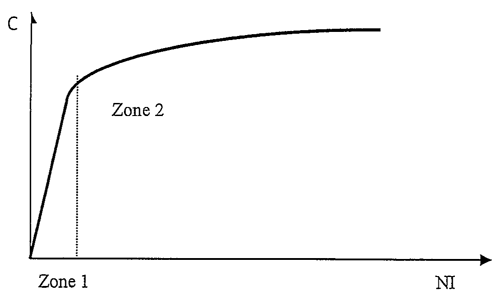
**Notions techniques moteur PAP**

# Couple de retenue ou couple de maintien

Le couple de maintien est le couple maximum qu’il est possible d’appliquer au rotor d’un moteur alimenté 2 phases à la fois par un courant constant de fréquence nulle, sans provoquer toutefois une rotation continue.

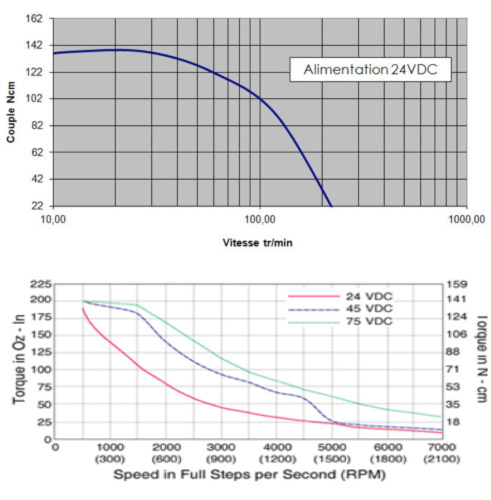
D’autre part, le couple de maintien est proportionnel au champ magnétique dont l’allure est :

Zone 1 : couple de maintien proportionnel aux ampères tours.

Zone 2 : saturation du circuit magnétique avec risques de désaimantation. Le couple de maintien est non proportionnel aux courants de phase dans cette zone.

# Couple résiduel ou couple de détente

Le couple de détente est le couple maximum qu’il est possible d’appliquer au rotor d’un moteur non alimenté sans provoquer sa rotation (décrochage). Ce couple est la somme d’un couple de frottement et du couple reluctant créé par le flux de l’aimant. Le couple résiduel est une fonction complexe mais peut en première approximation s’apparenter à une fonction sinusoïdale de période α = angle de pas.

[](http://www.mdp.fr/uploads/ckfinder/images/lexique/pas-a-pas/couple-dynamique.jpg)Couple dynamique

Le couple dynamique correspond au couple maximum que le moteur peut supporter. Il n’est pas constant.

Sa valeur est comprise entre le couple de retenue et le couple de maintien, et dépend de la fréquence. Le nombre de micro-pas par pas peut également influencer sa valeur.

# Couple statiqueCouple statique

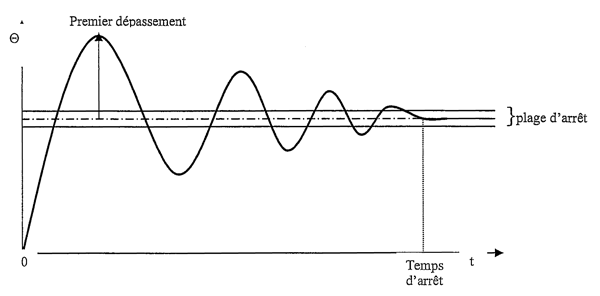
La loi de variation du couple statique avec la position angulaire du rotor dépend de la construction même du moteur. On peut, l’approcher assez bien par une loi sinusoïdale de période 4α du type.

L’allure du couple statique fait apparaitre deux positions angulaires pour lesquels le couple s’annule. C’est-à-dire 2 positions où le rotor n’est soumis à aucun couple. Une de ces positions est une position d’équilibre stable et l’autre d’équilibre instable. En effet, dans la position angulaire 2α, le couple rappellera le rotor si on l’écarte de sa position initiale. Par contre, dans la position 0 ou 4α, le couple moteur écartera le rotor si on l’écarte de sa position initiale et le rappellera dans une position stable.

Physiquement, une position d’équilibre stable existe lorsqu’un Nord rotor est en face d’un Sud stator. Une position d’équilibre instable existe lorsqu’un Nord rotor est en face d’un Nord stator.

Il apparait très clairement sur la courbe que le rotor possède une position stable tous les 4 pas angulaires. Aussi, lors d’un décrochage du rotor, le moteur peut perdre jusqu’à 4 pas avant de pouvoir retrouver sa vitesse de synchronisme (raccrochage).

