

Le dimensionnement d'une motorisation d'axe

FRANCIS BINET^[1]

Choisir et dimensionner un motoréducteur d'axe lors de la conception d'une machine automatique n'est pas toujours chose aisée. Après avoir posé le problème et modélisé la chaîne d'action en vue de son dimensionnement, l'auteur nous propose donc maintenant une méthode guidée de calcul de moteur, avec une application sur un cas réel de machine automatique. Nul doute que cette contribution fera référence – et on peut aussi y voir une forme d'hommage à Christian Merlaud, que beaucoup d'entre nous ont connu et apprécié.

La première partie de cet article nous a rappelé qu'il n'existe pas de méthode générale systématique de choix d'un servomoteur, vu le nombre considérable de paramètres technico-économiques à prendre en compte. Les techniciens ou les ingénieurs de bureau d'études invoquent le plus souvent l'« expérience » et le « savoir-faire ». Mais cela n'est pas satisfaisant pour les enseignants que nous sommes.

Pour pallier ce manque, cette seconde partie nous livre une méthode guidée de détermination d'un moteur en neuf étapes.

Rappelons que l'on se place toujours dans le cas d'une machine automatique sur laquelle on désire effectuer un déplacement en translation. L'actionneur est un moteur rotatif, le transformateur de mouvement pouvant être de n'importe quel type : vis-écrou, poulie-courroie, pignon-crémaillère... Et, en général, le cahier des charges impose un déplacement donné X en un temps maximal T dicté par le temps de cycle de la machine T_{cy} .

Rappelons également que les calculs que nous allons mettre en œuvre dans la méthode résultent d'une modélisation de la chaîne d'action, menée dans la première partie (voir *Technologie* n° 151).

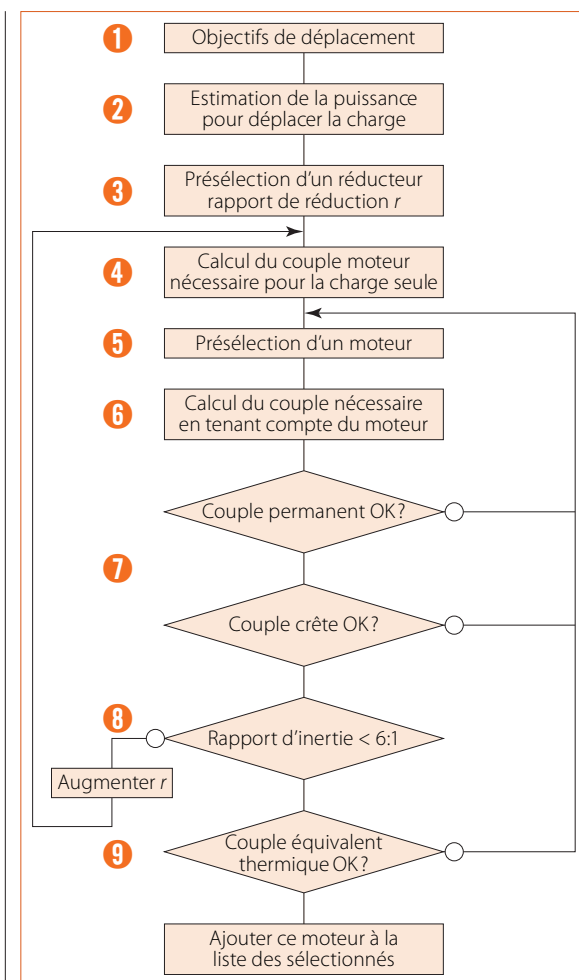
La méthode de choix et de dimensionnement d'un motoréducteur d'axe

Cette méthode peut se représenter au moyen de l'organigramme 1, qui, sans être exhaustif, met en évidence les rebouclages inévitables dus aux interactions entre les composants. Elle est largement inspirée du *Techno-guide E* [2].

[1] Professeur agrégé de génie mécanique en STS MAI à Châtenay-Malabry (92).

[2] Les chiffres grisés entre crochets renvoient à la bibliographie.

mots-clés
actionneur, automatismes, mécanique, puissance, transmission



1 La méthode de dimensionnement d'un moteur d'axe

Chaque étape de la méthode, repérée par un numéro, est ensuite explicitée.

1 Objectifs de déplacement

→ Données :

- Loi de vitesse
- Distance à parcourir : X
- Temps de déplacement : T

→ Calculs

- Si loi trapèze, prendre la loi « $1/3-1/3-1/3$ » avec : $V_{max} = 3X/2T$ et $a = 9X/2T^2$
- Si loi autre, prendre sinus carré avec : $V_{max} = 2X/T$ et $a = 8X/T^2$

2 Estimation de la puissance pour déplacer la charge

Ce calcul permet de prédéfinir la gamme dans laquelle le moteur sera choisi.

(seconde partie)

→ Données :

Vitesse maximale de la charge : V_{\max}
 Accélération de la charge : a
 Effort sur la charge : F
 Masse de la charge : M
 Rendement global estimé de la chaîne cinématique : η

→ Calculs

Puissance d'accélération : $P_a = MaV_{\max}$
 Puissance permanente : $P_p = FV_{\max}/\eta$
 Puissance totale : $P_t = (MaV_{\max}) + (FV_{\max}/\eta)$

3 Présélection d'un réducteur de rapport de réduction r

→ Données :

Vitesse nominale estimée du moteur : ω_{nom}
 Vitesse maximale de la charge : V_{\max}
 Coefficient de transmission du transformateur de mouvement : k

→ Calculs

Usuellement : $3\,000 \text{ tr/min} < \omega_{\text{nom}} < 5\,000 \text{ tr/min}$
 $r < (k\omega_{\text{nom}}/V_{\max})$
 Si $r < 2$, envisager un entraînement direct

