

# Moteurs pas à pas

## Généralités les moteurs pas à pas

Le moteur pas à pas fut inventé en 1936 par Marius Lavet (Ingénieur Français). Il doit en effet être alimenté par des impulsions électriques qui ne peuvent être réalisées qu'avec des composants électroniques de puissance qui ne sont devenus disponibles qu'à cette époque.

Cette technologie est intéressante pour les mouvements dont on souhaite contrôler la position à tout instant, mais qui ne doivent pas être trop coûteux. Il n'est pas nécessaire d'ajouter de capteur de position, car le moteur lui-même se comporte comme un capteur incrémental. La construction simple, ces moteurs peuvent être fabriqués à des prix insignifiants.

## Utilisations

Ces moteurs sont utilisés dans les systèmes demandant une grande précision de positionnement, mais dont les couples résistants et les inerties ne sont pas trop importants. On peut citer quelques applications :

Les petits systèmes automatiques, par exemple pour le réglage des rétroviseurs des automobiles et servomécanismes (utilisés dans la robotique) ; Les montres et pendules à quartz ; la micro-informatique (disque dur, etc.) et ses périphériques (imprimantes, table traçante, etc.) ; les machines à écrire ; Platines de magnétophones ; Antennes satellites ; télescopes ; etc.

## Principe de fonctionnement

Le moteur pas à pas rentre dans la famille des moteurs synchrone. Au lieu d'être alimenté à tension alternative de fréquence constante, les enroulements statoriques sont branchés à un générateur d'impulsions. Chaque impulsion électrique reçue se traduit par la rotation d'un pas  $\alpha_p$  du rotor.

$$N_p = \frac{360}{\alpha_p}$$

Où :  $\alpha_p$  : Pas en degrés (°).

Les valeurs les plus utilisées sont :  $N_p = 400, 200, 48, 24$  et  $12$ .

Le couple développé par ce moteur est produit par la tendance de sa partie mobile à se déplacer vers une position où l'inductance de la phase alimentée est maximale, c.-à-d. où la réluctance vue cette bobine est minimale. Pour une application industrielle, le dimensionnement de ce moteur doit être calculé de façon rigoureuse ou être surdimensionné afin d'éviter tout problème de glissement par « perte de pas ». Le moteur pas à pas fonctionnant en boucle ouverte (sans asservissement), il ne récupère pas sa position de consigne en cas de glissement.

## Types des moteurs pas à pas

Il existe 3 technologies de moteurs pas-à-pas, se différencient par leurs rotors. Où, on peut définir trois principaux types de moteurs pas à pas :

- ❖ Moteur à réluctance variable ;
- ❖ Moteur à aimants permanents ;
- ❖ Moteur hybride.

**1. Le moteur pas-à-pas à réluctance variable** comporte  $Z_s$  plots dans son stator et chaque plot a une bobine (nombre de phases =  $Z_s / 2$ ) et un rotor denté ( $Z_r$  – Nombre de dents) homogène ferromagnétique (fer doux) sans bobinage. Ce moteur a une structure à double saillance. Fonctionnant selon le même principe que les électroaimants, il se déplace

de manière à ce que le champ magnétique circule dans l'air sur une distance totalisée aussi courte que possible.

La figure 1 représente la vue en coupe de ce type de moteur, à 06 plots (dents) statoriques et 04 dents rotoriques (6/4), qui est le type le plus utilisé, mais on trouve aussi les combinaisons suivantes : 6/8 ; 8/6 ; 12/8 ; 12/10, etc. Les circuits magnétiques statorique et rotorique sont obtenus par assemblage de tôles découpées à la forme désirée. Les bobines statoriques peuvent être réalisées sur des mandrins avant d'être mises en place, c'est pourquoi la fabrication de ces enroulements simple et moins coûteuse. Les 02 bobines qui se trouvent sur des plots diamétralement opposés connectées en série de telle manière que, lorsqu'un courant circule dans une phase, le champ d'entrefer produit sort d'un plot statorique et rentre dans un autre plot comme illustré sur la figure 2. On aura un système triphasé d'enroulement *a*, *b*, *c* respectivement formés de bobines 1 et 1', 2 et 2', 3 et 3'.

