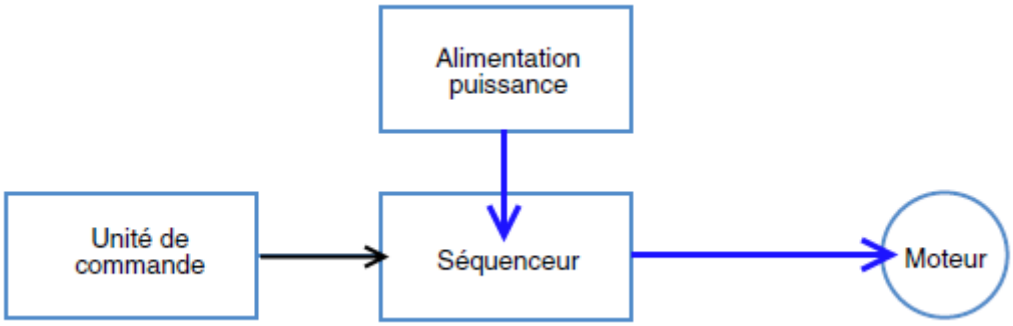
Moteur Pas à Pas

Pour la petite histoire, le moteur pas à pas fut inventé en 1936 par Marius Lavet, un ingénieur français des Arts et Métiers, pour l'industrie horlogère .



Le fonctionnement d'un moteur PAP nécessite la présence et l'intégration harmonieuse des éléments suivants :

- une unité de commande (*motion controller)* qui fournit des impulsions dont la fréquence est proportionnelle à la vitesse et prend en charge le sens de rotation. Dans le cas d'une fraiseuse à portique cette unité de commande prendra en charge d'autre fonctions comme la vitesse et la température de l'électrobroche, des capteurs de limite de course
- un séquenceur *(stepper driver)* qui mettra en forme et aiguillera vers les différentes bobines les impulsions vers le moteur,
- une alimentation de puissance *(power supply)* .

Pour les petites CNC à portique l'unité de commande va comprendre

- un logiciel de contrôle appelé post-processeur ,
- un carte *(motion controller)* qui reçoit les commandes du post-processeur et envoie les impulsions de commande aux différents équipements
- une carte BOB *(Breakout board)* qui crée un isolement électrique et facilite le raccordement filaire aux drivers, aux capteurs analogiques ou aux relais.

`On doit absolument raisonner globalement pour avoir cohérence et compatibilité sur l'ensemble {Motion controller + Stepper Driver + PAP}.`

Couple vs Puissance

Le couple est un effort appliqué à un axe pour le mettre en mouvement, le stopper ou le maintenir en position stable.

La puissance (en Watts) est la capacité à effectuer un travail en un temps donné. Par exemple monter 2 tonnes de béton à 3 m de hauteur va demander la même quantité d'énergie, qu'on le fasse

en 5 mn ou en une heure (60mn). Pour le faire en 5 mn cela demandera 12 fois plus de puissance qu'en une heure.

1 oz.in=0,00706 N.m ; N.m=141,612 ozf.in

Puissance= Couple*Vit_Rotation que l'on peut aussi écrire Couple=Puissance/Vit_Rotation

P en W ; Couple en N.m ; Vit_Rotation en radians par seconde.

Exemple :

- Fraiseuse d'établi tournant à 800 trs/mn avec un moteur de 1100 W.
  800 trs/mn devient (800/60)*(2*3,1416)=83,77 radians/s
  avec un rendement électrique-mécanique de 80 % le couple est de :
  Couple=(1100*0,8)/83,77 = 10,5 N.m
- Dans le cas d'une électrobroche de 1100W tournant à 24000 trs/mn le couple sur l'axe n'est plus que 10,5/24000*800= 0,36 N.m.

Conversion des couples

	Nm	cm kg	cm N	m Nm	cm gr	in.oz	lb.Ft
1b.Ft	1,383	=13,83	=138,3	=1383	=13830	=192	=1
in.oz	0,00072	=0,0723	=0,723	=7,23	=72,3	=1	=0,0052
cm gr	0,0001	=0,001	=0,01	=0,1	=1	=0,0,139	=0,0000723
m Nm	0,001	=0,01	=0,1	=1	=10	=0,139	=0,000723
cm N	0,01	=0,1	=1	=10	=100	=1,39	=0,00723
cm kg	0,1	=1	=10	=100	=1000	=13,9	=0,0723
Nm	1	=10<					

FCEM, Inductance

FCEM=force contre-électromotrice

Lorsque le flux du champ magnétique qui traverse un circuit conducteur varie au cours du temps, il apparaît dans ce circuit une tension induite. La tension ainsi créée est orientée de façon à générer des courants s'opposant à la variation du flux magnétique. On dit donc qu'elle s'oppose à la variation du flux. La variation du flux du champ magnétique peut avoir deux causes (non exclusives) :

- Soit le circuit est soumis à un champ fixe mais on le déforme ou on l'oblige à tourner (cas des machines à courant continu),
- soit le circuit est immobile et l'intensité du champ magnétique varie ou tourne (cas des alternateurs).

La « force » contre-électromotrice n'est pas une force mais une tension qui s'exprime en Volts.

Inductance

Selon le théorème d'Ampère tout courant parcourant un circuit crée un champ magnétique à travers la section qu'il entoure. L'**inductance** de ce circuit est le quotient du flux de ce champ magnétique par l'intensité du courant traversant le circuit. L'unité de l'inductance est le henry (H). En toute rigueur ce terme n'a d'intérêt que pour les situations dans lesquelles le flux est — ou peut être considéré comme — proportionnel au courant. Cette approximation de proportionalité est généralement acceptée pour les moteurs PAP.

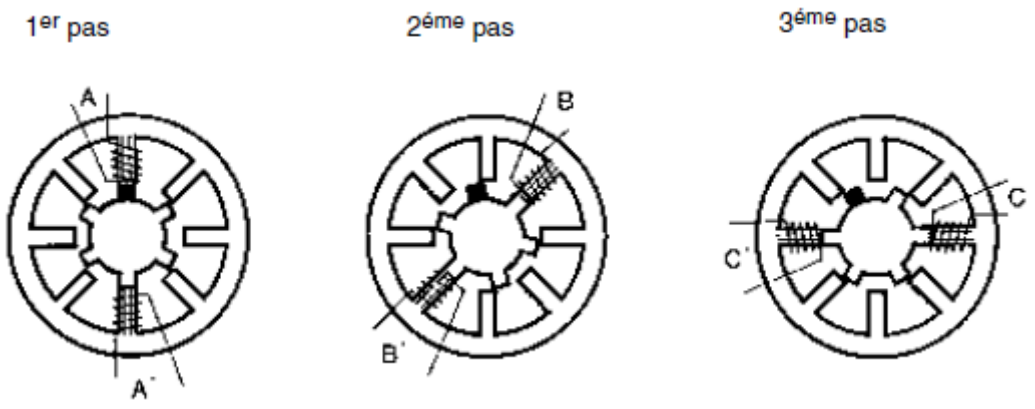
Principe simplifié de fonctionnement

On va prendre un moteur PAP à réluctance variable car le mécanisme se visualise plus facilement.

Ce moteur se compose d'un rotor denté et d'un stator (immobile) denté. Il fonctionne selon le principe du flux maximal. Le flux magnétique est maximal lorsqu'une paire de dents du rotor est alignée avec une paire de dents du stator.

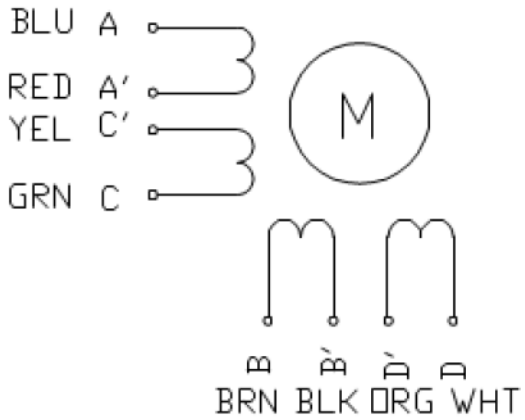
Le moteur pas à pas (PAP) n'a qu'un nombre fini de positions électriquement stables, celles où le flux est maximal. Le flux est maximal lorsque des paires de dents rotor et stator sont alignées.

Si l'on alimente une paire de bobines, dès que le flux magnétique est suffisant le moteur se met à tourner.



Exemple de table de commande des bobinages

Wiring Diagram:



Rotation:

CW DIRECTION	STEP	A C'	C A'	B D'	D B'
⇩	1	+		+	
	2		+	+	
	3		+		+
	4	+			+
	1	+		+	

La direction de rotation horaire *(CW= clock wise)* est celle vue en regardant l'axe moteur par son extrémité.

specifications:

PHASE	STEP ANGLE	RATED VOLTAGE	CURRENT /PHASE	RESISTANCE /PHASE	INDUCTANCE /PHASE	HOLDING TORQUE	ROTOR INERTIA
	DEG/STEP	V	A	ohms	mH	kgf-cm	gcm^2
unipolar	1.8	2.8	4	0.7	1.5	18	520
bipolar(s)	1.8	3.94	2.82	1.4	6	25	520
bipolar(p)	1.8	1.97	5.65	0.35	1.5	25	520

On voit ci-dessus les caractéristiques d'un moteur au format NEMA23

- selon le câblage l'intensité maximale admissible est différente, il faut s'en souvenir.
- La tension nominale *(rated voltage)* est la différence de tension à partir de laquelle le moteur se met à tourner.