4 Calcul du couple moteur nécessaire pour déplacer la charge

→ Données :

Accélération de la charge : a
 Effort sur la charge : F
 Gain en vitesse de la chaîne cinématique : $\lambda = k/r = V/\omega_m$
 Rendement global estimé : η
 Inertie du transformateur de mouvement : J_t

→ Calculs

J_c : inertie de la charge ramenée à l'arbre moteur : $J_c = (J_t + k^2M)/r^2$
 Couple d'accélération : $C_{ma} = J_c a/\lambda$
 Couple permanent : $C_{mp} = \lambda F/\eta$
 Couple crête : $C_{max} = (J_c a/\lambda) + (\lambda F/\eta)$

5 Présélection d'un moteur

On choisit un moteur dont le couple permanent est supérieur au couple crête déterminé en 4, car il faut tenir compte de l'inertie propre du moteur. On commence par le moteur « immédiatement supérieur », ou le modèle d'au-dessus si la marge paraît trop faible, dans la gamme du constructeur choisi. Ne pas oublier que plus un moteur est gros, plus il consomme de couple pour s'accélérer lui-même.

6 Calcul du couple nécessaire en tenant compte du moteur

→ Données :

Accélération de la charge : a

Effort sur la charge : F

Coefficient de transmission de la chaîne cinématique : $\lambda = k/r = V/\omega_m$

Rendement global estimé : η

Inertie moteur : J_m

Inertie réducteur : J_r

→ Calculs

Inertie équivalente totale ramenée à l'arbre moteur : $J_e = J_m + J_r + \lambda^2 M$

Couple d'accélération : $C_{ma} = J_e a/\lambda$

Couple permanent : $C_{mp} = \lambda F/\eta$

Couple crête : $C_{max} = (J_e a/\lambda) + (\lambda F/\eta)$

7 Vérification couple-vitesse du moteur sur les courbes du constructeur

Aucun point de fonctionnement ne doit être extérieur à la zone tant en régime permanent qu'en régime transitoire. Il est recommandé de prendre une marge confortable à ce niveau (environ 25 %).

8 Vérification du rapport d'inertie

En théorie, on obtient les meilleures performances lorsque le rapport d'inertie est de 1:1. On ne peut pas toujours atteindre cet objectif, la vitesse de rotation du moteur devenant trop élevée. En pratique, le rapport d'inertie ne doit pas dépasser une valeur comprise entre 5 et 10 pour les applications courantes, suivant la qualité de la mécanique. Le cas échéant, augmenter le rapport de réduction r afin de réduire le rapport d'inertie.

9 Vérification du couple thermique

Lorsque le cycle de fonctionnement du moteur laisse peu de temps pour le refroidissement, on détermine le couple équivalent thermique, lequel ne doit pas dépasser le couple permanent du moteur.

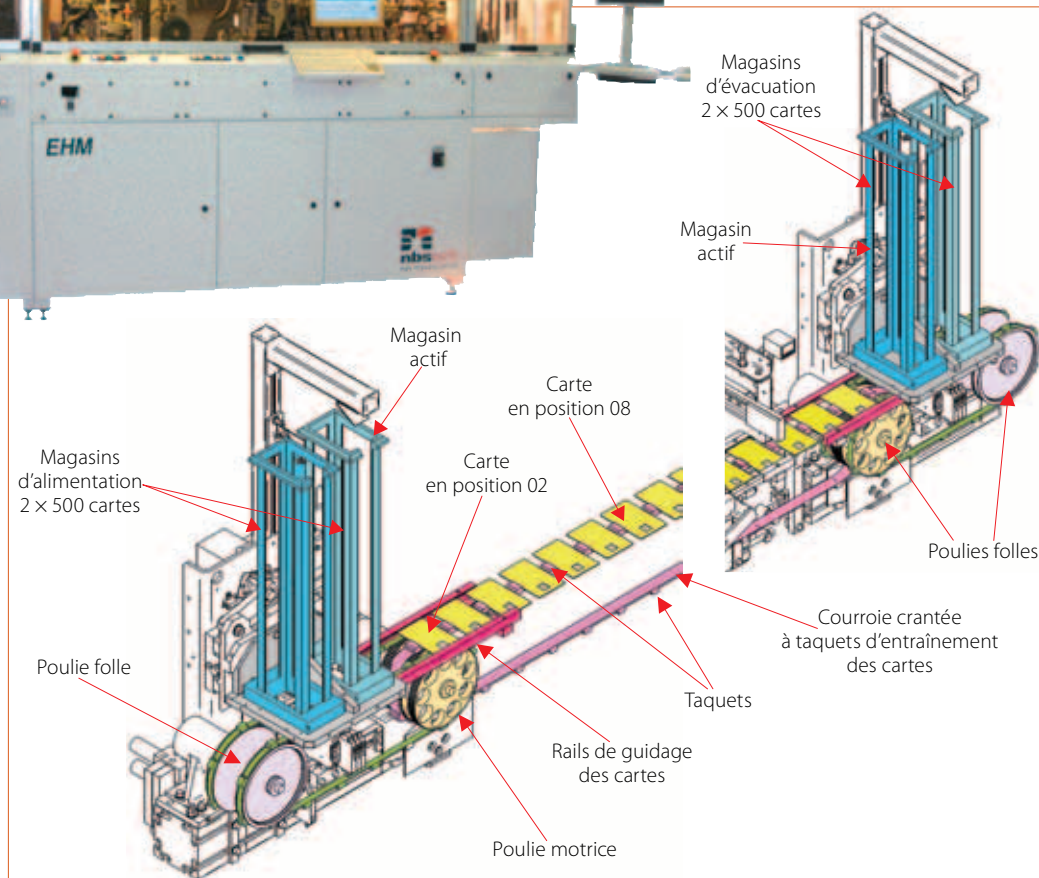
Application : une machine de fabrication de cartes à puce

