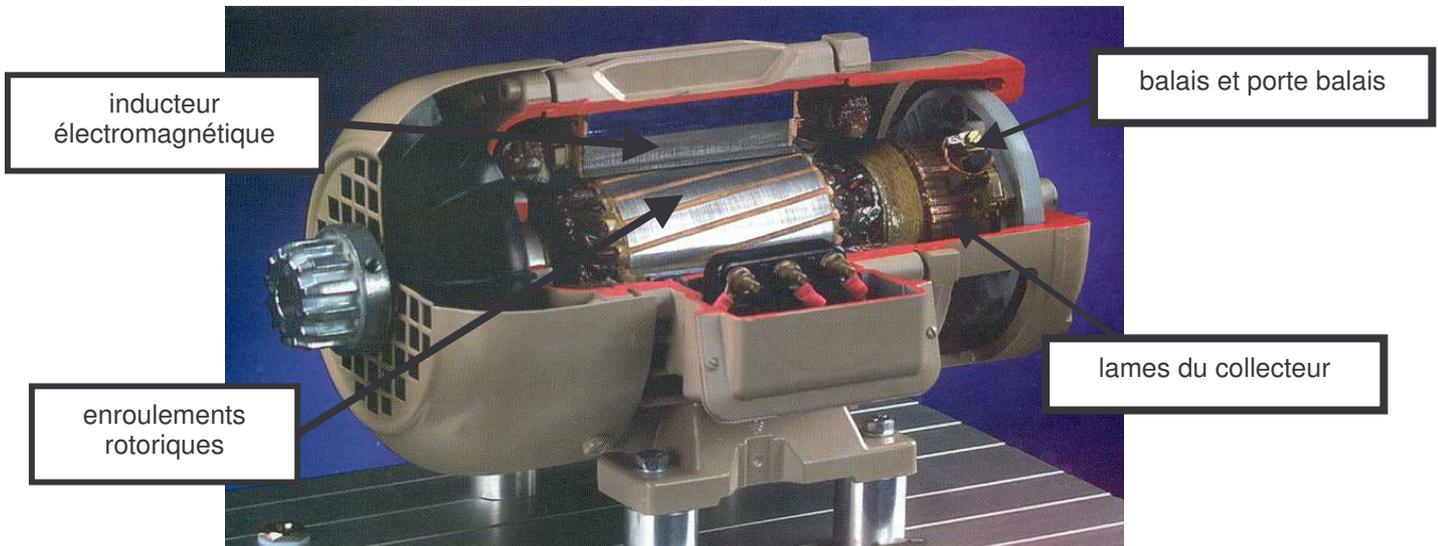


Au stator (la partie immobile) on crée un champ magnétique, soit à l'aide d'aimants permanents, soit par le passage d'un courant continu (appelé courant inducteur) dans une bobine (électroaimant). Par une alimentation électrique continue, on fait circuler un courant (appelé courant induit) dans le bobinage du rotor (partie en rotation), ce qui donne naissance à un champ magnétique d'axe perpendiculaire à celui du stator. Les pôles magnétiques de noms opposés s'attirent alors, créant un couple mécanique  $C$  provoquant le mouvement du rotor. Pour avoir toujours la présence de ce couple, la distribution du courant dans le rotor par rapport à l'axe du stator doit rester identique quelle que soit la position du rotor. Cette fonction est assurée par le système d'alimentation des conducteurs rotoriques, l'ensemble collecteur et balais, dont le principe est donné par la figure ci-dessous.



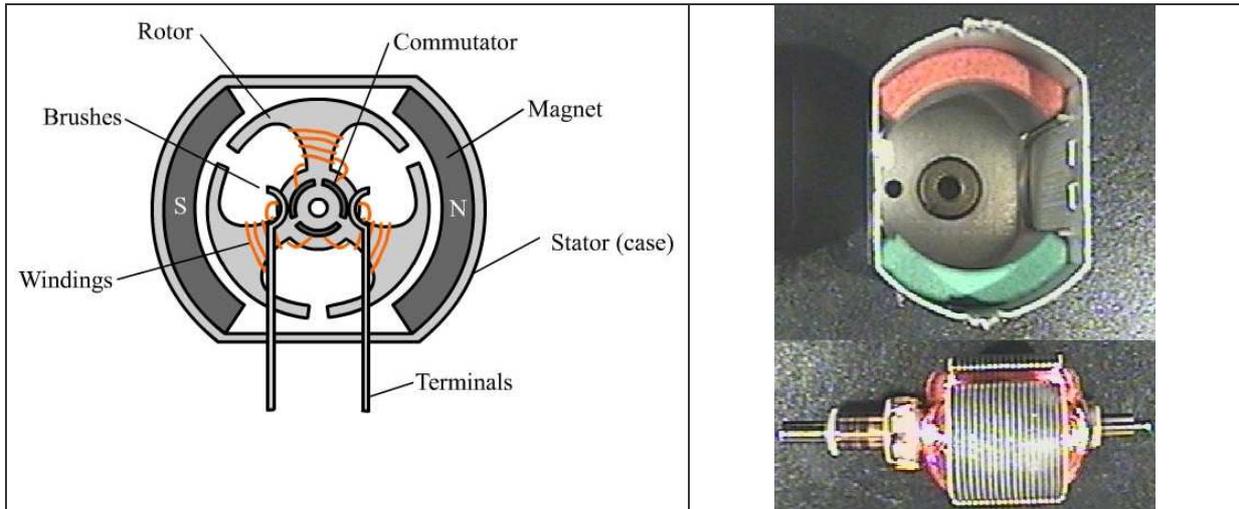
Les figures suivantes donnent quelques exemples de moteur à courant continu :