<u>Interprétation</u>

Par exemple en bipolaire série le courant maxi sera de 3,94 A. Pour que le moteur fournisse potentiellement son couple nominal (quand on va forcer la rotation jusqu'à 1.8°) à l'arrêt, il faut lui appliquer un courant de 2,82A.
A l'arrêt, pas de FCEM, il n'a que sa pure résistance ohmique à opposer soit 2,82 Ohms.
Ce qui nous fait U=R*I = 2,82*1,4= 3,95V
---> Ensuite, quand on va envoyer les séquences de pas pour le

mettre en rotation, va apparaître proportionnellement une FCEM qui va se soustraire aux 3,95 V. La résistance pure va évoluer vers une réactance (résistance + effets de l'inductance).
Au fur et à mesure de l'augmentation de vitesse pour maintenir les 3,95V il va falloir monter la tension au bornes des bobinage.
A partir d'une tension limite, si on accélère encore, le courant va chuter ainsi que le couple disponible.

Sur la majorité des systèmes grand public on travaille en courant constant et tension variable (à la manière d'une alimentation à découpage). C'est le driver qui se charge de cela, automatiquement,en temps réel. La puissance moyenne dissipée dans le moteur ne doit pas excéder un maximum admissible. En général on admet que les bobinages peuvent fonctionner en continu à une température de 70°C.

C'est à l'aide de switch que l'on règle sur le driver la consigne du courant.

Quelques définitions

Courant par phase

C'est l'intensité par phase à fréquence nulle (moteur à l'arrêt) qui provoque l'échauffement maximum admissible par le moteur. Ce courant est mesuré à froid dans le cas d'un moteur à alimentation à tension constante.

Couple de maintien statique

Le moteur étant alimenté le couple de maintien statique est le couple qu'il faut appliquer pour obtenir une rotation continue.

Couple de maintien (Cm)

Le couple de maintien est le couple minimum qu'il est nécessaire d'appliquer au rotor pour occasionner sa rotation, la mesure étant faite moteur alimenté deux phases à la fois à fréquence nulle

Généralités

Grosso modo 3 types principaux de moteurs PAP

- reluctance variable : moins puissant, mais plus rapide que les moteurs à aimants permanents.
- aimants permanents : faible coût de fabrication, résolution ne dépassant pas 100 pas/tour
- hybrides : combinaison des 2 technologies précédentes ; leur intérêt réside dans un meilleur couple, une vitesse plus élevée, et une résolution de 100 à 400 pas/tour.
- Attention de plus en plus en souvent par abus de langage il

est question de moteurs PAP hybrides pour parler de moteurs PAP régulés en boucle fermée comme des servomoteurs.

- Le gros de la production chinoise pour le grand public est du type hybride bipolaire à 200 pas au tour.

Moteur PAP en boucle fermée, dits « hybrides »

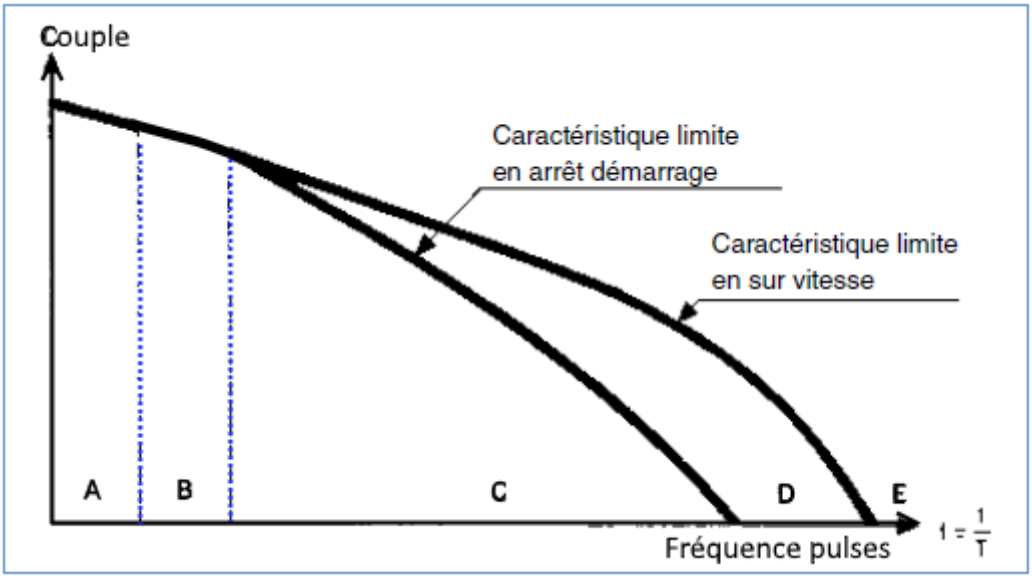
Ces moteurs ont une sortie d'arbre arrière sur laquelle on place un encodeur qui compte le déplacement angulaire du moteur. A la manière des servomoteurs il y a une rétroaction en boucle fermée. Ce dispositif permet de compenser les pertes de pas.

Par rapport au PAP en boucle ouverte les PAP « hybrides » peuvent accélérer très fort tout en fonctionnant en zone de survitesse, les pertes de pas sont reprises par la régulation. Par rapport aux servomoteurs, ils ont des couples très élevés à basse vitesse, sont considérés comme plus fiables et moins coûteux dans la gamme de puissance modeste qui est la leur. Par contre les PAP ne sont pas adaptés aux grandes vitesses et forte puissance.

Définition du besoin

- Définir clairement et avec précision le système, la chaîne cinématique pour connaître, les frottements, l'effet des masses en mouvement (moment d'inertie) ramenée au niveau de l'axe moteur. Penser à inclure le moment d'inertie du rotor lui-même
- Formaliser le mode de transmission et le service attendu pour obtenir le couple nominal utile en travail et en maintien de position
- Choisir un vitesse de fonctionnement et une accélération en situation d’usinage et en situation de déplacement à vide du portique
- Dans la mesure où le moteur délivre le couple nécessaire à la fréquence (vitesse de rotation) voulue, il convient de savoir dans quelle zone il va travailler. S'il fonctionne dans la zone de survitesse (D) alors il faut définir les rampes d'accélération et de décélération pour éviter les pertes de pas sauf si on travaille en boucle fermée.

La FCEM, liée à l'établissement du flux, a une constante de temps pour s'établir ou disparaître. Cela explique la sensibilté du couple à la vitesse de rotation. On découpe le fonctionnement du moteur en plusieurs zones.



- **Zone A** : fonctionnement possible mais déconseillé : bruit très élevé, à-coups du moteur dommageables à la mécanique
- **Zone B** : risque de perte de synchronisme par oscillations et résonance basse fréquence
- **Zone C** : Zone d'arrêt-démarrage, pas de perte de pas en boucle ouverte
- **Zone D** : zone dite de survitesse. Prévoir les rampes d'accélération/décélération en zone C sous peine de perte de de pas
- **Zone E** : zone de fonctionnement impossible

Brochage

Les moteurs sont disposnibles en 4, 6 ou 8 broches. Les moteurs 8 broches sont parfois appelés universels.

4 broches

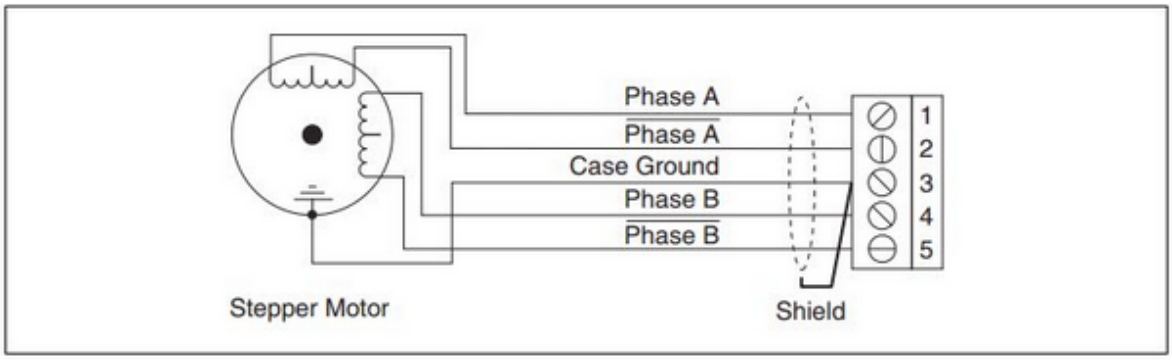


Figure 1 : 4-Wire Stepper Motor

Dessins : origine doc. National Instruments

6 broches

Dessins : origine doc. National Instruments

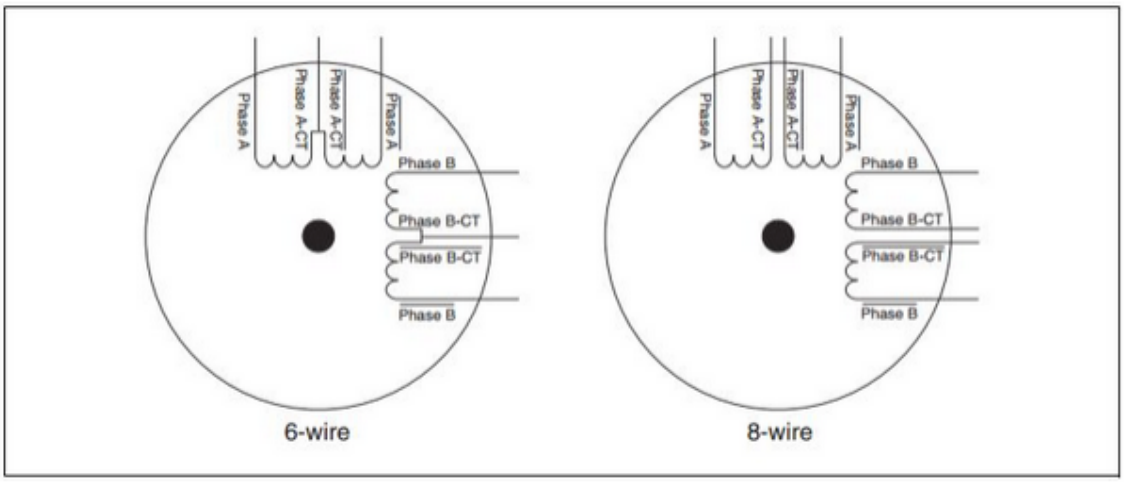


Figure 2 : 6-Wire Stepper Motor (Left) 8-Wire Stepper Motor in Parallel (Right)

Ces moteurs offrent un point milieu aux bobinages . Ce type de câblage est plutôt adapté pour les applications demandant un fonctionnement à faible vitesse avec beaucoup de couple. Certains de ces moteurs peuvent être câblés comme des 4 fils bipolaires et utiliser les drivers pour bipolaire.

