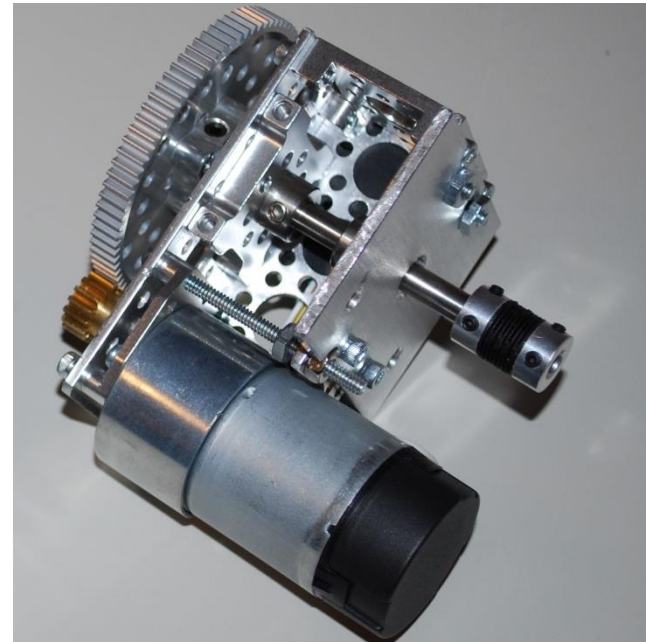


CALCULS ET CHOIX DES MOTEURS ET DES ENGRENAGES



Guide pour faire les bons choix en fonction
des vitesses sidérales et de GoTo requises

Révision 2017.12.18

CONCEPTION

Jean Vallières

OBJECTIF DU DOCUMENT

La première chose que vous devez connaître avant d'aller plus loin dans le projet est de savoir à quelle vitesse le moteur doit tourner pour faire le suivi des astres à la vitesse sidérale ou pour faire un déplacement rapide pendant un GoTo.

Pour suivre les astres et compenser la rotation terrestre, l'axe d'ascension droite du télescope doit faire un tour par jour sidéral, soit 23h 56m 04s.

Il faut donc choisir un moteur et des engrenages capables de faire tourner le télescope à cette vitesse sidérale lente avec précision en plus de faire des déplacements beaucoup plus rapides.

Par exemple, si la réduction totale du système d'engrenages est de 86400, le moteur devra tourner à 86400 tours par jour sidéral pour faire le suivi des étoiles, soit environ un tour par seconde.

L'objectif de ce document est donc de montrer comment choisir le bon moteur et les bons engrenages pour obtenir une réduction qui permettra de faire le suivi sidéral et les corrections d'autoguidage à basse vitesse et les déplacements rapides des GoTo.

CONTENU DU DOCUMENT

Cliquez sur les liens pour accéder directement au contenu

Les parties mécaniques de la motorisation

[L'engrenage principal et la vis sans fin](#)

[Le moteur et les autres composantes mécaniques](#)

[Le calcul de la réduction du système d'entraînement](#)

[Performances requises du système d'entraînement](#)