Un moteur de quelques kilowatts dont l'induction est réalisée par électroaimants :



Le détail des lames d'un collecteur

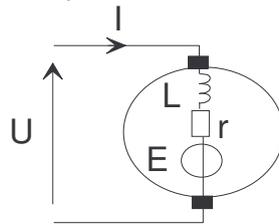
Un moteur à aimant de faible puissance (quelques watts) :



(d'après [http://www.cedrat.com/engineering/Magnetic\\_&\\_electric\\_devices\\_engineering/Motors/Motors.htm](http://www.cedrat.com/engineering/Magnetic_&_electric_devices_engineering/Motors/Motors.htm)) et

### Principales équations

D'un point de vue électrique le moteur est équivalent au schéma suivant :



avec pour équations :

$$E = K \Phi \Omega$$

$$C = K \Phi I$$

où E représente la force contre électromotrice du moteur,  $\Phi$  le flux du champ magnétique créé au stator,  $\Omega$  la vitesse de rotation angulaire (en rd/s), C le couple (en Nm), I le courant et K une constante propre au moteur.

D'un point de vue électrique, en toute rigueur nous avons :

$$U = E + rI + L \frac{dI}{dt}$$

Si on suppose le courant parfaitement continu cela devient :

$$U = E + rI \approx E$$

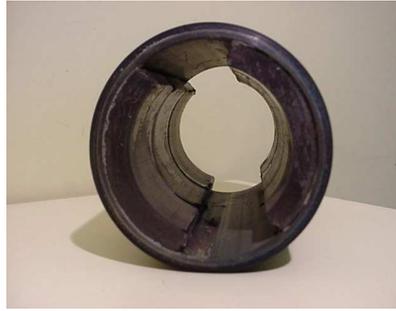
la résistance étant relativement faible (quelques m $\Omega$  pour un moteur de plusieurs kW).

Comme le montrent ces équations, la machine est parfaitement réversible et si on l'entraîne en rotation, on obtient à ces bornes une force électromotrice  $E = K\Phi\Omega$ , donc proportionnelle à la vitesse si le flux est constant. Cette machine n'est plus utilisée en génératrice aujourd'hui, exceptée pour des mesures de vitesses (génératrice tachymétrique).

Pour l'utilisation en moteur trois grandes tendances se dégagent.

### Moteur à aimant

Le champ d'excitation  $\Phi$  est fourni par des aimants permanents et reste donc constant.



Les relations précédentes deviennent alors :

$$U \approx E = K' \Omega$$

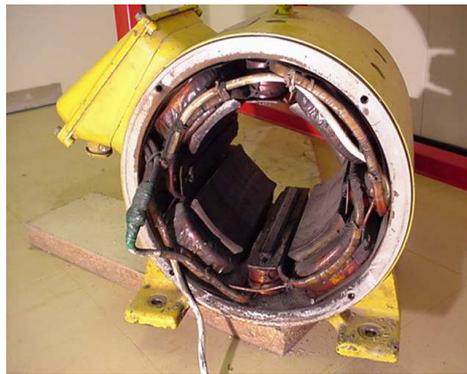
$$C = K' I$$

Ce moteur devient très intéressant dès que l'on souhaite faire de la vitesse variable : il suffit alors de l'alimenter avec une tension continue réglable, la vitesse étant proportionnelle à cette tension. La linéarité de ses caractéristiques fait que la conception d'un asservissement de vitesse (entraînement en rotation d'un lecteur de disquette ou de bande magnétique par exemple) ou de position (bras de robot par exemple) devient relativement simple.

La puissance de ces moteurs est limitée à quelques kW.

### Moteur à électroaimant

Pour des moteurs de puissance plus importante, le champ magnétique statorique n'est plus créé cette fois par un aimant, mais par un bobinage

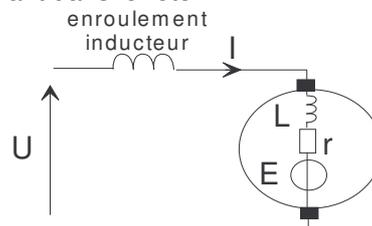


L'alimentation du stator est fournie par une source continue indépendante de l'induit ou plus simplement en parallèle sur l'induit.

On peut également envisager de générer le champ magnétique statorique par le même courant que celui du rotor en plaçant rotor et stator en série ; on obtient alors les propriétés décrites ci-après.

### Moteur à excitation série ou moteur universel

L'inducteur est alimenté par le courant dans le rotor.