8 broches universels

Ces moteurs offrent une grande souplesse de câblage, choisi selon les besoins de l'application. Ils ont 8 bobines indépendantes.

Il faut se rappeler que les drivers grands publics sont conçus pour des bipolaires 4 fils. Et donc à

moins de s'y connaître il vaut mieux ne pas improviser.

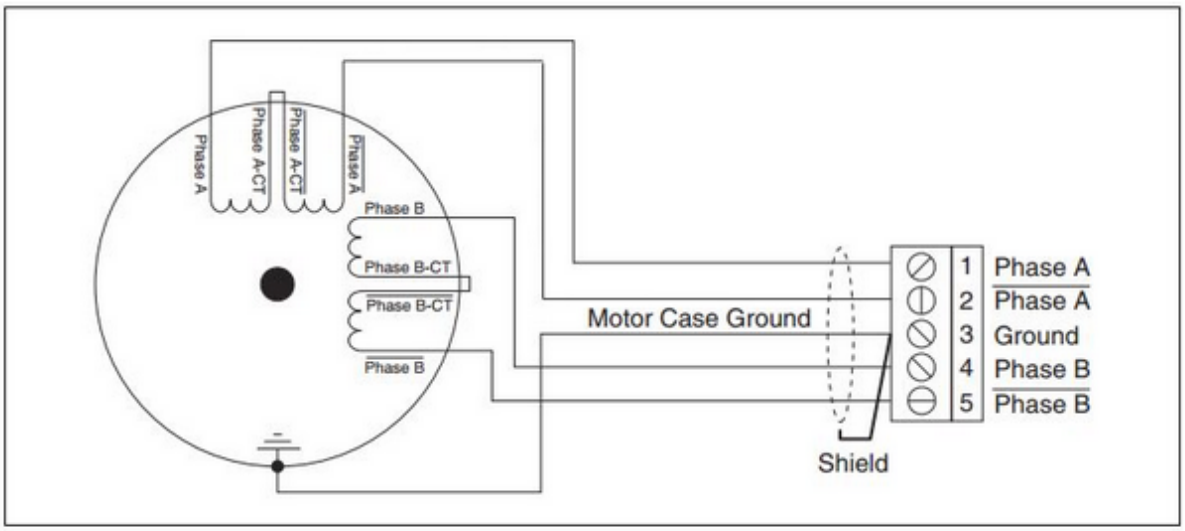


Figure 3: 8-Wire Stepper Motor (Series Configuration)

Dessins : origine doc. National Instruments

Cette configuration série ressemble beaucoup au 6 fils . C'est celle qui offre le plus de couple par ampère consommé au détriment de la vitesse de fonctionnement. C'est en général la configuration sous laquelle les moteurs grand public chinois sont livrés

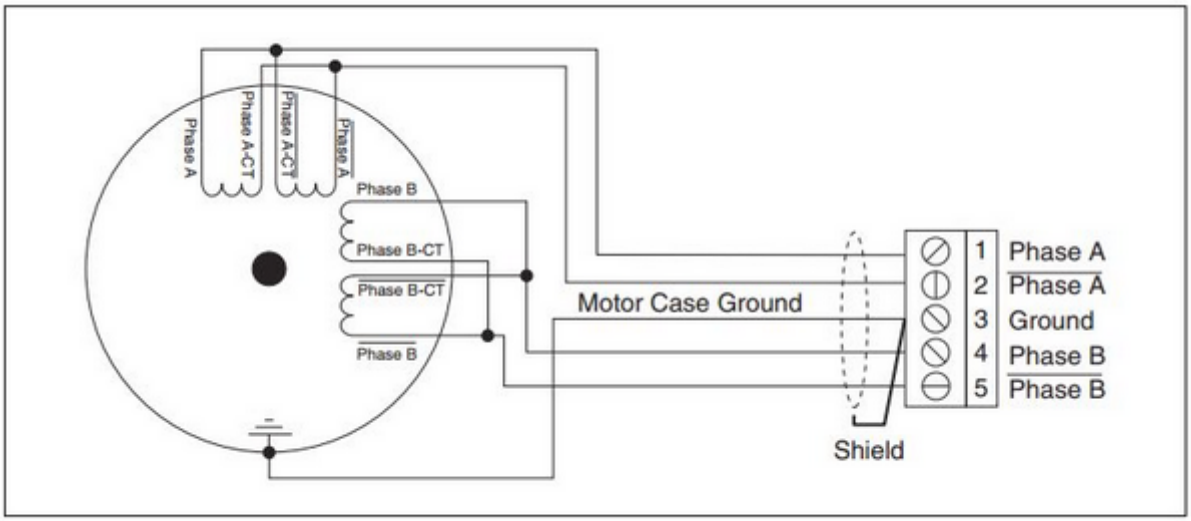
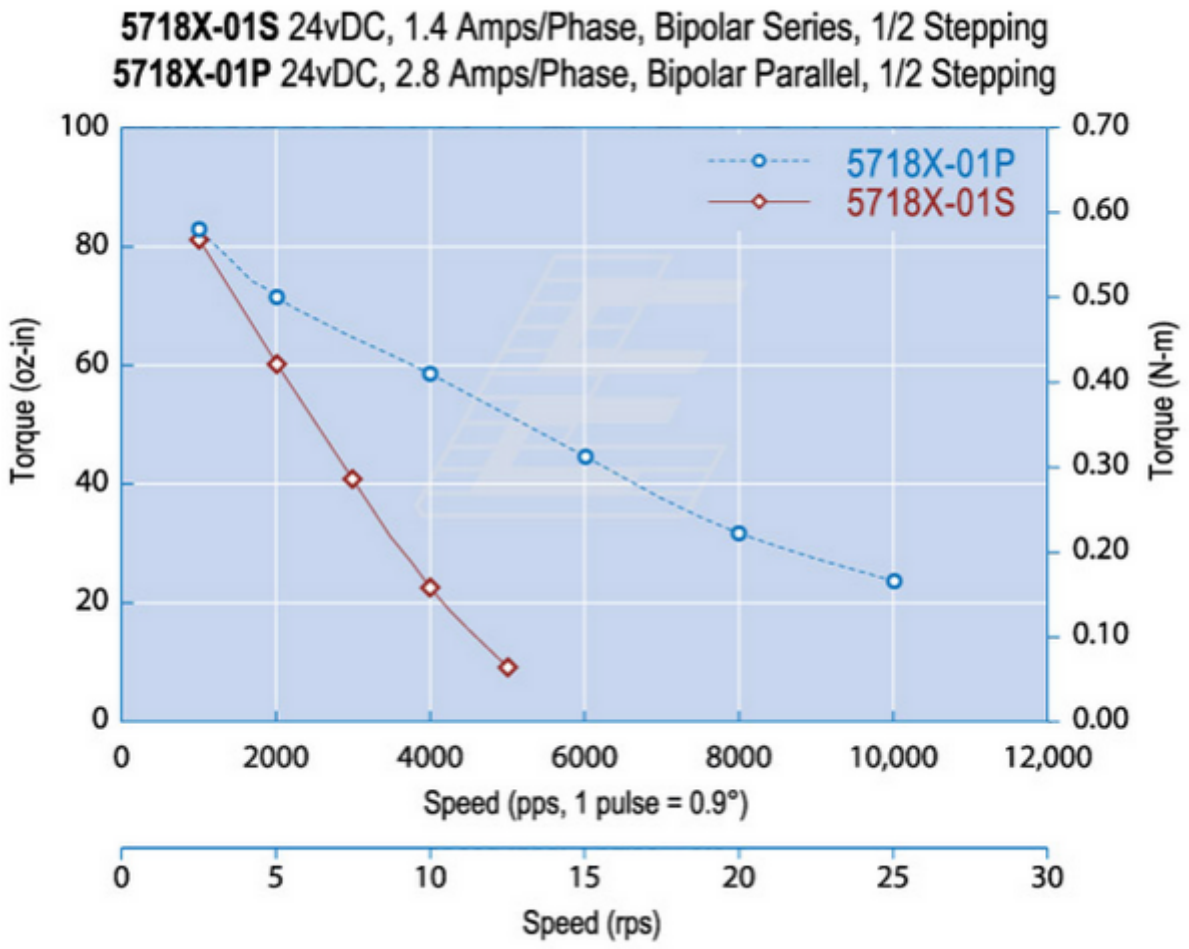


Figure 4: 8-Wire Stepper Motor (Parallel Configuration)

La configuration bipolaire parallèle permet un fonctionnement à plus grande vitesse au détriment du couple.