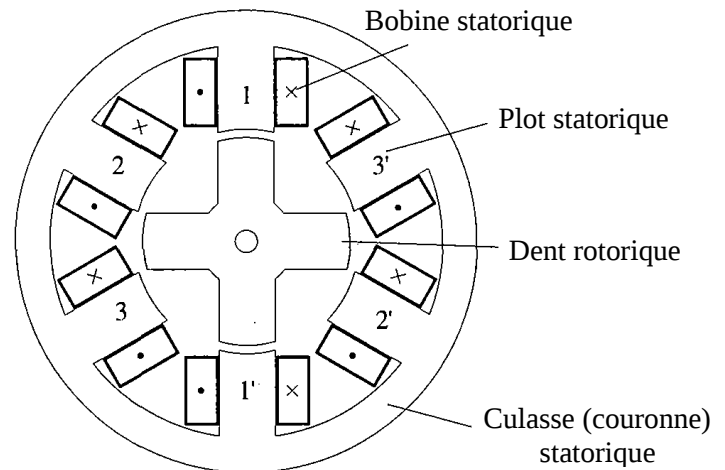


Figure 1 – Vue schématique d'un moteur à reluctance variable 6/4

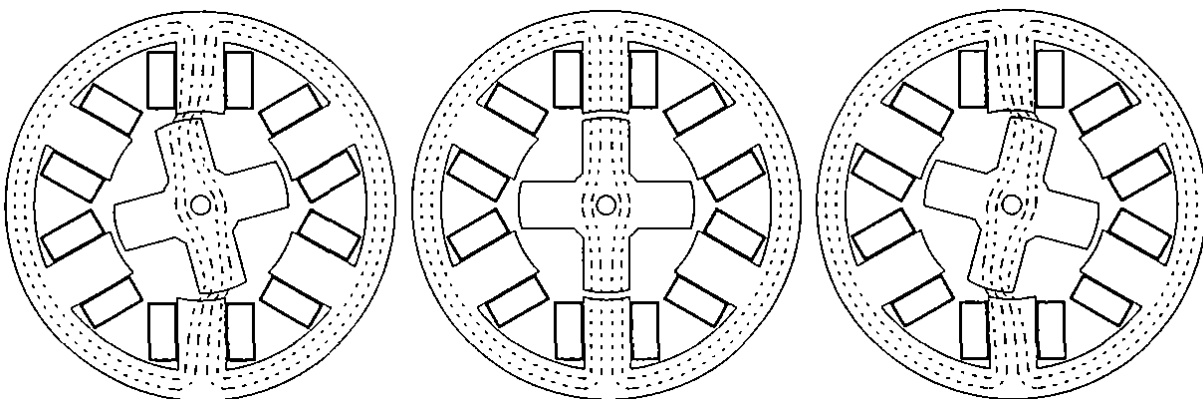


Figure 2 – Allure des lignes de champ produites par le courant de la phase *a* d'un moteur à reluctance variable 6/4

On remarque que la partie du flux qui traverse d'autres enroulements est négligeable. On peut dire que les trois enroulements sont découplés les uns des autres magnétiquement.

Lorsqu'on alimente la phase *a*, le rotor se place comme indiqué sur la figure 3-A, puis on alimente *c*, puis la phase *b*, puis à nouveau la phase *a*. Dans ce cas, le rotor pivote de 30° dans le sens horaire à chaque fois. On peut remarquer que tel type de moteur n'a pas forcément 3 phases au primaire, mais la plupart d'ailleurs n'en ont que 2, décalées de 90 degrés.

On peut remarquer que ce type de moteurs, le couple développé est indépendant du sens du courant.

On constate très bien que le pas est de 30°, ce qui correspond à 12 pas par tour. En général, on a le nombre de pas par tour :

$$N_p = \frac{Z_s \cdot Z_r}{|Z_s - Z_r|} ; \text{ avec } Z_s \neq Z_r$$

Dans l'exemple que vient de présenter ; on a  $Z_s = 6$  et  $Z_r = 4$  ce qui conduit à :  $N_p = 12$  pas/tour soit :  $\alpha_p = 30^\circ$ .

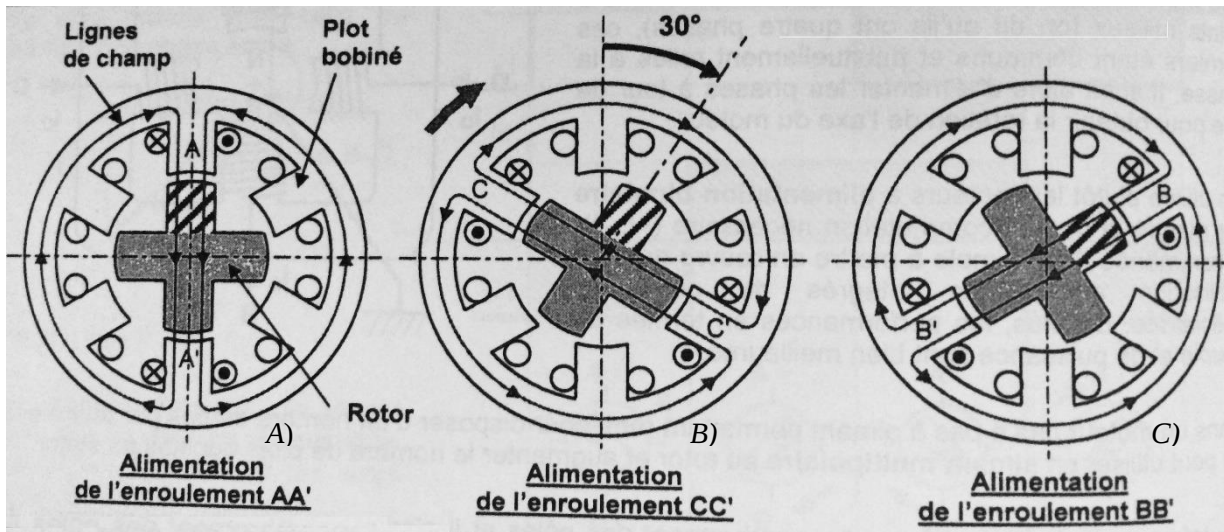


Figure 3 - Principe de fonctionnement d'un moteur pas-à-pas à reluctance variable à 12 pas par tour

Pour augmenter le nombre de pas par tour ( $N_p$ ), on doit multiplier le nombre de dents du rotor et le nombre de plots du stator. Ce qui apparait facile pour les dents rotoriques, puisqu'il s'agit d'un usinage, par contre on réalise le stator avec un nombre de plots faible avec des plots dentés (avec le même pas que celui du rotor) comme illustré sur la figure 4. Ce qui permet d'atteindre des nombres très importants de pas par tour ; jusqu'à 200 voire 400 pas par tour.

De plus, le coût de fabrication est faible, grâce à la simplicité de fabrication du rotor ainsi que l'absence des aimants permanents. Toutefois, le couple fourni est assez faible et le couple en absence de l'alimentation (couple de détente) est égal à zéro puisqu'il n'y a plus d'aimant au rotor.

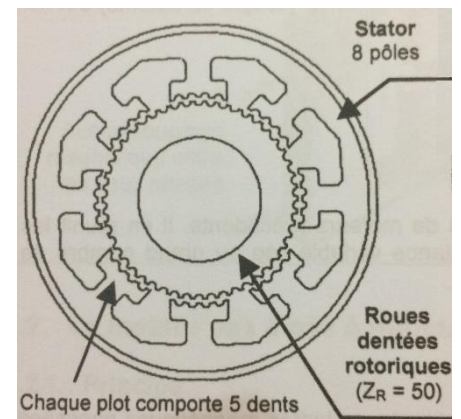


Figure 4 - Exemple d'un moteur pas-à-pas à reluctance variable à 200 pas par tours

**2. Le moteur pas à pas à aimants permanents** comporte un rotor aimanté. Son principe de fonctionnement est voisin de celui du moteur réluctant. Néanmoins, le sens du courant influence le sens du couple produit. Le couple de maintien ressemble également à celui du moteur réluctant. Cependant, ce couple tient (couple de détente) même si l'alimentation est déconnectée (aucune phase alimentée) et ce type de moteur fonctionne avec un faible bruit.