Le flux est alors fonction de ce courant et la relation sur le couple devient :

$$C = K \Phi I = K'' I^2$$

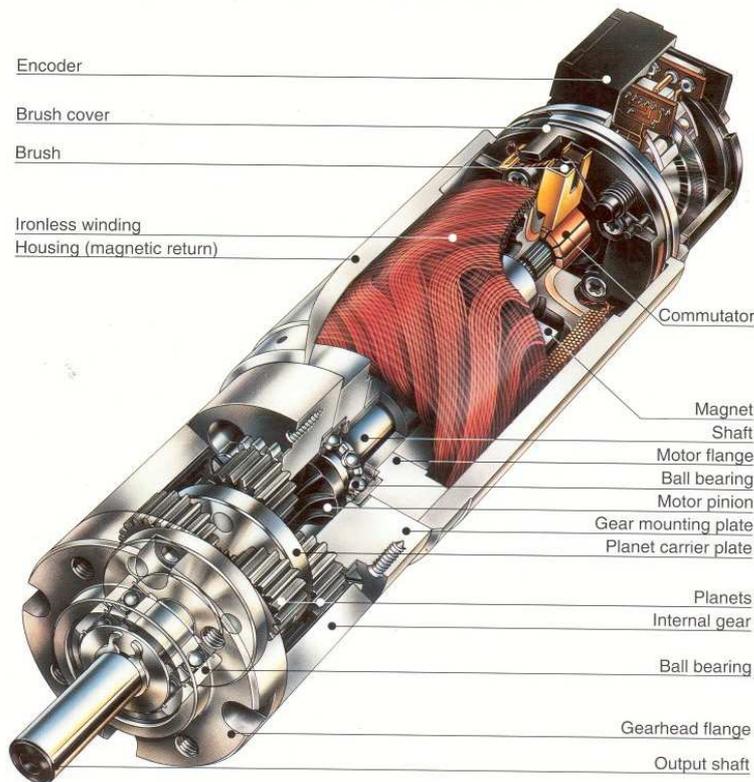
De cette relation on peut tirer les deux applications principales :

- a) Au démarrage d'un moteur la vitesse étant nulle, le courant au rotor est uniquement limité par la résistance série ( $\Omega=0$  donc  $E=0$ ) et prend une valeur très importante. Le couple fourni par ce genre de moteur est donc très grand au démarrage ce qui est une propriété très intéressante pour la traction électrique (locomotive, TGV Sud Est, véhicule et chariot électriques etc...)

b) Le couple de ce moteur ne dépend pas du sens du courant, on peut donc l'alimenter en alternatif. Ce moteur est très utilisé pour les applications domestiques (petit électroménager, perceuse etc...). On l'appelle aussi moteur universel.

### **Moteurs utilisés en robotique**

Dans le but de diminuer l'inertie due à la présence de fer dans le rotor, les constructeurs placent souvent celui-ci à l'extérieur, bobiné en forme de cloche, le stator et les aimants occupant la partie centrale du moteur.



Le principe de fonctionnement de ce type de configuration repose alors sur l'utilisation de la force de Laplace. Celle-ci étant appliquée directement sur les conducteurs statoriques, la conception de moteur de ce type est limitée pour les forts couples.

### **Limitations de la machine à courant continu**

L'ensemble collecteur balais qui fait la force de cette machine en donnant des caractéristiques très linéaires, fait aussi sa principale faiblesse. Cet ensemble est très fragile mécaniquement, nécessite un entretien important et est le siège d'arcs électriques qui limite son utilisation à des atmosphères "saines" (sans risque d'explosions etc...). Cependant, grâce à la simplicité de sa commande il reste très utilisé.

## **Les moteurs pas à pas (Stepper Motor)**

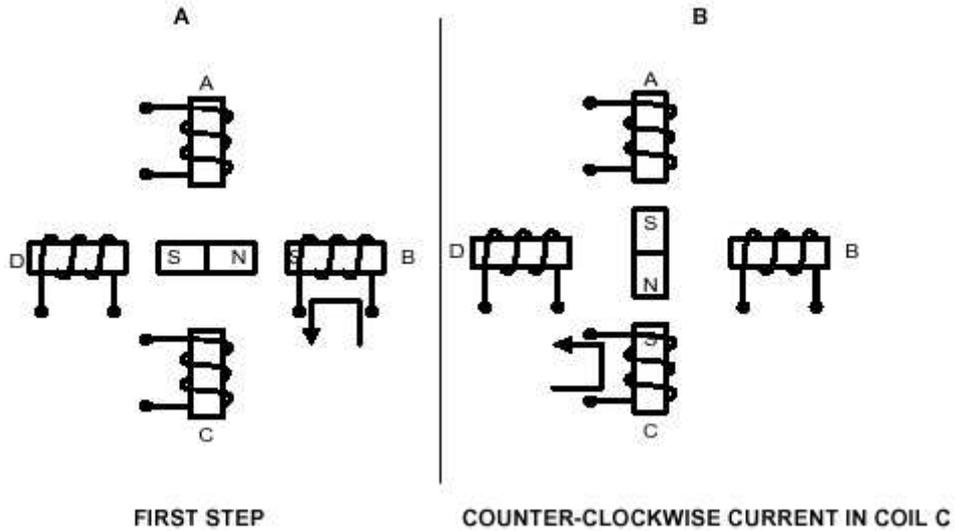
Le succès de ce moteur est en partie dû à sa constitution qui l'adapte parfaitement à une commande de type binaire, un coup d'horloge provoquant une rotation d'un pas. Pour l'électronicien, ce moteur est surtout utilisé dans le sens d'une "conversion d'information", plutôt que dans le sens d'une "transformation d'énergie". On parle parfois de "moteur numérique". Les applications vont du périphérique d'ordinateur (imprimante, lecteur de disquette etc...) à la machine outils. Son utilisation reste cependant aujourd'hui limitée à des puissances de quelques dizaines de watts.