Cette machine , construite par la société NBS Technologies, a servi de support pour le sujet de l'épreuve d'automatismes et informatique industrielle de la session 2007 de l'agrégation interne de mécanique. L'étude de l'automatisme séquentiel a fait l'objet d'un article dans le numéro 150 de *Technologie*  :

« NBS Technologies est une entreprise canadienne spécialisée dans le domaine du conditionnement des cartes à puce. Elle construit des machines modulaires capables de réaliser toutes les opérations de la fabrication d'une carte : fraisage de la cavité, encollage du module électronique, montage du module, marquage,



2 La machine de fabrication de cartes à puce



3 La structure du transfert linéaire

gravure par matricage, gravure laser, programmation personnalisée de la puce, ainsi que tous les contrôles qualité. La filiale française est située à Rousset dans la région Paca.»

- Cadence maximale : 5 000 cartes/heure
- Temps de cycle minimal : 0,7 s
- Capacité des magasins : 500 cartes chacun
- Dimensions : 4,3 m × 1,15 m × 1,85 m
- Prix ≈ 350 K€

Étude de la motorisation du transfert linéaire

Le déplacement des cartes est assuré par un transfert linéaire à courroie crantée à taquets 3. Ce système est mû par un motoréducteur asservi entraînant en rotation une couronne triple dentée (poulie motrice) 4. Cette couronne entraîne la courroie crantée principale qui porte les cartes entre ses taquets ainsi que deux courroies plus petites permettant d'amener les cartes du magasin vers le transfert linéaire proprement dit. La même structure se retrouve de l'autre côté, toutes les poulies étant folles.

Remarque : Ce système d'avance est utilisé pour différentes versions de ce type de machine. Ses performances attendues sont donc sujettes à des variations.

→ **Données :**

- Masse en translation (5 courroies + taquets + 32 cartes) : $M = 1 \text{ kg}$ maxi
- Inertie des poulies (2 poulies dentées + 2 poulies lisses) : $J_t = 8 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
- Rayon des poulies dentées : $R_p = 0,065 \text{ m}$
- Efforts résistants dus aux frottements sur la courroie < 10 N
- Rendement de la chaîne cinématique (poulie courroie + réducteur à faible jeu) : $\eta = 0,8$

→ **Choix technico-économiques préalables :**

- Fournisseur du moteur, du réducteur et du variateur : Parvex
- Type de moteur choisi : moteur *brushless*
- Carte de commande avec lois trapèze à sinus carré
- Chaîne cinématique 4 non modifiable

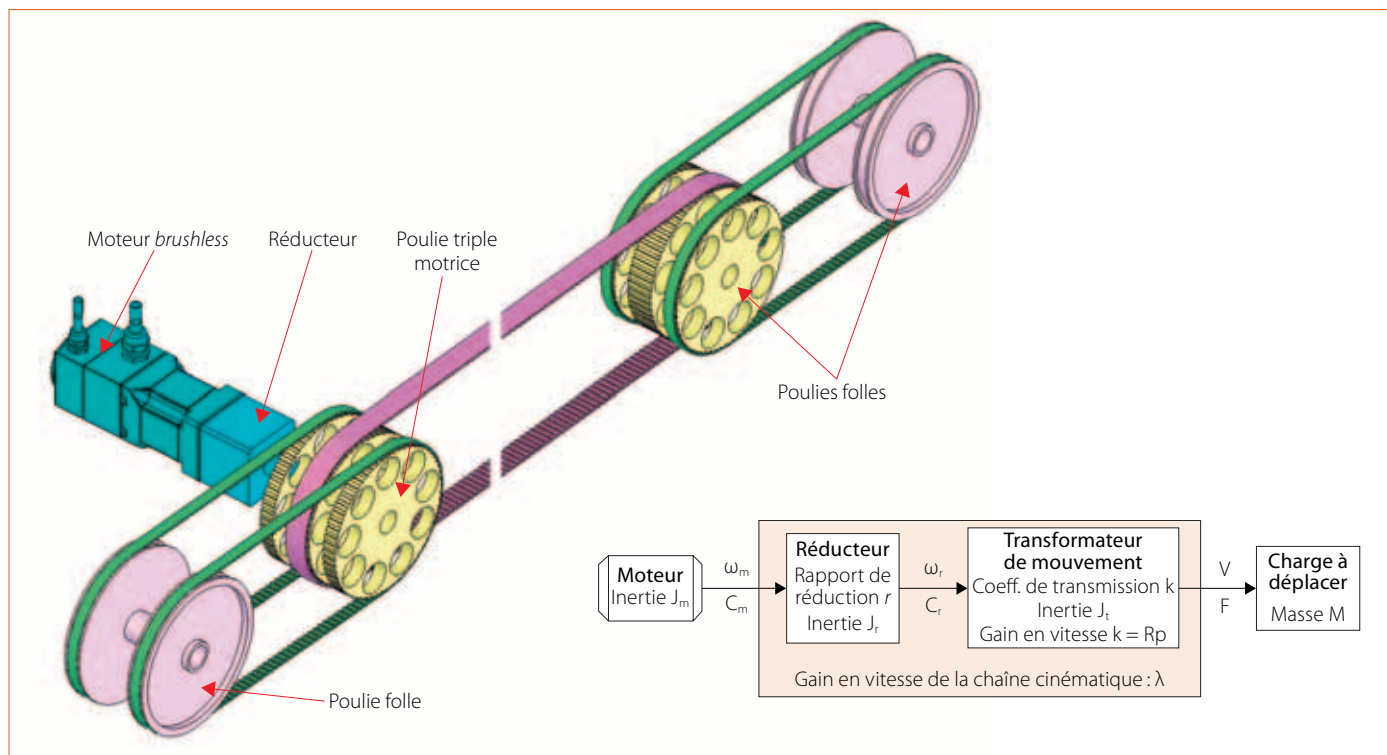
Application de la méthode

1 **Objectifs de déplacement pour la charge**

- Distance à parcourir : $X = 0,065 \text{ m}$
- Temps de déplacement maximal : $T = 0,2 \text{ s}$
- Répétabilité de positionnement de $\pm 40 \mu\text{m} = 80 \mu\text{m}$
- Vitesse maximale poulie-courroie : 40 000 tr/min et 80 m/s (données Binder)