Type de moteur à choisir

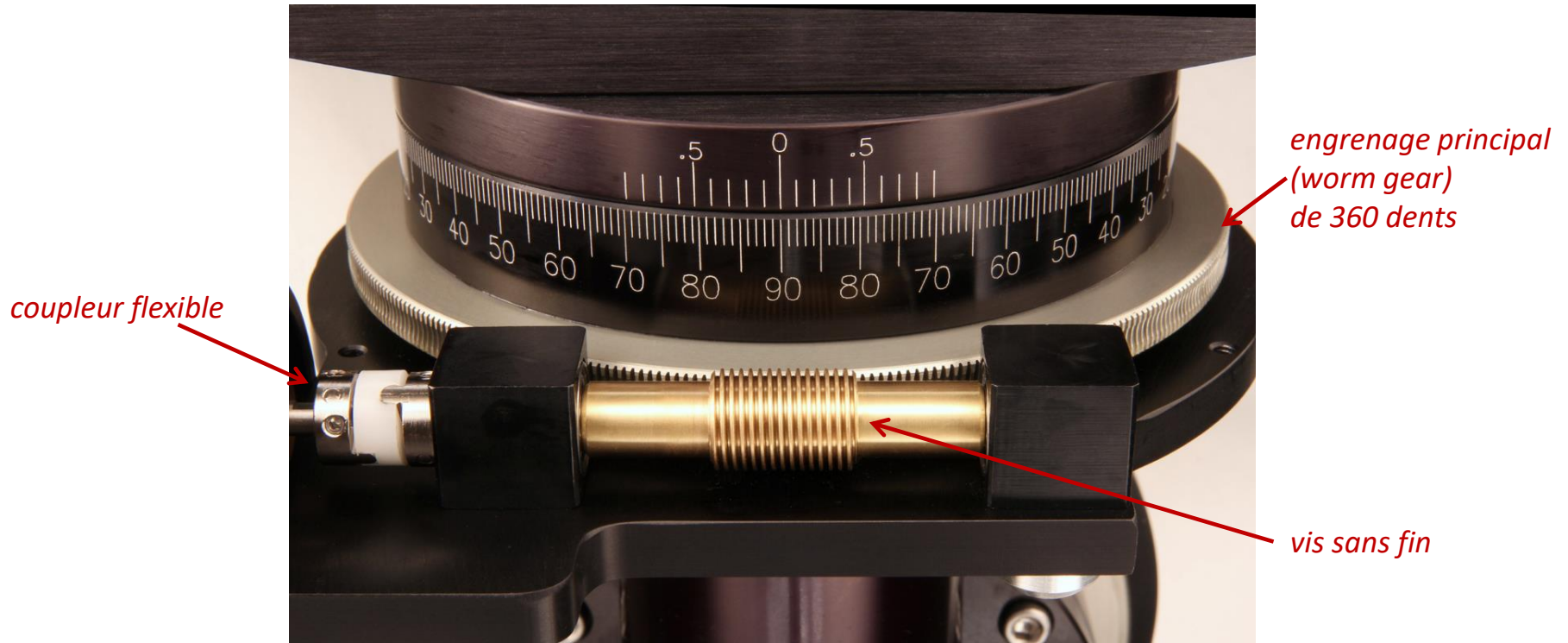
[moteur pas-à-pas](#)

[moteur CC avec encodeur](#)

[Tableau comparatif : moteur pas-à-pas et moteur CC avec encodeur](#)

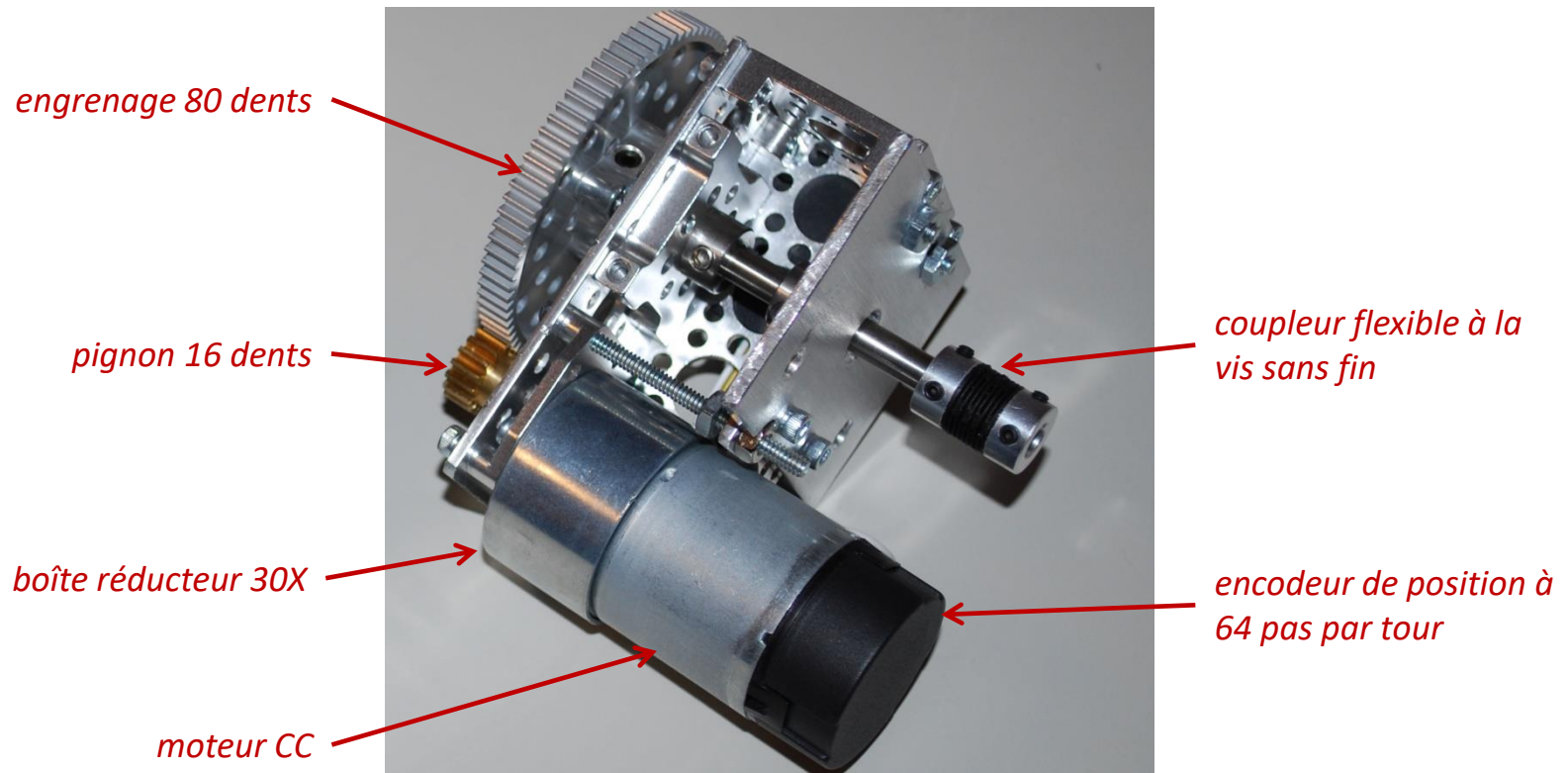
[Outil pour aider les calculs et les choix : SKYPIKIT MOTOR TESTER TUNER](#)