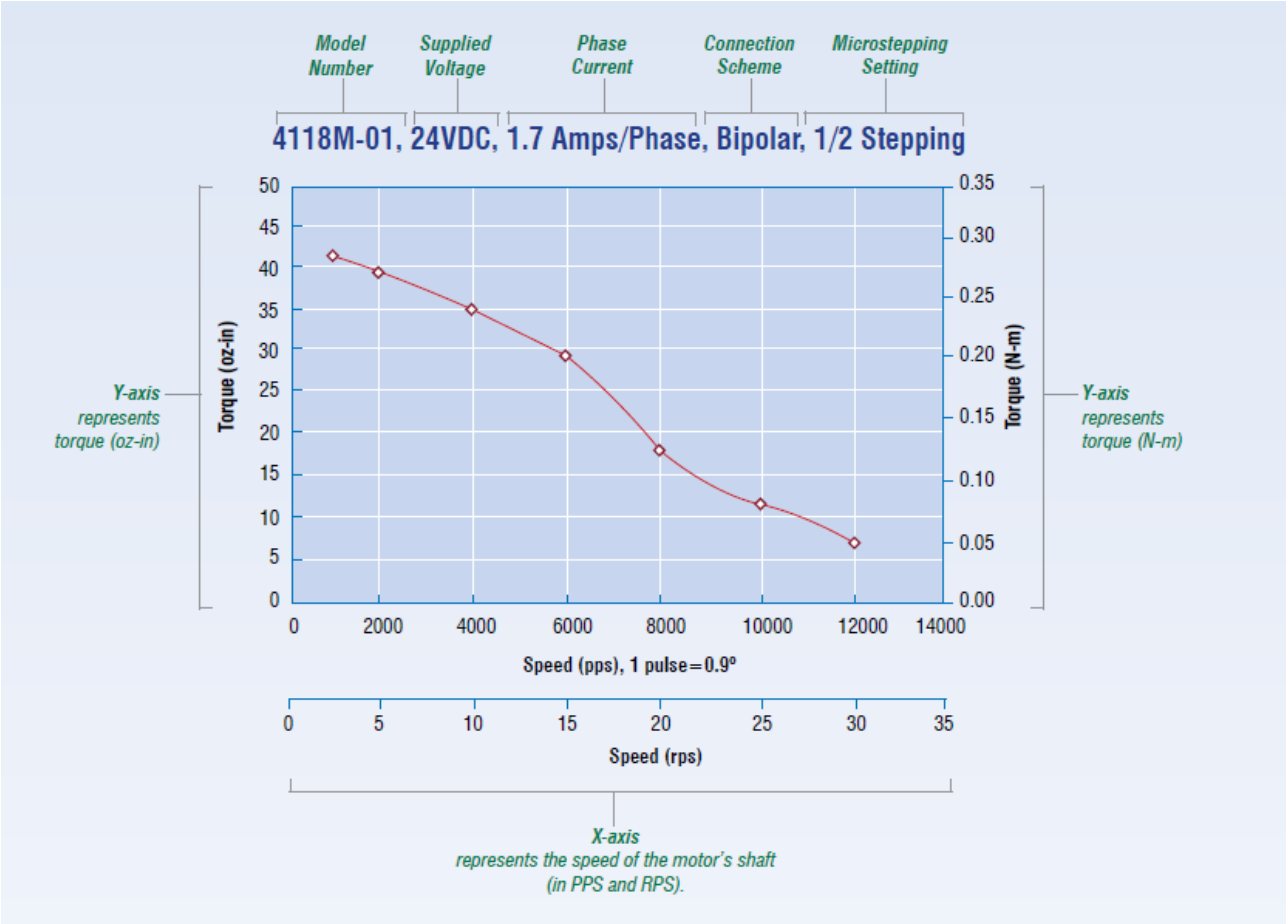


Source : Lin engineering

La courbe ci-dessus illustre les effets du type de câblage pour deux moteurs de même gamme[1] de chez Lin engineering. Le moteur à schéma parallèle demande un ampérage double du moteur à schéma série, mais son comportement est meilleur à grande vitesse.

1 Nema 23/ 200pas au tour/ 305 oz-in (2.16 N.m) Holding Torque

Couple d'un moteur pas à pas



Source : Lin engineering

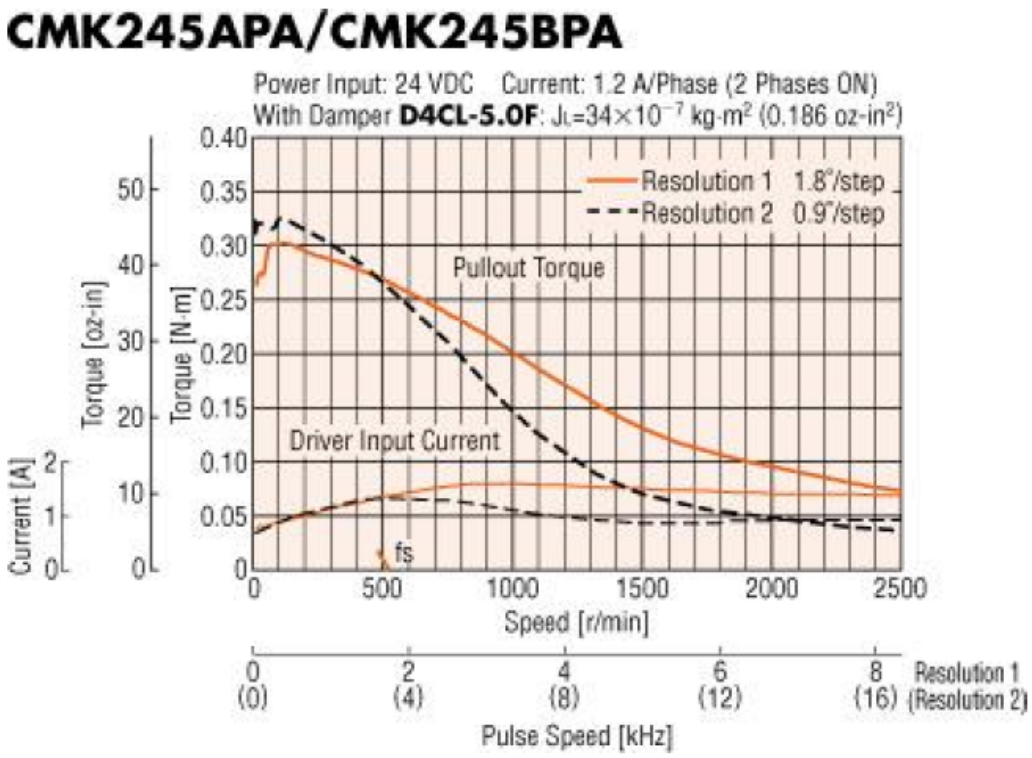
Les moteurs de la classe Nema 23 ont un couple de l'ordre de 270 oz.in soit 1,91 N.m mais peuvent monter jusqu'à 500 oz.in

Le couple d'un moteur pas à pas dépend de nombreux facteurs :

- type de câblage interne
- tension et intensité d'alimentation
- vitesse de rotation imposée par le générateur d'impulsions
- gestion en micropas.

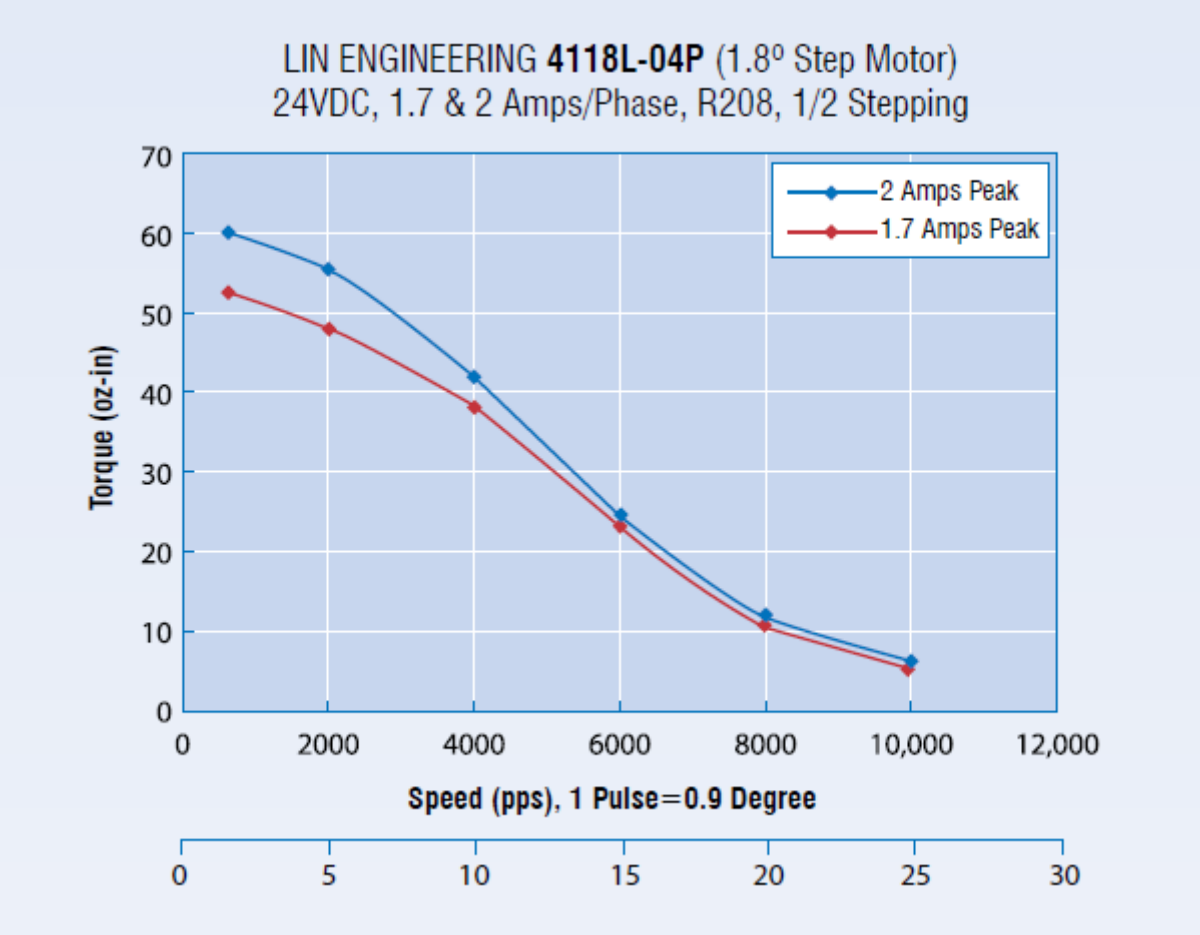
Le type de câblage, la tension et l'intensité sont imposés par le type de driver associé au moteur.