Choix de l'accélération et de la vitesse maximales

La chaîne cinématique 4 ainsi que les objets à transférer pourraient se contenter d'une classique loi de



4 La chaîne cinématique du transfert linéaire et sa schématisation

commande de vitesse en triangle. Mais la tolérance de répétabilité assez serrée nous conduit finalement à privilégier une loi de commande en sinus carré qui offre une approche particulièrement douce du point d'arrêt garantissant une meilleure précision.

L'accélération maximale est donc le double de celle nécessaire au déplacement X en un temps T suivant une loi triangle :

$$a_{\max} = \frac{8 X}{T^2} = \frac{8 \times 0,065}{0,2^2} = 13 \text{ m/s}^2$$

La vitesse maximale est identique à celle de la loi triangle :

$$V_{\max} = \frac{2 X}{T} = \frac{2 \times 0,065}{0,2} = 0,65 \text{ m/s}$$

La figure 5 montre les profils théoriques des lois triangle en vitesse et sinus carré appliquées à cet

exemple. L'accélération maximale de 13 m/s^2 n'est demandée que transitoirement. Pour autant, le moteur devra pouvoir la fournir.

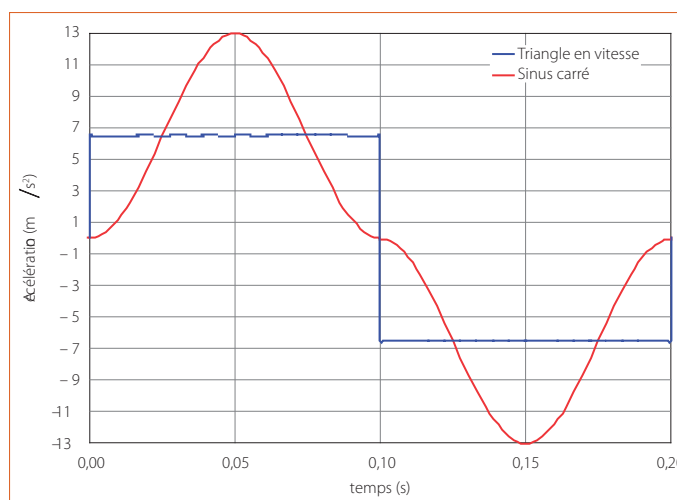
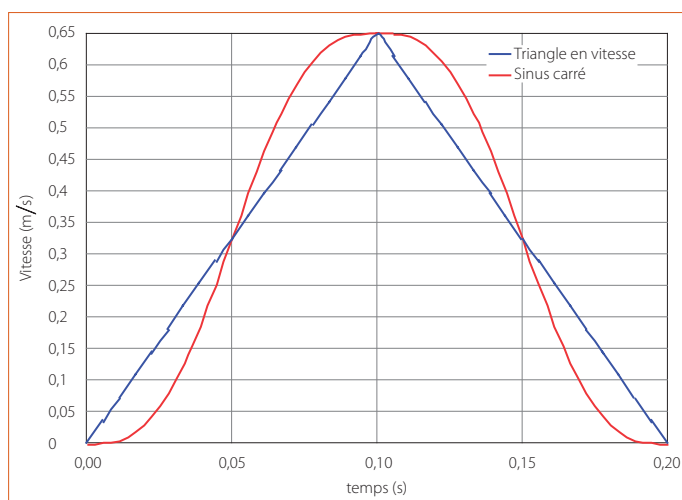
2 Estimation de la puissance pour déplacer la charge

Les calculs sont effectués dans le cas le plus défavorable à chaque fois : accélération maximale et vitesse maximale.

Puissance d'accélération :

$$P_a = M a_{\max} V_{\max} = 1 \times 13 \times 0,65 = 8,45 \text{ W}$$

Remarque : En toute rigueur, il faudrait calculer la fonction puissance pour la loi sinus carré afin d'en déduire la valeur maximale qui n'apparaît pas pour le couple $\{V_{\max}, a_{\max}\}$, mais pour le couple $\{0,46; 11,5\}$. On trouve environ 5,3 W.



5 Les lois de commandes en triangle et sinus carré compatibles avec le cahier des charges

Puissance permanente :

$$P_p = \frac{FV_{\max}}{\eta} = \frac{10 \times 0,65}{0,8} = 8,12 \text{ W}$$

Puissance totale :

$$P_t = MaV_{\max} + \frac{FV_{\max}}{\eta} = 8,45 + 8,12 \approx 17 \text{ W}$$

Eu égard aux petites masses déplacées et aux efforts résistants minimes, cette faible valeur était prévisible. Il ne faut toutefois pas perdre de vue qu'il va falloir y ajouter la puissance nécessaire à l'accélération du moteur lui-même ; comme nous le verrons, cette dernière est loin d'être négligeable.

Nous nous orientons vers les plus petits modèles de moteurs *brushless* Parvex, la gamme correspondante étant repérée NX, avec des puissances commençant à 200 W. L'extrait de documentation 6 donne les caractéristiques pour les moteurs les moins puissants.