## Principe de fonctionnement

Pour expliquer le principe de fonctionnement de ce type du moteur, on considère une structure simplifiée d'un moteur pas à pas à aimant permanent contenant deux enroulements au stator (deux phases AB et CD) avec deux bobines par phase et un rotor à un aimant permanent bipolaire, comme illustré sur la fig.5.

On distingue trois modes de fonctionnement :

### A. Commande en pas entier, mode monophasé

Dans ce cas, une seule phase est alimentée à chaque pas. Ce qui fait que le couple développé par le moteur n'est pas important. C'est dans ce mode que le fabricant définit le pas angulaire du moteur, comme illustré sur la Fig.7.

Les positions d'équilibre se situent suivant l'axe des deux phases.

On a :  $N_p = 4 \Rightarrow \alpha_p = 90^\circ$ .

Pour obtenir un tour complet, il faut pouvoir inverser le courant dans les phases : ce qui impose une alimentation bipolaire. Cela permet l'inversion du sens des polarités aux bornes des phases. Alors que, le sens de rotation dépend de l'ordre d'alimentation des phases.

### B. Commande symétrique en pas entier, en biphasé

Dans ce cas, les deux phases sont alimentées simultanément, Fig. 8. Ce qui permet d'avoir un couple maximum, et cela grâce, à la norme du champ résultant qui  $\sqrt{2}$  fois plus grande que celle du champ d'une phase, Fig. 6.

$$\|\vec{B}_1\| = \|\vec{B}_2\| = B$$

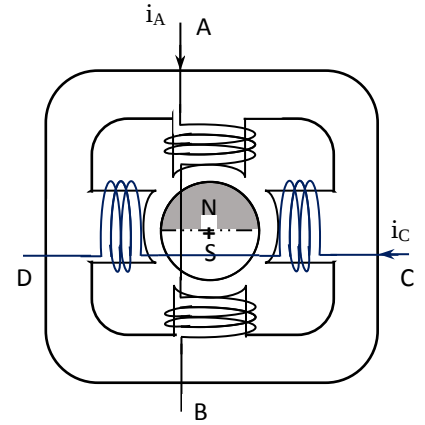


Fig. 5 : Représentation d'un moteur pas à pas à aimant permanent

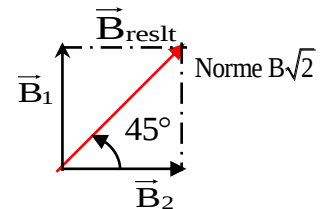


Fig. 6 : Représentation de la résultante du champ créée par deux phases

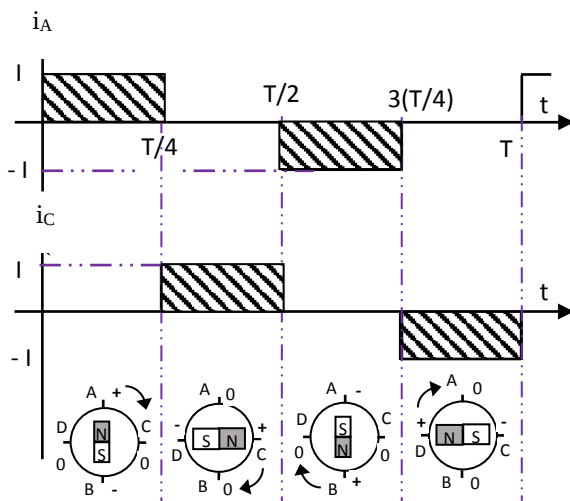


Fig. 7 : Séquences des alimentations de phases d'un moteur pas à pas en mode monophasé

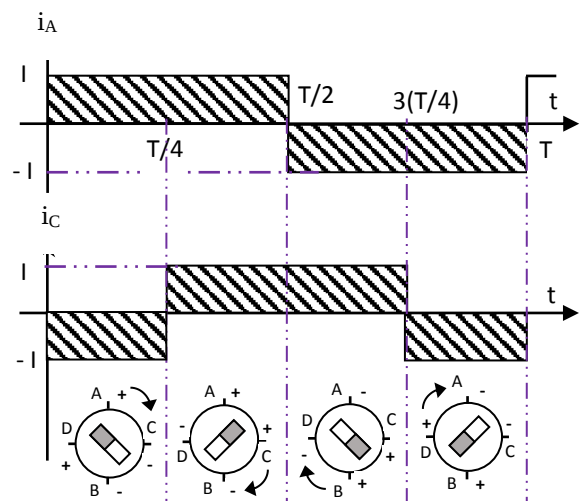


Fig. 8 : Séquences des alimentations de phases d'un moteur pas à pas en mode biphasé, commande symétrique

Les positions d'équilibre se situent cette fois suivant les bissectrices des angles formés par les axes des deux phases. Le pas angulaire est identique au mode 1 mais les positions d'équilibre sont intermédiaires aux précédentes, c.-à-d.  $N_p = 4 \Rightarrow \alpha_p = 90^\circ$ .