Calculs et choix des moteurs et des engrenages



Engrenage et vis sans fin de l'axe de déclinaison d'une monture Losmandy G11 avec les couvercles protecteurs enlevés

Calculs et choix des moteurs et des engrenages



*Assemblage fait maison installé sur chacun des axes
d'une monture Losmandy G11*

CALCUL DE LA RÉDUCTION DU SYSTÈME D'ENTRAÎNEMENT

Chaque élément du système d'entraînement contribue à la réduction. Nous allons utiliser l'exemple du système d'entraînement de la monture G11 avec les images des pages précédentes pour l'expliquer.

La première réduction de vitesse provient de l'engrenage principal de 360 dents et de sa vis sans fin. La vis sans fin doit faire un tour pour que le gros engrenage avance d'une dent, et doit donc faire 360 tours pour que l'axe du télescope fasse un tour complet. La réduction de cette paire est donc de **360X**.

La seconde réduction provient de la paire comprenant l'engrenage de 80 dents et le pignon de 16 dents relié à la sortie de la boîte de réduction du moteur. La réduction de cette paire est égale au rapport du nombre de dents, soit 80/16, ce qui donne **5X**. Le pignon doit faire 5 tours pour que l'engrenage de 80 dents en fasse un.

La réduction suivante est celle de la boîte réducteur du moteur qui contient un ensemble de petits engrenages. La valeur nous est fournie par le constructeur et un moteur peut être vendu avec un choix de boîte de réduction. Celle qu'on a utilisée pour le moteur de la monture G11 possède une réduction de **30X**. Le rotor du moteur doit faire 30 tours pour que la sortie de sa boîte de réduction en fasse un.

La réduction totale du système d'engrenages est le produit des réductions de chacune de ses parties, soit :

$$360 \times 5 \times 30 = 54\ 000$$

Le rotor du moteur doit donc faire 54 000 tours pour que l'axe du télescope en fasse un.

La dernière réduction qu'on a besoin de connaître est celle de l'encodeur de rotation du moteur, qui se calcule en pas par tour.

L'encodeur installé sur le moteur que nous avons choisi est un encodeur à effet Hall qui nous donne 64 pas par tour du rotor du moteur.

Finalement, pour connaître la réduction totale en pas d'encodeur, il faut multiplier la réduction des engrenages par celle de l'encodeur, ce qui donne :

$$54\ 000 \times 64 = 3\ 456\ 000$$

On détecte donc 3 456 000 pas d'encodeur par tour de 360° de l'axe du télescope. C'est ce que le contrôleur SKYPIKIT a besoin de connaître pour contrôler le moteur.

