

شعبية ال الديمقراطية الجزائرية الجمهورية
REPUBLICQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم والبحث و العاليي التطعيم
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
- سان تلم - بلقايد بكر أبي جامعة
Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Par : MAGAYA Aremokeng

Sujet

Dimensionnement de la motorisation d'axe d'un système mécatronique : Application à une machine industrielle.

M. Belalia Sid Ahmed	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
M. Hamza Cherif Sidi Mohammed	MCA	Univ. Tlemcen	Directeur
M. Chorfi Sidi Mohamed	MCB	Univ. Tlemcen	Co- Directeur
M. Sifi Miloud		Univ. Tlemcen	Examineur

Remerciements

Premièrement, je voudrais me remercier de ne pas avoir abandonné, de travailler dur et de croire que je pouvais le faire parce que, oui, je l'ai fait.

Je remercie aussi M. HAMZA CHERIF Sidi Mohamed pour l'aide et pour ses conseils précieux qu'il m'a donné pendant la réalisation de ce travail.

A grand merci à tous mes professeurs et enseignants de département génie mécanique pour toute leur aide pendant mes études ici.

Enfin, je tiens à remercier mes amis et ma famille pour tout l'amour et le soutien. Je vous apprécie vraiment.

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

 *A Habanamasisi Magaya et Lihlohonolo Magaya*

- *Ma grande mère, sans votre amour et votre soutien je ne serais pas là.*

Je t'aimerai pour toujours Gogola. Repose en paix.

- *Ma mère, l'amour de ma vie. Merci de me tenir la main et pour tous les encouragements*

 *A mes chers amis et ma famille votre soutien et votre amour sont bien appréciés*

RESUME

Résumé

Dès qu'une machine automatique est conçue, le problème du choix et du dimensionnement des motoréducteurs pour les axes se pose. L'actionneur est rotatif, le transformateur de mouvement peut être du type vis-écrou, poulie-courroie ou crémaillère, la loi de commande est tout ou rien, trapézoïdale, triangulaire ou sinusoïdale. Et, dans tous les cas, la motorisation doit effectuer un déplacement donné en un temps maximum, fixé par un taux imposé. Ce travail comporte deux parties.

La première partie pose le problème et modélise la chaîne d'action afin de la dimensionner.

La deuxième partie propose aux concepteurs une méthode guidée de calcul des moteurs et l'applique à un cas réel de machine automatique.

Abstract

Whenever an automatic machine is designed, the problem of selecting and sizing the geared motors for the axes arises. The actuator is rotary, the motion transformer can be of the screw-nut, pulley-belt or rack type, and the control law is on-off, trapezoidal, triangular or sinusoidal. And, in all cases, the motorization must perform a given displacement in a maximum time, fixed by an imposed rate. This work has two parts.

The first part poses the problem and models the chain of action in order to dimension it.

The second part proposes to the designers a guided method of calculation of the motors and applies it to a real case of automatic machine.

المخلص

كلما تم تصميم آلة أوتوماتيكية، تظهر مشكلة اختيار المحركات الموجهة للمحاور وتغيير حجمها. المشغل دوراني، يمكن أن يكون محول الحركة من الجوز اللولبي أو حزام البكرة أو نوع أو الجيبي الحامل، وقانون التحكم في وضع التشغيل أو الإيقاف أو شبه المنحرف أو المثلث وفي جميع الحالات، يجب أن تقوم الميكنة بإزاحة معينة في أقصى وقت، ويتم تحديدها بمعدل مفروض. هذا العمل من جزئين

ي طرح الجزء الأول المشكلة ويضع نموذجًا لسلسلة العمل من أجل تحديد أبعادها

ها على حالة حقيقية يترشح الجزء الثاني للمصممين طريقة موجهة لحساب المحركات ويطبق للآلة الأوتوماتيكية

SOMMAIRE

<i>Remerciements</i>	1
Dédicaces	2
RESUME.....	3
<i>SOMMAIRE</i>	4
LISTE DES FIGURES.....	6
LISTE DES TABLEAUX.....	8
LISTE DES SYMBOLES	9
INTRODUCTION GENERALE	10
Chapitre I: L'importance du dimensionnement d'une motorisation d'axe	12
I.1 Pourquoi le dimensionnement des moteurs ?.....	12
I.1.1 Le couple de charge	13
I.1.2 L'inertie de la charge	13
I.1.3 La vitesse	13
I.1.4 Concept important : Les valeurs nominales.....	13
Chapitre II: Généralités sur commande d'axe.....	16
La motorisation d'axe se compose en deux partie : la partie opérative et la partie commande	16
II.1 Partie commande.....	16
II.1.1 Les variateurs de fréquence (VFD)	16
II.1.2 Les convertisseurs	17
II.1.3 Les capteurs de position	17
II.2 Commande	19
II.2.1 Types de commandes de moteur	20
II.3 Partie opérative	22
II.3.1 Moteurs.....	22
II.3.2 Système d'axes.....	29
II.4 Les profils de mouvement.....	35
II.4.1 Profil de vitesse triangulaire :.....	35
II.4.2 Profils de mouvement trapézoïdaux	36

II.4.3 Limitation des à-coups	38
II.4.4 Avantage et inconvénients des profils.....	40
Chapitre III: Dimensionnement d'une motorisation d'axe	42
III.1 Le choix de la loi (ou profil) de commande	42
III.1.1 La détermination de la vitesse et de l'accélération maximales.....	44
III.2 La méthode de sélection et de dimensionnement d'un moteur	45
III.2.1 Sélection d'un réducteur (<i>gearbox</i>).....	51
III.2.2 Interprétation des courbes couple/vitesse	52
III.2.3 Courbes de performance des servomoteurs	52
Chapitre IV: Application à une machine industrielle.....	57
IV.1 Machine de fabrication de cartes à puces.....	57
IV.1.1 Système d'entraînement.....	58
IV.2 Analyse fonctionnelle.....	59
IV.2.2 Cahier de charge fonctionnelle	61
IV.1 Application d'organigramme sur la machine.....	62
IV.1.1 Le choix des solutions techniques	69
IV.2 Comparaison des moteurs	72
CONCLUSION.....	74
ANNEXE	75
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	78

LISTE DES FIGURES

Figure II.1: Système de servocommande montrant les relations s entre le variateur, le contrôleur et le moteur.	16
Figure II.2: Système d'entraînement avec VFD	17
Figure II.3: Les convoyeurs à entraînement positif avec capteur de position.....	18
Figure II.4: Capteur de position rotatif.....	18
Figure II.5: Capteur de position linéaire	19
Figure II.6: Wifi contrôleur pas à pas.....	21
Figure II.7: Servo moteur	24
Figure II.8 : Moteur pas à pas	25
Figure II.9: Moteur CC à balais	26
Figure II.10: Moteur CC sans balais	28
Figure II.11: Moteur induction CA	29
Figure II.12: Pince à rouleau	30
Figure II.13:Poulie courroie cranté	31
Figure II.14: vis -écrou.....	32
Figure II.15: Système pignon crémaillère	33
Figure II.16: Servo réducteur	35
Figure II.17: Profil de vitesse triangulaire	36
Figure II.18: Profils de mouvement trapézoïdaux.....	37
Figure II.19: Avec limitation de « <i>jerk</i> ».....	39
Figure II.20: « <i>jerk</i> » maximal	39
Figure III.1:Chaine cinématique	43
Figure III.2: Organigramme de sélection d'un moteur	46
Figure III.3: Courbe couple-vitesse pour servo moteur	53

Figure III.4: Moteur performant.....	54
Figure III.5: Moteur non performant.....	54
Figure III.6: Application à haute vitesse et à faible couple efficace	55
Figure III.7: Application à faible vitesse et à couple efficace élevé	55
Figure IV.1: La machine de fabrication de cartes à puces et la structure du transfert linéaire	57
Figure IV.2: La chaine cinématique du transfert linéaire et sa schématisation.....	58
Figure IV.3: Diagramme des interacteurs	59
Figure IV.4: Diagramme FAST	60
Figure IV.5: Vitesse lois de sinus carrée.....	62
Figure IV.6: Loi sinus carrée en accélération	63
Figure IV.7: Le cycle de transfert linéaire	68

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1 : Description des symboles -----	36
Tableau II.2: Description des symboles -----	38
Tableau II.3: Tableau des avantages de profile-----	40
Tableau III.1: Caractéristiques de la Technologie du Moteur-----	49
Tableau IV.1: Cahier de charge fonctionnelle-----	61
Tableau IV.2: Tableau de comparaison des choix -----	73

LISTE DES SYMBOLES

C_m : Couple moteur

J_m : Inertie du rotor autour de son axe

J_r : Inertie du réducteur sur l'arbre d'entrée (cote moteur)

J_t : Inertie du transformateur de mouvement sur son arbre d'entrée (cote réducteur)

J_c : Inertie de la charge ramenée à l'arbre moteur

r : Coefficient de réduction du réducteur > 1

k : Coefficient de transmission* (gain en vitesse) du transformateur de mouvement :

λ : Coefficient de transmission global (gain en vitesse) de la chaîne cinématique

C_a : Couple moteur requis en phase d'accélération

P_a : Puissance d'accélération

P_p : Puissance permanente

P_t : Puissance totale

ω_{nom} : Vitesse nominale estimée du moteur

V_{max} : Vitesse maximale de la charge

η : Rendement de la chaîne cinématique

CI : Circuit intégré

CC : Courant continu

CA : Courant alternatif

ω_r : Vitesse maximale en sortie de réducteur

CdCF : Cahier des charges fonctionnelles

R_p : Rayon de la poulie dentée

INTRODUCTION GENERALE

La grande majorité des systèmes de fabrication automatisée implique l'utilisation de systèmes sophistiqués de contrôle du mouvement qui, en plus des composants mécaniques, incorporent des composants électriques tels que des servomoteurs, des amplificateurs et des contrôleurs. La première tâche directe de l'ingénieur chargé de la conception du système de mouvement, avant de régler et de programmer les composants électriques, consiste à spécifier - de préférence le plus petit - moteur et système de commande capable de fournir le couple, la vitesse et l'accélération nécessaires.

L'objectif de ce travail est de dimensionner un système d'entraînement de moteur pour une machine industrielle, tout en tenant compte de toutes les contraintes techniques et économiques. Grâce à ce travail, nous découvrirons les impacts d'un dimensionnement correct du moteur et les moyens de l'obtenir.

Ce travail est structuré de la manière suivante :

Le premier chapitre présente l'importance d'un dimensionnement correct des moteurs, les composants à prendre en compte dans le dimensionnement.

Le chapitre deux présente les généralités sur les systèmes d'axe. Cela inclut la partie mécatronique des systèmes, les différents types de moteurs et leurs aspects ; les différents types de systèmes d'entraînement qui fonctionnent avec les moteurs pour différentes applications. Ce chapitre traite également des différents types de profils de mouvement pour différentes applications de moteur.

Le quatrième chapitre explique la procédure suivie pour dimensionner correctement un système d'entraînement par moteur et le choix des solutions techniques.

Le chapitre 5 aborde l'application à une machine industrielle : la machine de fabrication de cartes à puce.

La dernière partie est la conclusion générale et les perspectives de ce travail

CHAPITRE 1 :
L'IMPORTANCE DU DIMENSIONNEMENT
D'UNE MOTORISATION D'AXE

Chapitre I: L'importance du dimensionnement d'une motorisation d'axe

L'importance du dimensionnement des moteurs ne doit pas être sous-estimée. Un bon dimensionnement du moteur ne va pas seulement d'importantes économies en économisant de l'énergie, en réduisant les coûts d'achat et d'exploitation, en réduisant les temps d'arrêt, etc. mais il aide également l'ingénieur à concevoir de meilleurs systèmes de contrôle du mouvement.

I.1 Pourquoi le dimensionnement des moteurs ?

Un moteur dans un système d'entraînement a une grande influence sur le coût du système et la consommation d'énergie. Les coûts ne s'arrêtent pas à l'achat mais s'ajoutent car un mauvais dimensionnement nécessitera plus d'entretien. Un moteur avec un couple élevé nécessitera un amplificateur qui ajoutera également des coûts au système car un amplificateur est cher. Un bon dimensionnement du moteur assure non seulement la meilleure performance pour le système mais fournit également des économies considérables.

La méthode conventionnelle de dimensionnement des servomoteurs est basée sur le calcul de la charge du système, qui détermine la taille requise du moteur. La pratique standard exige d'ajouter un facteur de sécurité aux exigences de couple afin de couvrir les forces de frottement supplémentaires qui peuvent se produire en raison du vieillissement des composants mécaniques.

Lors du dimensionnement d'un moteur, il est toujours préférable de le sur-dimensionner un peu pour tenir compte des exigences de charge incertaines et de l'augmentation de la charge. Un moteur sous-dimensionné peut ne pas être capable de déplacer la charge et, dans des cas extrêmes, peut surchauffer et brûler. Les moteurs à courant alternatif ont tendance à surchauffer lorsqu'ils sont chargés lourdement ou légèrement, tandis que les servomoteurs, qu'ils soient sous-dimensionnés ou surdimensionnés, commenceront à vibrer ou à caler. Il faut tenir compte du fait que même s'il est préférable de sur-dimensionner le moteur plutôt que de le sous-dimensionner, son efficacité diminuera rapidement s'il fonctionne en dessous de la charge prévue.

Cependant, la détermination de la charge du système et la sélection du bon moteur peuvent être extrêmement longues. Chaque moteur a son inertie de rotor individuelle, qui contribue au couple de charge du système, puisque Le couple est égal à l'inertie multipliée par l'accélération. Le calcul du couple du système doit être répété pour chaque moteur envisagé pour l'application. Le dimensionnement correct d'un moteur nécessite de répondre à 3 critères : le couple, l'inertie de la charge et la vitesse. Le couple est défini comme une force de rotation à une distance de l'axe de rotation. Il est mesuré par des unités telles que lb-in (livres pouce) en impérial ou Nm (newton mètre) en métrique. Le couple est tout aussi important, sinon plus, que la puissance d'un moteur.

I.1.1 Le couple de charge

Le couple a deux composantes principales : le couple de charge et le couple d'accélération. Le couple de charge est la quantité de couple constamment requise pour l'application et comprend la charge de friction et la charge gravitationnelle. Le couple d'accélération est le couple requis uniquement pour l'accélération et la décélération maximales de la charge. Plus la charge doit accélérer, plus le couple d'accélération est élevé. Parfois, le couple de charge est plus élevé, parfois le couple d'accélération peut être plus élevé. Il est important de calculer les deux, surtout pour les profils de mouvement rapide. Le couple de charge est la somme des charges de friction et de gravitation.

I.1.2 L'inertie de la charge

L'inertie est définie comme la résistance d'un objet physique à tout changement de sa vitesse. Plus l'inertie est grande, plus l'objet sera résistant à l'accélération ou à la décélération. L'inertie de la charge, ou moment d'inertie, est la résistance d'un objet physique à tout changement de sa vitesse du point de vue de l'axe de rotation.

Pour une charge rotative, c'est le produit de sa masse et du carré de la distance perpendiculaire de la masse par rapport à l'axe. L'inertie de la charge est généralement désignée par "J". Les moteurs ne peuvent pas entraîner une quantité infinie d'inertie de charge. Les fabricants proposent souvent une inertie de charge admissible ou une valeur de rapport d'inertie pour les moteurs afin de faciliter leur dimensionnement.

Les valeurs d'inertie de charge admissibles sont des lignes directrices généralement données pour les moteurs à courant alternatif et les moteurs sans balais. Les rapports d'inertie sont généralement donnés pour les moteurs pas à pas ou les servomoteurs, et ils sont calculés en divisant la quantité totale d'inertie de charge (ou l'inertie de charge réfléchie si le moteur est réducteur) par l'inertie du rotor du moteur. Si ces valeurs sont dépassées, le moteur peut manquer des étapes, caler ou vibrer. Les moteurs à boucle fermée peuvent gérer un rapport d'inertie plus important que les moteurs à boucle ouverte.

I.1.3 La vitesse

Il ne suffit pas de trouver un moteur avec le couple approprié. Il doit être conçu pour être utilisé aux vitesses requises. Les fabricants fournissent des courbes vitesse-couple pour les moteurs qui décrivent leurs performances sur la plage de vitesse de fonctionnement. Ces courbes de données constituent une référence facile pour déterminer si le moteur fonctionnera dans les conditions de l'application.

I.1.4 Concept important : Les valeurs nominales

Chaque moteur a des valeurs nominales de tension, de courant, de vitesse et de puissance (et de fréquence pour un moteur à courant alternatif). Ces valeurs sont normalement indiquées soit sur la plaque signalétique, soit sur le document des aspects techniques. En général, les valeurs nominales représentent les valeurs maximales auxquelles le moteur doit être soumis en utilisation normale :

1. **La tension nominale** ne doit jamais être dépassée, sous peine d'exposer la machine ou l'utilisateur à un choc électrique.

2. **Courant nominal** - Ne doit pas être dépassé pendant une période prolongée, bien qu'il puisse être dépassé pendant une courte période au cours d'événements transitoires (par exemple, le démarrage du moteur). Si le courant est dépassé, il y a un risque de surchauffe et de brûlure des enroulements du moteur.
3. **La vitesse nominale** ne doit généralement pas être dépassée, mais les moteurs à induction sont conçus pour fonctionner légèrement plus vite que la vitesse nominale (jusqu'à une vitesse appelée vitesse synchrone) lorsqu'ils sont légèrement chargés. Par exemple, un moteur à induction dont la vitesse nominale est de 1 450 tr/min peut avoir une vitesse synchrone de 1 500 tr/min et être sûr jusqu'à cette vitesse. Il existe un risque de défaillance mécanique dû à la force centrifuge sur les composants rotatifs.
4. **La puissance nominale** ne doit généralement pas être dépassée car cela peut entraîner une surchauffe et, dans certains cas extrêmes, une défaillance de la machine. Cependant, certains moteurs ont un facteur de service qui permet d'utiliser le moteur à une puissance supérieure à la puissance nominale pendant de courtes périodes. Cela peut être utile pour gérer des charges variables qui peuvent dépasser la puissance nominale requise pendant de courtes périodes au cours du cycle de fonctionnement.
5. **Le couple nominal** est un paramètre très important lors du dimensionnement du moteur, même s'il n'est pas souvent indiqué sur la plaque signalétique. Dans les moteurs à courant continu et les moteurs à induction à courant alternatif, le courant de fonctionnement est proportionnel au couple. Le dépassement du couple nominal risque donc d'entraîner une surchauffe et une surchauffe des enroulements du moteur, ainsi que des dommages mécaniques aux accouplements et à l'arbre d'entraînement.