### C. Commande asymétrique en demi pas, en monophasé ou en biphasé

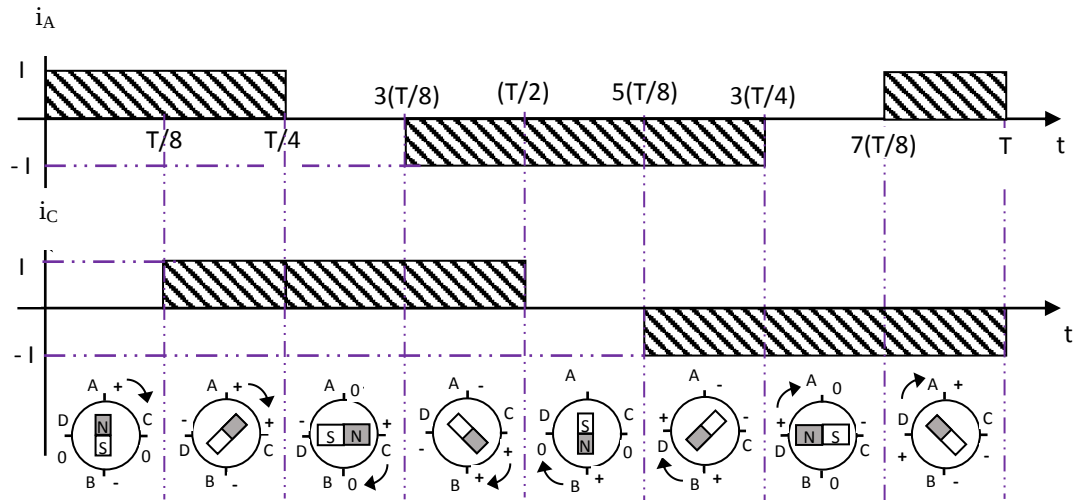


Fig. 9 : Séquences des alimentations de phases d'un moteur pas à pas en mode demi pas, commande asymétrique en demi pas, en biphasé

La combinaison en alternance du mode 1 et du mode 2 permet le fonctionnement en demi-pas, Fig.9. Pour effectuer un déplacement donné, il faut doubler le nombre d'impulsions de commande, c'est pourquoi on obtient le nombre de pas doublé. Les couples quasi statiques ne sont pas identiques (le couple est irrégulier) selon si une ou les deux phases sont alimentées, car le champ vaut en module alternativement B et  $\sqrt{2}.B$ .

On a :  $N_p = 8 \Rightarrow \alpha_p = 45^\circ$ .

### D. Commande symétrique en demi pas, en monophasé ou en biphasé

Pour un fonctionnement régulier en demi-pas, il faut augmenter le courant d'un facteur  $\sqrt{2}$  lorsqu'une seule phase est alimentée. On obtient ainsi les mêmes performances de couple du mode 2 mais avec deux fois plus de nombre de pas, Fig.10.

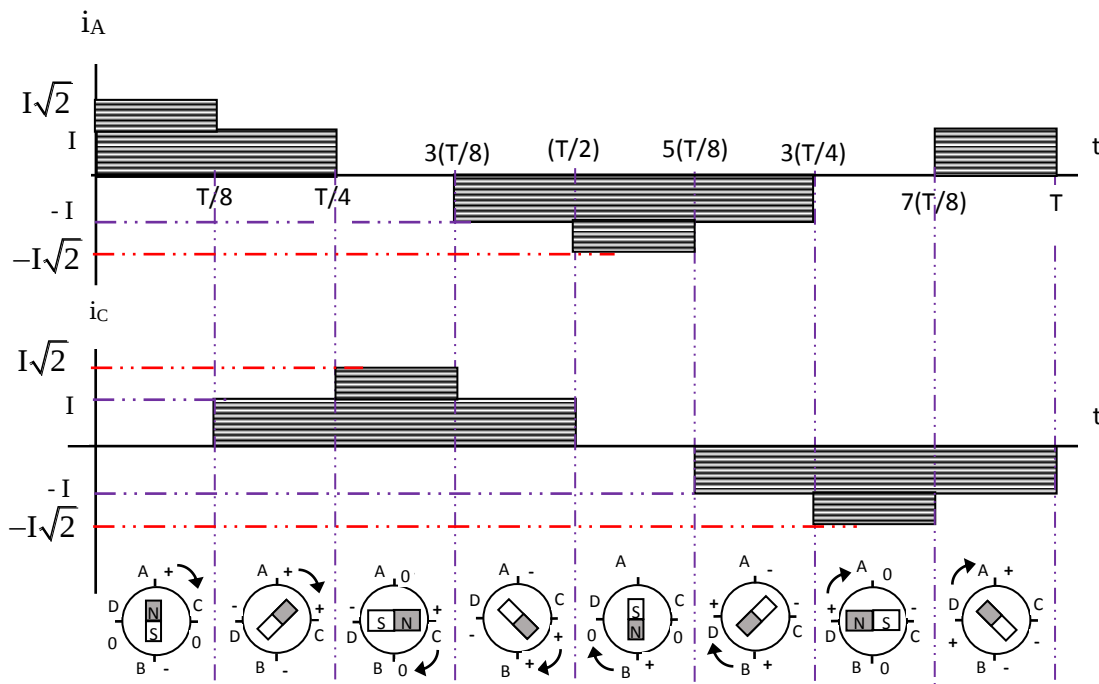


Fig. 10 : Séquences des alimentations de phases d'un moteur pas à pas en mode demi pas, commande symétrique en demi pas, en biphasé

## Le moteur pas à pas hybride

Ce type de moteur pas à pas combine les meilleures caractéristiques du moteur à réluctance variable et du moteur à aimant permanent. Il est donc à réluctance variable mais avec un rotor à AP. Généralement, on le réalise avec un nombre de pas très élevé et le couple élevé dû à l'action de l'aimant.

Un aimant annulaire, monté axialement dans le rotor, produit des polarités magnétiques opposées dans chaque roue dentée rotorique. Ces deux roues comportent le même nombre de dents, mais sont décalées angulairement d'un demi-pas de denture. La séquence de commutation est inchangée par rapport au moteur pas à pas à aimant permanent. A chaque fois, le rotor se déplace d'un quart de pas de denture, qui est ainsi le pas du moteur.

Lorsqu'un courant circule dans l'une des phases du bobinage statorique, il en résulte un couple de maintien très important, provenant à la fois du flux produit par l'aimant, et de l'effort d'attraction entre les dents rotorique et statoriques, dû au fonctionnement par réluctance variable.

Le nombre de pas par pôle :  $N_p = 2 \cdot m \cdot Z_r$

Où :  $Z_r$  : Nombre de dents d'une roue rotorique ;  $m$  : Nombre de phases.

Si on a  $Z_r = 10$  et  $m = 2$ , ce qui donne que  $N_p = 40$  pas/tour  $\Rightarrow \alpha_p = 9^\circ$ .