On note que le couple diminue très vite au fur et à mesure que la vitesse augmente, et ceci à courant constant.

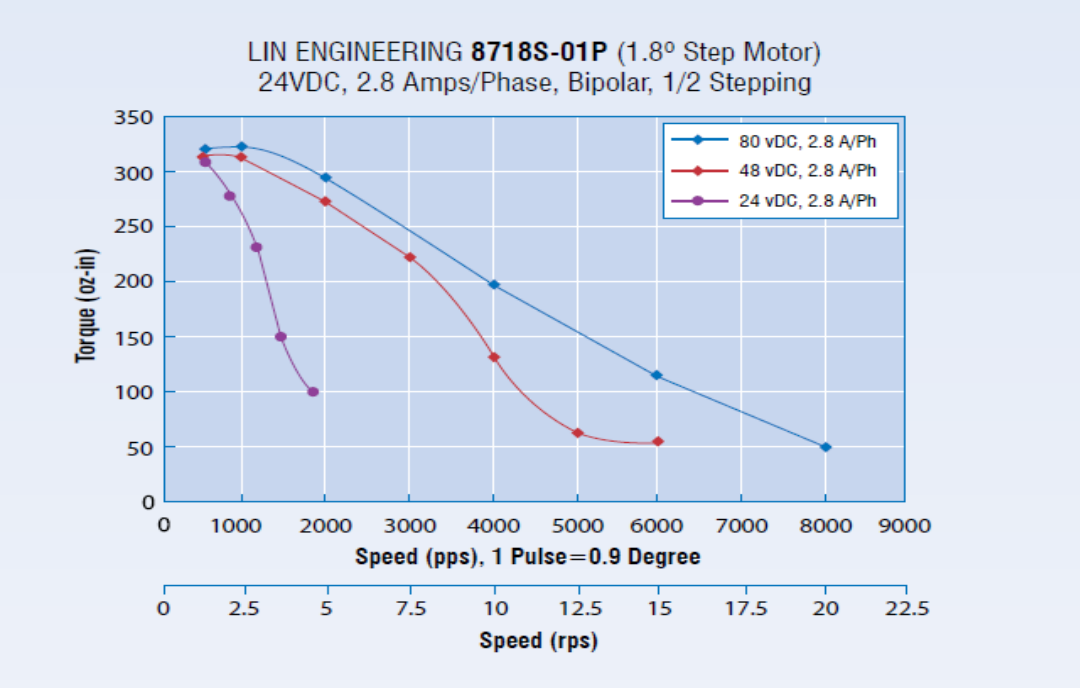


Source : Oriental motors

Sur la courbe ci-dessous on constate que l'utilisation d'un pilotage en demi-pas (0,9°) aggrave le phénomène



Source Lin engineering

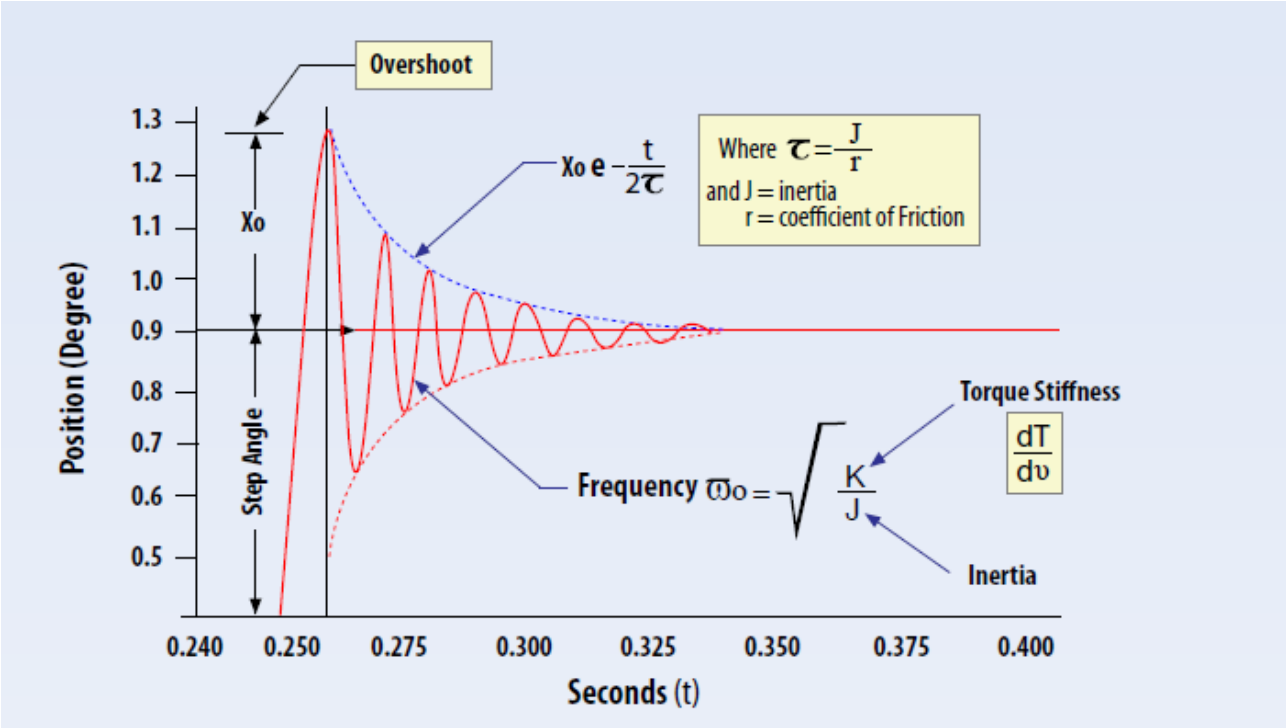


Sur les courbes ci-dessus on illustre l'effet de l'intensité et de la tension d'alimentation sur le couple moteur. La tension d'alimentation est un paramètre très important. La sous-alimentation est catastrophique même à basse vitesse. Il faut y veiller lors de l'achat du driver.

Oscillation et résonance

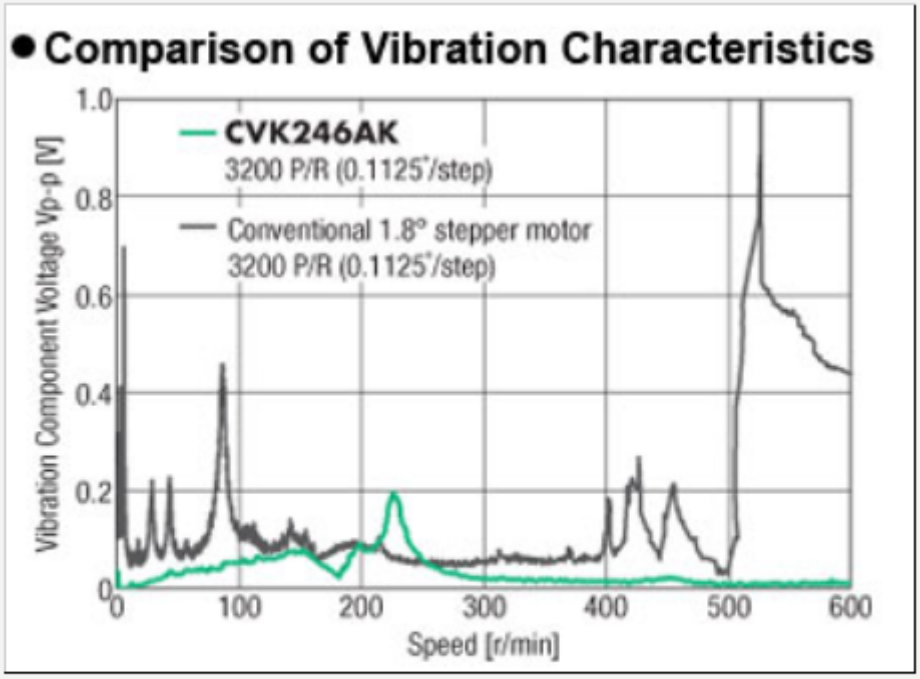
Si l'on suspend un masse à l'extrémité libre d'un ressort, l'autre extrémité étant fixée et que l'on tire sur la masse, si on la relâche brusquement la masse, alors le système se met à osciller de haut en bas et de bas en haut. L'amplitude des mouvements diminue (amortissement) puis le système se stabilise dans sa position d'équilibre. Il en va de même avec le moteur, la masse de l'exemple précédent c' est le rotor en mouvement avec la charge et le ressort ce sont les forces électromagnétiques.

La courbe suivante montre qu'il faut un peu plus de 0,3 s au moteur testé pour se stabiliser en position. La précision absolue de positionnement d'un moteur 200 pas est en général de ± 0,09°, elle n'est atteinte ici qu'au bout de 0,33s. Ce n'est pas négligeable.



Source Lin engineering : oscillation sur une commande de 1/2 pas

Sous certaines conditions de vitesse les phénomènes d'oscillations électro-mécaniques peuvent considérablement s'amplifier, et donner lieu à une résonance dommageable. La résonance ne s'établit pas instantanément, cela peut prendre de 1 à 15 s, mais cela amène le moteur à « caler »



The new smooth drive control with higher current control increases the basic step angle to a maximum of 2048. As a result, a reduction in step vibration in the low speed range is achieved.