CHAPITRE 2:
GÉNÉRALITÉS SUR LES COMMANDES D'AXE

Chapitre II: Généralités sur commande d'axe

La motorisation d'axe se compose en deux parties : la partie opérative et la partie commande

II.1 Partie commande

On peut considérer comme partie commande l'ensemble variateur de vitesse, capteur de position, traitement du positionnement. En variation de vitesse électronique, le moteur électrique est alimenté à partir du réseau par un circuit de puissance qui, sous la dépendance d'un circuit de contrôle, va permettre de doser l'énergie délivrée au moteur, en fonction des besoins instantanés de la partie opérative en couple et en vitesse. Dans ce circuit de puissance, l'énergie change plus ou moins de forme. Ce type de circuit est appelé communément convertisseur.

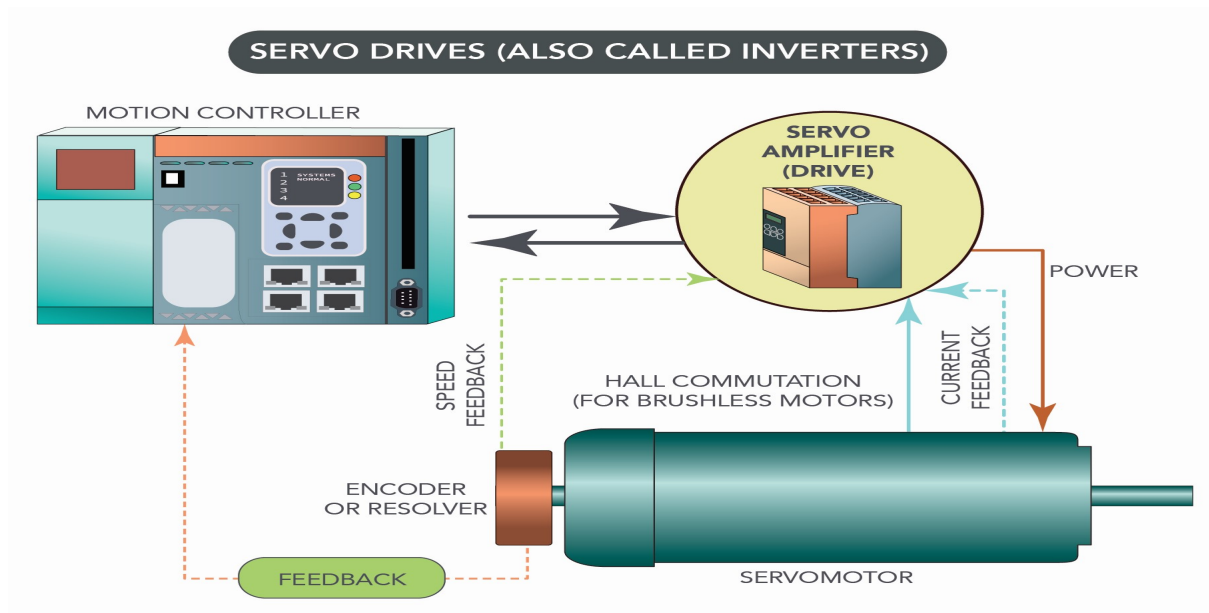


Figure II.1: Système de servocommande montrant les relations entre le variateur, le contrôleur et le moteur.

II.1.1 Les variateurs de fréquence (VFD)

La forme la plus élémentaire de mécatronique en relation avec les moteurs électriques à courant alternatif comprend le variateur de fréquence, ou VFD. Ces variateurs se connectent directement à un moteur électrique standard et remplissent un large éventail de fonctions. Leur objectif principal, le contrôle de la vitesse, est atteint en modifiant la fréquence électrique fournie au moteur. Cela permet un contrôle précis de la vitesse et du sens de rotation.

Les variateurs de fréquence (VFD) surveillent les performances d'un moteur et fournissent un retour d'information à sa programmation. Ils s'ajustent pour maintenir le moteur en rotation à

une vitesse spécifique, ou pour alerter les techniciens en cas d'équipement défectueux. Ils permettent également des démarrages à faible.

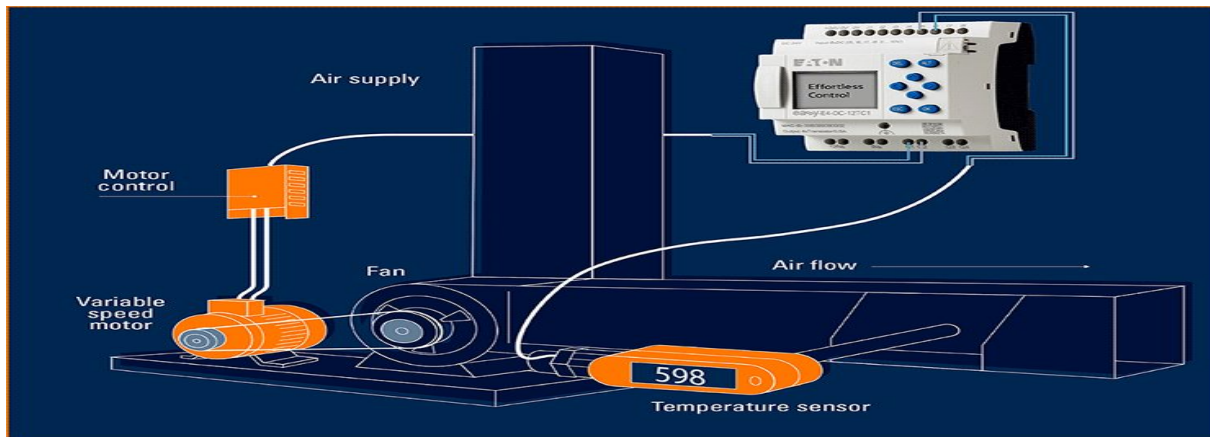


Figure II.2: Système d'entraînement avec VFD

II.1.2 Les convertisseurs

Un convertisseur tire l'énergie électrique du secteur à la tension et à la fréquence nécessaires pour obtenir la sortie souhaitée. L'utilisation de convertisseurs et de transistors (thyristor ou autres dispositifs de commutation de l'onduleur) pour réduire ou réguler la vitesse (pour le contrôle de la tension). L'utilisation d'une résistance variable pour absorber la fraction de la tension de la batterie qui n'est pas nécessaire à la charge. Cela permet également un contrôle progressif de la plage de tension fournie. Un contrôle efficace de la tension (et donc de la puissance) n'est possible que si une stratégie de commutation est adoptée.

C'est le couple moteur variateur le plus utilisé en commande d'axe. Son couple est proportionnel au courant de l'induit et sa vitesse ne dépend que de la tension d'alimentation. Le moteur courant continu associé à son variateur de vitesse n'est pas plus onéreux qu'un moteur asynchrone à cage standard commandé par un convertisseur de fréquence qui fait appel à une électronique beaucoup plus sophistiquée.

II.1.3 Les capteurs de position

Le système de servocommande nécessite une position précise, ce qui implique l'utilisation de capteurs de position. Le capteur de position est un dispositif qui collecte des informations sur la position et le mouvement précis d'un objet. Ces informations peuvent être obtenues par contact direct avec l'objet ou à distance à l'aide de capteurs magnétiques. Il peut également détecter l'épaisseur d'une pièce, le niveau d'un fluide ou l'angle de rotation d'un arbre. Le capteur de position est indispensable au bon fonctionnement de diverses machines telles que les machines-outils.

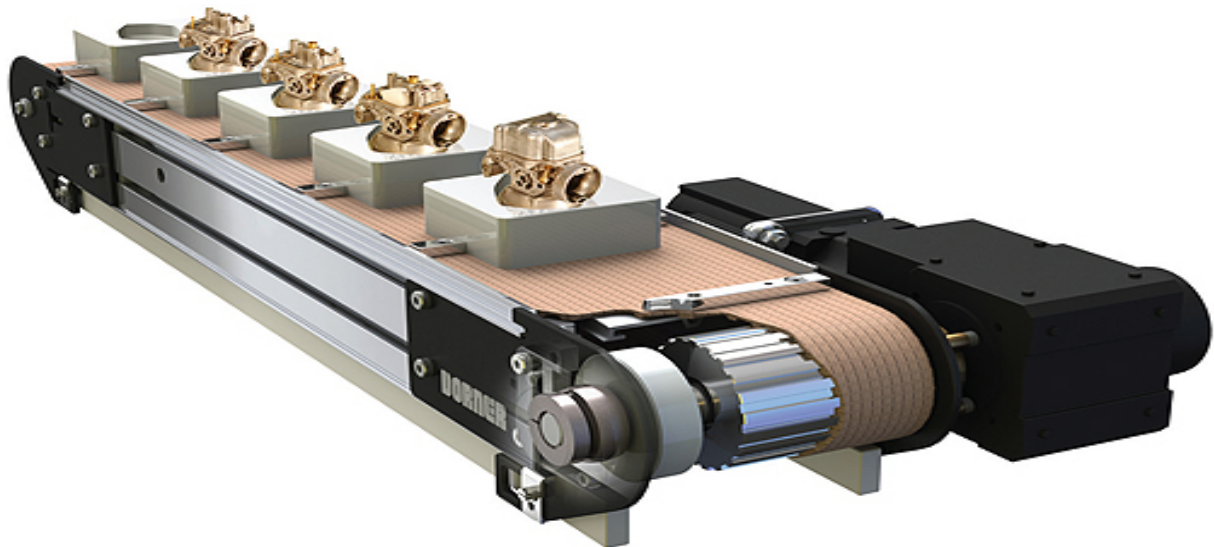


Figure II.3: Les convoyeurs à entraînement positif avec capteur de position

Le capteur de position est nécessaire pour :

- la commutation de moteur,
- la détection d'aimants multipolaires,
- la détection de la vitesse,
- le codage d'une position.

La plupart des capteurs de position, mais pas tous, peuvent également être considérés comme des capteurs de vitesse. Puisque la vitesse peut être définie comme le taux de changement de position, tout capteur de position dont la position est fréquemment mise à jour est aussi de facto un capteur de vitesse. La vitesse peut être facilement déterminée par les systèmes de contrôle modernes et courants en différenciant la sortie du capteur en fonction du temps ou, plus simplement, en comptant le nombre de changements de position par rapport au temps.



Figure II.4: Capteur de position rotatif

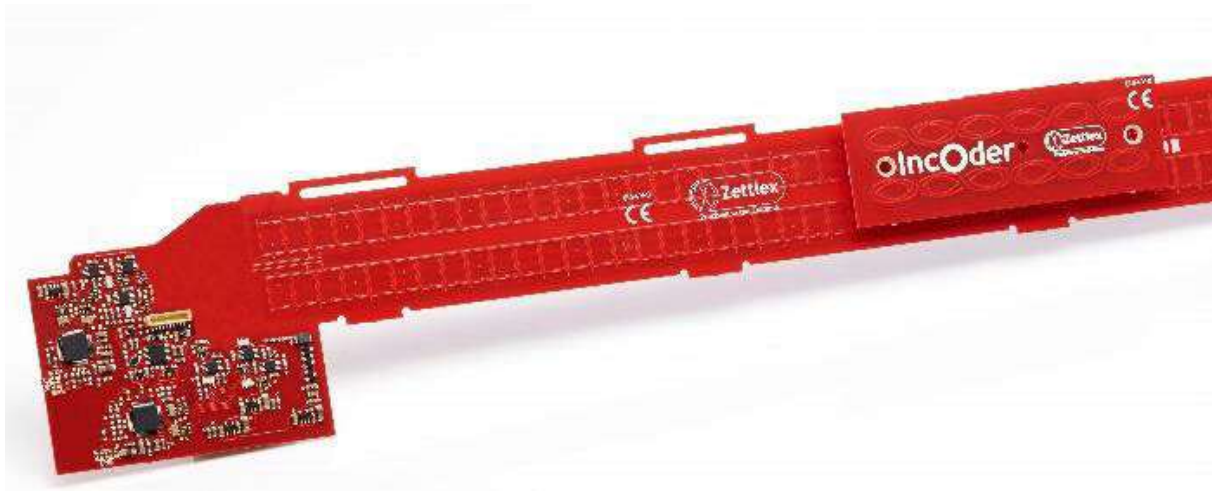


Figure II.5: Capteur de position linéaire

II.2 Commande

Une commande de moteur est un dispositif ou un groupe de dispositifs qui peut coordonner d'une manière prédéterminée les performances d'un moteur électrique. Un contrôleur de moteur peut inclure un moyen manuel ou automatique pour démarrer et arrêter le moteur, sélectionner la rotation avant ou arrière, sélectionner et réguler la vitesse, réguler ou limiter le couple, et protéger contre les surcharges et les défauts électriques. Les contrôleurs de moteur peuvent utiliser une commutation électromécanique ou des dispositifs électroniques de puissance pour réguler la vitesse et la direction d'un moteur.

Les contrôleurs de moteur sont utilisés avec les moteurs à courant continu et à courant alternatif. Un contrôleur comprend des moyens pour connecter le moteur à l'alimentation électrique, et peut également inclure une protection contre les surcharges pour le moteur, et une protection contre les surintensités pour le moteur et le câblage. Un contrôleur de moteur peut également superviser le circuit d'excitation du moteur, ou détecter des conditions telles qu'une faible tension d'alimentation, une polarité incorrecte ou une séquence de phase incorrecte, ou une température élevée du moteur.

Certains contrôleurs de moteur limitent le courant d'appel au démarrage, ce qui permet au moteur de s'accélérer et d'accélérer la charge mécanique connectée plus lentement qu'avec une connexion directe. Les contrôleurs de moteur peuvent être manuels, ce qui nécessite qu'un opérateur séquence un interrupteur de démarrage par étapes pour accélérer la charge, ou peuvent être entièrement automatiques, en utilisant des minuteries internes ou des capteurs de courant pour accélérer le moteur.

Certains types de contrôleur de moteur permettent également de régler la vitesse du moteur électrique. Pour les moteurs à courant continu, le contrôleur peut ajuster la tension appliquée au moteur ou le courant circulant dans l'enroulement de champ du moteur. Les moteurs à courant alternatif ne réagissent pas ou peu à l'ajustement de la tension aux bornes, de sorte que les contrôleurs pour courant alternatif ajustent plutôt la résistance du circuit du rotor (pour

les moteurs à rotor bobiné) ou modifient la fréquence du courant alternatif appliqué au moteur pour le contrôle de la vitesse à l'aide de dispositifs électroniques de puissance ou de changeurs de fréquences électromécaniques

II.2.1 Types de commandes de moteur

II.2.1.1 Démarreurs à moteur

Un petit moteur peut être démarré en le connectant simplement au réseau électrique. Un moteur de plus grande taille nécessite une unité de commutation spécialisée appelée démarreur de moteur ou contacteur de moteur. Lorsqu'il est mis sous tension, un démarreur direct sur ligne (DSL) connecte immédiatement les bornes du moteur directement à l'alimentation électrique. Dans les petites tailles, un démarreur de moteur est un interrupteur à commande manuelle ; les moteurs plus grands, ou ceux qui nécessitent une commande à distance ou automatique, utilisent des contacteurs magnétiques. Les très gros moteurs fonctionnant sur des alimentations moyennes tension (milliers de volts) peuvent utiliser des disjoncteurs comme éléments de commutation.

II.2.1.2 Démarreurs à tension réduite

Les démarreurs à tension réduite ou progressifs relient le moteur à l'alimentation électrique par l'intermédiaire d'un dispositif de réduction de la tension et augmentent la tension appliquée progressivement ou par paliers. Deux contacteurs ou plus peuvent être utilisés pour assurer le démarrage à tension réduite d'un moteur. En utilisant un autotransformateur ou une inductance en série, une tension plus faible est présente aux bornes du moteur, ce qui réduit le couple de démarrage et le courant d'appel.

II.2.1.3 Contrôleurs intelligents

Un contrôleur de moteur intelligent utilise un microprocesseur pour contrôler les dispositifs électroniques de puissance utilisés pour la commande du moteur. Les contrôleurs de moteur intelligents surveillent la charge d'un moteur et adaptent en conséquence le couple du moteur à la charge du moteur. Pour ce faire, ils réduisent la tension aux bornes du courant alternatif tout en diminuant le courant. Cela peut permettre d'améliorer l'efficacité énergétique des moteurs qui fonctionnent sous une charge légère pendant une grande partie du temps, ce qui entraîne une réduction de la chaleur, du bruit et des vibrations générés par le moteur.

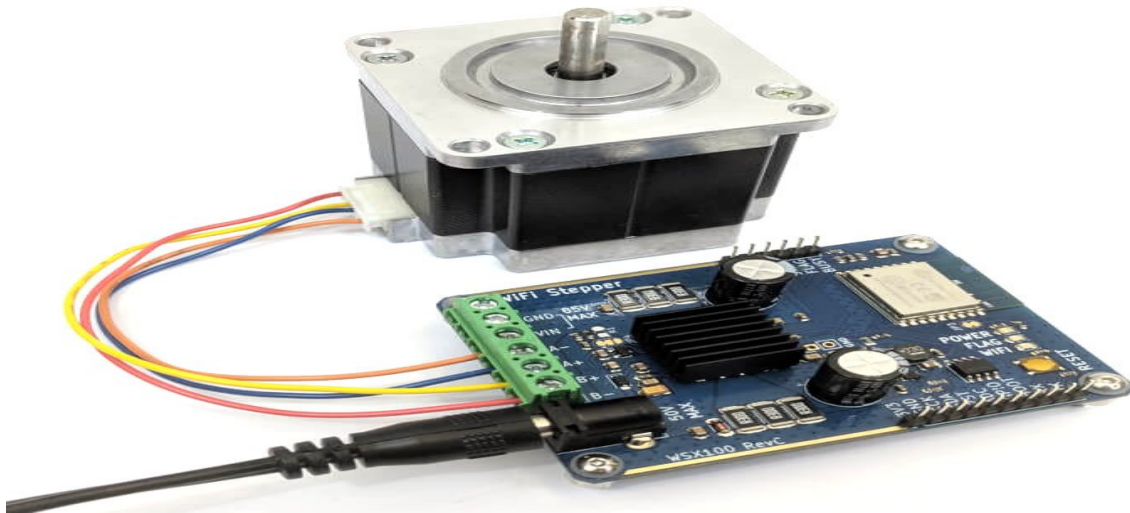


Figure II.6: Wifi contrôleur pas à pas

II.2.1.4 Relais de surcharge

Un démarreur contient des dispositifs de protection pour le moteur. Il s'agit au minimum d'un relais de surcharge thermique. La surcharge thermique est conçue pour ouvrir le circuit de démarrage et ainsi couper l'alimentation du moteur dans le cas où ce dernier absorbe trop de courant pendant une période prolongée. Le relais de surcharge possède un contact normalement fermé qui s'ouvre sous l'effet de la chaleur générée par un courant excessif circulant dans le circuit. Les surcharges thermiques sont dotées d'un petit dispositif de chauffage dont la température augmente avec le courant de fonctionnement du moteur.