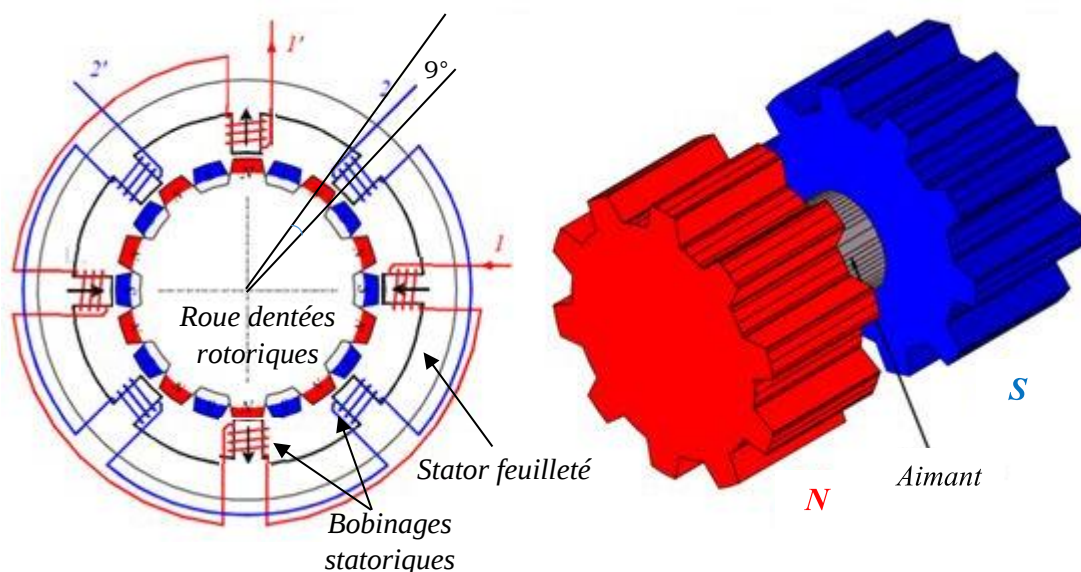


Fig.11 : Représentation d'un moteur hybride

Pour augmenter le nombre de pas par tour ( $N_p$ ), on doit aussi denter les dents des plots du stator avec le même pas que celui des roues rotorique. Ce qui permet d'atteindre 200 à 400 pas par tour. Ce qui revient à accroître le prix par rapport à celui des autres types de moteurs pas à pas citées ci-dessus. Cependant, ses performances excellentes font de lui le moteur pas à pas le plus utilisé.

La figure 12 suivante illustre un moteur hybride à 200 pas.