La figure ci-dessus illustre les pics de résonance sur un ensemble de production courante et sur un ensemble industriel (source : Oriental motors).

L'utilisation d'une commande à micropas permet de remédier, sans les supprimer, ces problèmes, en particulier les résonances.

L'utilisation de micropas donne un fonctionnement avec moins d'à coups ce qui est en général souhaitable.

Micropas

On se doit de considérer le système [Moteur-Driver] avant de tirer des conclusions hâtives sur l'effet des micropas sur le couple. Il semble d'ailleurs difficile de comparer le comportement des systèmes industriels à celui des offres grand public.

Un moteur pas à pas n'a qu'un nombre fini et précis de positions électriquement stables.

Ce sont par exemple les 200 positions des moteurs courants. Moyennant des procédés de contrôle on peut maintenir artificiellement le moteur avec ses bobinages alimentés dans des positions intermédiaires : les micropas *(microstep).* Ce sont les circuits spécialisés du driver qui se chargent du travail. Par contre plus on augmente le microdécoupage entre les pas naturels *(Full step)* plus il va falloir envoyer d'impulsions pour un même déplacement.

Microstep value	Multiplier to the motor's natural steps in one revolution	Number of steps per revolution for 1.8° motors
Full step	no multiplier	200
Half step	2x	400
Quarter step	4x	800
Eigth step	8x	1600
Sixteenth step	16x	3200
5 step	5x	1000
10 step	10x	2000
25 step	25x	5000
128 step	128x	25600
256 step	256x	51200
etc	etc	etc

Source Lin Engineering

Précision, répétabilité, résolution

La **précision** c'est la capacité pour l'archer de mettre la flèche en plein coeur de cible.

La **répétabilité** c'est la capacité, tir après tir, de mettre la flèche toujours dans la même zone de cible, même si ce n'est pas le coeur de cible.

Ce ne sont pas les mêmes notions ni le même usage.

La **résolution** d'un télescope c'est la capacité de séparer deux objets très proche au lieu de n'en voir qu'un seul. Pour l'Arduino la résolution de la broche analogique est de 1024 points. 5000/1024 =4,883 mv. Il ne pourra pas faire la différence entre une tension de 1V et 1,002V

La précision d'un moteur pas à pas est ± 5 % du pas. Pour 200 pas , 1 pas vaut 1,8° donc 1,8*0,05=0,09° . **Cette « erreur » reste constante et n'est pas cumulée sur les déplacements Full Step** ; par exemple pour un déplacement de 54° demandé on sera entre 54-0,09< position<54+0,09.

Cette précision de ± 0,09° autorise donc une résolution théorique de 360°/0,18°=2000 points.

Cette résolution correspond à 10 micropas par pas.

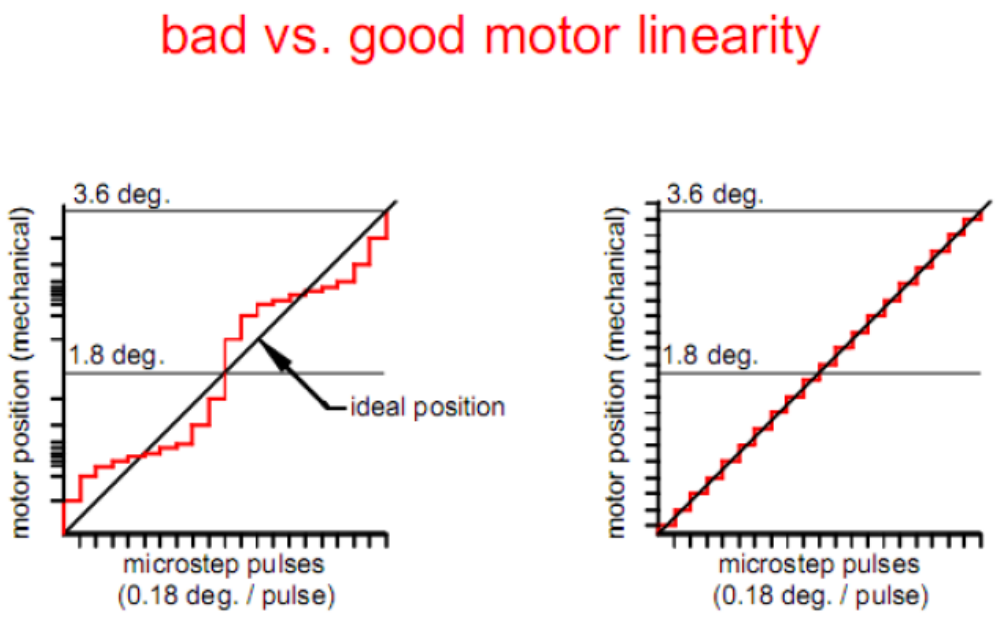
L'utilisation de micropas augmente la résolution mais ne modifie pas la précision qui, elle est acquise par construction.

Si l'on passe à un nombre de micropas plus important, cela n'apporte rien du côté précision-résolution comme pour un voltmètre qui mesure à 1 % et affiche sur... 10 chiffres. Par contre il y a deux exceptions à l'augmentation du nombre de micropas:

- le moteur à micropas est piloté en boucle fermée comme un servo moteur
- on a besoin d'un fonctionnement doux à des vitesses de rotation très faibles

Un autre élément à prendre en compte est la non linéarité de comportement de l'ensemble moteur-driver. Les micropas ne se répartissent pas de manière régulière à l'intérieur du déplacement ce qui a deux conséquences :

- statistiquement le positionnement n'est pas optimum
- des résonances peuvent apparaître à basse vitesse à cause des accélérations (micropas trop espacés) - décélérations cycliques (micropas trop serrés).



Source : Gecko Drive motors

La diminution ou non du couple est un sujet brûlant. Les prises de bec sur les forums pour ou contre les micropas ne sont pas rares mais les informations solides issues d'essais ne courent pas les rues.

Dans la pratique les mesures montrent que le couple moyen diminue avec le nombre de micropas demandés mais moins que ce donnent des calculs sommaires en partie parce on se rapproche de plus en plus d'une sinusoïde pour la commande. Le couple de maintien Holding Torque entre deux pas « naturels » diminuerait par contre beaucoup ce qui est très gênant.

Le couple de maintien (Holding Torque)

Le couple de maintien concourt à la précision

`Un moteur PAP à l'arrêt avec son couple de maintien est très différent d'un frein mécanique de couple identique.`

Le frein mécanique se mettra à glisser si et seulement si le couple moteur dépasse le couple de freinage.

`Le couple de maintien du moteur agit plutôt à la manière du couple de rappel d'un ressort de torsion.` Au fur et à mesure de l'augmentation du couple exercé par la charge, il y a glissement du rotor qui à un moment décroche et va retrouver une nouvelle position électriquement stable sur le pas suivant.

Gecko Drive Motors avance que pour 15 % du couple de maintien le glissement par rapport à la position d'arrêt souhaitée est de 1/10 de pas.

The relationship between restoring torque and shaft error angle is approximately sinusoidal as shown in Figure 18.

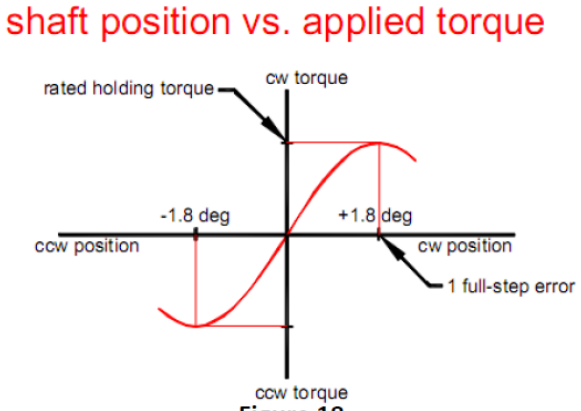
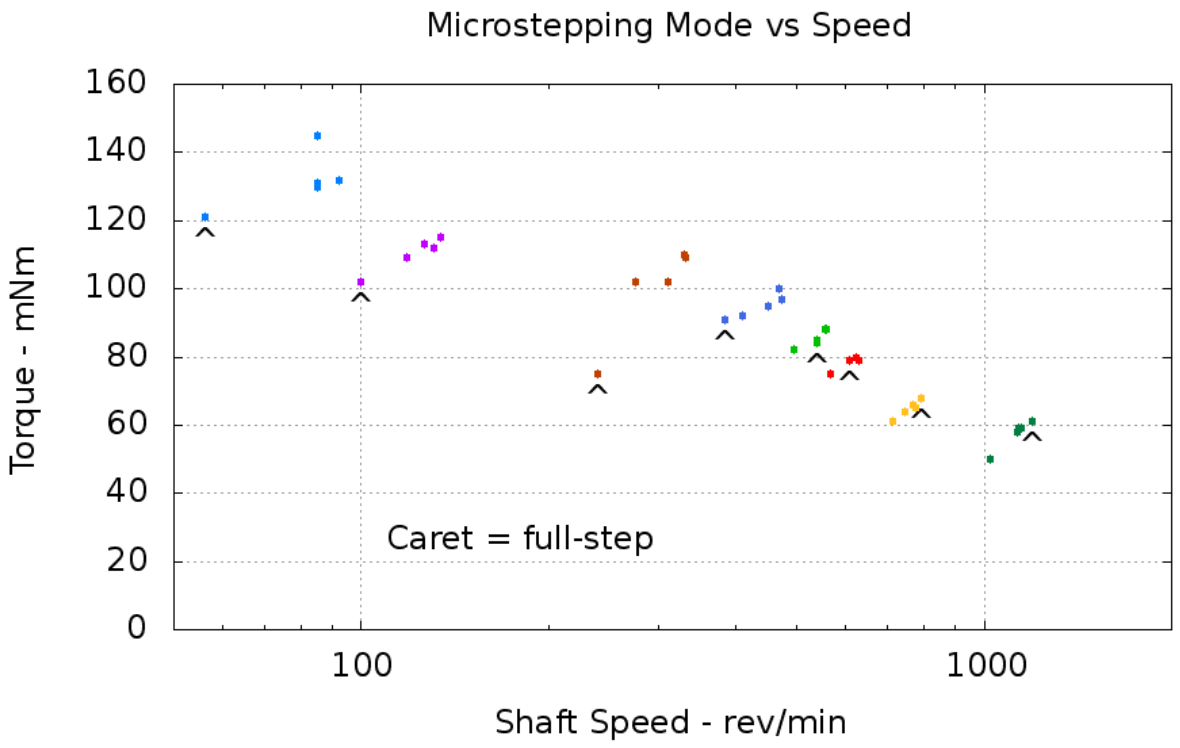


Figure 18

Source: Gecko Drive motors

`Plus le couple sur l'arbre se rapproche du couple de maintien du moteur plus le glissement devient important.` Si cela s'établissait, le couple de maintien deviendrait alors un élément dimensionnant majeur du système.