II.2.1.5 Protection contre la perte de tension

Les démarreurs utilisant des contacteurs magnétiques tirent généralement l'alimentation de la bobine du contacteur de la même source que l'alimentation du moteur. Un contact auxiliaire du contacteur est utilisé pour maintenir la bobine du contacteur sous tension après que la commande de démarrage du moteur ait été relâchée. Si une perte momentanée de la tension d'alimentation se produit, le contacteur s'ouvre et ne se referme pas jusqu'à ce qu'une nouvelle commande de démarrage soit donnée, ce qui empêche le redémarrage du moteur après une panne de courant.

Cette connexion fournit également un petit degré de protection contre une faible tension d'alimentation et la perte d'une phase. Cependant, étant donné que les bobines des contacteurs maintiennent le circuit fermé avec seulement 80 % de la tension normale appliquée à la bobine, il ne s'agit pas d'un moyen principal de protection des moteurs contre le fonctionnement à basse tension.

II.2.1.6 Servocommandes

Les servocommandes constituent une vaste catégorie de commandes de moteurs. Leurs caractéristiques communes sont les suivantes :

- un contrôle précis de la position en boucle fermée

- des taux d'accélération rapides
- contrôle précis de la vitesse Les servomoteurs peuvent être fabriqués à partir de plusieurs types de moteurs, les plus courants étant :
 - le moteur à courant continu à balais
 - moteurs à courant continu sans balais
 - les servomoteurs à courant alternatif

Les servo-contrôleurs utilisent le retour de position pour fermer la boucle de contrôle. Ceci est généralement mis en œuvre avec des codeurs de position, des résolveurs et des capteurs à effet Hall pour mesurer directement la position du rotor. D'autres méthodes de retour de position mesurent la force contre-électromotrice dans les bobines non entraînées pour déduire la position du rotor, ou détectent le transitoire de tension Kick-Back (pic) qui est généré lorsque l'alimentation d'une bobine est instantanément coupée. Ces méthodes sont donc souvent appelées méthodes de commande "sans capteur".

Un servomoteur peut être commandé par modulation de largeur d'impulsion. La durée pendant laquelle l'impulsion reste élevée (généralement entre 1 et 2 millisecondes) détermine où le moteur va essayer de se positionner. Une autre méthode de commande est l'impulsion et la direction.

II.2.1.7 Contrôleurs de moteurs pas à pas

Les contrôleurs pas à pas modernes commandent le moteur avec des tensions beaucoup plus élevées que la tension nominale de la plaque signalétique du moteur, et limitent le courant par le biais du découpage. La configuration habituelle consiste en un contrôleur de positionnement, appelé indexeur, qui envoie des impulsions de pas et de direction à un circuit d'entraînement séparé à tension plus élevée, responsable de la commutation et de la limitation du courant.

II.3 Partie opérative

On considérera comme partie opérative l'ensemble actionneurs processus physique et capteurs associés. Les actionneurs rotatifs sont de loin les plus utilisés dans le domaine de la commande d'axe.

Les progrès technologiques actuels permettent de trouver des moteurs électriques fournissant des couples et des puissances massiques de plus en plus élevés. De plus ces actionneurs sont de mise en œuvre facile et ne nécessitent qu'un entretien réduit. Actuellement, environ 90% des robots sont à motorisation électrique. Dans la majorité des cas, les constructeurs utilisent des moteurs à courant continu. Les performances (puissance massique et couple) et les facilités d'utilisation des motrices autos synchrones semblent en faire les futurs moteurs des commandes d'axe.

II.3.1 Moteurs

Un moteur électrique est une machine électrique qui convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. La plupart des moteurs électriques fonctionnent par l'interaction du champ magnétique du moteur et du courant électrique dans une bobine de fil pour générer une force

sous forme de couple appliqué à l'arbre du moteur. Les moteurs électriques peuvent être alimentés par des sources de courant continu (CC), comme des batteries ou des redresseurs, ou par des sources de courant alternatif (CA), comme un réseau électrique, des onduleurs ou des générateurs électriques. Un générateur électrique est mécaniquement identique à un moteur électrique, mais fonctionne avec un flux d'énergie inverse, convertissant l'énergie mécanique en énergie électrique.

Les moteurs électriques peuvent être classés en fonction de considérations telles que le type de source d'énergie, la construction interne, l'application et le type de sortie de mouvement. Outre les types de courant alternatif et continu, les moteurs peuvent être à balais ou sans balais, avoir différentes phases (monophasé, biphasé ou triphasé) et être refroidis par air ou par liquide. Les moteurs à usage général, de dimensions et de caractéristiques standard, fournissent une puissance mécanique pratique pour une utilisation industrielle. Les plus gros moteurs électriques sont utilisés pour la propulsion des navires, la compression des pipelines et les applications de pompage-stockage, avec des puissances atteignant 100 mégawatts.

On trouve des moteurs électriques dans les ventilateurs industriels, les soufflantes et les pompes, les machines-outils, les appareils ménagers, les outils électriques et les lecteurs de disques. On peut trouver de petits moteurs dans les montres électriques. Dans certaines applications, comme le freinage par récupération avec les moteurs de traction, les moteurs électriques peuvent être utilisés en sens inverse comme générateurs pour récupérer l'énergie qui serait autrement perdue sous forme de chaleur et de friction.

Il existe quatre types fondamentaux de commandes et d'entraînements de moteurs : CA, CC, servo, et pas à pas, chacun ayant un type de puissance d'entrée modifié en fonction de la fonction de sortie souhaitée pour correspondre à une application

II.3.1.1 Servomoteur

Un servomoteur est un actionneur rotatif ou linéaire qui permet un contrôle précis de la position angulaire ou linéaire, de la vitesse et de l'accélération. Il consiste en un moteur adapté couplé à un capteur pour le retour de position. Il nécessite également un contrôleur relativement sophistiqué, souvent un module dédié conçu spécifiquement pour être utilisé avec des servomoteurs. Les servomoteurs ne constituent pas une catégorie spécifique de moteurs, bien que le terme servomoteur soit souvent utilisé pour désigner un moteur adapté à une utilisation dans un système de contrôle en boucle fermée.

Les servomoteurs et les variateurs sont généralement utilisés pour des applications de contrôle du mouvement dans les secteurs de la construction et de la fabrication. Leurs principales applications consistent à assister une machine dans l'exécution d'une tâche qui doit être effectuée fréquemment et d'une manière particulière. Dans la pratique, ils contribuent souvent à alimenter les systèmes d'entraînement de broches, les convoyeurs, les machines-outils et la robotique. Pour mieux comprendre les servomoteurs, examinez quelques-unes de leurs applications ci-dessous :

- La robotique : Les servomoteurs sont souvent utilisés en robotique. La petite taille des servomoteurs les rend parfaits pour être utilisés dans de nombreux robots. De plus, ils fournissent la précision et la densité de force dont les robots ont besoin pour fonctionner correctement. Les types de robots qui s'appuient sur les servomoteurs et les entraînements comprennent les détonateurs de bombes, les bras robotisés et les engins de lutte contre l'incendie télécommandés.
- La production industrielle : Les entreprises de l'industrie manufacturière essaient toujours de produire des processus robotiques et automatisés plus précis et plus efficaces. Dans le secteur de la fabrication, les servomoteurs sont souvent utilisés pour alimenter les bras robotisés qui déplacent les matériaux. En outre, les servomoteurs sont utilisés dans les machines de fabrication pour aider les machines à couper ou à plier les feuilles de métal avec plus de précision et de puissance. Ils sont également utilisés dans les systèmes de convoyeurs pour les aider à faire tourner leurs éléments.
- Ascenseurs : Lorsqu'une entreprise crée une technologie d'ascenseur, la sécurité est une préoccupation majeure. Pour s'assurer que les ascenseurs transportent les passagers en toute sécurité, les entreprises utilisent des servo-systèmes. Ce type de système contribue à rendre le trajet aussi fluide que possible pour les passagers grâce à des processus de rétroaction et de contrôle.



Figure II.7: Servo moteur

II.3.1.2 Moteurs pas à pas

Les moteurs pas à pas sont essentiellement des moteurs CC sans balais. Ils sont auto-positionnés et ne nécessitent pas d'encodeur pour le retour de position. Cependant, certaines applications peuvent utiliser un codeur dans le seul but de détecter un "décrochage" pendant le mouvement. Les moteurs pas à pas produisent un couple élevé pour une taille et un poids donnés. Le couple disponible des moteurs pas à pas chute de façon spectaculaire avec l'augmentation de la vitesse et les courbes de performance complexes (couple en fonction de la vitesse) compliquent la sélection pour une application spécifique. Leur vitesse maximale est d'environ 5000 tr/min pour un couple très faible. La gamme de puissance des moteurs pas à pas va jusqu'à plusieurs centaines de watts, mais ne dépasse guère ce niveau.

Ce type de moteur est principalement utilisé dans des industries comme la construction et la fabrication. Ils contrôlent les couples, la position et la vitesse des moteurs de divers types de machines. Ils sont très populaires en raison de leur conception à rétroaction ouverte et de leur précision. Bien qu'ils ne soient pas adaptés aux applications à grande vitesse, leurs

mouvements précis et répétables fonctionnent dans une large gamme de vitesses. Les moteurs pas à pas sont connus pour leur fiabilité, leur facilité d'utilisation et leur réversibilité.

Les moteurs pas à pas ont plusieurs applications où ils sont couramment utilisés. Les entreprises utilisent régulièrement des moteurs pas à pas de petite puissance pour le micro-positionnement, les robots, les machines-outils, les entraînements de montres électriques, les équipements médicaux, les imprimantes, les systèmes de contrôle informatique et les disques durs. Les pas à pas de grande puissance sont utilisés dans les équipements militaires, les convoyeurs, les dispositifs d'exploration scientifique et les machines-outils.

Le principal inconvénient des moteurs pas à pas est le bruit et les vibrations qu'ils produisent. Ces vibrations peuvent affecter de manière significative la durée de vie d'un système mécanique. Il existe toutefois des mesures pour réduire les vibrations, comme les techniques d'entraînement à micro-pas ou les amortisseurs mécaniques, mais elles ne permettent généralement pas d'éliminer complètement le problème.

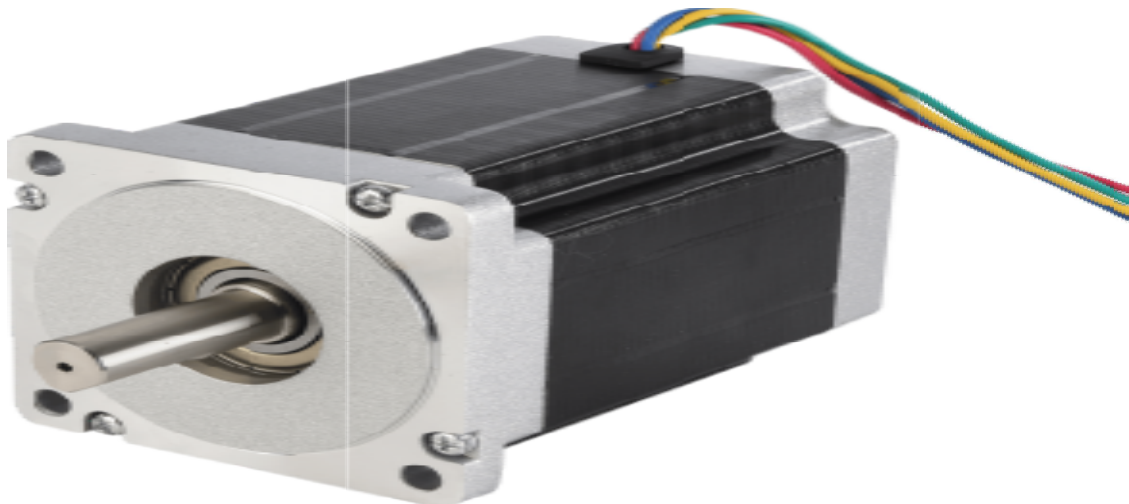


Figure II.8 : Moteur pas à pas

II.3.1.3 Moteurs CC à balais

Un moteur électrique CC à balais est un moteur électrique à commutation interne conçu pour être alimenté par une source de courant continu. Les moteurs à balais ont été la première application commercialement importante de l'énergie électrique pour entraîner l'énergie mécanique, et les systèmes de distribution de courant continu ont été utilisés pendant plus de 100 ans pour faire fonctionner les moteurs dans les bâtiments commerciaux et industriels. La vitesse des moteurs à courant continu à balais peut être modifiée en changeant la tension de fonctionnement ou l'intensité du champ magnétique. Selon les connexions du champ à l'alimentation électrique, les caractéristiques de vitesse et de couple d'un moteur à balais peuvent être modifiées pour fournir une vitesse constante ou une vitesse inversement proportionnelle à la charge mécanique.

Les moteurs CC à balais conviennent à une grande variété d'applications, notamment pour le positionnement, mais aussi pour le contrôle de la vitesse et du couple. Ils nécessitent un

codeur pour les applications de positionnement. Les moteurs CC à balais sont disponibles dans une grande variété de tailles, jusqu'à plusieurs kilowatts. La plage de vitesse peut atteindre 10 000 tr/min et même plus. Ils fonctionnent en douceur et sont relativement silencieux.

Le principal inconvénient des moteurs à courant continu à balais réside dans les balais, qui s'usent avec le temps et doivent être remplacés. Ils peuvent également être responsables de la formation d'arcs électriques. Un autre inconvénient est que les moteurs CC à balais fournissent un couple relativement faible par rapport à leur taille et à leur poids. Les moteurs à balais continuent d'être utilisés pour la propulsion électrique, les grues, les machines à papier et les laminoirs à acier. Comme les balais s'usent et doivent être remplacés, les moteurs à courant continu sans balais utilisant des dispositifs électroniques de puissance ont supplanté les moteurs à balais dans de nombreuses applications.

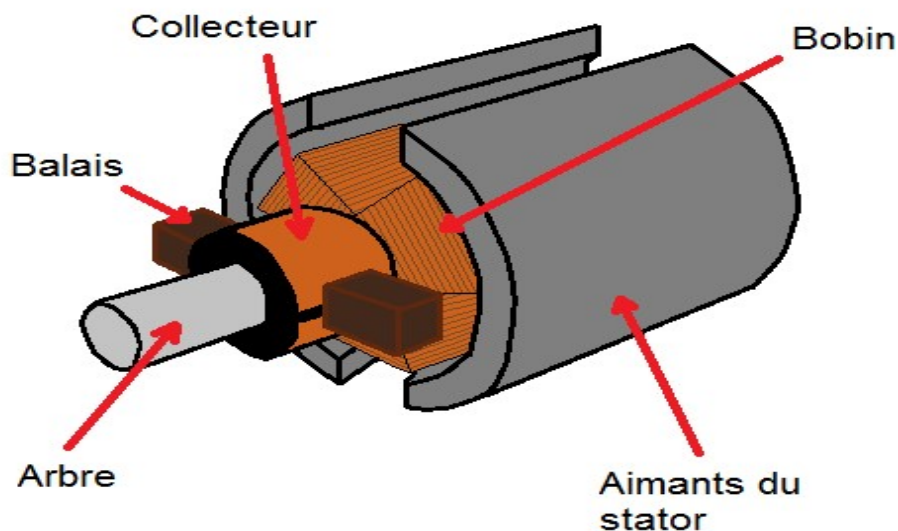


Figure II.9: Moteur CC à balais

II.3.1.4 Moteurs CC sans balais

Un moteur électrique CC sans balais, également connu sous le nom de moteur à commutation électronique ou de moteur CC synchrone, est un moteur synchrone utilisant une alimentation électrique en courant continu (CC). Il utilise un contrôleur électronique en boucle fermée pour commuter les courants continus vers les enroulements du moteur en produisant des champs magnétiques qui tournent effectivement dans l'espace et que le rotor à aimant permanent suit. Le contrôleur ajuste la phase et l'amplitude des impulsions de courant continu pour contrôler la vitesse et le couple du moteur. Ce système de commande est une alternative au collecteur mécanique (balais) utilisé dans de nombreux moteurs électriques conventionnels.

Tout comme le moteur à balais, le moteur CC sans balais nécessite un encodeur pour le retour de position. Il est, cependant, la technologie de moteur la plus largement utilisée pour les applications servo. Les moteurs CC sans balais fonctionnent relativement doux et

silencieux; ils ne nécessitent pas de balais mécaniques pour la commutation. Grâce à ses excellentes caractéristiques thermodynamiques, il est capable de générer un couple élevé pour une taille donnée. Les moteurs CC sans balais sont disponibles dans une large plage de puissance et peuvent fonctionner à des vitesses très élevées jusqu'à 30000 tr / min et encore plus.

L'inconvénient d'un moteur CC sans balais peut être son prix élevé en raison de l'utilisation de matériaux magnétiques de terres rares pour générer un couple. Ils nécessitent également des amplificateurs assez complexes et donc plus chers.

Applications des moteur CC sans balais

Les moteurs sans balais remplissent de nombreuses fonctions assurées à l'origine par les moteurs à courant continu à balais, mais le coût et la complexité du contrôle empêchent les moteurs sans balais de remplacer complètement les moteurs à balais dans les domaines les moins coûteux. Néanmoins, les moteurs sans balais se sont imposés dans de nombreuses applications, notamment dans des appareils tels que les disques durs d'ordinateurs et les lecteurs de CD/DVD.

Les petits ventilateurs de refroidissement des équipements électroniques sont alimentés exclusivement par des moteurs sans balais. On les retrouve dans les outils électriques sans fil, où l'efficacité accrue du moteur permet de prolonger les périodes d'utilisation avant que la batterie ne doive être rechargée. Les moteurs sans balais à faible vitesse et faible puissance sont utilisés dans les platines à entraînement direct pour les disques de gramophone.