### **Constitution**

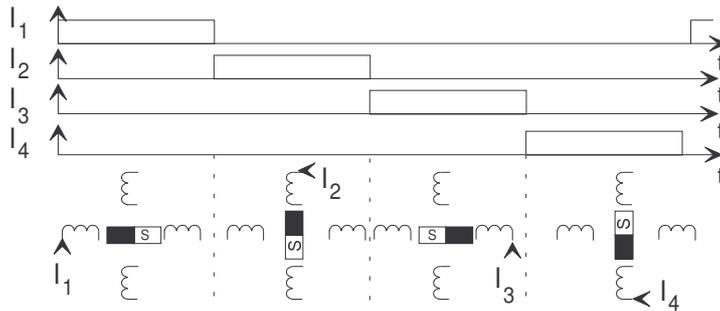
On rencontre trois types de moteur pas à pas.

## Moteur pas à pas à aimant

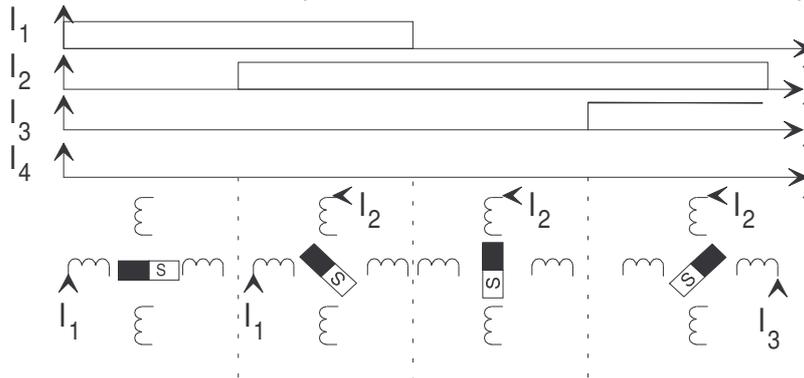
La figure ci-après donne la constitution simplifiée d'un moteur à quatre phases statoriques et un aimant rotorique :



L'alimentation par un courant d'une phase crée l'apparition d'un champ magnétique statorique, provoquant un mouvement du rotor.



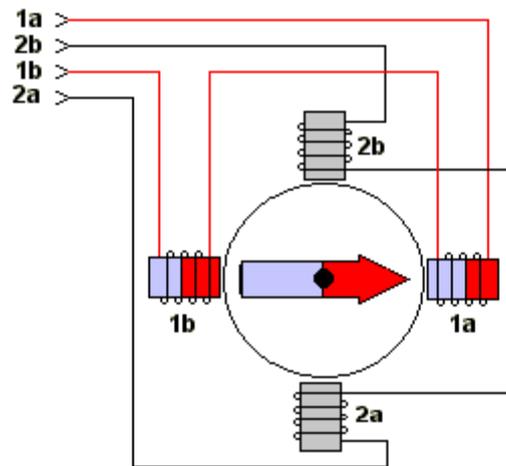
On obtient ainsi sur cet exemple simplifié quatre pas par tour. Il est possible de doubler ce nombre par l'utilisation d'une commande dite en demi-pas en commandant alternativement une puis deux phases :



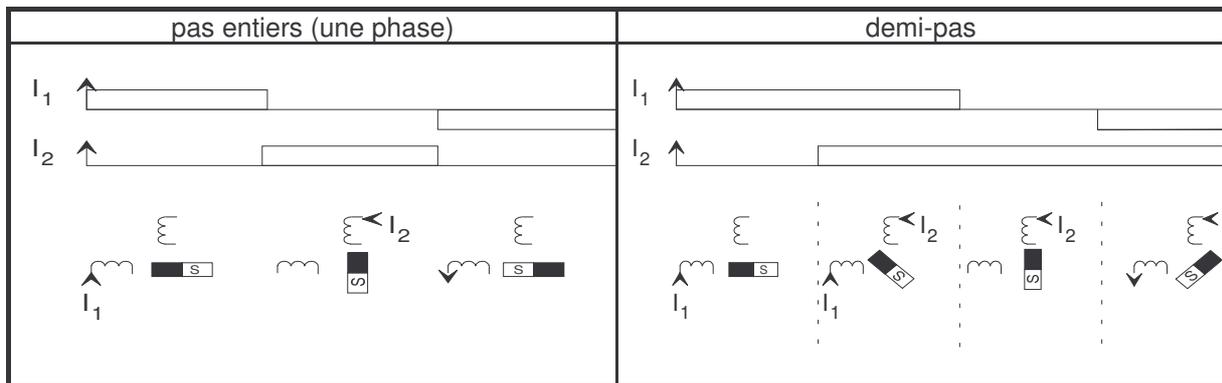
Le couple moteur ainsi obtenu n'est pas constant : il existe un rapport de  $\sqrt{2}$  sur la valeur de celui-ci, entre l'alimentation d'une ou deux phases (toujours dans notre exemple simplifié). Cette ondulation de couple peut être néfaste pour l'application considérée (en créant une vibration à vitesse élevée par exemple). Dans certains cas, on ne commande le moteur qu'avec les demi-pas correspondant à l'alimentation de deux phases, de manière à bénéficier d'un couple moteur plus élevé.

Il convient également de noter que la coupure de l'alimentation des phases n'annule pas complètement le couple, l'induction rémanente du stator maintenant le couple à environ 10% de la valeur maximale.