# Réponse indicielle (réponse à un échelon de courant)

[](http://www.mdp.fr/uploads/ckfinder/images/lexique/pas-a-pas/reponse-indicielle.png)Cette partie étudie le mouvement du rotor lorsqu’il effectue une avance élémentaire d’un pas puis s’arrête. Cette étude va permettre de mettre en évidence les phénomènes d’oscillation, d’instabilité et de précision du moteur pas à pas.

Lors de l’étude du comportement statique, le moteur est supposé fonctionner à vide et sans frottement. En réalité, il est soumis à 4 contraintes :

* La **charge inertielle** : son action ne s’exerce que lors des accélérations et décélérations du moteur, elle influe également sur les fréquences de résonance.
* Le **couple résistant statique** : il s’agit du couple qui s’oppose à la rotation du rotor (couple statique appliqué par la charge). Il est constant en module et en direction.
* Le **couple résistant dû aux frottements visqueux** : il est proportionnel à la vitesse. Il représente l’action d’un gaz ou d’un liquide sur le rotor (ventilateur, pompe, etc.).
* Le **couple résistant dû aux frottements secs** : il représente la résultante des frottements d’un solide sur un autre solide. Il est constant en module et variable en direction car il s’oppose toujours au mouvement (paliers, roulement, pignon, courroie, etc.).

# Influence des paramètres sur le fonctionnement du moteur pas à pas

Le mouvement oscillatoire amorti du rotor autour de sa position d’équilibre stable peut être caractérisé par 3 éléments : le 1er dépassement, le temps d’arrêt et la plage d’arrêt.

Afin d’optimiser le fonctionnement d’une application motorisée en pas à pas, il est possible d’ajuster au mieux les paramètres qui influent sur le comportement du moteur.

|  | 1er dépassement | Temps d’arrêt | Plage d’arrêt |
| --- | --- | --- | --- |
| L’augmentation des paramètres ci-dessous entraine |  |  |  |
| Courant (couple moteur) | + | + | - |
| Inertie charge + rotor | + | + | 0 |
| Couple résistant | - | - | 0 |
| Frottements secs | - | - | + |
| Frottements visqueux | - | - | 0 |

(+) Augmentation / (-) Réduction / (0) sans influence

L’augmentation du couple moteur augmente l’amplitude des oscillations et leur durée mais améliore la précision d’arrêt. Le système est donc plus nerveux, plus précis mais plus instable en haute fréquence. Ce paramètre augmente la puissance requise par le moteur.

L’augmentation de l’inertie de charge ne présente aucun intérêt dans l’amélioration du fonctionnement du moteur.

L’augmentation du couple résistant (couple statique de la charge) réduit l’amplitude des oscillations et leur durée sans affecter la précision d’arrêt. En revanche, le rendement général du système motorisé est dégradé. Il en est de même pour l’augmentation des frottements, qui de plus réduisent la précision d’arrêt et la durée de vie des organes mécaniques (paliers, pignons, etc.).

L’augmentation des frottements visqueux améliore sensiblement la stabilité du système sans dégrader la plage d’arrêt. Il est donc recommandé pour certains essais de rajouter une charge à frottement visqueux sur l’axe arrière du moteur.

# Problème de précision de pas

La précision du pas est en %

Précision de pas

La mesure de pas réelle est faite en accouplant un codeur angulaire haute résolution sur le moteur. L’erreur de positionnement du rotor n’est pas cumulative. En effet, la solution mathématique de l’écart maxi de l’angle d’arrêt par rapport à la position théorique ne dépend pas des conditions initiales (position erronée du pas précédent) de la position du rotor mais du couple moteur et des frottements secs (paliers, roulements, …).

Les autres causes d’erreurs de position sont dûes aux courants de phases asymétriques, aux erreurs constructives du moteur (entrefer décentré, irrégulier, rotor axialement décentré, géométrie de denture imprécise, …), au couple résiduel supérieur au couple de positionnement.