Juste comme information, ce résultat donne 0,375 seconde d'arc par pas d'encodeur, ce qui est un bon choix pour ce petit moteur pas trop cher.

MOTEUR PAS-À-PAS

Si vous choisissez un moteur pas-à-pas à la place d'un moteur CC avec encodeur, on remplace simplement le nombre de pas/tour d'encodeur par le nombre de micro-pas/tour du moteur pas-à-pas.

PERFORMANCES REQUISES DU SYSTÈME D'ENTRAÎNEMENT

Le système d'entraînement a deux objectifs principaux :

1- Conserver l'objet visé bien centré et toujours à la même place dans le champ de vision pendant qu'on observe à l'oculaire ou qu'on prend une photo, malgré le déplacement des astres dans le ciel causé par la rotation de la Terre. C'est ce qu'on appelle le suivi (tracking) dans ce document et dans ce site.

2- Déplacer le télescope le plus rapidement possible d'un endroit à l'autre du ciel quand on veut changer d'astre à pointer. C'est ce qu'on appelle GoTo dans ce document et dans ce site.

Cela peut sembler évident à première vue, mais ce n'est pas si simple à réaliser puisque les deux objectifs doivent être réalisés avec le même moteur et le même système d'engrenages. Et il y a une très grande différence de vitesse entre celle du suivi et celle du GoTo.

Pendant le suivi, le système d'entraînement fait avancer le télescope vers l'ouest à la vitesse d'environ 15 secondes d'arc par seconde, pour conserver l'astre à la même place dans le champ.

Pendant un GoTo, le même moteur devra par exemple tourner 240 fois plus vite si on veut déplacer le télescope à la vitesse de 1 degré par seconde pour pointer un nouvel objet céleste.

Il faut donc un système de contrôle et un moteur capables d'accepter une grande gamme dynamique de vitesses de rotation.

PRÉCISION DU SUIVI

Pendant le mouvement de suivi (tracking), le moteur avance par pas. Il faut avoir les pas les plus fins ou les plus rapides possibles pour qu'entre chaque pas, le déplacement soit le plus petit possible. Si le déplacement est trop grand, une étoile peut produire une traînée sur l'image.

Le contre-exemple serait des pas d'une durée trop longue, disons une seconde entre chaque pas. Dans ce cas, l'astre aurait le temps de se déplacer de 15 secondes d'arc dans le champ entre chaque pas, ce qui pourrait causer des traînées sur une photo.

Le déplacement maximum permis dépend de la distance focale du télescope. C'est certain que si on utilise seulement un appareil photo sans télescope avec une lentille de 50 mm de focale, on peut se permettre quelques secondes entre chaque pas sans que la traînée ne paraisse sur l'image obtenue.

En règle générale, on suggère comme exemples les conditions suivantes selon les focales du télescope :

Focale	Pas / seconde	Déplacement de l'astre
200 mm	10	1,5 arcsec / pas
600 mm	30	0,5 arcsec / pas
1000 mm	50	0,3 arcsec / pas
2000 mm	100	0,15 arcsec / pas

Ces valeurs sont assez conservatrices puisque la turbulence atmosphérique peut produire à elle seule un étalement de 1 à 4 arcsec selon les conditions. De plus, ces déplacements sont calculés pour un astre sur l'équateur céleste, et seraient plus faibles pour des astres situés à des déclinaisons plus élevées.

UN COMPROMIS À FAIRE

Théoriquement, on pourrait choisir les pas les plus fins et les plus rapides possibles pour réduire le déplacement entre chaque pas pendant le suivi sidéral, par exemple 1000 pas par seconde.

Mais dans ce cas, supposons que le moteur choisi est seulement capable de tourner à une vitesse maximum de 10 000 pas par seconde quand on veut faire des GoTo.

Cela signifie que la vitesse de GoTo serait 10 fois plus rapide que la vitesse du suivi sidéral d'environ 15 arcsec/seconde. Cela donnerait une vitesse de GoTo de seulement 150 arcsec/seconde, soit 1 degré en 24 secondes, ce qui serait beaucoup trop lent pour un GoTo.

Si on voulait être capable de faire des GoTo à la vitesse maximum de 1 degré/seconde, il faudrait faire les GoTo 24 fois plus vite. La solution serait d'utiliser un système d'engrenages donnant une réduction 24 fois plus faible, et le télescope pourrait se déplacer 24 fois plus vite avec la même vitesse maximum du moteur de 10 000 pas/seconde.