On peut obtenir les mêmes résultats que précédemment avec un nombre de phase deux fois plus faible en utilisant une alimentation bipolaire. La structure simplifiée du moteur est alors la suivante (d'après <http://70.85.87.12/stepper/Tutorials/BiTutor.html>) :



Les chronogrammes ci-après décrivent le fonctionnement en pas entiers une phase et en demi-pas :

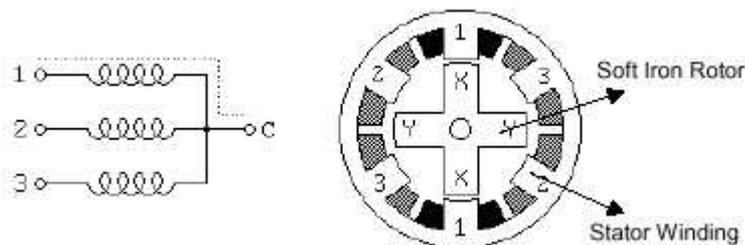


Les progrès réalisés en intégration et en électronique de puissance favorisent aujourd'hui l'usage de moteurs à alimentation bipolaire. L'électronique associée est plus complexe, mais la connectique avec le moteur et la conception de ce dernier s'en trouvent simplifiées.

Les moteurs à aimant sont limités par le nombre de pas par tours qu'ils peuvent produire (en général de 2 à 24), celui-ci dépendant du nombre de phases et du nombre de pôles par phases.

### Moteur pas à pas à réluctance variable

Une approche simplifiée de ce moteur est donnée par la figure suivante :



Le rotor, qui ne contient pas d'aimants permanents, est simplement réalisé en matériau ferromagnétique. Le stator est constitué de trois phases matérialisées par les enroulements « 1 », « 2 » et « 3 ». Dans l'exemple de la figure, l'alimentation de la phase « 2 » provoquera un champ magnétique circulant par le stator et les dents du rotor les plus proche des enroulements excités (c'est à dire les dents notées Y). Le rotor se magnétise et un couple se crée entre stator et rotor, provoquant

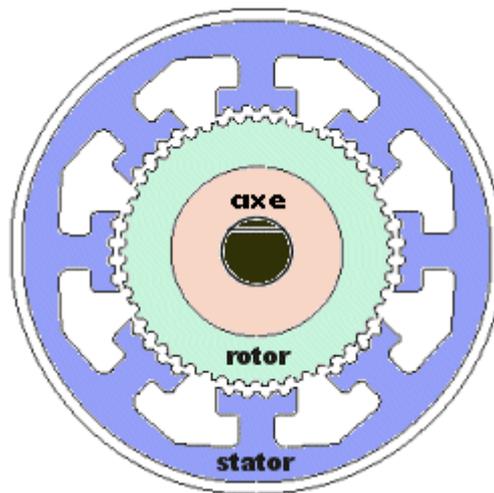
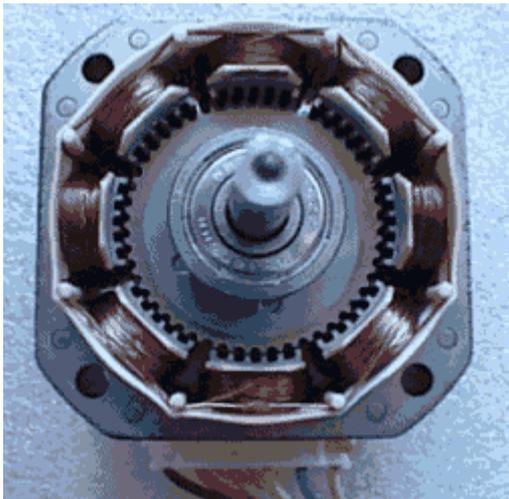
la rotation de ce dernier, vérifiant ainsi la règle du flux maximal (le circuit magnétique se configure de manière à provoquer le passage du flux maximal). On peut remarquer que le moteur tourne dans le sens inverse de l'alimentation des phases. Lors de la rotation, la réluctance vue de la phase varie, ce qui justifie le nom du moteur.

En jouant sur le pas des enroulements statoriques  $\alpha_s$  et des dents au rotor  $\alpha_r$ , on peut obtenir un nombre de pas par tour très important (exemple 72 pas par tours).

Le couple fourni par ce moteur est plus faible que celui d'un moteur à aimant et il n'existe pas de couple de maintien en cas de suppression de l'alimentation.

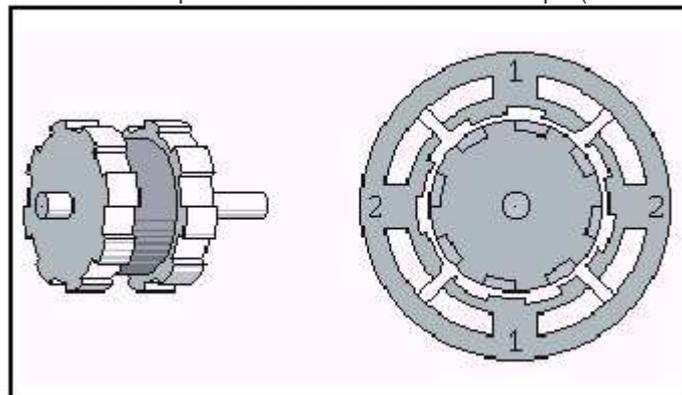
### Moteurs pas à pas hybrides

L'idée est de bénéficier des avantages du moteur à aimant (couple élevé) et à réluctance (nombre de pas par tour élevé) en associant les deux principes.