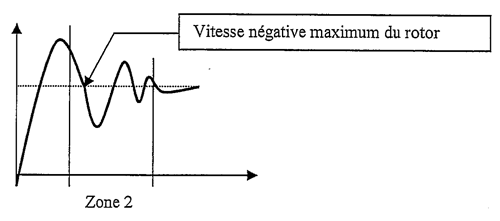
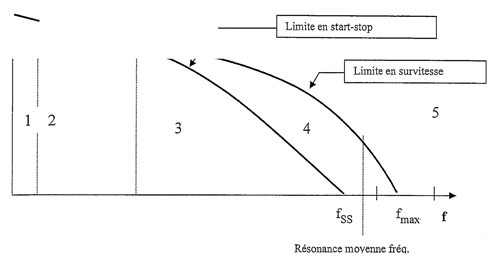
# http://sam.electroastro.pagesperso-orange.fr/dossiers/pasapas/schemagif/SCHEMA3.GIF[Zone 1](http://www.mdp.fr/uploads/ckfinder/images/lexique/pas-a-pas/zone1.png)Réponse fréquentielle

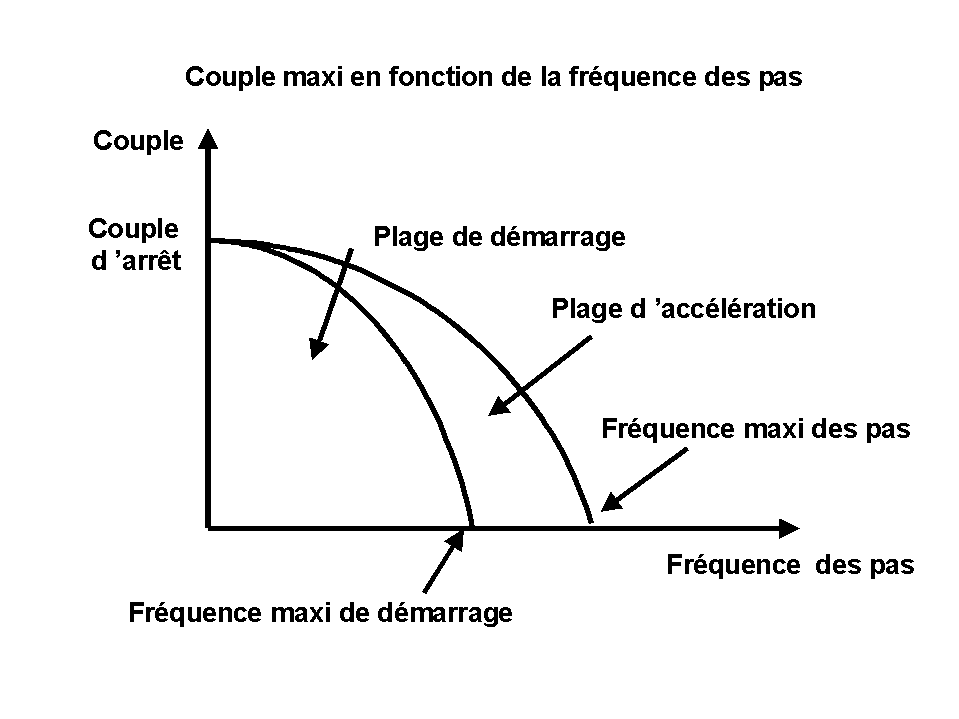
Cette partie étudie le comportement du moteur lorsque les pas s’enchainent pour une mise en rotation continue du moteur. L’enchainement des pas est réalisé par une commutation successive des états électriques des phases dont la période doit être supérieure au temps que met le moteur pour effectuer un pas. Autrement dit, il existe une fréquence limite au-delà de laquelle le moteur ne peut plus suivre les ordres de la commande.

Cette fréquence limite dépend principalement du couple que le moteur doit fournir. Elle dépend également du mode de commande et du mode d’établissement du courant dans les bobinages.

Il existe 5 zones de fréquence (vitesse) d’utilisation du moteur pas à pas.

* Zone 1 : la commutation des phases a lieu lorsque les oscillations du rotor sont atténuées. Cette zone basse fréquence risque de générer un bruit important de fonctionnement dû aux à-coups du moteur.
* Zone 2 : la commutation a lieu dans la zone des oscillations. Il peut arriver que l’énergie cinétique accumulée par le retour du rotor (vitesse négative) soit supérieure à l’énergie du couple moteur. Dans ce cas, il y a **perte de pas** ou **arrêt du moteur**. Ce phénomène est appelé **résonance**. Cette zone se situe approximativement entre **50 et 200 Hz** et doit être évitée. Une 2ème zone de résonance à moyenne fréquence (medium range) se situe vers **800 à 1500 Hz**.
* Zone 3 : la zone de résonance est passée, il est possible de **démarrer** ou d’**arrêter le moteur sur 1 pas**, sans perte de pas. La valeur limite est appelée **fréquence de start-stop fss,** ou **pull-in**. La valeur de la fréquence de start-stop est fonction du couple (statique + dynamique) que doit fournir le moteur et dépend de manière importante du type de commande électronique utilisée. Elle se situe généralement en-dessous de **1200 Hz**.
* Zone 4 : au-delà de cette fréquence fss, il n’est plus possible de démarrer ou d’arrêter le moteur sur 1 pas, il faut donc démarrer le moteur dans la zone 3 et l’accélérer progressivement. Cette zone est appelée **survitesse**, ou **pull-out**.
* Zone 5 : la fréquence de commande est trop importante. Aussi, il n’y a pas de rotation possible.