Il faudrait cependant utiliser aussi une vitesse de suivi (tracking) 24 fois plus lente, soit 41,67 pas/seconde, ce qui est quand même bon pour une focale jusqu'à 1000 mm.

Vous devez donc trouver la combinaison moteur et engrenages qui permet en même temps un suivi assez précis et une vitesse de GoTo assez rapide.

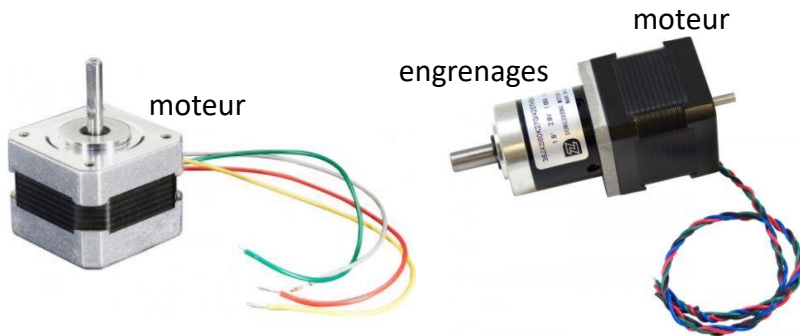
Si vous avez une monture avec les moteurs et les engrenages déjà installés, et que vous ne voulez pas les changer, vous n'avez qu'à calculer les nombres de pas/seconde requis pour faire le suivi et les GoTo.

Calculs et choix des moteurs et des engrenages

CHOIX D'UN MOTEUR PAS-À-PAS BIPOLAIRE

Comme son nom le dit, un moteur pas-à-pas avance d'un pas (step) à chaque impulsion du contrôleur.

Un moteur pas-à-pas bipolaire contient deux bobines (ou l'équivalent). Chaque bobine se termine par deux fils et c'est pourquoi ce moteur est alimenté par quatre fils de différentes couleurs.

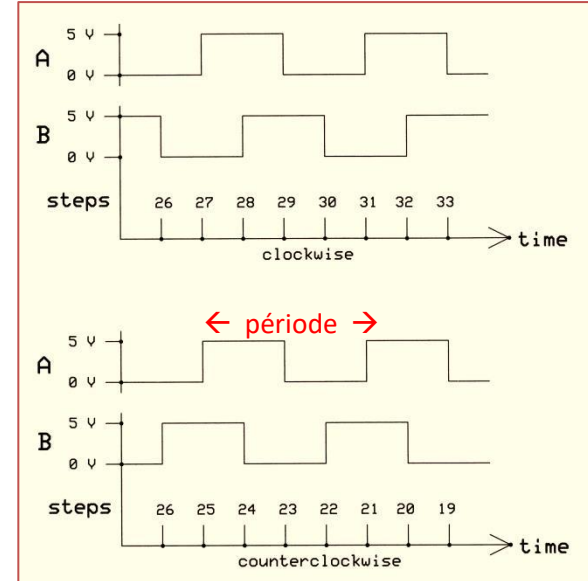


Moteurs pas-à-pas bipolaires à 4 fils, avec et sans engrenages disponibles chez RobotShop

Chaque fois que le contrôleur (SKYPIKIT ou autre) envoie une impulsion de pas (steps) au driver de puissance de moteur, le driver transforme cette impulsion en deux signaux A et B envoyés aux bobines A et B du moteur (voir le diagramme).

Si par exemple, la broche DIR (direction) du contrôleur reliée au driver est à 0 volt, le driver génère un signal B en retard de $\frac{1}{4}$ de période sur le signal A, et cela va faire que le moteur va tourner dans le sens horaire.

Si le signal DIR est à 5 volts, c'est le signal A qui est en retard sur B et le moteur va tourner dans le sens anti-horaire.



Le fait que les signaux A et B soient déphasés d'un quart de période permet de contrôler le sens de la rotation.

Sur le diagramme, la tension fournie aux bobines varie entre 0 et 5 volts. Ce n'est qu'un exemple. Certains moteurs acceptent une tension nominale maximum de 12 volts, 24 volts ou autre. Il faut donc choisir un driver de puissance capable de fournir la tension requise par le moteur.