Moteur pas à pas hybride (d'après <http://etronics.free.fr/dossiers/num/num50/mpap.htm> )

On peut également augmenter le nombre de pas par tour en plaçant sur un même axe plusieurs moteurs judicieusement décalés. On parle alors de moteur multi-corps (multistack).



### 1.2. Caractéristiques mécaniques

De part sa conception, le moteur pas à pas est prévu pour fonctionner normalement dans un asservissement de position en boucle ouverte : aucun capteur de position n'est nécessaire à condition de respecter certaines règles de manière à ne pas provoquer de "pertes de pas".

La première condition à respecter est évidemment de ne pas entraîner une charge de couple résistant supérieur au couple moteur. Ce n'est cependant pas suffisant.

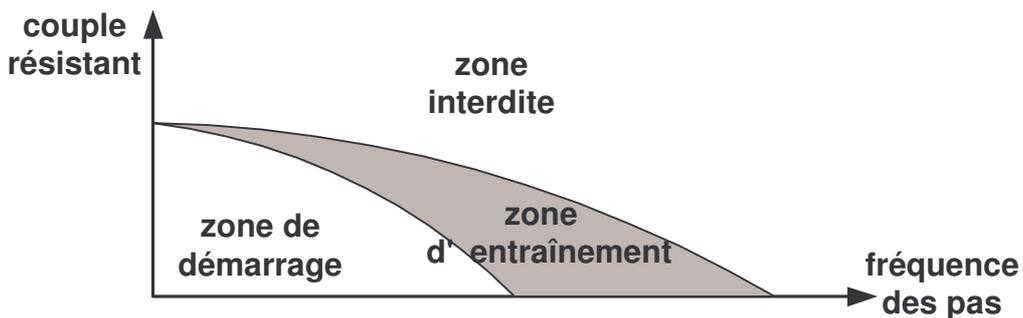
Comme tout système en rotation, le fonctionnement est régi par l'équation fondamentale de la dynamique :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_M - C_R$$

avec  $J$  : inertie de l'ensemble moteur charge  
 $\Omega$  : vitesse de rotation  
 $C_M$  : couple moteur  
 $C_R$  : somme des couples résistants

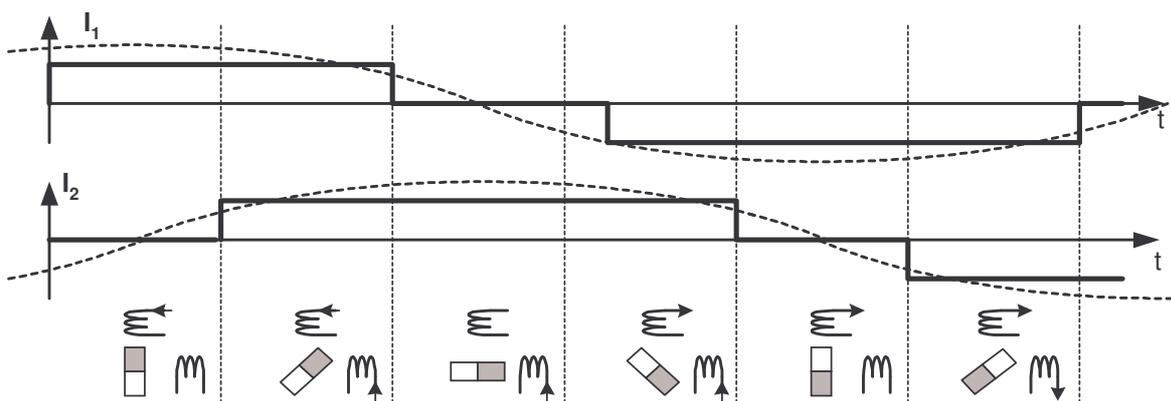
Il ne faudra donc pas vouloir imposer une accélération trop importante au démarrage, ni une décélération trop grande en régime établi. La fréquence maximale d'alimentation du moteur sera donc limitée au démarrage (en fonction du couple résistant et du moment d'inertie), de même que l'on ne pourra passer brutalement d'une fréquence importante à une vitesse faible, sans provoquer une perte de pas (et rendre inopérant un asservissement de position).

Le constructeur donne donc l'évolution de la fréquence d'alimentation du moteur en fonction du couple de charge pour une inertie donnée, définissant trois zones : marche-arrêt (dite de démarrage ou start-stop), entraînement (ou survitesse) et interdite.



## Les moteurs synchrones

Le moteur synchrone peut être vu dans une première approche comme un moteur pas à pas bipolaire à aimant, alimenté en mode demi-pas. Comme nous l'avons vu, dans ce mode de fonctionnement, le couple est plus important lorsque les deux phases sont alimentées, et moins important lorsqu'une seule est alimentée, ce qui peut créer des vibrations. Pour atténuer ce phénomène, il est possible d'augmenter le courant dans la phase, lorsqu'elle est seule à être alimentée, voire alimenter les phases en sinusoïdal pour lisser complètement le couple (ce qui se fait parfois avec le moteur pas à pas, on parle alors de mode micro-pas).