- **Transport** : On trouve des moteurs sans balais dans les véhicules électriques, les véhicules hybrides, les transporteurs personnels et les avions électriques. La plupart des bicyclettes électriques utilisent des moteurs sans balais qui sont parfois intégrés au moyeu de la roue elle-même, le stator étant fixé solidement à l'essieu et les aimants étant fixés à la roue et tournant avec elle. Le même principe est appliqué aux roues des scooters auto-équilibrés.
- **Outil sans fil** : Les moteurs sans balais sont présents dans de nombreux outils sans fil modernes, notamment certains coupe-bordures, souffleurs de feuilles, scies (circulaires ou alternatives) et perceuses/visseuses. Les avantages des moteurs sans balais par rapport aux moteurs à balais (faible poids, rendement élevé) sont plus importants pour les outils portatifs alimentés par batterie que pour les gros outils fixes branchés sur une prise de courant alternatif, de sorte que l'adoption a été plus rapide dans ce segment du marché.
- **Chauffage et ventilation** : Les industries du chauffage, de la ventilation et de la climatisation (CVC) et de la réfrigération ont tendance à utiliser des moteurs sans balais au lieu de divers types de moteurs CA. La raison la plus importante pour passer à un moteur sans balais est la réduction spectaculaire de la puissance requise pour les faire fonctionner par rapport à un moteur CA typique. Alors que les moteurs à bague de déphasage et les moteurs à condensateur permanent fendo dominaient autrefois en tant que moteur de ventilateurs, de nombreux ventilateurs fonctionnent désormais avec

un moteur sans balais. Certains ventilateurs utilisent également des moteurs sans balais afin d'augmenter l'efficacité globale du système.

- Outre l'efficacité supérieure du moteur sans balais, les systèmes CVC (en particulier ceux dotés d'une vitesse variable et/ou d'une modulation de charge) utilisent des moteurs sans balais parce que le microprocesseur intégré permet la programmabilité, le contrôle du débit d'air et la communication en série. Certains ventilateurs de plafond et ventilateurs portables sont également équipés de ce moteur. Ils annoncent que le moteur est très économe en énergie et plus silencieux que la plupart des ventilateurs.
- Ingénierie industrielle : L'application des moteurs CC sans balais dans l'ingénierie industrielle se concentre principalement sur l'ingénierie de la fabrication ou la conception de l'automatisation industrielle. Dans le secteur de la fabrication, les moteurs sans balais sont principalement utilisés pour le contrôle du mouvement, le positionnement ou les systèmes d'actionnement.

Les moteurs sans balais conviennent parfaitement aux applications de fabrication en raison de leur densité de puissance élevée, de leurs bonnes caractéristiques vitesse-couple, de leur rendement élevé, de leurs larges plages de vitesse et de leur faible maintenance. Les utilisations les plus courantes des moteurs CC sans balais dans l'ingénierie industrielle sont les moteurs linéaires, les servomoteurs, les actionneurs pour les robots industriels, les moteurs d'entraînement d'extrudeuses et les entraînements d'alimentation pour les machines-outils CNC.

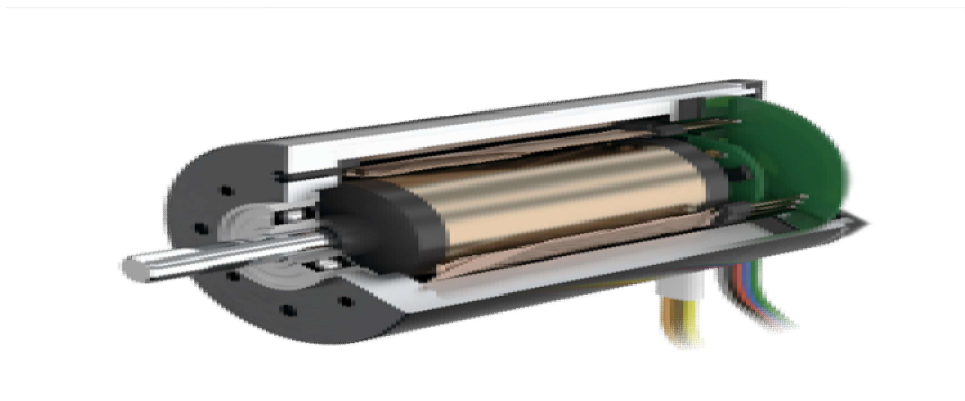


Figure II.10: Moteur CC sans balais

II.3.1.5 Moteurs à induction CA

Traditionnellement, les moteurs à induction CA ont été principalement utilisés pour des applications à vitesse constante. Leur conception est simple (pas d'aimants ni dans le rotor ni dans le stator) et fonctionnent donc de manière fiable sur une longue période; ils sont bon marché lorsqu'ils sont utilisés pour des applications à vitesse constante. En raison de l'émergence de commandes électroniques plus sophistiquées, qui apportent une certaine complexité et ajoutent aux coûts totaux du système, les moteurs à induction CA peuvent être utilisés pour les applications de contrôle de vitesse et de couple. Bien que techniquement

réalisables avec ces techniques de contrôle électronique, les moteurs à induction CA sont rarement utilisés pour applications de positionnement.

Les moteurs à induction sont les moteurs et les entraînements à courant alternatif les plus utilisés dans les processus quotidiens. Vous trouverez des moteurs à induction dans les appareils de cuisine, les climatiseurs, les véhicules, les machines industrielles et les pompes à eau. Ils sont utilisés dans de nombreux appareils ménagers en raison de leur flexibilité à répondre aux demandes de charge variables de nombreuses applications électriques.

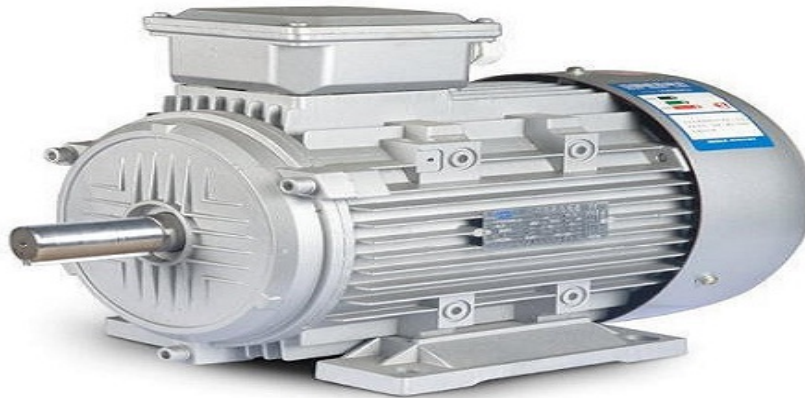


Figure II.11: Moteur induction CA

II.3.2 Système d'axes

Il est souvent nécessaire de transformer le mouvement à la sortie de l'actionneur. En effet, la plupart de temps, l'énergie de rotation est convertie (sortie du moteur) en un mouvement de translation (déplacement du mobile). Les constituants doivent être :

- Rigides pour améliorer la stabilité et la précision
- Légers pour diminuer le temps de réponse et les efforts.
- La réalisation doit être :
- Précise pour augmenter la précision et le bon fonctionnement
- Pas trop précise pour ne pas augmenter le coût.

Le choix de cette partie mécanique est un compromis entre certains impératifs contradictoires (précision-coût par exemple). Le constructeur joue dans ce cas un rôle d'arbitre important pour la bonne marche du système. Tous les dispositifs mécaniques dont nous allons parler dans ce qui suit supportent soit un mouvement rotatif, soit un mouvement linéaire. Certains dispositifs rotatifs, tels que la boîte de vitesses, ne servent qu'à transmettre la vitesse (en influençant la vitesse nécessaire au moteur) et d'autres, comme une table rotative, sont de véritables charges. Tous les dispositifs linéaires sont également des charges, c'est-à-dire qu'ils effectuent le travail réel tel que défini par l'ingénieur. Les dispositifs mécaniques peuvent être classés dans les catégories suivantes :

II.3.2.1 Charges rotatives :

II.3.2.1.1 Pince à rouleau

Une commande d'entrée est envoyée à la pince à partir d'une unité de commande du robot. Cette unité est généralement préprogrammée par un opérateur via un boîtier d'apprentissage. Avec la plupart des préhenseurs électriques, la commande peut être une position, une vitesse ou une force de préhension. Le robot peut envoyer des commandes à la pince à l'aide d'E/S numériques ou en utilisant l'un des protocoles de communication disponibles pour les robots.

La commande du robot est reçue par le module de commande du préhenseur responsable de l'entraînement du ou des moteurs du préhenseur. Ce module est parfois intégré au préhenseur, mais la plupart du temps, il s'agit d'un boîtier situé entre le contrôleur du robot et le préhenseur.

Le servomoteur électrique réagit au signal. L'arbre tourne alors jusqu'à la position, la vitesse ou la force commandée. Pour permettre une commande en boucle fermée, un retour de la position du moteur est généralement nécessaire au niveau du préhenseur. Jusqu'à ce qu'il y ait un changement de signal, le servomoteur maintient la position (et résiste au changement).



Figure II.12: Pince à rouleau

- Table rotative
- Bobineuse

II.3.2.2 Charges linéaires

II.3.2.2.1 Convoyeur

Un système de convoyeur est une pièce commune d'équipement de manutention mécanique qui déplace des matériaux d'un endroit à un autre. Les convoyeurs sont particulièrement utiles dans les applications impliquant le transport de matériaux lourds ou volumineux. Les systèmes de convoyeurs permettent le transport rapide et efficace d'une grande variété de matériaux, ce qui les rend très populaires dans les industries de la manutention et de l'emballage.

Ils ont également des applications populaires auprès des consommateurs, car on les trouve souvent dans les supermarchés et les aéroports, constituant la dernière étape de la livraison

des articles/sacs aux clients. De nombreux types de systèmes de convoyage sont disponibles et sont utilisés en fonction des besoins des différentes industries. Il existe également des convoyeurs à chaîne (au sol et aériens). Les convoyeurs à chaînes sont constitués de rails fermés, de poutres en I, de câbles de remorquage, de chariots motorisés et libres, et de chariots poussés à la main.

Les convoyeurs à bande modulaires permettent, grâce à leur bande rigide en acétal, d'accumuler des charges (avec frottement entre la bande et les objets transportés). La bande est en fait une chaîne en plastique qui s'engrène avec des pignons en plastique. En termes de maintenance, l'avantage est qu'il n'y a pas de centrage et de tension de la bande, contrairement à un convoyeur à bande classique.

- Convoyeur à bande crantée : la bande crantée permet de déplacer la bande d'une quantité précise, sans craindre de glisser comme avec une bande lisse.
- Le convoyeur magnétique est un dispositif doté d'une bande et d'une partie magnétique qui, placée sous la bande, attire les produits métalliques vers le bas, leur donnant plus de stabilité. Les convoyeurs à tambour magnétique sont utilisés pour séparer les particules ou les déchets métalliques. Ils sont souvent utilisés dans les fonderies pour retirer les déchets métalliques d'un convoyeur à sable après l'opération de décochage.
- Un convoyeur tubulaire est un convoyeur dont la bande est fermée sur elle-même pour former un tube. Ce type de convoyeur protège le produit des intempéries, évite les déchets et réduit les émissions de poussières, entre autres. Ce type de bande permet de réaliser des courbes horizontales et verticales ainsi que des angles d'inclinaison élevés. Aux points de chargement et de déchargement, la bande s'ouvre en auge pour recevoir ou décharger le matériau. La transition est assurée par le positionnement des rouleaux. La bande est maintenue dans le tube par des rouleaux positionnés en hexagone sur le périmètre

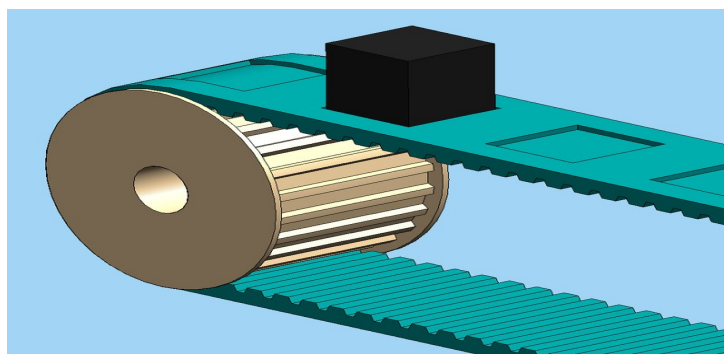


Figure II.13:Poulie courroie cranté

II.3.2.2.2 Vis sans fin (vis -écrou)

Le système à vis et écrou permet de transformer un mouvement de rotation en un mouvement de translation en combinant les mouvements d'une vis et d'un écrou. Il existe deux types de systèmes à vis et écrou. Dans certains systèmes, c'est la vis qui joue le rôle d'organe moteur.

Dans ce cas, le mouvement de rotation de la vis se transforme en mouvement de translation pour l'écrou. Dans d'autres systèmes, c'est plutôt l'écrou qui constitue l'organe moteur. Dans ce cas, le mouvement de rotation de l'écrou se transforme en mouvement de translation pour la vis. Ce mécanisme est généralement irréversible. Il ne peut qu'être amorcé par une rotation de l'organe moteur. En effet, une translation de la vis ou de l'écrou bloque le mécanisme.

Les avantages :

- Ce mécanisme permet d'exercer des forces et des pressions importantes.
- Il permet aussi des ajustements fins.

Les inconvénients :

- Ce mécanisme génère beaucoup de frottement.
- Sa fragilité peut entraîner des problèmes de guidage.
- Le système est lent à moins d'avoir un pas de vis important



Figure II.14: vis -écrou

II.3.2.2.3 Système pignon crémaillère

Le système à pignon et crémaillère transforme le mouvement de rotation du pignon en un mouvement de translation de la crémaillère ou vice versa. Ce système comprend une roue dentée qu'on appelle « pignon » et une tige dentée qu'on appelle « crémaillère ». Lorsque le pignon tourne, ses dents s'engrènent dans les dents de la crémaillère et entraînent cette dernière dans un mouvement de translation. Si l'on fait bouger la crémaillère, les dents de la crémaillère s'engrèneront dans les dents du pignon qui subira alors un mouvement de rotation. Il s'agit donc d'un système réversible.

Avantage :

- Il n'y a aucun glissement lors de la transformation de ce mouvement.
- La force de ce système est relativement grande.

Inconvénients :

- Les engrenages qui sont utilisés peuvent nécessiter une lubrification importante.
- Ce mécanisme nécessite un ajustement précis à cause des dents entre la roue et la crémaillère.

- Il y a beaucoup d'usure.
- Ce n'est pas un mouvement cyclique, c'est un mouvement fini (on doit s'arrêter lorsqu'on est rendu au bout de la crémaillère).



Figure II.15: Système pignon crémaillère

II.3.2.3 Transmissions de vitesse

II.3.2.3.1 Système poulie courroie

Le système à poulies-courroie permet de transmettre un mouvement de rotation à une distance plus ou moins importante. Il existe plusieurs types de transmission par poulies-courroie : courroies plates, rondes, trapézoïdales, striées et crantées. Silencieuses, elles sont surtout utilisées aux vitesses élevées avec de grands entraxes possibles entre poulies.

La tension initiale des courroies est indispensable pour garantir l'adhérence et assurer la transmission du mouvement. Un système à entraxe réglable ou un dispositif annexe de tension (galet enrouleur, etc.) est souvent nécessaire pour régler la tension initiale et compenser l'allongement des courroies au cours du temps. À l'exception des courroies crantées, en fonctionnement normal, il existe un léger glissement de la courroie sur les poulies amenant une imprécision du rapport de transmission ; celui-ci n'est pas exactement égal au rapport des diamètres des deux poulies.

Ce système permet de plus :

- pour un arbre moteur d'avoir plusieurs arbres récepteurs.
- un montage économique et une maintenance aisée.
- d'amortir les vibrations et les chocs de transmission ce qui augmente la durée de vie des organes moteur et récepteur.
- d'assurer un fonctionnement silencieux.

Par contre les courroies ont une durée de vie plus limitée que la plupart des organes mécanique, il faut donc surveiller l'usure et prévoir un plan d'entretien périodique (maintenance préventive) pour palier au vieillissement de la courroie.

Avantage :

- Souplesse de la transmission due à l'élasticité de la courroie
- Possibilité de faire varier l'entraxe
- Pas de lubrification
- Silencieux

Inconvénients :

- Usure de la courroie
- Rapport de transmission irrégulier du au glissement
- Nécessité d'un tendeur de courroie

II.3.2.4 Boite de vitesse (servo-réducteur)

Les réducteurs permettent de multiplier le couple, de réduire la vitesse et d'adapter l'inertie des systèmes motorisés. Les servo systèmes, en particulier, nécessitent des réducteurs capables de fournir non seulement un couple élevé avec une faible inertie ajoutée, mais aussi une précision et une rigidité élevées. Un type de réducteur répond à tous ces critères, tout en offrant une durée de vie relativement longue et une maintenance réduite : le réducteur planétaire.

Lorsqu'un réducteur est ajouté au groupe motopropulseur, la vitesse de rotation fournie par le moteur au composant entraîné est réduite de la valeur du rapport d'engrenage, ce qui peut permettre au système de mieux utiliser les caractéristiques de vitesse-couple du servomoteur. Les réducteurs planétaires sont capables d'accepter des vitesses d'entrée très élevées et de fournir une réduction de vitesse allant jusqu'à 10:1 pour les modèles standard, les modèles à grande vitesse fournissant des rapports d'engrenage (et, par conséquent, une réduction de vitesse) de 100:1 ou plus.

Les réducteurs planétaires peuvent être lubrifiés à la graisse ou à l'huile, bien qu'un réducteur planétaire destiné à un usage servo (parfois appelé réducteur "servo" ou "servo") soit souvent lubrifié à la graisse. Dans les deux cas - lubrification à la graisse ou à l'huile - les réducteurs planétaires sont souvent lubrifiés à vie par le fabricant, ce qui élimine la maintenance pour l'utilisateur final.

L'avantage le plus important de l'utilisation d'un réducteur dans un système servo est sans doute son effet sur l'inertie de la charge. L'inertie de la charge, qui se reflète dans le moteur, est réduite par le carré du rapport d'engrenage. Ainsi, même une réduction de vitesse relativement faible peut avoir un effet significatif sur le rapport d'inertie.