Les moteurs pas-à-pas viennent avec différentes résolutions en pas par tour. Pour un moteur à 400 pas/tour, il faudra lui transmettre 400 impulsions pour qu'il fasse un tour de 360° . Ce moteur va ainsi avancer de $0,9^\circ$ à chaque pas.

[Suite page suivante ...](#)

CHOIX D'UN MOTEUR PAS-À-PAS BIPOLAIRE (SUITE)

VITESSE MAXIMUM DU MOTEUR ET LIMITE DE COURANT

La vitesse maximum dépend du nombre d'impulsions par seconde (en pas ou micro-pas) que le moteur est capable de prendre sans décrocher.

Le courant I dans une bobine du moteur est égal à V/R (tension en volt divisée par la résistance de la bobine en ohm). Pour un moteur au repos, avec des bobines de résistance = 24 ohms, le courant sera de 0,5 ampère (ou 500 mA) si la tension fournie par le driver est de 12 volts ($0,5 = 12/24$).

Un moteur pas-à-pas cesse de fonctionner à haute vitesse parce qu'il agit comme un alternateur qui fournit une tension opposée à la tension du driver qui essaie de l'alimenter. Plus il tourne vite, plus cette tension opposée augmente, et peut finir par annuler la tension du driver. Ceci annule en même temps le courant et le moteur n'a plus de puissance.

Un truc serait d'augmenter la tension fournie par le driver au moteur pour qu'il puisse tourner plus vite avant d'annuler la tension du driver. Mais cela risquerait de donner un courant trop fort dans les bobines quand le moteur est au repos (pas d'effet de tension opposée), et carrément le brûler.

Heureusement que maintenant, les drivers de puissance sont munis de limiteur de courant (même les moins chers). Vous pouvez donc fournir au moteur une tension plus élevée que sa tension nominale pour qu'il puisse tourner plus vite (pour faire des GoTo), à la condition que vous ajustiez bien la limite de courant (avec un potentiomètre sur le driver) pour limiter le courant quand le moteur est au repos ou tourne lentement (pendant le suivi).

Le courant maximum ne devrait jamais dépasser une valeur égale à la tension nominale du moteur (indiquée par le fabricant du moteur) divisée par la résistance de chaque bobine (mesurée avec votre multimètre). Par exemple $500 \text{ mA} = 12 \text{ volts} / 24 \text{ ohms}$.

Consultez le guide de votre driver de puissance de moteur pour pouvoir ajuster correctement la limite de courant. Voir l'exemple dans le guide de motorisation de la monture EQ3.

VITESSE LENTE, PRÉCISION DU SUIVI ET MICRO-PAS

Une solution est de diviser les pas en micro-pas pour avoir un plus petit déplacement entre chaque micro-pas. Presque tous les drivers de puissance le permettent. Quand le contrôleur envoie une impulsion au driver, ce dernier modifie la tension à la bobine pour avancer d'un micro-pas.

Au lieu de passer directement de 0 volt à 5 volts comme sur le diagramme, la tension va augmenter d'une fraction de 5 volts. Si le driver est programmé (par des jumpers) pour faire 16 micro-pas par pas, il faudra 16 impulsions du contrôleur pour passer de 0 à 5 volts par sauts de tension en escalier. Cependant chaque saut n'est pas le même mais suit une courbe à peu près sinusoïdale. Ces micro-sauts de tension ont aussi l'avantage de rendre le moteur plus silencieux.

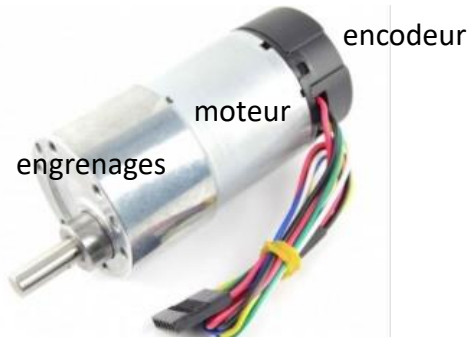
Est-ce qu'on peut ainsi augmenter la précision de 16 X en utilisant ces micro-pas ? Pas tout-à-fait. Le déplacement du moteur n'est pas exactement égal à un seizième de pas à chaque micro-pas. Comme règle dans notre projet, nous utilisons une précision qui augmente comme la racine carrée du nombre de micro-pas par pas.