NX Series				
Motor	Torque M_0 (N.m)	Max Speed (rpm)		Inertia (kg.m ² .10 ⁻³)
		230V	400V	
NX110EAP	0.45	6000	-	1.3
NX205EAV	0.45	5000	7500	2.1
NX205EAS	0.45	7500	-	2.1
NX210EAT	1	4000	6000	3.8
NX210EAP	1	6000	-	3.8
NX310EAP	2	2300	4000	7.9
NX310EAK	2	4000	-	7.9
NX420EAV	4	-	2000	29

6 Un extrait de documentation Parvex : les moteurs *brushless* NX

3 Présélection d'un réducteur de rapport de réduction r

Gain en vitesse de la chaîne cinématique :

$$\lambda = \frac{V}{\omega_m} = \frac{R_p}{r} \Rightarrow r = \frac{R_p \omega_m}{V}$$

En prenant *a priori* une vitesse de 4000 tr/min (≈ 419 rad/s) que tous les moteurs de la gamme NX peuvent atteindre et en se plaçant dans le cas de la vitesse linéaire maximale (loi triangle), on obtient :

$$r = \frac{R_p \omega_m}{V} = \frac{0,065 \times 419}{0,65} = 41,9$$

La gamme de réducteurs Parvex à faible jeu GX offre des rapports de réduction échelonnés de 5 en 5 : 20, 25, 30, 35, 40, etc. On choisit le coefficient de réduction le plus proche, soit $r = 40$, d'où l'on déduit la vitesse maximale pour le moteur :

$$\omega_m = \frac{Vr}{R_p} = \frac{0,65 \times 40}{0,065} = 400 \text{ rad/s} = 3819 \text{ tr/min}$$

Vitesse maximale en sortie de réducteur :

$$\omega_r = \omega_m / r = 400 / 40 = 10 \text{ rad/s} = 95,5 \text{ tr/min}$$

Jeu du réducteur en option « jeu réduit » : 6', correspondant à un déplacement linéaire

$$\Delta x = \Delta \theta R_p = \frac{6 \times \pi \times R_p}{60 \times 180} = 1,13 \times 10^{-4} \text{ m} = 113 \mu\text{m}$$

Cette valeur est supérieure à la répétabilité demandée de $\approx 40 \mu\text{m} = 80 \mu\text{m}$. On pourrait considérer que, le déplacement ayant toujours lieu dans le même sens, le jeu n'intervient pas sur la précision de positionnement. Cela n'est pas toujours vrai, par exemple si l'asservissement compense un dépassement.

On conserve le rapport de réduction présélectionné $r = 40$ pour l'instant. L'aspect précision peut être résolu soit en changeant de modèle de réducteur soit en « négociant » la tolérance si c'est envisageable.

→ Inertie du réducteur GX1-R040-R01 :

$$J_r = 4 \text{ } \exists \text{ } 10^{-6} \text{ kg.m}^2$$

4 Calcul du couple moteur nécessaire pour déplacer la charge

Gain en vitesse du transformateur de mouvement poulie-courroie :

$$k = V/\omega_r = R_p$$

Inertie de la charge ramenée à l'arbre moteur :

$$J_c = \frac{J_t + k^2 M}{r^2} = \frac{8 \times 10^{-3} + (0,065)^2 \times 1}{(40)^2} = 7,64 \times 10^{-6} \text{ kg.m}^2$$

Couple d'accélération :

$$C_{ma} = \frac{J_c a}{\lambda} = \frac{J_c a r}{R_p} = \frac{7,64 \times 10^{-6} \times 13 \times 40}{0,065} = 0,061 \text{ N.m}$$

Couple permanent :

$$C_{mp} = \frac{\lambda F}{\eta} = \frac{R_p F}{\eta r} = \frac{0,065 \times 1}{0,8 \times 40} = 0,002 \text{ N.m}$$

Couple crête :

$$C_{\max} = 0,061 + 0,002 = 0,063 \text{ N.m}$$

Remarque : Le couple permanent dû aux efforts résistants est petit devant le couple d'accélération : il s'agit bien d'une application essentiellement inertielle.

5 Présélection d'un moteur

Les plus petits modèles dans l'extrait de documentation présenté en 6 sont déjà trop puissants. On présélectionne le moteur NX110EAP :

Vitesse nominale : 6000 tr/min

Couple nominal : 0,33 N.m (la valeur fournie dans le tableau 6 est celle du couple à basse vitesse)

Inertie du rotor : $J_m = 1,3 \times 10^{-5} \text{ kg.m}^2$

Puissance de nominale : 210 W

6 Calcul du couple nécessaire en tenant compte du moteur

Inertie équivalente totale ramenée à l'arbre moteur :

$$J_e = J_m + J_r + \frac{J_t + k^2 M}{r^2} = J_m + J_r + J_c = 1,3 \times 10^{-5} + 4 \times 10^{-6} + 7,64 \times 10^{-6} = 2,46 \times 10^{-5} \text{ kg.m}^2$$

Couple d'accélération :

$$C_{ma} = \frac{J_e a}{\lambda} = \frac{J_e a r}{R_p} = \frac{2,46 \times 10^{-5} \times 13 \times 40}{0,065} = 0,197 \text{ N.m}$$

Couple permanent inchangé :

$$C_{mp} = \frac{\lambda F}{\eta} = \frac{R_p F}{\eta r} = \frac{0,065 \times 1}{0,8 \times 30} = 0,002 \text{ N.m}$$

Couple crête :