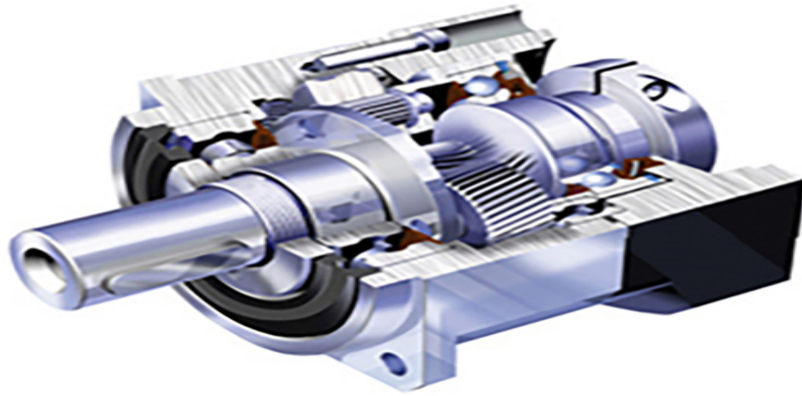


Figure II.16: Servo réducteur

1) Divers (tous rotatifs)

- Frein
- Accouplement
- Disque

II.4 Les profils de mouvement

Les applications d'entraînement par moteur nécessitent des mouvements définis et contrôlés, souvent pour déplacer une pièce vers une position spécifiée à une vitesse précise ou le long d'une trajectoire prédéterminée. Un profil de mouvement fournit les informations sur le mouvement physique et décrit graphiquement comment le moteur doit se comporter pendant le mouvement (souvent en termes de position, de vitesse et d'accélération). Il est utilisé par le servo-contrôleur pour déterminer les commandes (tensions) à envoyer au moteur.

Le type de profil de mouvement requis pour une application dépend de l'objectif du mouvement. Par exemple, le système transporte-t-il simplement une pièce entre des postes de travail ou place-t-il des composants électriques sur une carte de circuit imprimé ? Bien qu'il existe de nombreux profils de mouvement différents permettant de réaliser un mouvement physique donné, les deux types de profil de mouvement les plus courants sont le profil triangulaire et le profil trapézoïdal, ainsi nommés en raison de la forme qu'ils décrivent lorsque la vitesse est tracée en fonction du temps.

II.4.1 Profil de vitesse triangulaire :

Un profil de mouvement triangulaire est caractérisé par des temps (et des distances) d'accélération et de décélération égaux, sans aucun temps passé à vitesse constante. Il est surtout utilisé pour des déplacements rapides, de point à point. En d'autres termes, un profil de mouvement triangulaire divise le temps alloué au mouvement en deux moitiés - une période d'accélération et une période de décélération. Ce profil est couramment utilisé pour les applications qui ne nécessitent pas une période de vitesse constante - comme le transport et

le prendre et placer (pick-and-place) car il fournit le mouvement le plus rapide entre deux points.

Les calculs de vitesse et d'accélération pour un profil de mouvement triangulaire sont basés sur la géométrie d'un triangle, ce qui les rend relativement simples. La hauteur du triangle représente la vitesse maximale, et l'accélération est trouvée en divisant la vitesse maximale par le temps d'accélération, qui est égal à $\frac{1}{2}$ du temps total de déplacement.

Pour les applications linéaires non horizontales, c'est-à-dire que la charge est déplacée dans un angle vers le haut ou vers le bas, il est important d'envisager l'utilisation d'un frein de maintien. Le moteur doit compenser la force gravitationnelle exercée sur la charge pendant les cycles à vitesse nulle, ce qui, sans l'utilisation d'un frein de maintien, entraînera des exigences de couple plus élevées. Selon l'application, le moteur peut rester à l'arrêt pendant un certain temps.

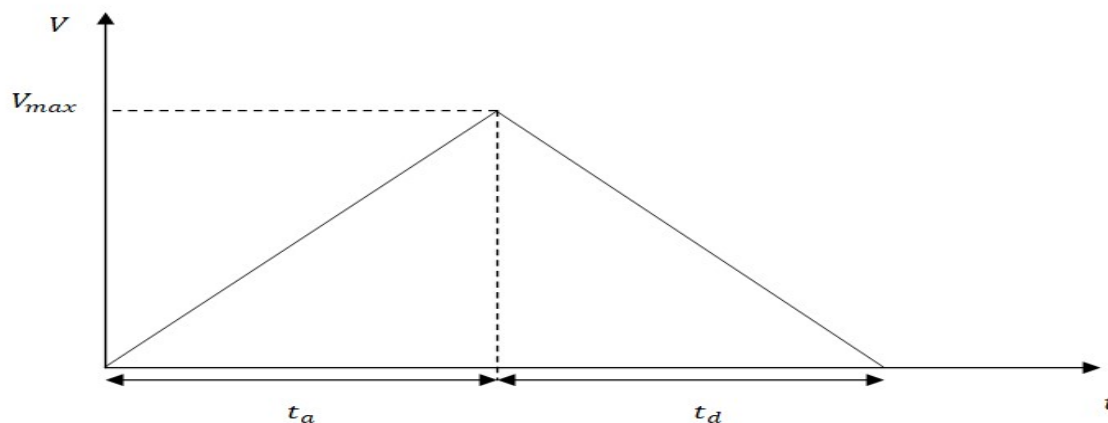


Figure II.17: Profil de vitesse triangulaire

Symbole	Description
v	Vitesse
V_{max}	Vitesse maximum
t	Temps
t_a	Temps d'accélération
t_d	Temps de deceleration
T	durée totale du cycle
X	Distance total

Tableau II.1 : Description des symboles

II.4.2 Profils de mouvement trapézoïdaux

Contrairement à un mouvement triangulaire, un profil de mouvement trapézoïdal permet de passer un certain temps (ou une certaine distance) à une vitesse constante. Il est surtout utilisé pour les mouvements réguliers et à vitesse constant. La version mathématiquement la plus

simple du profil trapézoïdal divise le temps total du mouvement en trois, en allouant 1/3 du temps total du mouvement à l'accélération, 1/3 à la vitesse constante (maximale) et 1/3 à la décélération. Mais il est assez fréquent que les mouvements trapézoïdaux utilisent une plus grande partie du temps pour la vitesse constante, avec des taux d'accélération et de décélération très rapides.

Le profil de mouvement trapézoïdal est sans doute le plus courant dans les applications de contrôle du mouvement, car il constitue la base des processus qui nécessitent une période de vitesse constante, comme le dosage, la mesure et l'usinage. Les calculs de mouvement pour les profils de mouvement trapézoïdaux sont un peu plus complexes que pour les mouvements triangulaires. La meilleure façon d'analyser un profil de mouvement trapézoïdal est de décomposer le profil en deux triangles droits (pour les phases d'accélération et de décélération du mouvement) et un rectangle (pour la phase de vitesse constante). Selon l'application, le moteur peut rester à l'arrêt pendant un certain temps.

Certaines applications peuvent nécessiter différentes rampes de décélération, par exemple, une pour la décélération régulière (commande d'arrêt régulier) et une pour le fonctionnement d'urgence (commande d'arrêt d'urgence). Dans ce cas, la décélération de l'arrêt d'urgence peut déterminer le besoin de couple le plus élevé.

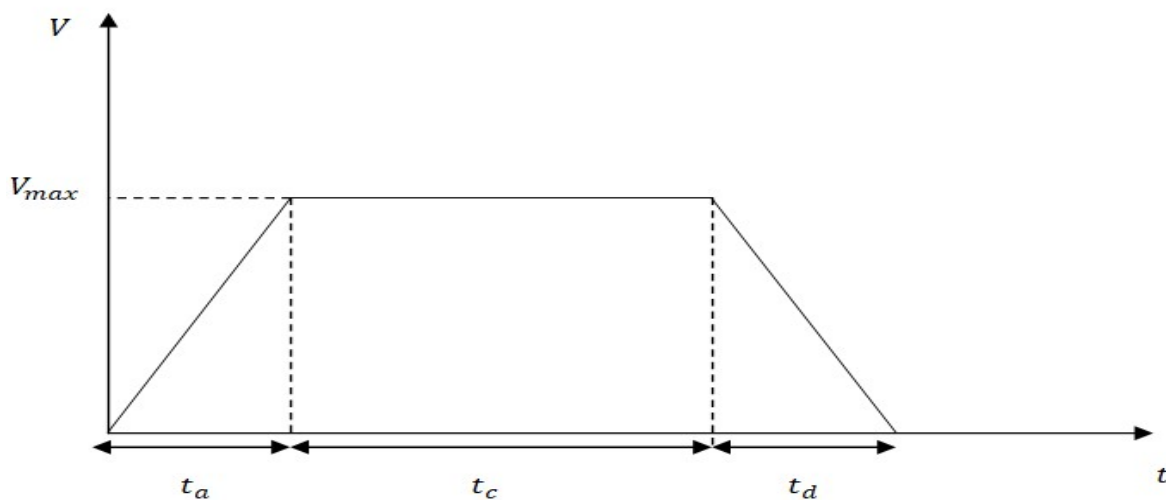


Figure II.18: Profils de mouvement trapézoïdaux

Symbole	Description
v	Vitesse
V_{max}	Vitesse maximum
t	Temps
t_a	Temps d'accélération
t_c	Temps constant
t_d	Temps de deceleration
T	durée totale du cycle

X	Distance total
---	----------------

Tableau II.2: Description des symboles**Propriétés :**

- c'est la loi la plus souvent utilisée
- les phases transitoires sont les plus rapides mais l'accélération discontinue produit les chocs mécaniques
- Pour un servomécanisme, une consigne de vitesse mini est appliquée au démarrage (seuil de vitesse, frottements) et un palier à faible vitesse est introduit au ralentissement pour obtenir une bonne précision lors du freinage.

- Si loi trapèze, prendre la loi 1/3-1/3-1/3 avec :

$$V_{max} = \frac{3X}{2T} \text{ Et } \alpha = \frac{9X}{2T^2} \quad (2.01)$$

- Si loi autre, prendre sinus carré avec :

$$V_{max} = \frac{2X}{T} \text{ Et } \alpha = \frac{8X}{T^2} \quad (2.02)$$

- Temps d'accélération est égal à temps de décélération :

$$t_a = T - \frac{X}{v_{max}} \quad (2.03)$$

II.4.3 Limitation des à-coups

Bien qu'ils soient à la base de la majorité des applications de contrôle du mouvement, les profils de mouvement triangulaires et trapézoïdaux ne sont pas idéaux pour les systèmes de mouvement en raison d'un phénomène connu sous le nom de "saccade". La limitation des à-coups (également appelée profilage de la courbe en S) est le taux de variation dans le temps de l'accélération/ décélération de l'axe.

Il s'agit de permettre une commande de mouvement plus douce en réduisant les saccades (taux de changement) dans les portions d'accélération et de décélération du profil de mouvement. Il a pour but d'éliminer les secousses mécaniques lors des changements de vitesse et peut être utilisé pour minimiser l'usure mécanique, en optimisant les déplacements, de réduire les éclaboussures lors du transport de liquides, d'éviter le basculement lors du transport de boîtes sur une plate-forme, etc.

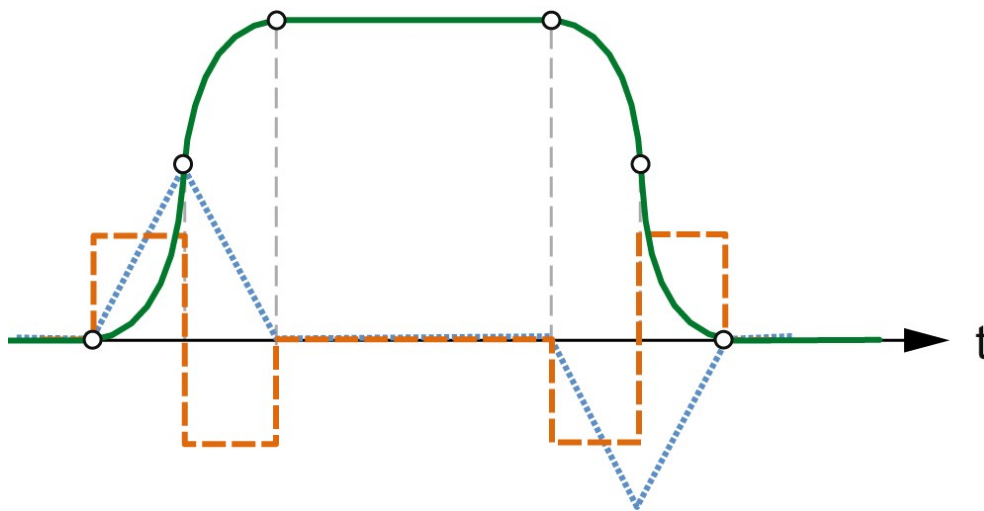


Figure II.19: Avec limitation de «jerk»

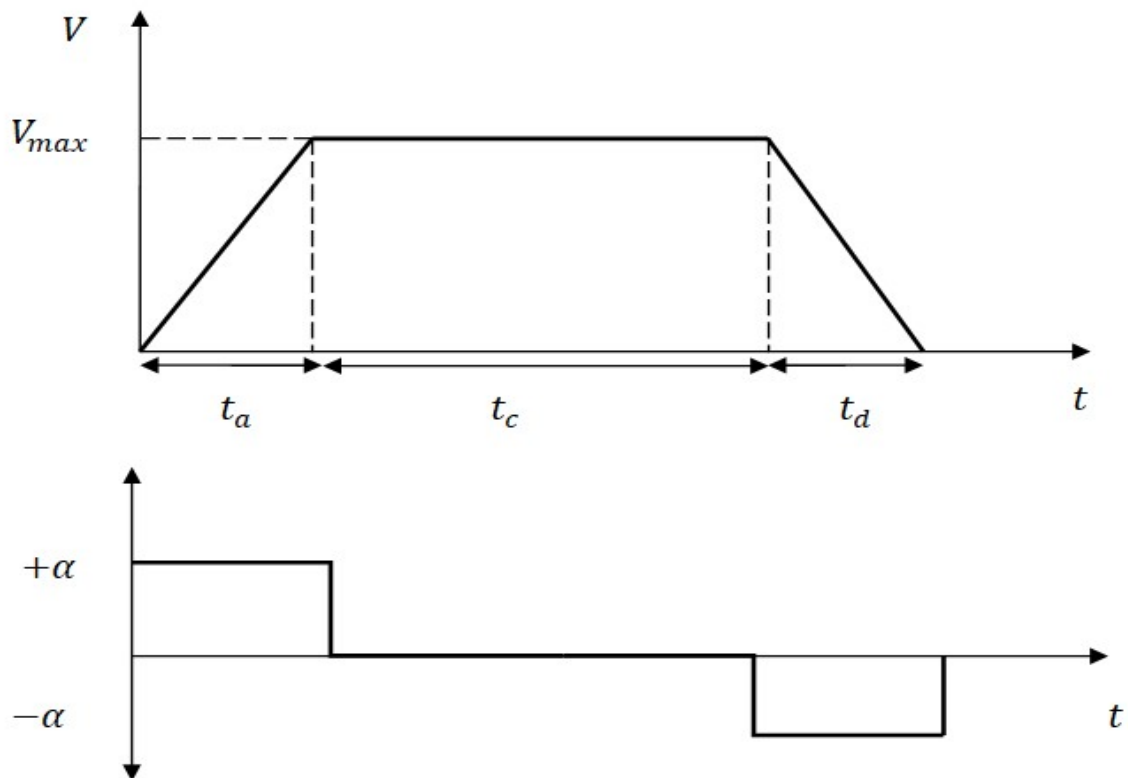


Figure II.20: «jerk» maximal

La contrepartie de l'utilisation d'une courbe en S par rapport à un profil de déplacement trapézoïdal est que la durée totale du déplacement est plus longue avec un profil en S. En effet, la montée en puissance de l'accélération (et de la décélération) prend plus de temps que l'accélération instantanée d'un déplacement trapézoïdal. En effet, la montée en puissance de l'accélération (et de la décélération) prend plus de temps que l'accélération instantanée d'un mouvement trapézoïdal.

Toutefois, le gain de temps obtenu en utilisant un profil de déplacement trapézoïdal peut être annulé par un temps de stabilisation plus long, en raison des vibrations induites par des niveaux élevés de secousses. Et comme les secousses exercent une pression importante sur les composants mécaniques, même si un mouvement trapézoïdal est utilisé comme base, un certain lissage est généralement appliqué aux phases d'accélération et de décélération, rendant le profil de mouvement plus en forme de S.

II.4.4 Avantage et inconvénients des profils

Les avantages et les inconvénients des profils sont donnés par le tableau suivant :

Loi (ou profil) de commande	Avantages	Inconvénients
Loi tout ou rien en vitesse (loi à accélération nulle)	-Vitesse minimale maximale pour un déplacement donné en un temps donné -Simplicité maximale	-Accélération théoriquement infinie : en pratique, l'évolution de la vitesse n'est pas contrôlée dans les phases transitoires. -Puissance et couple maximum exigés du moteur -Précision d'arrêt difficile à obtenir
Loi trapèze ou triangle en vitesse (loi à accélération constante)	-Vitesse et accélération maximales contrôlées par le profil -Simplicité	-Accélération théoriquement infinie* : chocs mécaniques -Puissance élevée en fin d'accélération
Lois à accélération continue : • trapèze en accélération • sinus ou sinus ² en accélération • polynomiale...	-Le « <i>jerk</i> » est contrôlé : pas de chocs et moins de vibrations -Meilleur suivi de trajectoire	-Des lois plus complexes à développer -Accélération maximale supérieure à celle requise par les autres lois -Ne permettent pas le mouvement dans un temps minimal

Tableau II.3: Tableau des avantages de profile

CHAPITRE 3:
DIMENSIONNEMENT D'UNE MOTORISATION D'AXE

Chapitre III: Dimensionnement d'une motorisation d'axe

Lors de la conception d'une machine automatique, se pose le problème du choix et du dimensionnement des motoréducteurs d'axes. La motorisation est rotative, le transformateur de mouvement peut être du type vis-écrou, poulie-courroie ou crémaillère, la loi de commande est tout ou rien, trapézoïdale ou sinusoïdale. Et, dans tous les cas, la motorisation doit réaliser un déplacement donné en un temps maximum, fixé par un taux imposé.

L'ensemble de ces actionneurs doit, pour la plupart, réaliser en un temps donné ; ce temps étant lui-même conditionné par le temps de cycle de la machine dans laquelle l'actionneur est intégré. Leur dimensionnement consiste essentiellement à calculer le couple (C_m) ou la force moteur (F_m) nécessaire dans la phase transitoire à partir d'une valeur d'accélération maximale choisie pour les besoins de ce temps d'action. En général, cette détermination est faite sur la base d'un modèle cinématique, le plus souvent de type trapézoïdal en vitesse.

III.1 Le choix de la loi (ou profil) de commande

Dans la phase d'avant-projet, nous allons essayer de déterminer la vitesse et l'accélération maximales afin de dimensionner le moteur et l'éventuel réducteur. A ce stade, la commande n'est pas forcément connue : les cartes d'axes modernes sont capables de générer des lois de commande complexes de type polynomial ou sinusoïdal.