Le fonctionnement du moteur synchrone est basé sur ce principe : un aimant au rotor est entraîné en rotation par un champ magnétique tournant au stator, champ magnétique créé par des courants sinusoïdaux polyphasés. Il n'est en effet pas possible de créer un champ magnétique tournant avec une seule phase (voir le principe du moteur pas à pas), le moteur sera donc biphasé (2 phases en quadratures comme dans l'exemple précédent) ou triphasé, les différentes bobines statoriques étant décalées de 120°.

La vitesse de rotation est directement proportionnelle à la fréquence d'alimentation du stator (d'où le nom synchrone) :

$$\omega = p \Omega$$

avec  $\Omega$  la vitesse angulaire de rotation,  $\omega$  la pulsation des tensions d'alimentation,  $p$  étant une caractéristique de la machine appelée nombre de paires de pôles.

Cette machine est réversible et peut fournir si elle est entraînée en rotation, une tension alternative de fréquence proportionnelle à cette vitesse.

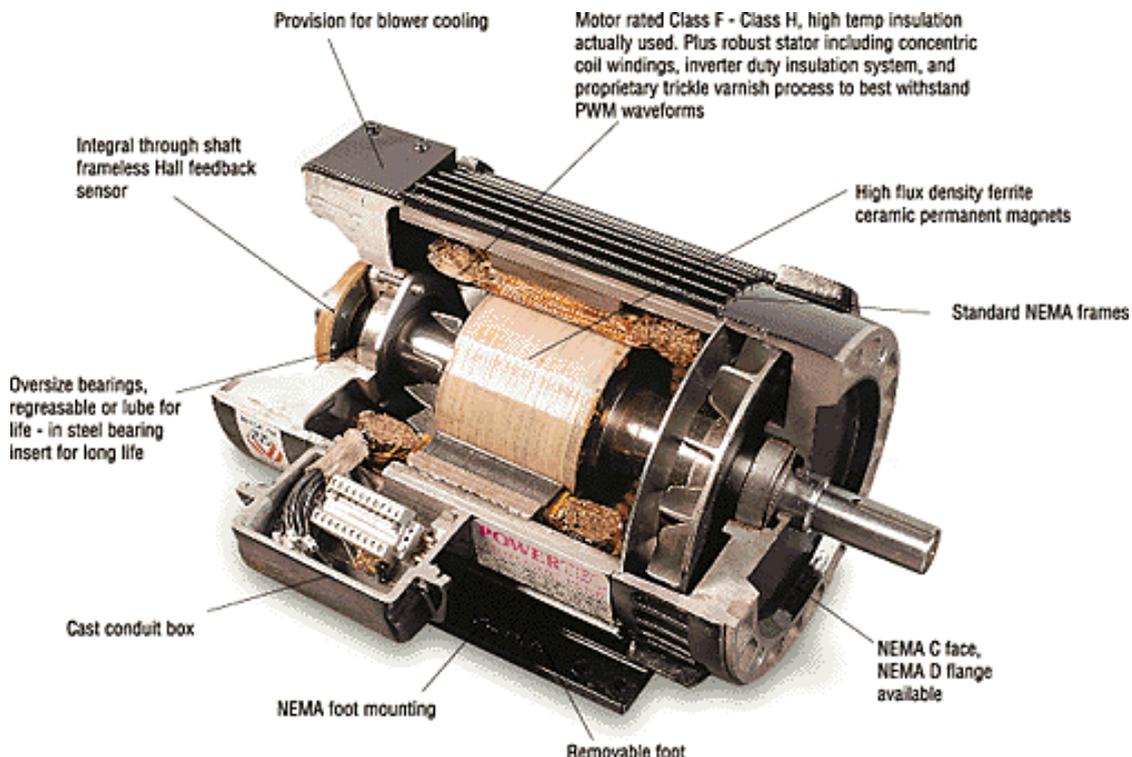
Les deux utilisations principales sont :

a) La production d'énergie électrique, que ce soit dans les centrales (thermique, hydraulique ou nucléaire) ou dans une automobile (alternateur triphasé puis redresseur à diode) pour charger la batterie. Le rotor est alors un électroaimant, ce qui permet d'asservir l'amplitude de la tension fournie ;

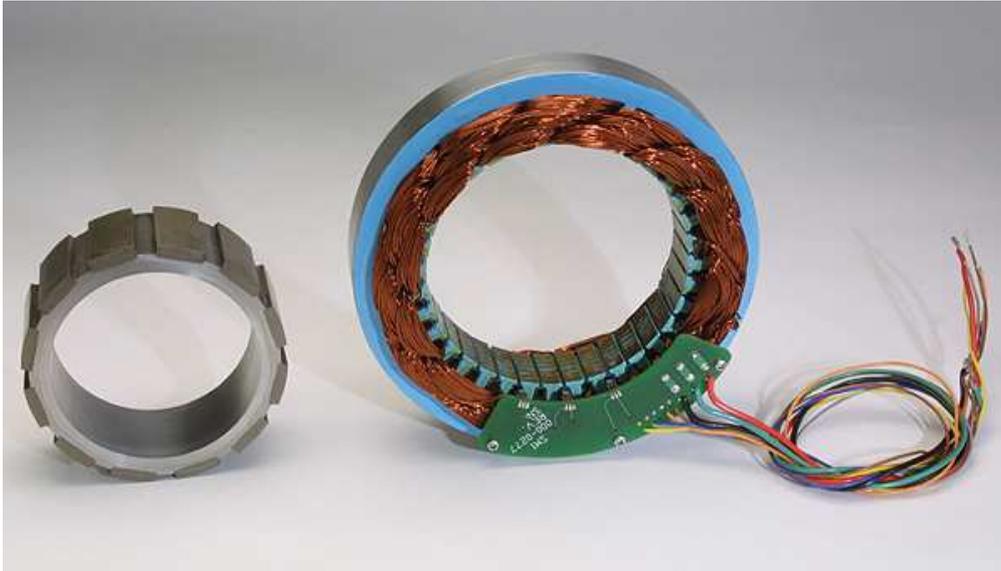
b) L'utilisation en moteur à vitesse variable. Il est alors nécessaire de réaliser une alimentation à fréquence variable (onduleur) qui est beaucoup plus complexe que l'alimentation à tension continue variable de la MCC. Cependant le gain apporté par la suppression du collecteur de la MCC ainsi que les progrès de l'électronique de puissance font souvent préférer cette solution, que ce soit pour les faibles puissances (où la machine est souvent appelée « moteur à courant continu sans balais ») en robotique par exemple, ou pour les fortes puissances, en traction électrique par exemple (TGV Atlantique).