Par exemple, si vous calculez un déplacement brut de 0,1 arcsec par micro-pas avec un driver donnant 16 micro-pas/pas, votre précision réaliste de suivi serait plutôt de 0,4 arcsec (racine carrée de $16 = 4$).

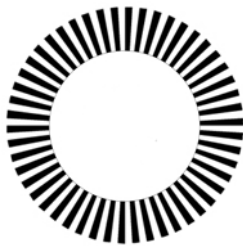
Calculs et choix des moteurs et des engrenages

CHOIX D'UN MOTEUR CC AVEC ENCODEUR

Le contrôle d'un moteur CC à brosses nécessite un encodeur rotatif de position directement raccordé sur l'arbre du rotor, afin de connaître la position du moteur.

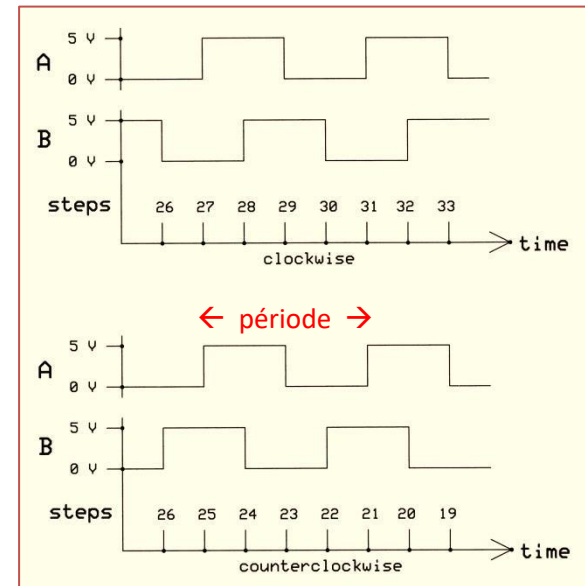


Un encodeur rotatif optique est composé d'un disque gravé de nombreuses raies (souvent entre 100 et 500) et de deux détecteurs optiques (A et B) qui détectent le passage de ces raies quand le moteur tourne.



Par exemple, quand le détecteur A détecte la lumière qui passe entre les raies, il émet un signal à 5 volts sur la broche A de l'encodeur. Quand une raie opaque passe devant et cache la lumière, il émet un signal à 0 volt. Quand le moteur tourne, le signal sur la broche A alterne donc entre 0 volt à 5 volts à une vitesse qui dépend de la vitesse de rotation du moteur et du nombre de raies.

La période du signal A est le temps écoulé entre deux passages de 0 volt à 5 volts. Un deuxième détecteur B qui envoie un signal sur la broche B est installé proche du détecteur A mais déphasé d'un quart de période. Ainsi, le signal B est en retard ou en avance d'un quart de période selon le sens de la rotation, comme le montre l'image suivante. C'est pourquoi ce type d'encodeur se nomme « encodeur de quadrature ».



Le fait que les signaux A et B soient déphasés d'un quart de période permet de connaître le sens de la rotation. Cela permet en plus de compter quatre pas pour chaque période en montant ou en descendant comme on le voit sur l'image. Par exemple, un encodeur avec un disque de 100 raies permet de compter 400 pas par tour.

Certains moteurs sont munis d'encodeurs magnétiques à effet Hall, mais le résultat est semblable. Cependant la résolution est moindre (16 à 64 pas par tour au lieu de 400 à 2000 pas par tour).

CHOIX D'UN MOTEUR CC AVEC ENCODEUR

VITESSE MAXIMUM DU MOTEUR

Pour un moteur CC avec encodeur, la vitesse maximum dépend du modèle de moteur et du voltage maximum qu'on peut lui fournir sans l'endommager (appelée tension nominale par le fabricant). Elle dépend aussi du nombre maximum de pas par seconde que l'encodeur peut générer et que le contrôleur peut détecter.

VITESSE LENTE ET PRÉCISION DU SUIVI

On a vu dans la section des performances requises qu'il fallait limiter le déplacement de l'astre entre chaque pas, par exemple à un déplacement maximum de 0,5 arcsec par pas avec une distance focale de 600 mm.

Il existe deux façons de diminuer le déplacement par pas :

- 1- Augmenter la vitesse de suivi en pas/seconde et augmenter la réduction des engrenages. Mais cela va diminuer votre vitesse maximum de GoTo comme on l'a vu.
- 2- Utiliser un encodeur rotatif avec un plus grand nombre de pas par tour.