Ces profils nécessitent une accélération plus importante que celle déterminée pour un simple profil triangulaire. Géométriquement parlant, les aires des courbes de vitesse, qui représentent la distance parcourue, doivent être égales : l'aire "perdue" en accélérant moins au départ doit nécessairement être compensée en accélérant plus. La surface "perdue" en accélérant moins au départ doit nécessairement être compensée en accélérant plus par la suite. L'actionneur doit être capable de fournir ce couple d'accélération, qui peut s'ajouter aux couples résistants.

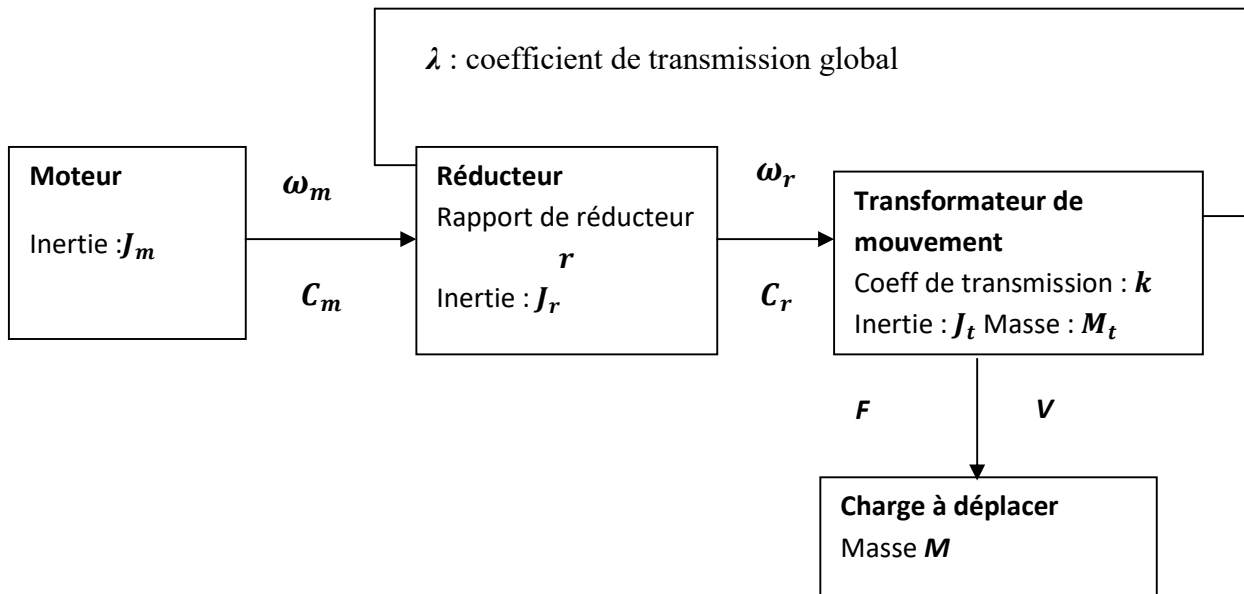


Figure III.1:Chaîne cinématique

* Le coefficient de transmission d'un composant mécanique est le rapport, vitesse en sortie/ vitesse en entrée de telle manière que la vitesse en sortie s'exprime logiquement comme le produit de la vitesse en entrée par le coefficient de transmission. Généralement, les constructeurs – et la tradition – veulent que l'on utilise l'inverse de cette définition pour caractériser les réducteurs, le rapport de réduction étant égal a vitesse en entrée /vitesse en sortie.

En observant les lois de commande, on remarque que les couples d'accélération sont soit constants soit nuls (phases de vitesse constante). La puissance maximale sera nécessairement atteinte en phase d'accélération et a la vitesse maximale, soit

$$P_{max} = C_a * \omega_{m_max} \quad (3.01)$$

En posant $\lambda = \frac{V}{\omega_m}$ coefficient de transmission de la chaîne cinématique, la relation devient :

$$P_{max} = \frac{V}{\lambda} * C_a \quad (3.02)$$

Par ailleurs, le couple moteur C_a requis en phase d'accélération est constant et égal a :

$$C_a = J_{eq} * \frac{d\omega_m}{dt} \quad (3.03)$$

Inertie équivalente totale ramenée sur l'arbre moteur :

$$J_{eq} = J_m + J_r + \frac{J_t + k^2 * M}{r^2} \quad (3.04)$$

L'accélération du moteur peut s'écrire :

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{\alpha}{\lambda} \rightarrow C_a = \frac{J_{eq}}{\lambda} * \alpha \quad (3.05)$$

En remplaçant dans l'expression de la puissance :

$$P_{max} = \frac{J_{eq}}{\lambda} * \alpha * V_{max} \quad (3.06)$$

Le déplacement parcouru (aire du trapèze) est :

$$X = V_{max}(T - t_a) \rightarrow V_{max} = \frac{X}{T - t_a} \quad (3.07)$$

La vitesse maximale atteinte est :

$$V_{max} = \alpha * t_a \rightarrow \alpha = \frac{V_{max}}{t_a} \quad (3.08)$$

En remplaçant α et V_{max} dans l'expression de la puissance :

$$P_{max} = \frac{J_{eq}}{\lambda^2} * \frac{V_{max}^2}{t_a} = \frac{J_{eq}}{\lambda^2} * \frac{X^2}{t_a(T - t_a)^2} \quad (3.09)$$

Lors de la détermination du moteur, et en l'absence de valeurs relatives à l'accélération et à la vitesse dans le CdCF, il est commode de choisir comme modèle de commande en vitesse trapézoïdale une loi 1/3-1/3-1/3. Les principales relations sont les suivantes :

$$V_{max} = \frac{3X}{2T} ; \quad (3.10)$$

$$\alpha = \frac{9X}{2T^2} ; \quad (3.11)$$

$$\omega_{m_max} = \frac{3X}{2\lambda T} \quad (3.12)$$

$$C_a = \frac{9X_{eq}}{2\lambda^2} = \frac{9X[r^2(J_m + J_r) + J_t + k^2 * M]}{2rkT^2} \quad (3.13)$$

III.1.1 La détermination de la vitesse et de l'accélération maximales.

Ce point est fondamental, car ces deux valeurs affectent directement le choix du moteur et du réducteur. Pour un déplacement X en un temps T, on peut calculer les valeurs maximales relatives atteintes par les fonctions cinématiques, qui peuvent être exprimées comme suit :

$$V_{max} = C_v \frac{X}{T} \quad (3.14a)$$

$$\alpha_{max} = C_a \frac{X}{T^2} \quad (3.14b)$$

$$J_{max} = C_j \frac{X}{T^3} \quad (3.14c)$$

III.2 La méthode de sélection et de dimensionnement d'un moteur

Il n'existe pas de méthode systématique et infaillible de choix d'un servomoteur dans le cas général, étant donné le nombre considérable de paramètres techniques et économiques à prendre en compte. En pratique, il faut beaucoup d'expérience et de savoir-faire. En revanche, il y a des nombreuses règles à connaître, qui permettront de s'orienter rapidement vers des solutions crédibles.

Pour remédier à cette lacune il existe une méthode guidée pour déterminer un moteur en neuf étapes. Cette méthode peut être représentée au moyen de l'organigramme qui, sans être exhaustif, met en évidence les boucles inévitables dues aux interactions entre les composants.

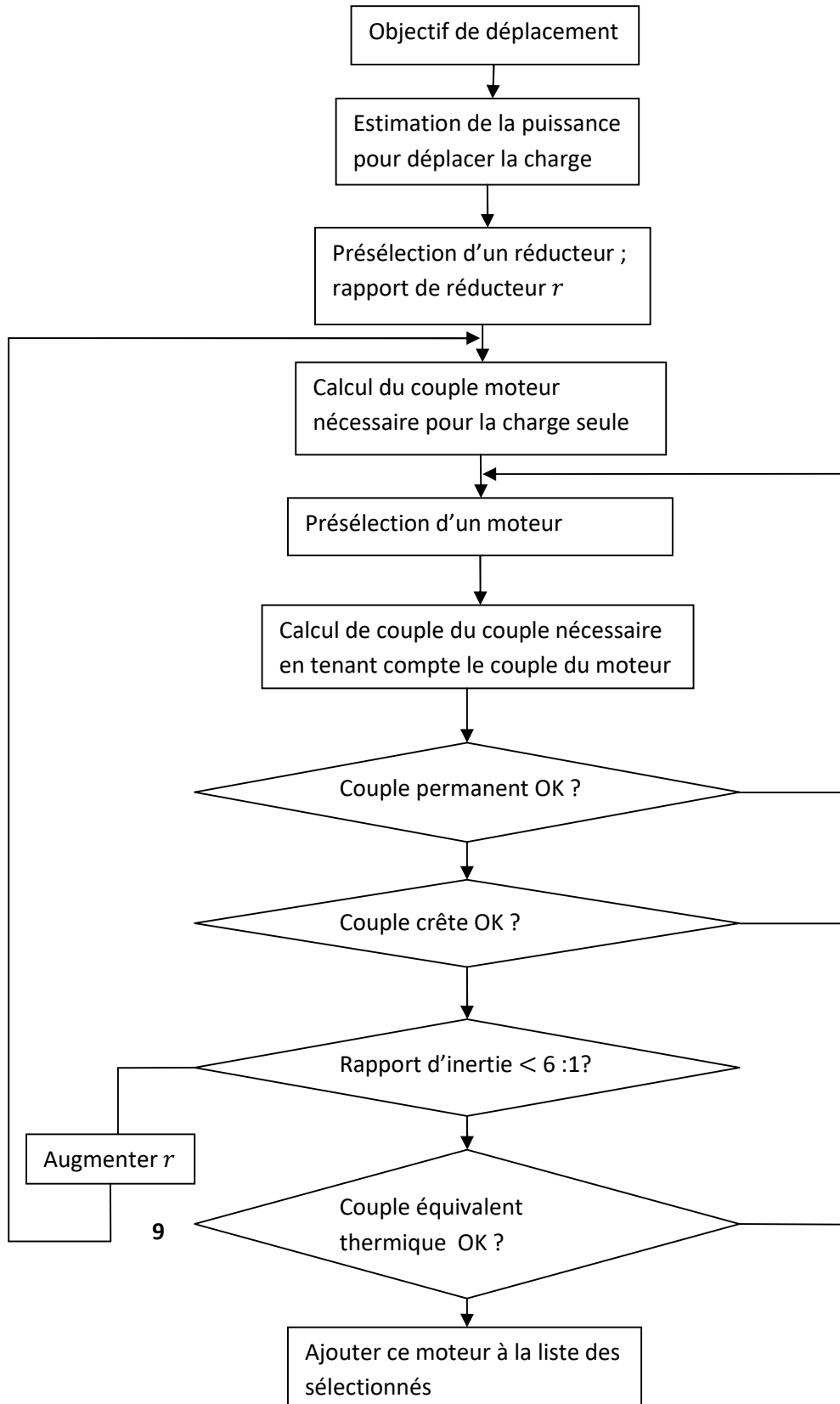


Figure III.2: Organigramme de sélection d'un moteur

Etape 1 : Objectifs de déplacement

Données :

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

Calculs :

- Si c'est la loi trapèze prendre « $1/3 - 1/3 - 1/3$ » avec :

$$V_{max} = \frac{3X}{2T} \quad (3.10)$$

$$\alpha_{max} = \frac{9X}{2T^2} \quad (3.11)$$

- Si c'est la loi autre prendre sinus carrée avec :

$$V_{max} = \frac{2X}{T} \quad (3.14)$$

$$\alpha_{max} = \frac{8X}{T^2} \quad (3.15)$$

Etape 2 : Estimation de la puissance pour déplacer la charge

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

Données :

- Vitesse maximale de la charge : V_{max}
- Accélération de la charge : α_{max}
- Effort sur la charge : F
- Masse de la charge : M
- Rendement global estime de la chaîne cinématique : η

Calculs :

- Puissance d'accélération :

$$P_a = M\alpha_{max}V_{max} \quad (3.16)$$

- Puissance permanente :

$$P_p = \frac{FV_{max}}{\eta} \quad (3.17)$$

- Puissance totale :

$$P_t = (M\alpha_{max}V_{max}) + \left(\frac{FV_{max}}{\eta}\right) \quad (3.18)$$

Etape 3 : 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 : $3\,000 \text{ tr/min} < \omega_m < 5\,000 \text{ tr/min}$:

$$r < \frac{k\omega_m}{V_{max}}$$

- Si $r < 2$, envisager un entraînement direct

Etape 4 : Calcul du couple moteur nécessaire pour déplacer la charge

Données :

- Accélération de la charge : α
- Effort sur la charge : F
- Gain en vitesse de la chaîne cinématique :

$$\lambda = \frac{k}{r} = \frac{V}{\omega_m} \quad (3.19)$$

- Rendement global estimé : η
- Inertie du transformateur de mouvement : J_t

Calculs :

- inertie de la charge ramenée à l'arbre moteur :

$$J_c = \frac{(J_t + k^2M)}{r^2} \quad (3.20)$$

- Couple d'accélération :

$$C_a = \frac{J_c * \alpha}{\lambda} \quad (3.21)$$

- Couple permanent :

$$C_{mp} = \frac{F * \lambda}{\eta} \quad (3.22)$$

- Couple crête :

$$C_{max} = \left(\frac{J_c \cdot \alpha}{\lambda}\right) + \left(\frac{F \cdot \lambda}{\eta}\right) \quad (3.23)$$

Étape 5 : Présélection d'un moteur

On choisit un moteur dont le couple permanent est supérieur au couple crête déterminé en **étape 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. Plus un moteur est gros, plus il consomme de couple pour s'accélérer lui-même.

Le tableau suivant donne une vue d'ensemble des technologies de moteurs et de leurs caractéristiques de fonctionnement de base, ce qui facilitera la présélection du moteur et du réducteur.

Caractéristiques	Moteur Pas à pas	Moteur CC à Balais	Moteur CC Sans balais	Moteur à Induction CA	Commentaire
A bras prix	Oui	Oui	Oui	Non	Les moteurs pas à pas et moteurs CC à balais sont moins chers; les moteurs CC sans balais sont plus chers
Bon fonctionnement (bruit minimal, vibrations)	Non	Oui	Oui	Non	La commutation sinusoïdale contribue au fonctionnement plus fluide des moteurs CC sans balais
Haute vitesse	Non	Oui	Oui	Non	Les moteurs pas à pas ne dépassent généralement pas 3000 tr/min.
Haute puissance	Non	Non	Oui	Oui	Les moteurs pas à pas et les moteurs à balais à courant continu ne viennent pas en général dans des gammes supérieures à 1 kilo watts
Rapport vitesse/taille élevé	Oui	Non	Oui	Oui	Les moteurs à courant continu sans balais offrent un meilleur spectre de couple en fonction de la vitesse, alors que les performances des moteurs pas à pas diminuent de manière significative à des vitesses plus élevées.
Facilité d'utilisation	Oui	Non	Non	non	Pas de rétroaction et pas de réglage du servo nécessaire
Circuit de commande simple	non	Oui	Non	Non	Toutes les technologies de moteur, autres que le moteur CC à balais, nécessitent plus d'un circuit amplificateur par moteur.

Tableau III.1: Caractéristiques de la Technologie du Moteur

Etape 6 : Calcul du couple nécessaire en tenant compte du moteur

Données :

- Accélération de la charge α
- Effort sur la charge : F
- Coefficient de transmission de la chaîne cinématique :

$$\lambda = \frac{k}{r} = \frac{V}{\omega_m} \quad (3.19)$$

- Rendement global estimé : η
- Inertie moteur : J_m
- Inertie réducteur : J_r

Calculs :

- Inertie équivalente totale ramenée à l'arbre moteur :

$$J_{eq} = J_m + J_r + \frac{(J_t + k^2 M)}{r^2} \quad (3.24)$$

- Couple d'accélération :

$$C_a = \frac{J_{eq} \cdot \alpha}{\lambda} \quad (3.25)$$

- Couple permanent :

$$C_{mp} = \frac{F \cdot \lambda}{\eta} \quad (3.26)$$

- Couple crête :

$$C_{max} = \left(\frac{J_c \cdot \alpha}{\lambda} \right) + \left(\frac{F \cdot \lambda}{\eta} \right) \quad (3.27)$$

Etape 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 %).

Etape 8 : Vérification du rapport d'inertie

En théorie, les meilleures performances sont obtenues lorsque le rapport d'inertie est de 1:1. Cet objectif ne peut pas toujours être atteint, car la vitesse du moteur devient trop élevée. En pratique, le rapport d'inertie ne doit pas dépasser une valeur comprise entre 5 et 10 pour les applications courantes, en fonction de la qualité de la mécanique. Si c'est nécessaire, on augmente le rapport de réduction r afin de réduire le rapport d'inertie. Pour les servo moteurs le rapport d'inertie est la plupart 6 :1.

$$\text{Rapport d'inertie} = \frac{J_c}{J_m + J_r} \quad (3.28)$$

Etape 9 : Vérification du couple thermique

Lorsque le cycle de fonctionnement du moteur laisse peu de temps pour le refroidissement alors, le temps de refroidissement et le couple équivalent thermique sont déterminés. Couple équivalent thermique, qui ne doit pas dépasser le couple permanent du moteur.

Couple en phase dynamique :

Avec accélération α en phase dynamique

$$C_{ma} = \frac{J_{eq} \cdot \alpha}{\lambda} \quad (3.29)$$

Couple thermique :

$$C_{th} = \sqrt{\frac{\sum C_i t_i}{\sum t_i}} \quad (3.30)$$

III.2.1 Sélection d'un réducteur (*gearbox*)

Le dimensionnement d'un réducteur dépend de la vitesse d'entrée, de l'inertie, du couple dynamique, des charges spécifiques sur l'arbre et du diamètre de l'arbre du moteur. La vitesse d'entrée ne doit pas dépasser la valeur nominale du réducteur, car cela entraînerait une usure prématurée du joint d'étanchéité en raison de l'augmentation de la pression.

Il faut limiter le couple de sortie pour éviter de casser le réducteur et pour obtenir la meilleure solution de réducteur, il est nécessaire de dimensionner la charge. La plupart des fabricants de réducteurs fournissent l'inertie réfléchi du réducteur dans leur guide d'utilisation. Cela permet de ne pas avoir à calculer l'inertie de chaque engrenage.

III.2.2 Interprétation des courbes couple/vitesse

Les performances des deux technologies de moteurs, les servomoteurs à balais/sans balais d'un côté et les moteurs pas à pas de l'autre, sont plus efficacement démontrées par des graphiques qui illustrent la relation entre le couple et la vitesse. D'autre part, sont plus efficacement démontrées par des graphiques qui illustrent la relation entre le couple et la vitesse, c'est-à-dire quel couple est disponible à quelle vitesse.