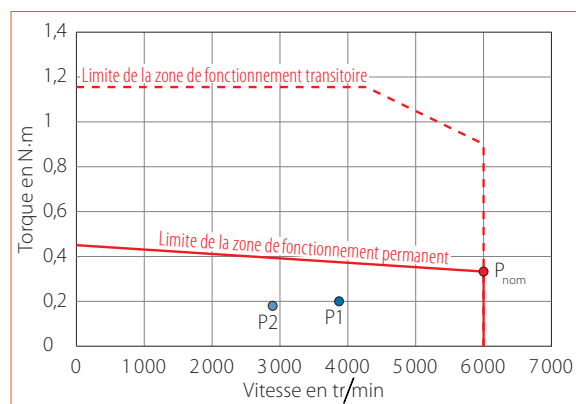
$$C_{\max} = 0,2 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Remarque : Le couple nécessaire pour l'accélération du moteur seul est égal à la moitié du couple total :

$$C_{\text{mm}} = \frac{J_m a}{\lambda} = \frac{J_m a r}{R_p} = \frac{1,3 \times 10^{-5} \times 13 \times 40}{0,065} = 0,1 \text{ N}\cdot\text{m}$$

7 Vérification couple-vitesse du moteur sur les courbes du constructeur

Bien que ce moteur soit le plus petit de la gamme, il possède une marge importante tant en vitesse qu'en couple **7**, puisque l'on ne dépassera pas 0,2 N·m à 3800 tr/min (point P1), le moteur pouvant fournir 0,33 N·m à 6000 tr/min en régime permanent (point P_{nom}).



7 La caractéristique couple-vitesse du moteur NX110EAP

Remarque : La zone de travail intermittente est exclue dans ce type d'application (même si le problème ne se pose pas dans le cas présent) : la machine étant susceptible de travailler en production continue, le moteur n'aurait pas le temps de refroidir au vu du cycle **8**.

8 Vérification du rapport d'inertie

En négligeant les efforts de frottement, le rapport d'inertie est égal à

$$\frac{J_i + k^2 M}{J_m + J_r} = \frac{8 \times 10^{-3} + (0,065)^2 \times 1}{1,3 \times 10^{-5} + 4 \times 10^{-6}} = \frac{7,64 \times 10^{-6}}{1,7 \times 10^{-5}} = 0,45 : 1,$$

soit une valeur très faible.

On peut aisément diminuer le rapport de réduction pour atteindre le rapport d'inertie optimal :

$$r_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{J_i + k^2 M}{J_m}} = \sqrt{\frac{8 \times 10^{-3} + (0,065)^2 \times 1}{1,3 \times 10^{-5}}} = 30,66$$

3-2 Présélection d'un nouveau réducteur de rapport de réduction r

On modifie le rapport de réduction en choisissant la valeur la plus proche, soit $r = 30$.

On déduit la vitesse maximale pour le moteur :

$$\omega_m = \frac{Vr}{R_p} = \frac{0,65 \times 30}{0,065} = 300 \text{ rad/s} = 2864 \text{ tr/min}$$

Vitesse maximale en sortie de réducteur :

$$\omega_r = \omega_m / r = 300 / 30 = 10 \text{ rad/s} = 95,5 \text{ tr/min}$$

Jeu du réducteur en option « jeu réduit » : 6', identique au précédent avec le même problème de précision.

On choisit le modèle GX1-R030-R01, de même inertie que le précédent :

$$J_r = 4 \times 10^{-6} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$$

4-2 Calcul du couple moteur nécessaire pour déplacer la charge

Gain en vitesse du transformateur de mouvement poulie-courroie :

$$k = V/\omega_r = R_p$$

Inertie de la charge ramenée à l'arbre moteur :

$$J_c = \frac{J_i + k^2 M}{r^2} = \frac{8 \times 10^{-3} + (0,065)^2 \times 1}{(30)^2} = 1,36 \times 10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$$

Couple d'accélération :

$$C_{\text{ma}} = \frac{J_c a}{\lambda} = \frac{J_c a r}{R_p} = \frac{1,36 \times 10^{-5} \times 13 \times 30}{0,065} \approx 0,082 \text{ Nm}$$

Couple permanent :

$$C_{\text{mp}} = \frac{\lambda F}{\eta} = \frac{R_p F}{\eta r} = \frac{0,065 \times 1}{0,8 \times 30} = 0,0027 \text{ Nm}$$

Couple crête :

$$C_{\max} = 0,082 + 0,0027 \approx 0,085 \text{ N}\cdot\text{m}$$

5-2 Présélection d'un moteur

Comme précédemment, le plus petit moteur est largement dimensionné. On choisit le même, le modèle NX110EAP.

6-2 Calcul du couple nécessaire en tenant compte du moteur

Inertie équivalente totale ramenée à l'arbre moteur :

$$J_e = J_m + J_r + \frac{J_i + k^2 M}{r^2} = J_m + J_r + J_c = 1,3 \times 10^{-5} + 4 \times 10^{-6} + 1,36 \times 10^{-5} = 3,06 \times 10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$$

Couple d'accélération :

$$C_{\text{ma}} = \frac{J_e a}{\lambda} = \frac{J_e a r}{R_p} = \frac{3,06 \times 10^{-5} \times 13 \times 30}{0,065} = 0,184 \text{ Nm}$$

Couple permanent inchangé :

$$C_{\text{mp}} = \frac{\lambda F}{\eta} = \frac{R_p F}{\eta r} = \frac{0,065 \times 1}{0,8 \times 30} = 0,0027 \text{ Nm}$$

Couple crête :

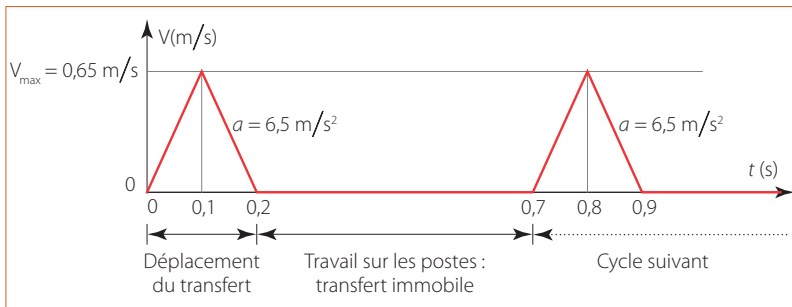
$$C_{\max} = 0,186 \text{ N}\cdot\text{m}$$

7-2 Vérification couple-vitesse du moteur sur les courbes du constructeur

Il existe encore une marge importante, puisque l'on ne dépassera pas 0,18 N·m à 2800 tr/min (point P2 sur la figure **7**).