[](http://www.mdp.fr/uploads/ckfinder/images/lexique/pas-a-pas/zone2.png)[](http://www.mdp.fr/uploads/ckfinder/images/lexique/pas-a-pas/resonnance-moyenne-frequence.jpg)

Ces 5 zones ainsi définies permettent de tracer la caractéristique du couple moteur en fonction de sa fréquence d’alimentation. Il faut noter que les caractéristiques données par les constructeurs sont relevées moteur à vide avec le niveau de courant nominal du moteur pour les 2 phases alimentées. Plusieurs courbes de couple sont données car le mode de commande est indissociable des caractéristiques intrinsèques du moteur. Il faut donc être très attentif dans la **comparaison** de deux moteurs à l’aide des courbes de couple car les essais doivent être faits à **même puissance**, avec le **même mode de commande**.

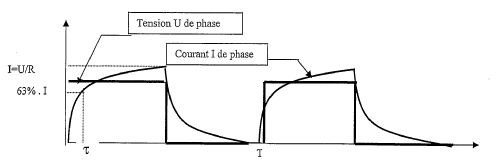
# Influence de l’inertie

Une augmentation de l’inertie de la charge ne modifie pas la forme de la courbe de survitesse. En revanche, le temps d’accélération sera augmenté.

Les performances en start-stop dépendent de l’inertie.

# Influence de la constante de temps électrique moteur

Il est nécessaire d’introduire la notion de constante de temps  = L/R. elle est due à la présence du circuit RL formé par les bobines. La forme du courant dans une phase moteur à l’établissement et à la disparition de la tension U est :

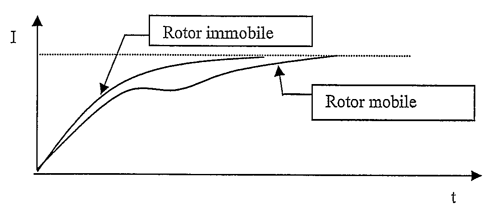


Si la fréquence de commande des phases augmente ( diminue) alors le courant ne pourra plus atteindre le niveau I = U/R. Il arrive pour une fréquence limite que le courant moyen ne soit plus suffisant pour fournir un couple moteur.

Lors de l’annulation de la tension d’une phase, le courant de cette phase ne disparait pas instantanément et crée un couple magnétique qui s’oppose à la rotation du moteur.

Les commandes électroniques les plus performantes sont donc des commandes à courant constant quelle que soit la fréquence.

# Influence de la tension induite (fcem ou back fem)

[[](http://www.mdp.fr/uploads/ckfinder/images/lexique/pas-a-pas/fcem.png)](http://www.mdp.fr/uploads/ckfinder/images/lexique/pas-a-pas/fcem.png)La rotation du rotor aimanté sous les pôles des bobinages crée une tension induite qui s’oppose à l’établissement du courant dans les phases du moteur.

Si le rotor est immobile U = Ri et plus la vitesse augmente, plus la tension induite devient  importante. Le cas limite théorique ou la fcem est égale à la tension d’alimentation U, a pour effet d’annuler le courant et donc le couple.

Comme pour l’influence de la constante de temps, les commandes électroniques les plus performantes sont des commandes à courant constant quelle que soit la fréquence.