Bien que les systèmes pas à pas soient également des servo-systèmes, il existe des différences significatives entre les courbes de performance des moteurs pas à pas et des servo-systèmes. Des différences significatives entre les courbes de performance d'un servomoteur et d'un moteur pas à pas. Une connaissance approfondie de ces différences et l'interprétation correcte des courbes de performance sont cruciales pour le processus de sélection du moteur.

On ne saurait trop insister sur le fait que la comparaison des données du moteur avec les exigences en matière de couple et de vitesse de charge ne doit se faire que sur la base d'un couple réaliste. Sur la base d'informations réalistes sur le couple par rapport à la vitesse (si ces données sont fournies), et pas seulement sur le couple et la vitesse nominaux. Le couple et la vitesse nominaux.

III.2.3 Courbes de performance des servomoteurs

Lorsque l'on compare des servomoteurs de différents fabricants, il est toujours avantageux d'utiliser leurs courbes de performance, c'est-à-dire le couple par rapport à la vitesse ou vice versa, ce qui nécessite une bonne compréhension de ces courbes. Un autre facteur est la tension, qui affecte de manière significative la vitesse maximale.

Les données du moteur dérivées des courbes de performance et figurant sur la fiche technique (telles que le couple nominal, la vitesse nominale) dépendent en grande partie de l'interprétation du fabricant. Elle peut être conservatrice et donc laisser potentiel d'utiliser le moteur au-delà des paramètres nominaux dans certaines circonstances. Pour des raisons de marketing l'interprétation peut être plus agressive en faveur d'une vitesse ou d'un couple plus élevés.

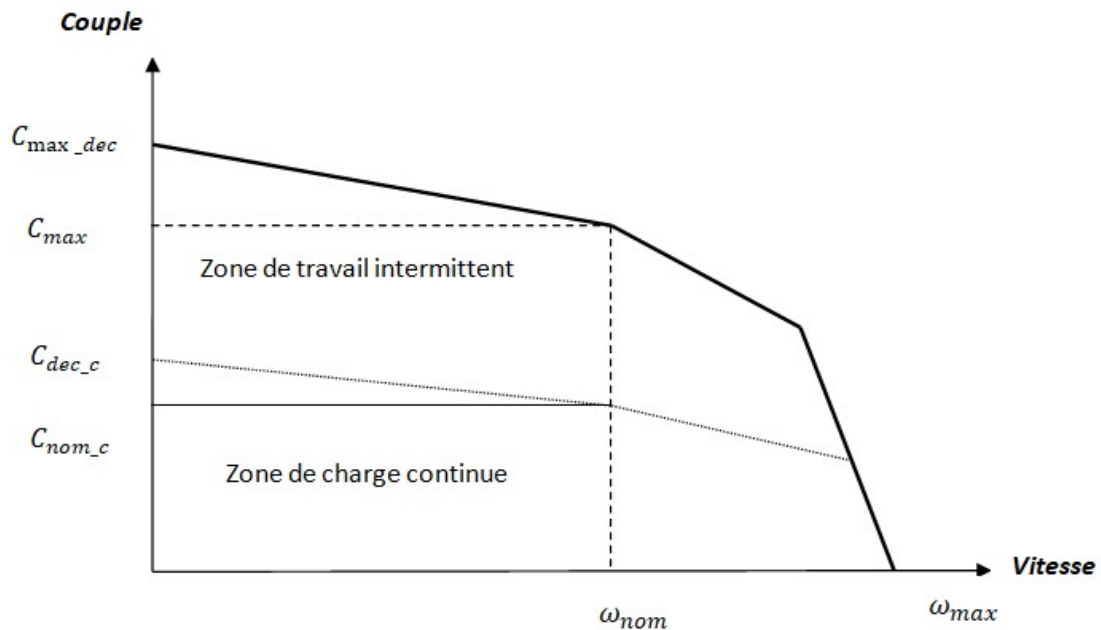


Figure III.3: Courbe couple-vitesse pour servo moteur

C_{nom_c} : Le couple nominal continu est le couple continu que le moteur peut fournir à la vitesse nominale, proche de la vitesse maximale du moteur. Il permet de mieux juger des performances du moteur, car il s'agit du couple du moteur à la vitesse.

C_{dec_c} : Le couple continu de décrochage est le couple continu du moteur à vitesse nulle (décrochage). Il s'agit du couple à rotor bloqué. Les fabricants le testent en bloquant le rotor et surveillant la température du moteur lorsque celui-ci est alimenté en courant.

Le couple de pointe est le couple maximal que le moteur peut introduire pendant une courte période, généralement pour l'accélération/décélération ou pour surmonter la friction. Nos moteurs sont conçus pour un cycle d'utilisation de 10% et le couple de pointe est donc 3,1 fois le couple de décrochage continu.

Les servos ont généralement deux zones :

1. La zone de service continu, dans laquelle un fonctionnement continu est possible sans surchauffe du moteur.
2. La zone de service intermittent, dans laquelle le fonctionnement, en particulier l'accélération, n'est possible que sur une base intermittente. La durée pendant laquelle le moteur ou la combinaison moteur/variateur peut maintenir le couple intermittent est limitée et est très spécifique au moteur. Il se situe typiquement entre 0,05 et 30+ secondes (voir la fiche technique du fabricant).

Le principal facteur contribuant au couple de pointe/intermittent requis est l'accélération, car le couple est égal à l'inertie multipliée par l'accélération. À vitesse constante, le moteur n'a besoin que de pour maintenir le couple constant dû aux forces de frottement.

Pour comparer les besoins de l'application avec les performances du moteur, le couple efficace de l'application et la vitesse maximale doivent être vérifiés avec la courbe de couple/vitesse continue du moteur. Le couple de pointe de l'application, qui est fonction de l'inertie et de l'accélération, doit être comparé à la courbe de couple/vitesse intermittente. Dans ce cas, la condition de temps limité mentionnée précédemment s'applique et doit être prise en compte. La figure suivante montre une application dont les exigences en matière de couple et de vitesse se situent bien dans la performance du moteur

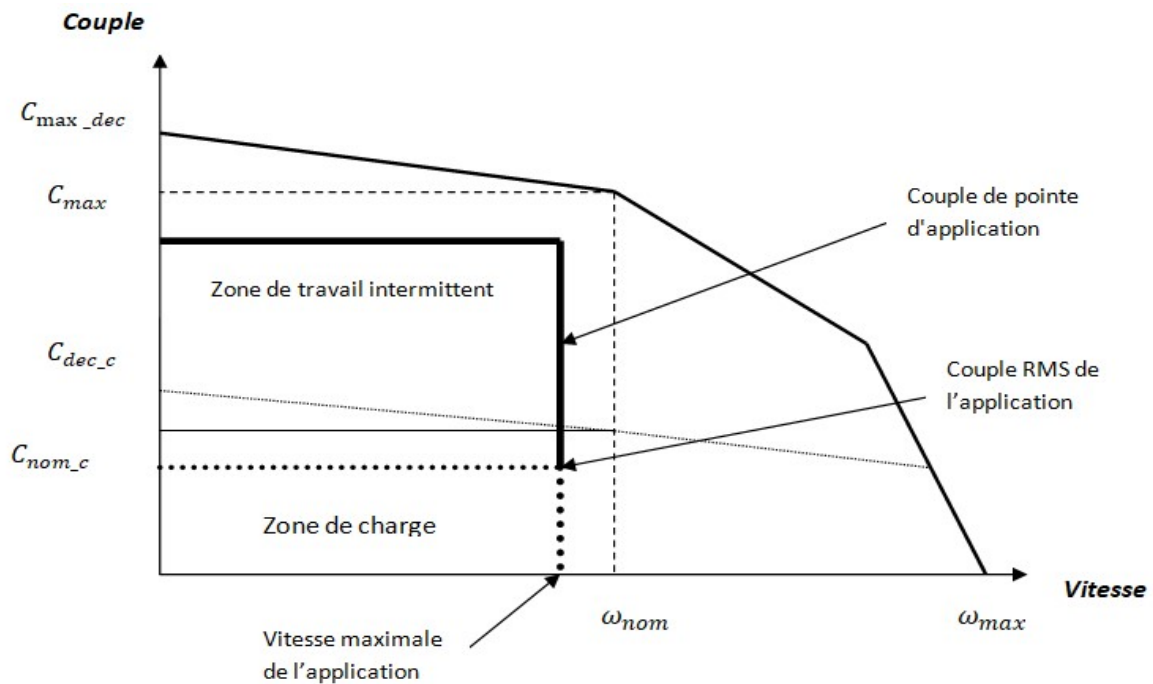


Figure III.4: Moteur performant

A titre de référence, la figure suivante montre une application dont les exigences en matière de couple et de vitesse sont hors de portée des performances du moteur.

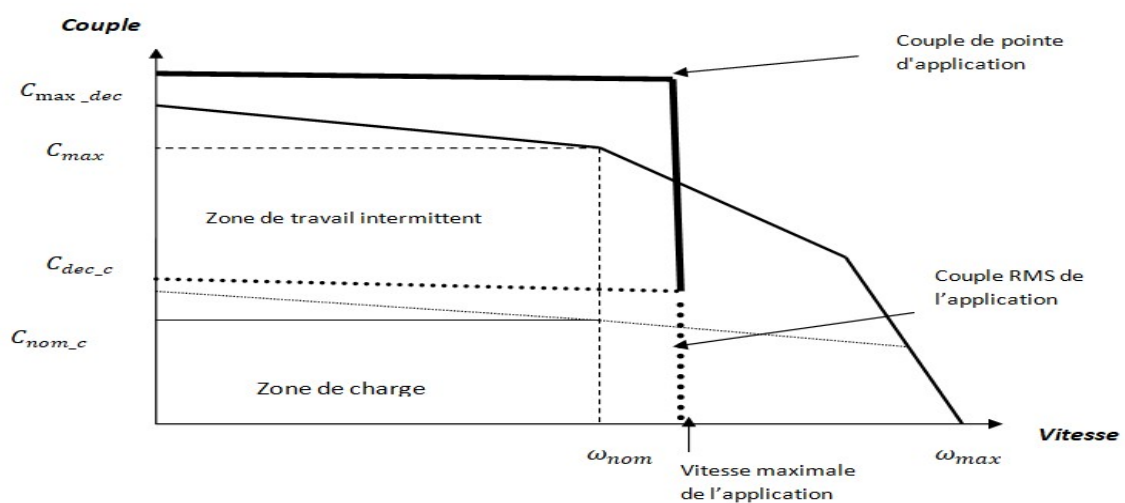


Figure III.5: Moteur non performant

Dans certains cas, il est possible d'utiliser un moteur au-delà de ses caractéristiques nominales, qu'il s'agisse du couple ou de la vitesse. L'exemple suivant suppose une vitesse supérieure à la vitesse nominale du moteur, alors que les exigences de couple sont faibles. Cet exemple montre une vitesse d'application supérieure à la vitesse nominale du moteur, mais avec un couple efficace requis suffisamment faible pour être couvert par la zone de service continu.

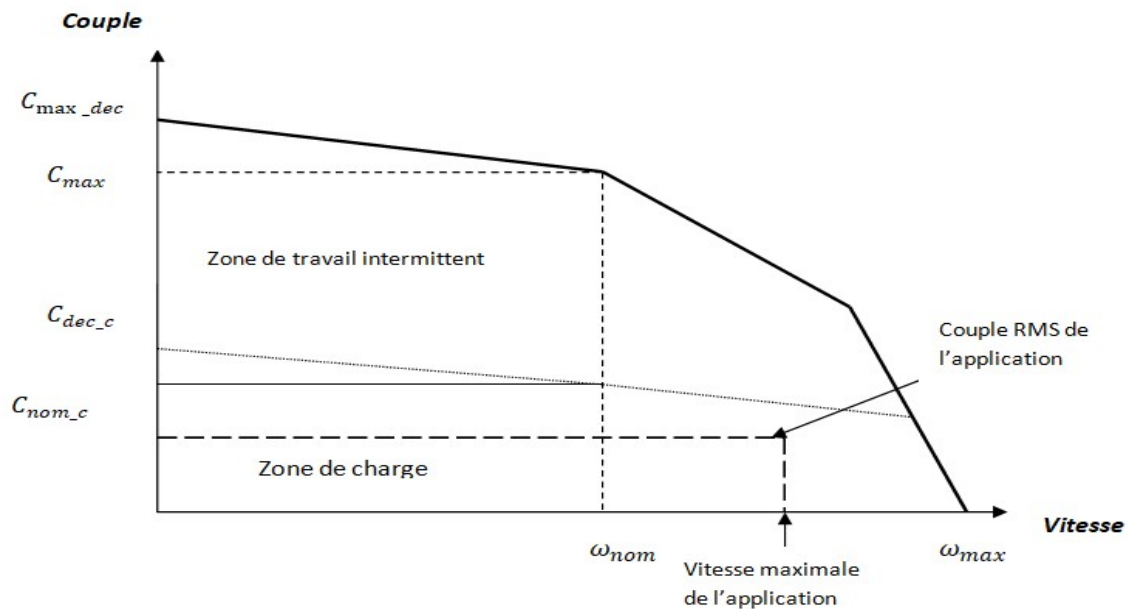


Figure III.6: Application à haute vitesse et à faible couple efficace

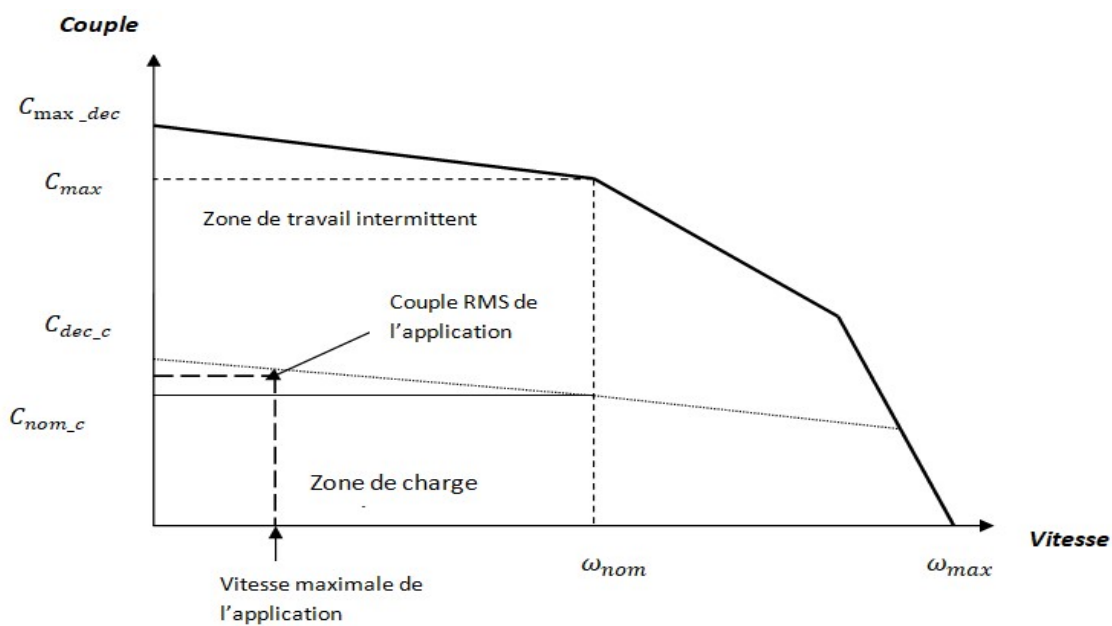


Figure III.7: Application à faible vitesse et à couple efficace élevé

CHAPITRE 4:
APPLICATION À UNE MACHINE INDUSTRIELLE :
MACHINE À FABRIQUER LES CARTES À PUCES

Chapitre IV: Application à une machine industrielle

IV.1 Machine de fabrication de cartes à puces

Machine de fraisage de cartes à puce entièrement automatique, inserteur de puces CI (circuit intégré). Cette machine est utilisée pour fraiser la fente standard de la carte qui est utilisée pour intégrer différents types de modules. Et en même temps, tester, coller et perforer différents modules et les implanter dans les cavités fraisées pour l'encastrement des CI.

La machine ne nécessite qu'un seul opérateur, elle est stable et facile à régler. La machine est facile à utiliser et à entretenir, ce qui améliore la durée de vie de la machine et la productivité. L'interface utilisateur conviviale protège la sécurité des opérateurs.

La cadence maximale de la machine est de : 5000cartes/heure

Le temps de cycle est de =0.7s

Les dimensions de la machine : 4.3m * 1.15m * 1.85m

Le prix de la machine est environ : 66 000USD

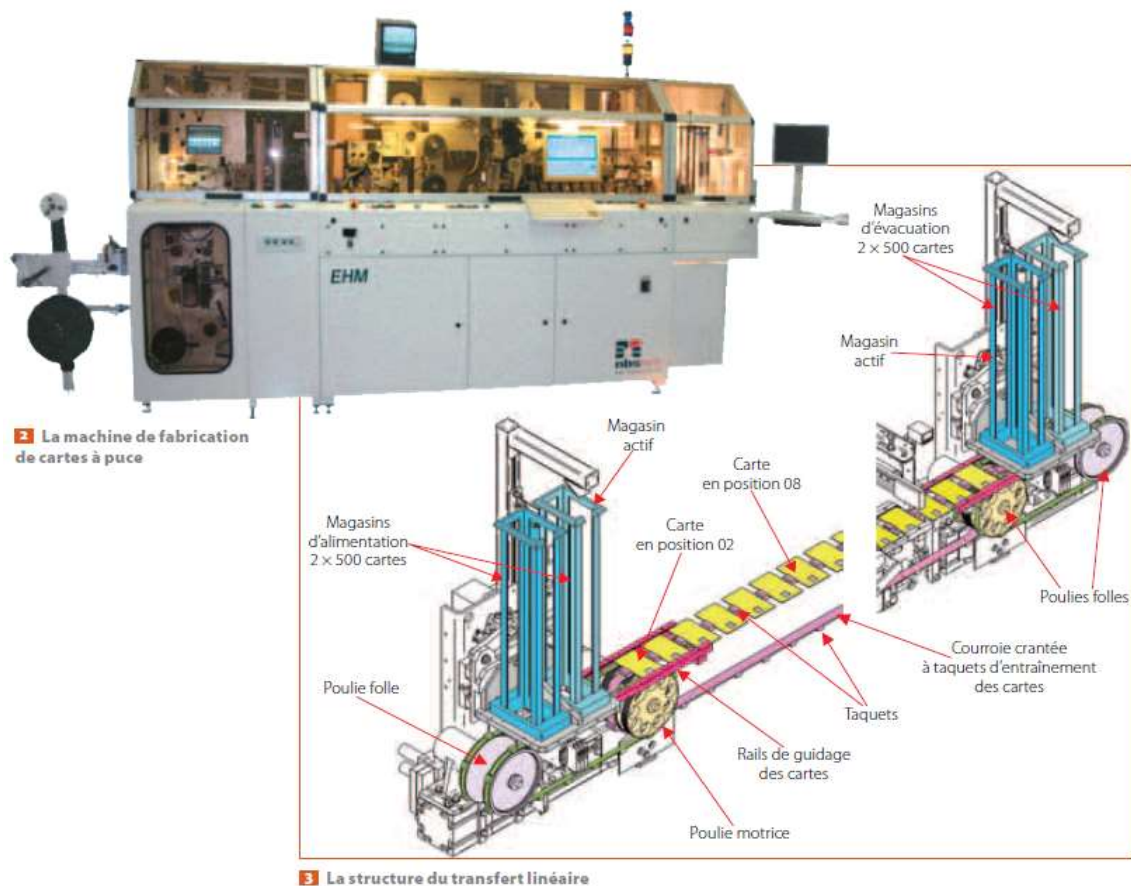


Figure IV.1: La machine de fabrication de cartes à puces et la structure du transfert linéaire

IV.2 Analyse fonctionnelle

L'analyse des fonctions permet de déterminer les fonctions et les contraintes auxquelles un produit sera confronté au cours de son cycle de vie.