9 Vérification du couple équivalent thermique

En prenant, pour simplifier, le modèle d'une loi triangle, le cycle est celui de la figure **8**.



8 Le cycle du transfert linéaire

Couple en phase dynamique

$$C_{ma} = \frac{J_e a}{\lambda} = \frac{J_e a r}{R_p} = \frac{3,06 \times 10^{-5} \times 6,5 \times 30}{0,065} = 0,092 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Couple thermique :

$$C_{th} = \sqrt{\frac{\sum C_i t_i}{\sum t_i}}$$

$$= \sqrt{\frac{0,092 \times 0,1 + 0,092 \times 0,1}{0,7}} = 0,162 \text{ N}\cdot\text{m}$$

On reste dans la zone de fonctionnement permanent du moteur avec beaucoup de marge.

Le choix de solutions techniques

Solution ne garantissant pas la tolérance de positionnement demandée

Dans le cas où l'extension de la tolérance de positionnement à 113 μm est envisageable, le choix précédent peut être conservé :

- Moteur Parvex NX110EAP : $C_n = 0,33 \text{ N}\cdot\text{m}$
- Réducteur Parvex à jeu réduit : GX1-R030-R01-01

Les marges de couple et de vitesse importantes autorisent une évolution des performances du transfert linéaire pour une application future.

Solution alternative garantissant la tolérance de positionnement

Dans le cas où la valeur de la précision de positionnement demandée n'est pas modifiable, il faut utiliser un autre réducteur. Dans la même gamme Parvex GX, on trouve des modèles à jeu réduit de 3', mais dont le rapport de réduction se limite à 10 (ces réducteurs possèdent un seul train contre deux pour les modèles avec $r > 10$, ce qui explique le jeu moindre).

$$J_r = 3 \times 10^{-6} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$$

Calculons le rapport d'inertie avec $r = 10$:

$$\frac{k^2 M + J_i}{r^2} = \frac{8 \times 10^{-3} + (0,065)^2 \times 1}{(10)^2}$$

$$\frac{J_m + J_r}{1,3 \times 10^{-5} + 4 \times 10^{-6}} = 7,2,$$

ce qui est important.

En retournant au tableau des moteurs, on remarque le modèle NX205, de couple à basse vitesse identique 0,45 N·m (couple nominal 0,29 N·m), mais d'inertie supérieure :

$$J_m = 2,1 \times 10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$$

La vitesse nominale de 5000 tr/min est largement suffisante. Effectuons les calculs pour ce moteur.

Rapport d'inertie :

$$\frac{k^2 M + J_i}{r^2} = \frac{8 \times 10^{-3} + (0,065)^2 \times 1}{(10)^2}$$

$$\frac{J_m + J_r}{2,1 \times 10^{-5} + 3 \times 10^{-6}} = 5,09,$$

ce qui est acceptable

Reprenons les calculs avec ce nouveau couple moteur réducteur.

$$J_e = J_m + J_r + \frac{J_t + k^2 M}{r^2}$$

$$= 2,1 \times 10^{-5} + 3 \times 10^{-6} + \frac{8 \times 10^{-3} + (0,065)^2 \times 1}{(10)^2}$$

$$= 1,46 \times 10^{-4} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$$

Couple d'accélération :

$$C_{ma} = \frac{J_e a}{\lambda} = \frac{J_e a r}{R_p} = \frac{1,43 \times 10^{-4} \times 13 \times 10}{0,065} \approx 0,29 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Couple permanent :

$$C_{mp} = \frac{\lambda F}{\eta} = \frac{R_p F}{\eta r} = \frac{0,065 \times 1}{0,9 \times 10} = 0,0072 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Couple crête :

$$C_{max} \approx 0,3 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Vitesse maximale du moteur :

$$\omega_m = \frac{V_r}{R_p} = \frac{0,65 \times 10}{0,065} = 100 \text{ rad/s} \approx 955 \text{ tr/min}$$

Le point de fonctionnement (vitesse maximale - couple maximal) est à l'intérieur de la zone permanente sur le diagramme vitesse-couple du moteur (point P3 sur la figure 9), avec une marge de couple suffisante. On n'utilise que 20 % de la gamme de vitesse.

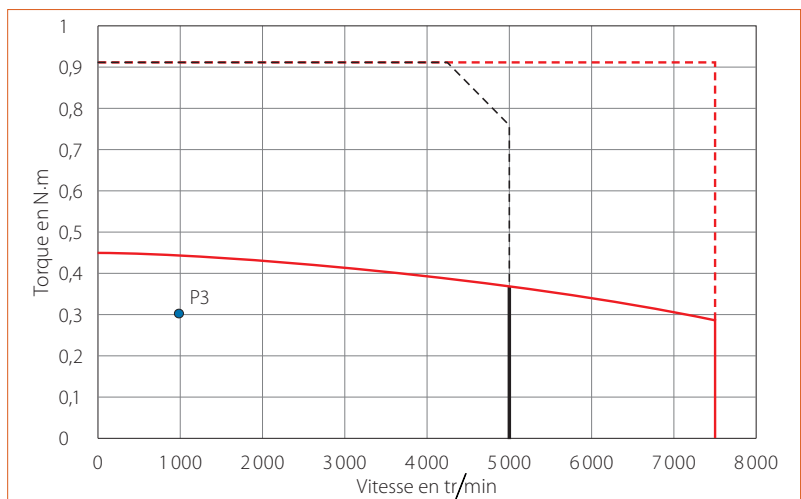
Vérification du couple thermique en loi triangle