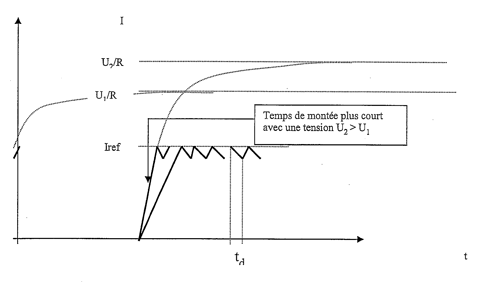
# Commande en tension (ou RL)

En appliquant une tension d’alimentation à un bobinage d’une phase, le courant s’établit suivant la loi exponentielle. La valeur du courant n’est limitée que par la résistance du bobinage, aussi pour régler le courant nominal dans le moteur il faut :

* soit, disposer d’une tension d’alimentation relativement faible (quelques volts), mais le temps d’établissement du courant est relativement long avec  = L/R, ce qui limite la plage de vitesse de fonctionnement
* soit, avoir une tension plus élevée, mais en rajoutant une résistance série Rs pour limiter le courant. La constante de temps  = L / ( R+Rs ) est alors réduite, mais au prix de pertes joules importantes dans cette résistance série, ce qui limite l’emploi de cette technique aux très petits moteurs. A noter que le courant s’établit plus rapidement donc le couple est amélioré ainsi que la plage de vitesse de fonctionnement.

Ce type de commande en tension est destiné à des applications ne nécessitant pas de vitesses de fonctionnement élevées et de plus ne permet pas d’optimiser les performances du moteur en terme de couple. Aussi, il apparait que ce type de commande est moins utilisé, notamment grâce à la vulgarisation des systèmes à découpage.

# Commande en courant ou découpage

Dans cette technique, on applique une tension assez élevée pour assurer une montée rapide du courant. On dispose une résistance de mesure du courant. Lorsqu’il atteint la valeur préréglée Iref, la commande annule la tension par blocage des transitors. Le courant décroit et lorsqu’il atteint une valeur plus faible ou après un temps d’extinction fixe, la commande ré-applique alors la tension (d’où le terme « chopper »). Il s’agit donc d’un découpage de la tension appliquée au bobinage, à fréquence élevée de l’ordre de 20kHz.

Remarque : lors de l’annulation de la tension, l’énergie emmagasinée par la self de phase doit être évacuée. Plusieurs modes de récupération sont alors possibles :

* Récupération de type « slow decay » :  
  L’énergie est dissipée dans la résistance de mesure du pont de puissance. Cette méthode a l’inconvénient de permettre une décroissance du courant assez lente td et par conséquent l’avantage d’une ondulation de courant faible et d’un courant moyen plus élevé.  
  ​
* Récupération de type « fast decay » :  
  L’énergie est renvoyée vers l’alimentation et les condensateurs de filtrage qui ensuite restitueront cette énergie à la remise en conduction du courant. Cette méthode a l’avantage de permettre une décroissance rapide du courant (intéressant en micropas et en HF) et par conséquent l’inconvénient d’une ondulation de courant élevé et d’un courant moyen plus faible. Ce type de récupération génère un échauffement plus important du moteur.
* Récupération de type « mixed decay » :  
  Comme son intitulé l’indique, cette méthode utilise alternativement les deux modes précédents. Aujourd’hui, quelques composants (Allegro) électroniques de pilotage de moteurs pas à pas sont conçus pour cette méthode.

La commande en courant chopper offre les meilleures performances en termes de couple moteur et de plage de vitesse de fonctionnement. Ce type de commande est la plus répandue notamment grâce à la faible puissance dissipée par le système à découpage et le choix de composants électroniques disponibles à sa réalisation qui sont de plus en plus performants.

# Echauffement moteur alimenté à courant constant I de fréquence nulle

Dans ce cas, le rotor est soumis à son couple de maintien. La cause unique de son échauffement est les pertes Joules.

Dans le cas d’une alimentation des 2 phases, la puissance transmise au moteur est : P = 2RI²

Si le courant I est le courant nominal donné par le constructeur, le moteur, et plus particulièrement le vernis d’isolement des fils de bobinage, doit supporter en continu ce courant.

La limite acceptable de la température extérieure mesurée sur le stator est d’environ 130°C. Au-delà de cette limite, une dégradation du bobinage peut se produire et par conséquent détruire le moteur. Le moteur pas à pas est un moteur qui chauffe énormément. Il est fréquent que la température de sa carcasse dépasse les 100°C.

La plupart des commandes électroniques ont un mode « repos » qui permet de réduire le courant lorsque le rotor est arrêté et donc de réduire l’échauffement tout en conservant un couple de maintien constant.

Un montage sur un support métallique permet une meilleure évacuation des calories.

Dans la définition d’un moteur pas à pas, il est indispensable de connaitre le « duty cycle » (temps marche/temps arrêt) car il permet d’optimiser le fonctionnement sans dégrader le moteur par un échauffement excessif.