Calculs et choix des moteurs et des engrenages

TABLEAU COMPARATIF : MOTEUR PAS-À-PAS ou CC AVEC ENCODEUR

	Moteur pas-à pas	Moteur CC avec encodeur	Conclusion
Gamme dynamique de vitesses : (vitesse de GoTo / vitesse de suivi)	Limitée par le nombre de micro-pas / seconde que le moteur peut accepter sans décrocher. Peut être augmentée avec un driver qui fournit une tension plus forte que la tension nominale tout en limitant le courant.	Dépend de la vitesse maximum du moteur quand on lui applique sa tension nominale. Dépend aussi de la vitesse minimum à laquelle le moteur peut tourner de façon régulière pour avoir un suivi précis. La précision du suivi peut être augmentée avec un moteur de meilleure qualité, avec un encodeur qui contient plus de pas par tour et en choisissant les bons paramètres de contrôle PID et autres.	La gamme dynamique de vitesses des moteurs CC avec encodeur est normalement plus grande que celle des moteurs pas-à-pas.
Complexité du contrôle	Peut être minimal pour un contrôle simple comme celui d'un moteur de porte-oculaire. Dans ce cas, on pourrait utiliser seulement un ARDUINO et un driver de puissance.	Utilise un contrôle en boucle fermée avec rétroaction. Nécessite un système de contrôle rapide et performant pour détecter et compter très rapidement les signaux de l'encodeur et réagir en corrigeant la tension envoyée au moteur pour le faire tourner à la bonne vitesse. Demande aussi un bon ajustement des paramètres du contrôle PID et autres.	Le contrôle d'un moteur CC avec encodeur est plus complexe que celui d'un moteur pas-à-pas. On ne pourrait pas le faire avec un ARDUINO UNO seul. Mais cela devient possible et simplifié en ajoutant la puce SKYPIKIT.
Niveau sonore	Le moteur peut être assez bruyant et se mettre à vibrer à certaines vitesses lentes ou moyennes. On peut diminuer ce problème en utilisant des micro-pas plus fins.	Le moteur est complètement silencieux à l'arrêt et à basse vitesse. Cependant, à haute vitesse, on entend le bruit des engrenages et du rotor.	Un moteur CC avec encodeurs est plus silencieux qu'un moteur pas-à-pas.
Alimentation	Peut utiliser beaucoup de courant si alimenté quand il est au repos ou tourne à basse vitesse. Ce problème peut être réglé en coupant l'alimentation au repos et en utilisant correctement la limite de courant du driver.	Le courant augmente quand le moteur force. Un moteur qui force et tourne lentement demande plus de courant qu'un moteur qui tourne vite.	Les deux types de moteurs demandent des courants qui varient entre 50 mA et 500 mA pour les petits moteurs utilisés dans les montures de télescopes.

Calculs et choix des moteurs et des engrenages

SETTINGS CONTROL ANALYZE DC motor calculation STEPPER motor calculation

number of teeth of the main worm gear

main worm gear teeth advance / revolution of the main worm

reduction of the motor reductor

reduction of the other gears in the system

quadrature encoder counts / quadrature encoder revolution

nominal RPM at the output of the motor reductor at nominal voltage

CALCULATE

RESULTS

Full speed of the motor rotor at nominal voltage = 10500 RPM or 175 revolutions/sec.

Full quadrature encoder speed at nominal voltage = 11200 counts/sec.

Calculated sidereal tracking speed with given data = 40,1095 counts/sec.

One quadrature encoder count = 0,374 arcsec

Suggested maximum slew or goto speed = 8960 counts/sec or 0,933 degree/sec

Slew speed for 1 degree/sec = 9600 counts/sec

OUTIL D'AIDE POUR CALCULER LES ENGRENAGES ET CHOISIR LES MOTEURS

En plus de permettre de tester les moteurs, l'application SKYPIKIT MOTOR TESTER TUNER offre la possibilité de calculer instantanément les résultats obtenus avec diverses combinaisons d'engrenages et de moteurs.

Vous pouvez essayer jusqu'à ce que vous obteniez les résultats désirés.

L'exemple montré à gauche correspond à la motorisation de la monture G11 expliquée au début de ce document.

Vous trouverez tous les renseignements nécessaires dans le manuel guide de cette application.

FIN