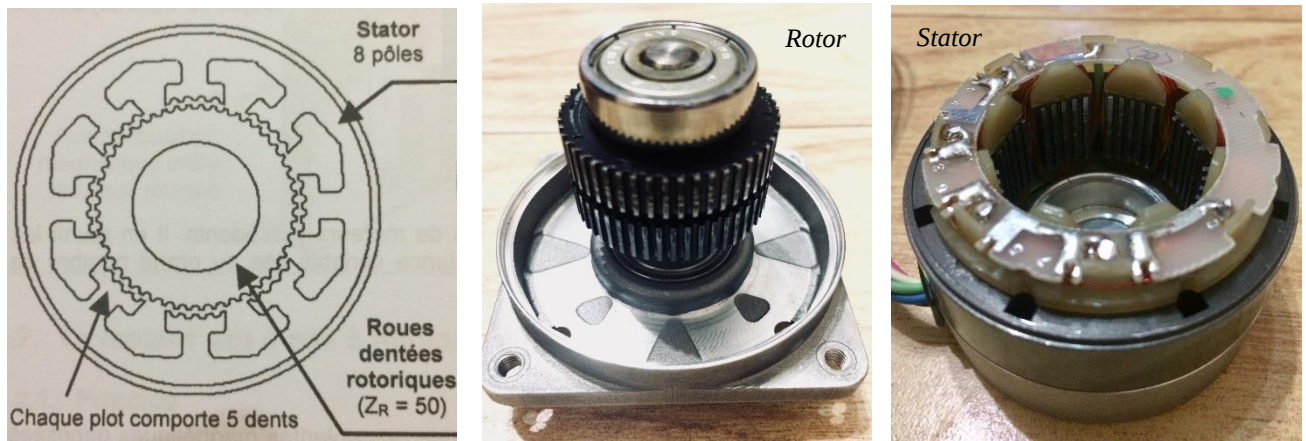


Figure 12 - Exemple d'un moteur hybride à 200 pas par tours

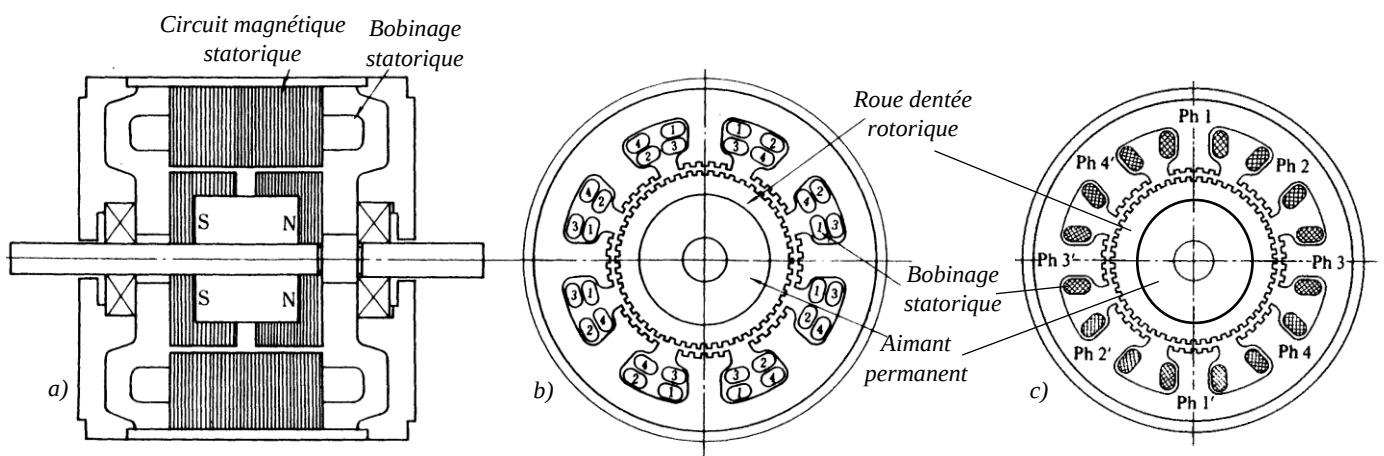


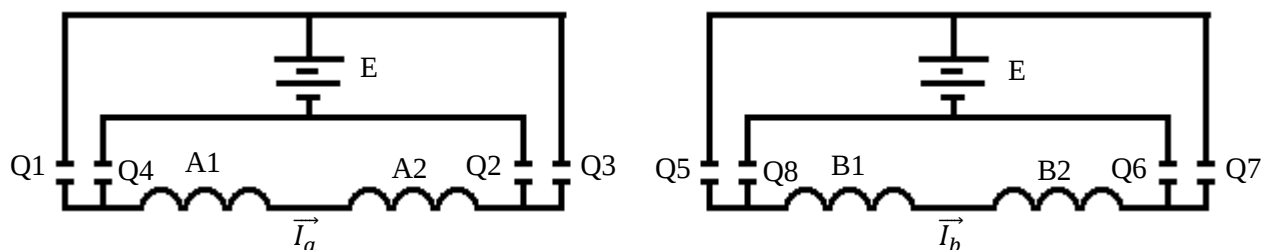
Figure 13 - Différentes coupes des moteurs hybrides : b) – avec des enroulements unipolaires ; c) – avec des enroulements bipolaires

### Enroulements et systèmes d'excitation

Il existe 2 types d'enroulements statoriques : les enroulements bipolaires et unipolaires. Pour chaque type d'enroulement, il trouve plusieurs modes d'excitation.

#### Enroulements bipolaires

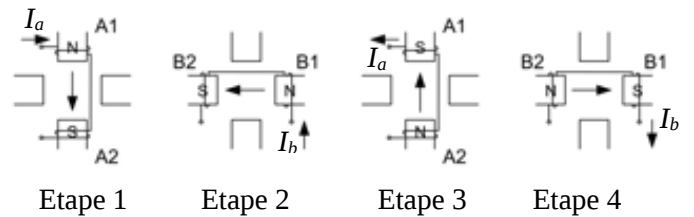
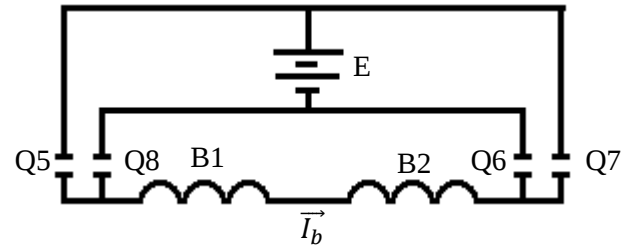
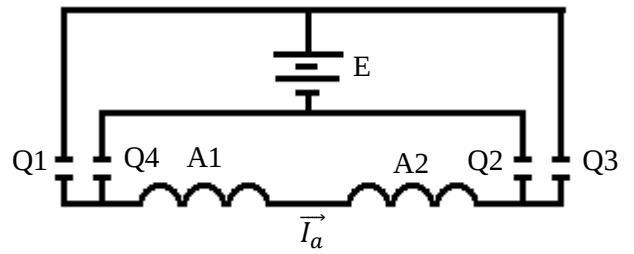
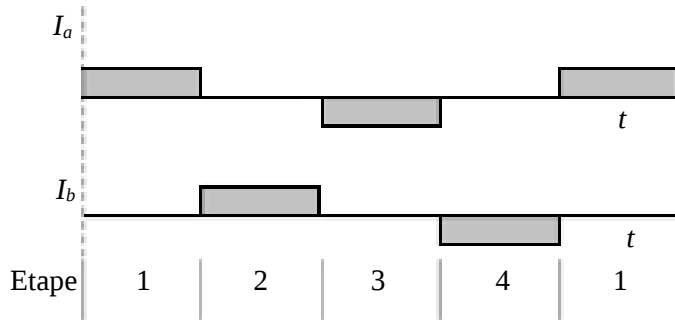
La figure suivante nous montre 2 groupes de bobines : A1, A2 et B1, B2 du stator à 04 plots.



Avec  $Q1 \dots Q8$  sont des commutateurs, ils permettent d'exciter les bobine de 3 manières différentes.

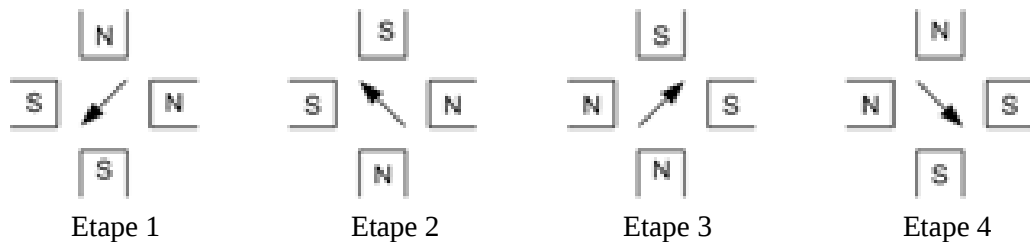
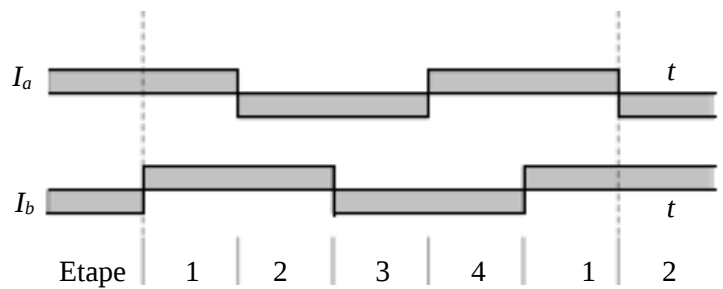
### Excitation ondulée :

| Etape | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 |
|-------|---|---|---|---|---|
| Q1 Q2 | F |   |   |   | F |
| Q5 Q6 |   | F |   |   |   |
| Q3 Q4 |   |   | F |   |   |
| Q7 Q8 |   |   |   | F |   |