On voit ci-après le tracé de mesure de couple pour un ensemble grand public piloté par un circuit A4988 (genre Pololu). Les carrés sont le Full step, les autres signes sont des micropas qui s'étalent de 1/2, 1/4, 1/8, et 1/16 .



Source :http://softsolder.com/2011/09/11/stepper-dynamometer-microstepping-mode-vs-torque/

Selon ce graphique Full step a un avantage certain à faible vitesse, mais à grande vitesse il n'y a plus guère de différence. L'auteur note que le 1/8 de pas est le meilleur compromis pour son

montage. Il note aussi qu'à forte charge le Full step fournissait moins de couple que les micropas. On rejoint ici le point de vue de Gecko Drive qui prétend qu'au delà de 1/10 il n'y a pas grand-chose à gagner en augmentant le nombre de micropas.

Influence de la charge et de la cinématique

Toute application impliquant l'utilisation d'un moteur pas à pas nécessite de collecter les informations indispensables à un bon dimensionnement :

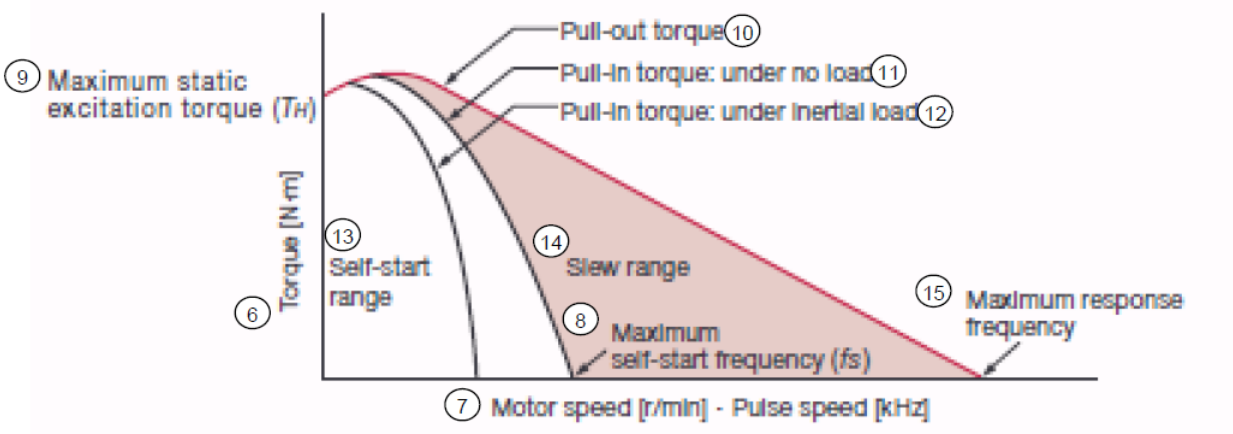
- la masse de la charge à entraîner (en kg),
- son inertie (en $kg \cdot m^2$)
- le type d'entraînement mécanique (vis, courroie crantée, crémaillère, etc.) ;
- le type de guidage, afin d'estimer les frottements (secs et visqueux) ;
- les efforts de travail (en N), par exemple effort axial de la fraise sur sa trajectoire ;
- le déplacement le plus critique (distance en fonction d'un temps).

L'influence de la charge est directement liée au calcul du couple moteur via les paramètres du calcul inertiel (en $kg \cdot m^2$) et de l'accélération (en $m \cdot s^{-2}$). Pour des paramètres d'accélération et de chaîne cinématique identiques, un moteur PAP n'aura pas besoin du même couple selon la charge mise en jeu.

Pour une application industrielle, le dimensionnement d'un moteur pas à pas doit être calculé de façon rigoureuse ou être raisonnablement 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.

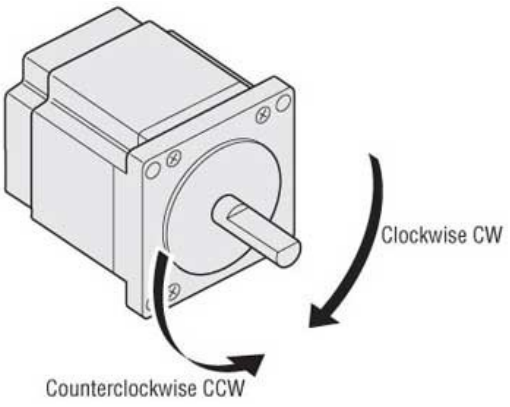
Annexe 1 :Glossaire

La majorité des notices (datas sheet), sont en anglais d'où le petit glossaire que je me suis concocté



Source : Oriental motors company

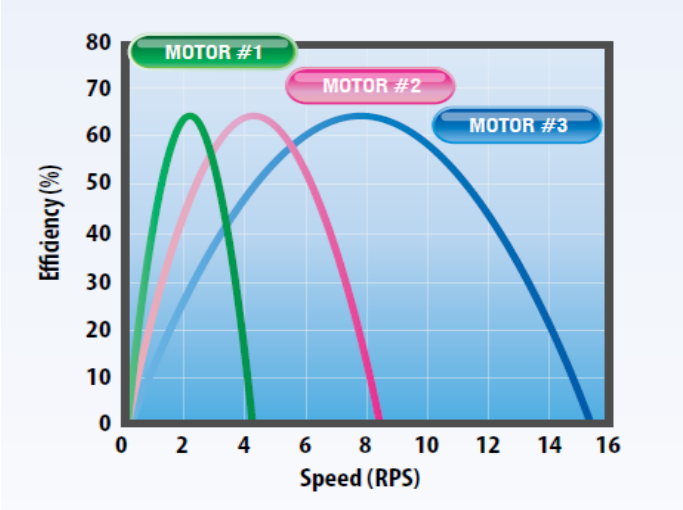
- **Torque** : couple
- **r/min, rev/mn** : tours/mn
- **PPS** : pulses per second , impulsions par secondes
- **Angle Accuracy** : précision angulaire. Il existe plusieurs définitions. En général il s'agit de la différence entre la position théorique et la position finale d'arrêt du moteur
- **ATE Angular Transmission Error** : c'est la différence entre la rotation théorique de l'arbre de sortie, calculée à partir du nombre de pulses envoyés, et sa rotation réelle. Cette notion prend son sens si un système de transmission intermédiaire comme un réducteur à engrenages est interposé.
- **ACC Automatic Current Cutback** : c'est une fonction du driver qui réduit, en général de moitié le courant d'alimentation du moteur si aucun pulse n'est envoyé. La temporisation est en général comprise entre 0,1 et 0,8s. En réduisant le courant on réduit aussi le couple de maitien mais on limite l'échauffement des composants et du moteur.
- **Half current** voir ACC ci-dessus
- **Backlash** : jeu mécanique dans les transmissions en général. Il provoque des erreurs de positionnement particulièrement lors d'un changement de rotation.
- CW, CCW Clock Wise, Counter clockWise : sens horaire ou anti horaire. La convention est face à l'arbre de sortie



- **Misstep** : perte de pas, désynchronisation avec les pulses
- **Maximum No-load starting speed** : c'est la vitesse initiale maximale à laquelle le moteur peut démarrer, sans charge ni accélération, tout en restant parfaitement synchronisé. Habituellement notée « fs » sur les courbes de performances
- **Holding Torque** : c'est le couple que le moteur produit à l'arrêt, bobinages alimentés à l'intensité nominale. C'est ce couple qui permet de maintenir l'appareillage en position fixe lors d'un usinage par exemple. Pour éviter un chauffage excessif du moteur et un claquage des composants, les drivers ont une option Half current qui diminue de moitié le courant de maintien et donc diminue d'à peu près autant le Holding Torque
- **Pull-out Torque curve :** cette courbe représente le couple maximum que le moteur en charge peut fournir à une vitesse donnée sans perte de synchronisme. Toute combinaison {couple, vitesse} qui se situe au-dessus de la courbe amènera un perte de synchronisme (perte de pas en langage courant)
- **Pull-in Torque curve (no load)** : cette courbe représente la combinaison maximale {couple, vitesse} à laquelle un moteur sans charge peut démarrer, ceci sans accélération ni décélération. Si l'on souhaite démarrer au-dessus de cette courbe le moteur devra être accéléré ou décéléré dans un zone de fonctionnement nommée « slew[2] range ».
- **Pull-in Torque curve (inertial load) :** cette courbe représente la combinaison {couple, vitesse} que le moteur peut fournir avec une charge de type inertielle (masse à entraîner), s'arrêter, démarrer sans accélération ni décélération, c'est à dire à vitesse constante.
- **Self start range (start/stop region)** : dans cette zone de fonctionnement le moteur démarre, s'arrête et change de direction sans perte de synchronicité avec les impulsions envoyées par le driver. Il tourne à la vitesse des impulsions sans accélérer ni décélérer
- **Slew range** : c'est la zone où on fait fonctionner en général le moteur. Après avoir démarré le moteur dans la zone Self start, le moteur est accéléré ou une charge lui est appliquée. Avant de l'arrêter, on le décélère pour l'amener en zone de Self start avant de l'arrêter.