La machine synchrone ne peut être reliée directement au réseau 50 Hz (comme pour le moteur pas à pas, la montée en vitesse doit être progressive), elle doit d'abord être entraînée à sa vitesse nominale par un autre moteur avant d'être couplée.

Les figures ci-après proposent quelques exemples de structures de moteurs ; tout d'abord un moteur synchrone de conception très classique :



Puis un moteur destiné à la robotique :

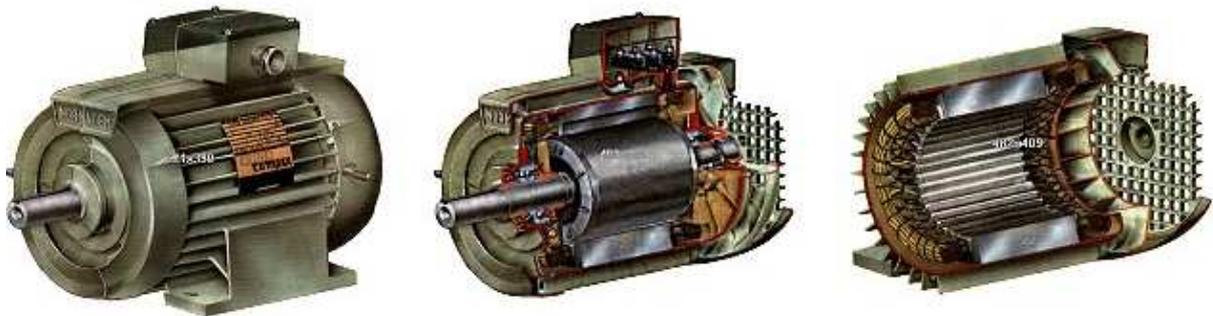


Enfin, deux moteurs de faible puissance, tel que ceux que l'on trouve maintenant pour l'entraînement du disque au sein des lecteurs de CDROM ou encore en modélisme ; on notera que le rotor (et donc les aimants) est à l'extérieur (d'après <http://www.solcon.nl/gijkool/brushlessE1.html>) :



## Les moteurs asynchrones

La constitution du stator est identique au moteur synchrone mais le rotor est constitué soit par un cylindre métallique (en faible puissance), soit par des barreaux en court circuit (moteur à cage d'écurie), soit par des enroulements en court circuit sur eux même ou sur des résistances.



Le fonctionnement de ce moteur peut s'expliquer par un raisonnement qualitatif. Le champ tournant créé au stator induit des courants (appelés courant de Foucault) au rotor. Comme tout phénomène physique, ces courants vont s'opposer à la cause qui leur a donné naissance (à savoir la variation du champ statorique) et entraîner le rotor en rotation de manière à ne plus subir de variation de champ

magnétique. Le rotor ne tourne jamais aussi vite que le champ statorique (sans quoi il n'y aurait plus de raison à cette rotation) et on observe un glissement (d'où le nom asynchrone) entre la vitesse du champ statorique  $\Omega_s = p\omega$  (même définition que pour le moteur synchrone) et la vitesse du moteur  $\Omega$  :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$$

Contrairement au moteur synchrone, celui ci peut être branché directement sur le réseau de distribution triphasé et moyennant un artifice sur le réseau monophasé. Sa robustesse en fait un moteur intéressant dans une large gamme de puissance allant de l'électroménager (lave linge) à la traction électrique (TGV nord) en passant par les machines outils.

Comme le moteur synchrone, le moteur asynchrone ne peut théoriquement pas fonctionner en monophasé ; quelques adaptations simples, comme le condensateur de démarrage ou la spire de Fragger permette cependant l'utilisation monophasée.

Le fonctionnement en vitesse variable peut se faire au moyen d'un simple gradateur si on n'est pas exigeant sur les performances, ou par un onduleur à commande vectorielle nécessitant un DSP pour les calculs. La mise en œuvre devient alors très complexe. C'est ce type de motorisation qui équipe par exemple les TGV de troisième génération.

## Domaines d'utilisation

Le tableau suivant résume les principales caractéristiques et domaines d'utilisation des moteurs que nous venons de voir.

catégorie	type	propriétés	utilisation
<b>courant continu</b>	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)
<b>courant alternatif</b>	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
<b>pas à pas</b>	aimants permanents, hybride, réluctance variable	très faible puissance, positionnement précis en boucle ouverte	matériel informatique