### Excitation standard :

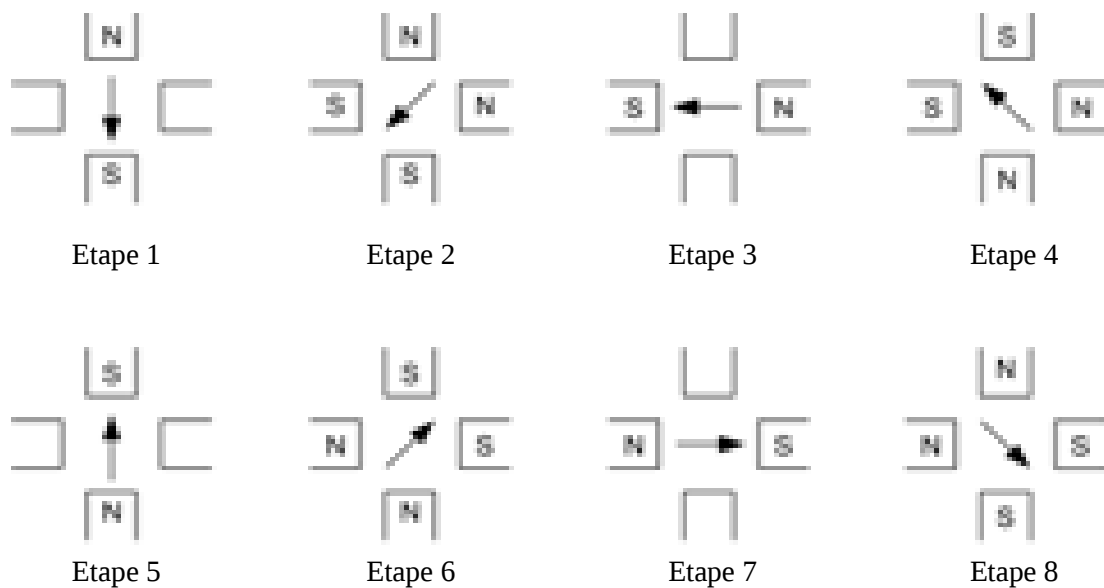
| Etape | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 |
|-------|---|---|---|---|---|
| Q1 Q2 | F |   |   | F | F |
| Q5 Q6 | F | F |   |   | F |
| Q3 Q4 |   | F | F |   |   |
| Q7 Q8 |   |   | F | F |   |



**N.B. :** Dans ce cas le pas est égal à  $90^\circ$  et le couple développé est supérieur.

### Excitation à demi - pas :

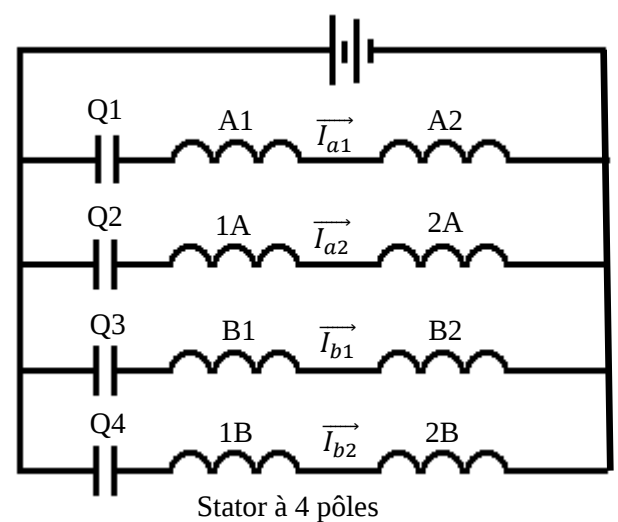
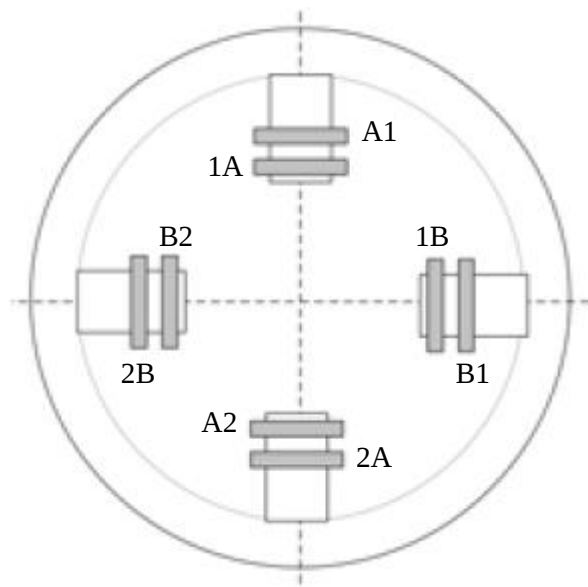
| Etape | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 1 |
|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Q1 Q2 | F | F |   |   |   |   |   | F | F |
| Q5 Q6 |   | F | F | F |   |   |   |   |   |
| Q3 Q4 |   |   |   | F | F | F |   |   |   |
| Q7 Q8 |   |   |   |   |   | F | F | F |   |



**N.B. :** Dans ce cas le pas est égal à  $45^\circ$  et la résolution de position est plus grande.

### **Enroulements monopolaires :**

- Le courant circule toujours dans le même sens ;
- Une bobine crée toujours un pôle de même polarité ;
- La machine nécessite moins de commutateurs, mais la consommation de cuivre en plus ;
- Elle a meilleur temps de réponse.



| Etape | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 |
|-------|---|---|---|---|---|
| Q1    | F |   |   |   | F |
| Q3    |   | F |   |   |   |
| Q2    |   |   | F |   |   |
| Q4    |   |   |   | F |   |

## Comportement mécaniques des moteurs pas à pas

### Caracteristiques statiques

Le couple de maintien est le couple minimum qu'il est nécessaire d'appliquer sur l'arbre moteur pour occasionner sa rotation, la mesure étant faite lorsque le moteur est alimenté à  $f = 0$  (arrêt).

Le couple de detente a la même définition mais avec le moteur non alimenté. Il est nul pour les moteurs à reluctance variable.