2 To slew = déraper ; slew rate= vitesse de balayage

- **Maximum response fequency** : vitesse maximale à vide (no load) du moteur



Source : Lin engineering

- **Efficiency** : rendement. Les moteurs pas à pas ont un rendement électrique>>mécanique médiocre par rapport à des moteurs conventionnels. Leur courbe de rendement est assez étroite d'où la nécessité d'un choix judicieux. En effet on risque de redécouvrir le chauffage électrique par convecteurs si l'on demeure dans des zones de faible rendement. L'électricité non convertie en travail mécanique se transforme en chaleur.

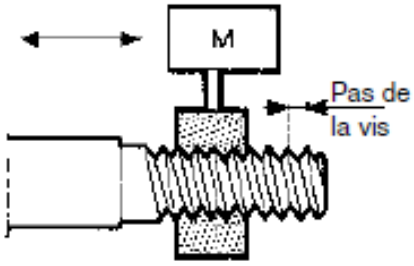
Annexe 2 : Moments d'inertie

Source : documentation Crouzet

Dispositif vis/écrou

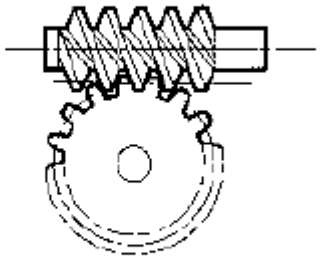
$$J = \frac{MP^2}{4\pi^2} + \frac{mr^2}{2}$$

M = Masse en translation
m = Masse de la vis
r = Rayon moyen de la vis



Système roue/vis

$$J = J_V + \frac{1}{R^2} J_r$$



J_v = Inertie de la vis considérée comme un cylindre de diamètre égal au diamètre primitif.

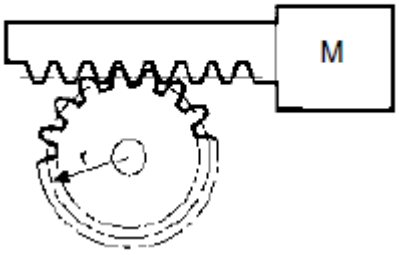
J_r = Inertie de la roue considérée comme un cylindre plein de diamètre égal a un diamètre primitif

R = Rapport de réduction

Crémaillère

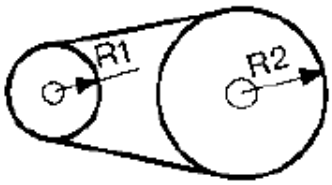
$$J = Mr^2 + \frac{mr^2}{2}$$

M = Masse en translation
m = Masse pignon



Transmission pour courroie (ou chaîne)

$$J = \frac{M_1 + 2m + M^2}{2} R1^2$$

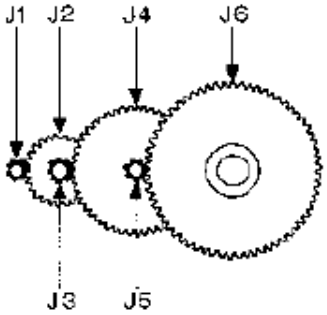


M_1 = Masse poulie moteur
M_2 = Masse poulie menée

m = Masse courroie

Si la poulie menée reçoit aussi le moment d'inertie Jc d'une charge on a alors :

$$J = \frac{M_1 + 2m + M_2}{2} R_1^2 + J_C \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2$$



Cas d'un réducteur

$$J = \frac{1}{R^2} J_c + J_r$$

J_c = Inertie de la charge entraînée en sortie du réducteur
J_r = Inertie du réducteur
R = Rapport de réducteur

➜ Nota :

L'inertie du réducteur se calcule étage par étage, chaque roue étant considérée comme un cylindre.

$$J_r = J_1 + \left(\frac{1}{R_1}\right)^2 (J_2 + J_3) + \left(\frac{1}{R_1}\right)^2 (J_4 + J_5) + \ldots\ldots$$

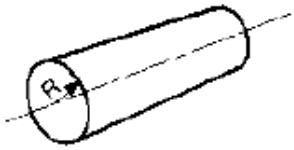
En pratique le calcul de l'inertie des 2 premiers trains, voire très souvent du premier donne une valeur approchée suffisante.

Inertie

Calcul des Inerties ramenées au moteur

➜ *Cylindre*

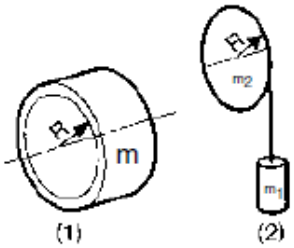
$$J = \frac{mR^2}{2}$$



➜ *Jante - Poids/poulie*

$$J = mR^2$$

$$J = mR^2 + \frac{mR^2}{2}$$

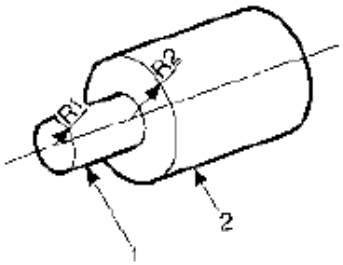


➜ *Cylindres coaxiaux (arbres épaulés)*

$$J = \frac{M_1R_1^2}{2} + \frac{M_2R_2^2}{2}$$

M1 = Masse du cylindre 1

M2 = Masse du cylindre 2



Annexe : Calcul simplifié du couple moteur

---> *attention tous les calculs devront être effectués avec un système d'unités cohérent. Il vaut mieux préférer le système international.*

Il est intéressant d'estimer la valeur minimale du couple moteur en fonction des entrées suivantes :

- vitesse dans la direction donnée (m/s). Avec le pas de vis *p* on en déduit la vitesse de rotation en radians/seconde.
- accélération dans la même direction (m/s²). L'accélération est la variation de vitesse pendant une durée déterminée.
- masses et moments d'inertie (kg.m²) : portique, moteur, vis à bille, accouplements, engrenages,...

D'autres valeurs devront avoir été mesurées ou estimées comme les frottement internes (translation, rotation, traction des câbles d'alimentation et tuyaux de refroidissement,...).

Toutes ces données sont ramenées à l'axe de rotation du moteur.

On écrit que Accélération_des_masses= Couple_moteur- Couple_résistant

$$J_{total} * \frac{d\omega}{dt} = C_{mot} - C_{rés.}$$

$$\frac{d\omega}{dt} \quad est\ l'accélération\ angulaire$$

$$J_{total} \quad moment\ d'inertie\ de\ masses\ en\ rotation$$

On notera que le moteur PAP et la vis à bille ne forment rien d'autre qu'un vérin électrique à vis. Le faible pas de la vis (de 5mm à 10mm au tour) donne une démultiplication élevée.

$$T = F * \frac{p}{2*\pi} * \left(\frac{N_1}{N_2}\right)$$

Le couple résistant *T* transmis à la vis dépend de la force résistante *F*, du pas *p* de la vis et d'un éventuel rapport de démultiplication (engrenage, courroies et poulies).

Les conséquences sont que le moteur n'aura pas besoin de fournir un couple élevé, mais devra par contre être capable de fortes accélérations et d'une vitesse de rotation assez élevée. On devra préférer des moteurs bipolaires avec des bobinages à faible inductance câblées en parallèle.

Le moteur ne devra pas quand même avoir un couple à l'arrêt trop faible car le couple diminue fortement lorsque la vitesse de rotation augmente, comme cela a été illustré dans les chapitres précédents.

Données mécaniques				
Masse de l'équipage mobile M_p	10	kg		
Diamètre de la vis Dv	12	mm	*0,0120*	*m*
Longueur de vis L	450	mm	*0,45*	*m*
Pas de la vis P	5	mm/tour	*0,005*	*m*
Masse volumique matière vis	8000	kg/m3		
Masse vis m_vis	*0,407*	kg		
J_rotor moteur	680	g.cm2		
Moments d'inertie				
J_vis	*0,0000073*	kg.m2		
J_équipage mobile	*0,000063*	kg.m2		
J_rotor moteur	*0,000068*	kg.m2		
J_poulies	*0*	kg.m2		
J_courroies	*0*	kg.m2		
J_accouplements	*0*	kg.m2		
J_engrenages	*0*	kg.m2		
J_total	*0,000139*	kg.m2		
Données dynamiques				
Vitesse d'avance portique	1250	mm/mn	*0,0208*	*m/s*
Durée rampe 0-->Vmax	0,05	s		
Vitesse angulaire	*26,18*	rads/s		
Accélération angulaire	*523,6*	rads/s²		
Distance parcourue 0-->Vmax	*1,04*	mm		
J*d(omega)/dt	*0,073*	N.m		
Forces et couple résistant				
Effort de coupe axial	80,0	N		
Forces de frottement glissières	10	N		
Force de gravité (poids)	0	N		
Autres couples résistants	0	N.m		
Coeff frottement vis	0,11			
Frottement induit sur la vis	*9,9*	N		
Couple résistant induit à la vis	0,079	N.m		
Couple détente moteur	10	N.cm		
	0,10	N.m		
Couple total	*0,18*	N.m		
Résultats				
Couple moteur >=	**0,252**	N.m		
	25,2	N.cm		
Vitesse angulaire moteur	**250,0**	trs/mn		
	4,2	trs/s		