Couple d'accélération :

$$C_{ma} = \frac{J_e a}{\lambda} = \frac{J_e a r}{R_p} = \frac{1,43 \times 10^{-4} \times 6,5 \times 10}{0,065} \approx 0,145 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$C_{th} = \sqrt{\frac{\sum C_i t_i}{\sum t_i}} = \sqrt{\frac{0,145 \times 0,1 + 0,145 \times 0,1}{0,7}} = 0,2 \text{ N}\cdot\text{m}$$

à l'intérieur de la zone permanente.



9 La caractéristique couple-vitesse du moteur NX205EAV

Le jeu du réducteur en option « jeu réduit » est de 3', correspondant à un déplacement linéaire

$$\Delta x = \Delta \theta R_p = \frac{3 \times \pi \times R_p}{60 \times 180} = 5,67 \times 10^{-5} \text{ m} = 56 \mu\text{m}$$

compatible avec la tolérance de positionnement.

→ Moteur Parvex NX205EAV : $C_n = 0,29 \text{ N}\cdot\text{m}$, vitesse nominale 7 500 tr/min

→ Réducteur Parvex à jeu réduit : GX2-R010-R01

Ce que le constructeur a choisi

La configuration installée sur la machine est la suivante :

→ Moteur *brushless* Infranor :

Couple nominal : 0,54 N·m

Vitesse nominale : 6 500 tr/min

Inertie du rotor : $J_m = 1,5 \times 10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$

→ Réducteur MHP 65-Ra 1/12 à faible jeu :

Rapport de réduction $r = 12$

Jeu < 5'

Inertie : $J_r = 4 \times 10^{-6} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$

Cette solution est assez proche de la solution alternative proposée précédemment avec :

→ Un moteur plus puissant (367 W et 0,54 N·m contre 230 W et 0,29 N·m). La marge de vitesse et de couple est nettement plus importante. Dans les deux cas, il s'agit du plus petit moteur de la gamme retenue.

→ Un réducteur à faible jeu entraînant un jeu linéaire < 94 μm . Il est à noter que ce jeu maximal est supérieur à celui autorisé par le cahier des charges.

→ Un rapport d'inertie acceptable :

$$\frac{k^2 M + J_t}{J_m + J_r} = \frac{8 \times 10^{-3} + (0,065)^2 \times 1}{1,5 \times 10^{-5}} = 5,66$$

Et l'entraînement direct ?

Cette solution est potentiellement intéressante vu que l'on est loin d'utiliser toutes les performances des moteurs dans les cas précédents. De plus, ce choix permettrait d'améliorer la précision, la raideur et le rendement de la chaîne cinématique. Essayons.

Vitesse maximale pour le moteur :

$$\omega_m = Vr/R_p = 0,65/0,065 = 10 \text{ rad/s} = 95,5 \text{ tr/min}$$

Inertie de la charge ramenée à l'arbre moteur :

$$J_c = \frac{J_t + k^2 M}{r^2} = \frac{8 \times 10^{-3} + (0,065)^2 \times 1}{(1)^2} = 1,22 \times 10^{-2} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$$

Couple d'accélération :

$$C_{ma} = \frac{J_c a}{\lambda} = \frac{J_c a r}{R_p} = \frac{1,22 \times 10^{-2} \times 13 \times 1}{0,065} \approx 2,44 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Couple permanent :

$$C_{mp} = \frac{\lambda F}{\eta} = \frac{R_p F}{\eta r} = \frac{0,065 \times 1}{0,9} = 0,072 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Couple crête :

$$C_{max} = 2,44 + 0,072 = 2,5 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Ce couple nous impose de choisir un moteur beaucoup plus gros que les précédents, du type Parvex NX420EAP, d'inertie vingt fois plus importante **6**. Même si cette solution est techniquement réalisable,

il faut garder à l'esprit que l'on cherche *in fine* à déplacer horizontalement des objets ne pesant que quelques grammes. La solution est abandonnée.

Conclusions

→ Les possibilités, fort nombreuses *a priori*, sont généralement limitées par le choix préalable d'un constructeur : en effet, il est toujours intéressant du point de vue économique de garder le même constructeur pour tous les actionneurs sur une même machine. De plus, la maintenance est simplifiée par rapport à des solutions hétérogènes, tant en termes de compétences demandées aux techniciens qu'en termes de stockage ou de fourniture de composants de rechange.

→ Le surdimensionnement est la règle, en restant dans des proportions raisonnables. Un moteur sous-dimensionné étant inacceptable, on est tenu de prendre de la marge dans l'autre sens. Le moteur choisi dans cet exemple permettrait de travailler dans une zone vitesse-temps bien plus grande que celle définie préalablement dans les objectifs de déplacement.

→ Certaines spécifications du cahier des charges peuvent compliquer notablement le problème, comme la répétabilité de positionnement de $\pm 40 \mu\text{m}$ dans cet exemple. Le cas échéant, il est toujours bon de vérifier leur flexibilité.

→ Les modifications de la partie opérative ne sont pas toujours envisageables : dans cet exemple, le diamètre des poulies peut difficilement être réduit car la hauteur de passage aux divers postes est imposée. →

Bibliographie et sources

[1] *Technoguide E: Le guide de la commande d'axe*, Adepa, Paris, 1989

[2] TAILLARD (Ph.), « Étude d'un problème d'automatisation », agrégation interne de mécanique, *Technologie* n° 150, mai-juin 2007