### Caracteristiques dynamiques

#### Déplacement d'un pas

La fin d'un pas ou d'un parcours, le moteur a tendance à osciller autour de sa valeur finale à une fréquence dite fréquence de résonance ou naturelle du système, Fig. 14.

L'amortissement de ces oscillations est obtenu ; soit volontairement si on augmente les frottements visqueux, artificiellement tout en agissant sur les pertes ferromagnétiques ou bien agir sur la commande.

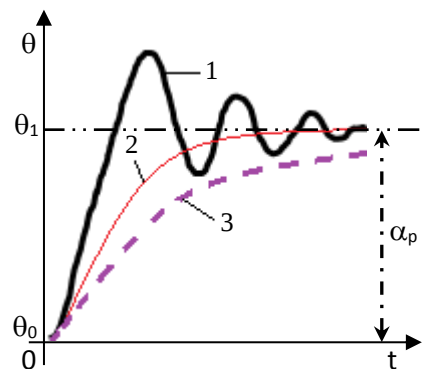


Fig. 14 - Réponse indicielle de déplacement du moteur pas à pas : 1) – Sous amortissement ; 2) – Amortissement critique ; 3) – Sur amortissement

#### Enchainement d'un pas

Lors d'un déplacement de plusieurs pas ou bien une rotation continue, de nombreux modes de fonctionnement sont envisagés, selon la fréquence des pas, Fig.15.

- ❖ Fig.15-(a) : Pour une fréquence faible, le rotor s'arrête à chaque pas. L'enclenchement des pas correspond à un assemblage de réponses indicielles ; Ce fonctionnement est dénommé **fonctionnement par à-coups** ;

- ❖ Fig. 15-(b) : Pour une fréquence élevée, le rotor ne s'arrête plus entre chaque pas. Ce qui fait que la position croît régulièrement ; **fonctionnement en continu** ;
- ❖ Avec l'augmentation supplémentaire de la fréquence, Fig.15-(c) : le fonctionnement s'apparente à celui d'un moteur synchrone.

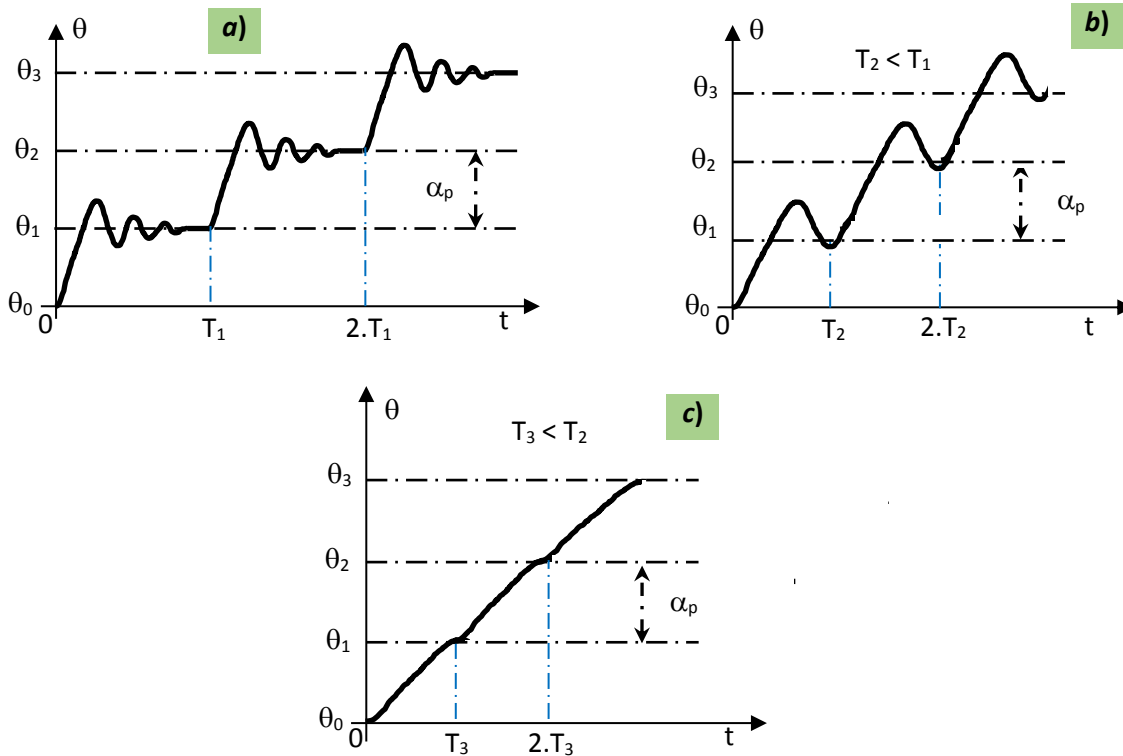


Fig.15 : Réponse indicielle de déplacement d'un moteur pas à pas

### Caractéristiques du couple en fonction de la fréquence des pas

Lors de réalisation d'un moteur pas à pas, on définit deux domaines de fonctionnement dans la caractéristique du couple en fonction de la fréquence.

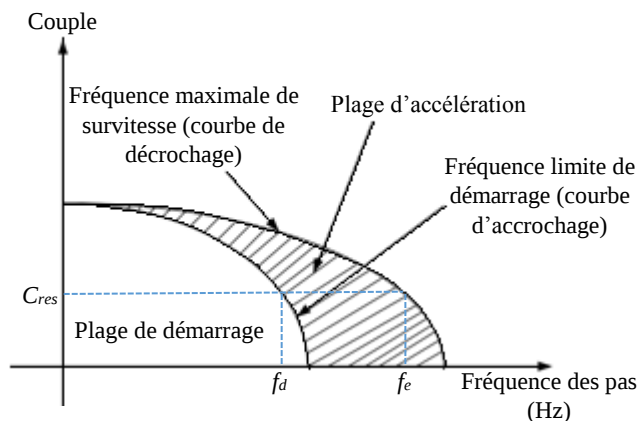


Fig.16 - Caractéristiques du couple en fonction de la fréquence des pas :  $f_d$  – Fréquence maximale de démarrage ;  $f_e$  – Fréquence maximale d'entraînement