IV.2.1.1 Analyse du besoin

L'intégration croissante de la technologie dans la vie quotidienne a entraîné une augmentation de l'utilisation des cartes à puce. Nous les trouvons dans presque tout, y compris les appareils de communication, les cartes-clés et les systèmes bancaires. C'est principalement parce qu'elles offrent une transaction transparente et une sécurité. Parce qu'avec l'augmentation de la technologie, il y a une augmentation de l'utilisation des cartes à puce, les industries ont donc besoin de produire des machines qui sont plus sûres et précises et en même temps produire plus de cartes à puce dans un temps court.

Le développement de l'utilisation des réseaux en nuage et des cartes SIM virtuelles réduira le besoin de cartes à puce, mais ne le fera pas disparaître, car pour accéder à l'internet, il faudra toujours une carte à puce.

IV.2.1.2 Analyse fonctionnelle externe

L'analyse des fonctions externes traite des contraintes extérieures vues du point de vue de l'utilisateur (celles qui ne sont pas les caractéristiques techniques de la machine). Pour notre machine nous avons les suivantes :

- Operateur ; Produit ; Environnement
- Temps ; Prix ; Energie électrique
- Normes ; Milieu ambiant ; Commande

Diagramme des interacteurs

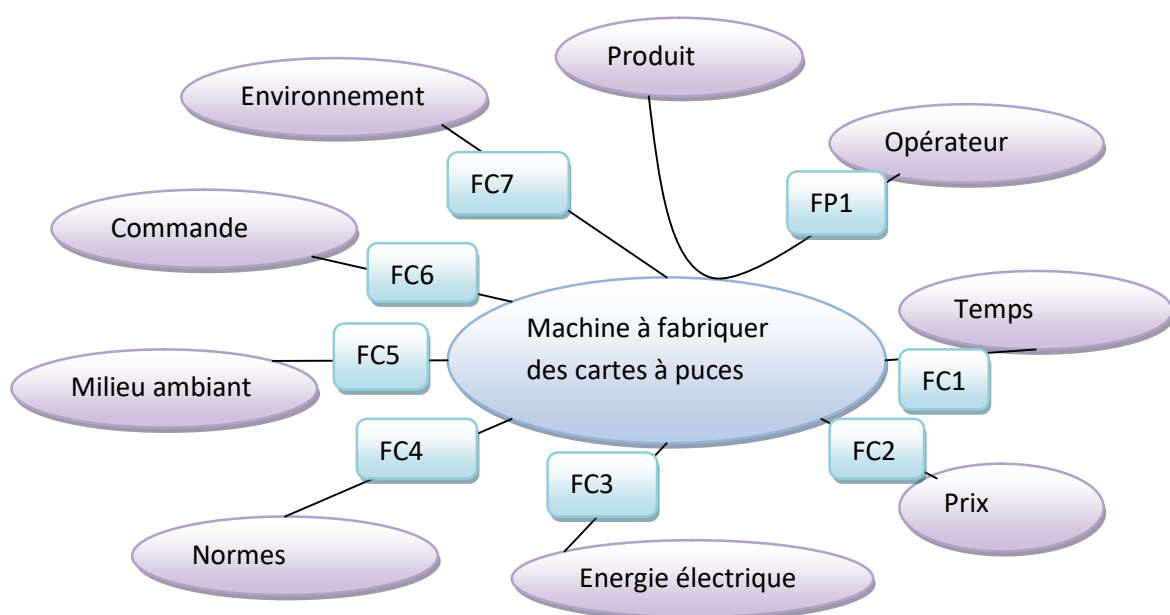


Figure IV.3: Diagramme des interacteurs

FP1 : déplacer les cartes à puces vers les positions de manipulation dans toutes sécurités et précision

FC1 : réaliser la production dans les temps impartis

FC2 : être accessible et esthétique

FC3 : utiliser l'énergie électrique

FC4 : respecter les normes de sécurité stipulée

FC5 : résister au milieu ambiant

FC6 : panneau de commande accessible et facile à utiliser

FC7 : respecter l'environnement

IV.2.1.3 Analyse des fonctions interne

L'analyse fonctionnelle interne décrit le point de vue du concepteur chargé de fournir le produit pour répondre aux besoins exprimés. Nous y parvenons en exprimant les fonctions de services en termes de fonctions techniques. Toutes les fonctions de services ne peuvent pas être exprimées de cette manière.

IV.2.1.3.1 Diagramme de FAST

Le diagramme FAST (Function Analysis System Technic) permet d'exprimer les fonctions des services en termes de fonctions techniques et donc de solutions techniques. Le diagramme FAST permet d'exprimer les fonctions des services en termes de fonctions techniques et donc de solutions techniques. C'est l'objectif principal de ce projet car nous voulons dimensionner le moteur qui entraînera la machine.

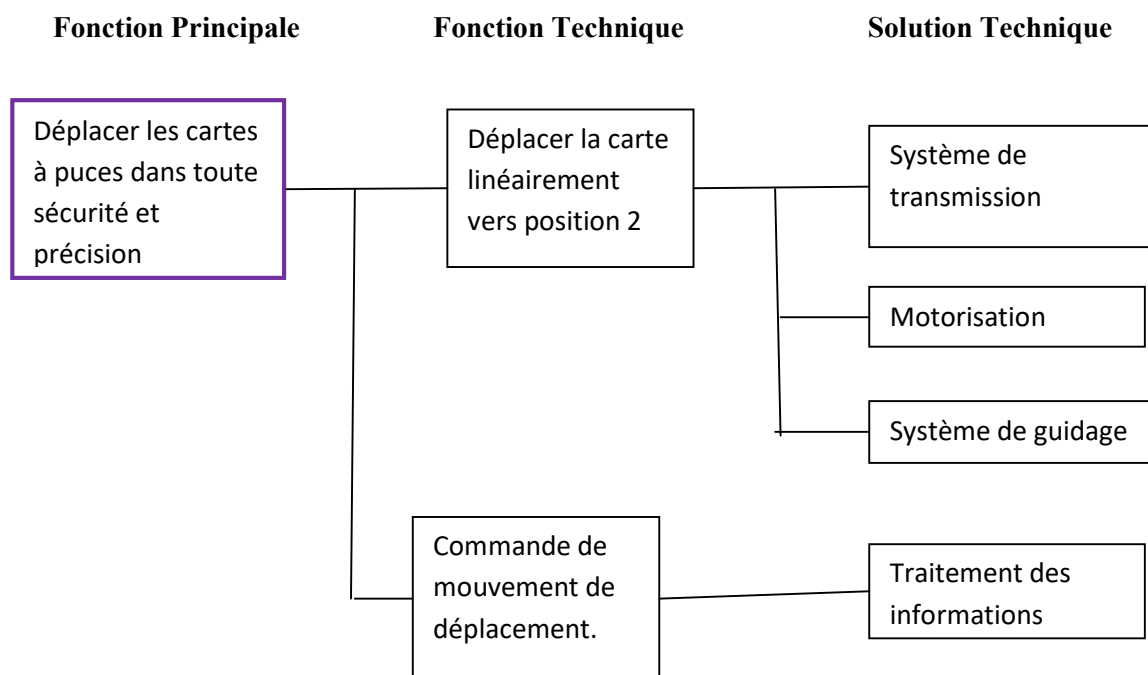


Figure IV.4: Diagramme FAST

IV.2.2 Cahier de charge fonctionnelle

FS	Expressions	Critères	Niveaux flexibilité
FP1	déplacer les cartes à puces vers les positions de manipulation dans toutes sécurités et précision	Distance de déplacement de charge	0.065m
		Accélération maximale de charge	13m/s ²
		Vitesse maximale de charge	0.65m/s
		Charge	1kg max
		Précision servo	±40μm
		Vitesse de rotation de moteur (vitesse maximale poulie courroie)	40000 tr/minute et 80m/s
		Puissance maximale	aprox 3.5kW
		Rapport de réducteur	r
		Tolérance de l'ajustement	0.01mm
FC1	réaliser la production dans les temps impartis	Temps de cycle de production	0.7s
FC2	être accessible et esthétique	Le prix de machine par rapport le temps de fabrications des cartes à puce par heure	66 000USD ; 5000cartes/heure
		Poids de machine	Environ 1500kg
		Nombre des magasins d'alimentation	2 magasins
		Capacité des magasins	500 cartes chacun
		Dimensions de machine	L4.3*W1.15*H1.85m
FC3	utiliser l'énergie électrique	Alimentation	AC220V 50/60Hz 20A
		Tension	220/380 V
		Type de technologie	servomoteur
FC4	respecter les normes de sécurité stipulée	Norme de sécurité	AFNOR, ISO...
FC5	résister au milieu ambiant	Température	25 ≤ T°C ≤ 40
FC6	panneau de commande accessible et facile à utiliser	Accessibilité de commande	Double axe +PC
		Operateurs	une personne
FC7	respecter l'environnement	Recyclage	Utiliser les matériaux recyclables

Tableau IV.1: Cahier de charge fonctionnelle

IV.1 Application d'organigramme sur la machine

Etape 1 : Objectifs de déplacement

Données :

- Distance à parcourir : $X = 0.065m$
- Temps de déplacement : $T = 0.2s$
- Répétabilité de positionnement $\pm 40\mu m = 80\mu m$
- Vitesse maximale poulie courroie 40 000tr/mn et 80m/s

Choix de l'accélération et de la vitesse maximale

Cette application concerne des déplacements point à point ; ce qui nécessite l'utilisation de la loi du triangle. Mais en raison de la tolérance serrée de répétabilité, nous utiliserons la règle de contrôle du sinus carré qui offre une approche douce du point d'arrêt, garantissant une meilleure précision. Cela assure une augmentation de l'accélération (le double de celle de la règle du triangle) mais une vitesse constante.

Calculs :

- $\alpha = \frac{8X}{T^2} = \frac{8 \cdot 0.065}{0.2^2} = 13m/s^2$
- $V_{max} = \frac{2X}{T} = \frac{2 \cdot 0.065}{0.2} = 0.65m/s$

L'accélération maximale de $13m/s^2$ n'est requise que de manière transitoire. Cependant, le moteur doit être capable de la fournir. Les deux figures suivant montrent les lois de commandes en triangle et sinus carré compatibles avec le cahier des charges

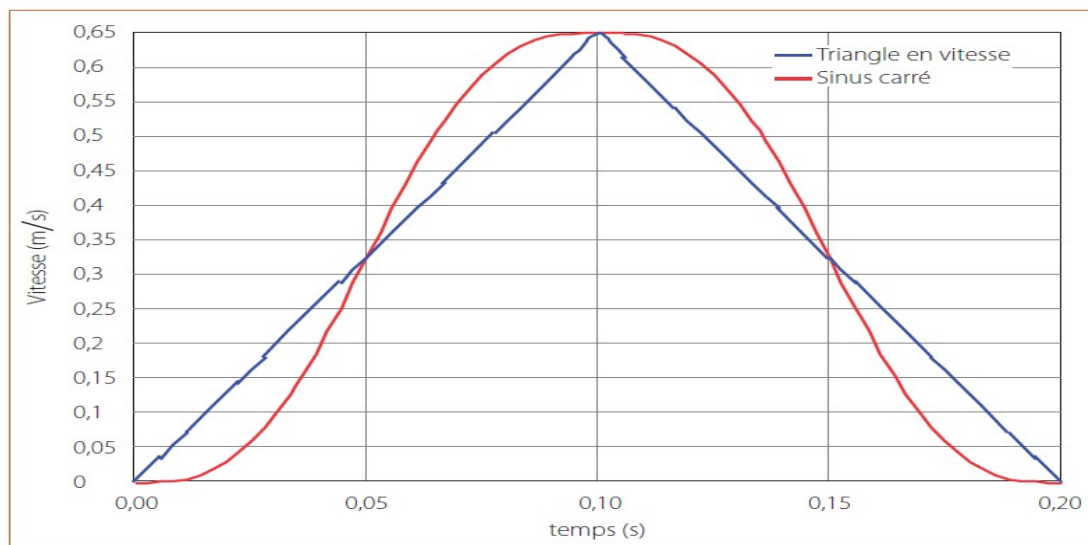


Figure IV.5: Vitesse lois de sinus carrée

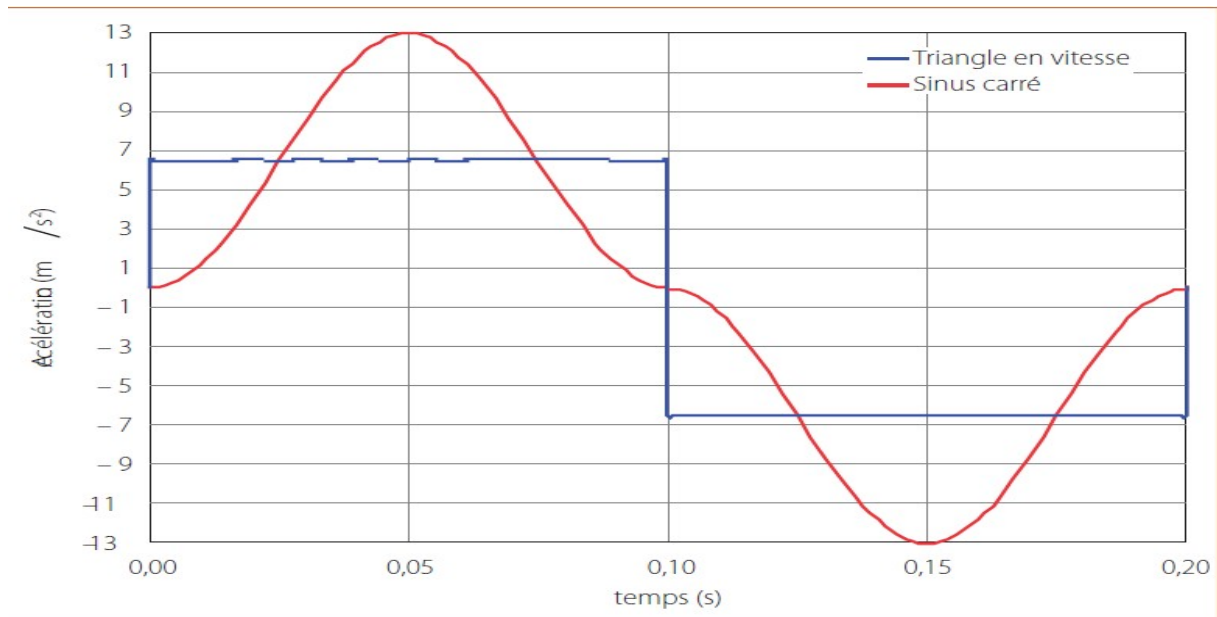


Figure IV.6: Loi sinus carrée en accélération

Etape 2 : Estimation de la puissance pour déplacer la charge

Ce calcul permet de prédéfinir la gamme dans laquelle le moteur sera choisi. On fait le calcul dans le cas le plus défavorable à chaque fois.

Données :

- Vitesse maximale de la charge : $V_{max} = 0.65\text{m/s}$
- Accélération de la charge : $\alpha_{max} = 13\text{m/s}^2$
- Effort sur la charge : $F = 10\text{N}$
- Masse de la charge : $M = 1\text{kg}$
- Rendement global estimé de la chaîne cinématique : $\eta = 0.8$

Calculs :

- Puissance d'accélération :

$$P_a = M\alpha V_{max} = 1 * 13 * 0.65 = \mathbf{8.45W}$$

- Puissance permanente :

$$P_p = \frac{FV_{max}}{\eta} = \frac{10*0.65}{0.8} = \mathbf{8.125W}$$

- Puissance totale :

$$P_t = (M\alpha V_{max}) + \left(\frac{FV_{max}}{\eta}\right) = 8.125 + 8.45 = \mathbf{16.575 \approx 17W}$$

Puisque nous déplaçons de petites masses et que les forces sont minimales, la valeur basse est attendue. N'oubliez pas que nous allons ajouter la puissance nécessaire pour accélérer le moteur, car cette puissance n'est pas négligeable

Etape 3 : Présélection d'un réducteur rapport de réduction r

Gain de vitesse de la chaîne cinématique :

$$\lambda = \frac{V}{\omega_m} = \frac{R_p}{r} \rightarrow r = \frac{R_p * \omega_m}{V}$$

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

$$r = \frac{R_p * \omega_m}{V} = \frac{0.065 * 419}{0.65} = \mathbf{41.9}$$

La gamme de réducteurs à faible jeu Alpha SP+ offre des réducteur à deux étages ; avec des rapports de réduction de 16, 20, 25, 28, 32, 35, 40, 50, 64,70 et 100. On choisit le coefficient de réduction le plus proche, soit $r = 40$, d'où l'on déduit la vitesse maximale pour le moteur

$$\omega_m = \frac{V * r}{R_p} = \frac{0.65 * 40}{0.065} = \mathbf{400rads^{-1}} = \mathbf{3819tr/min}$$

Vitesse maximale en sortie de réducteur

$$\omega_r = \frac{\omega_m}{r} = \frac{400}{40} = \mathbf{10rads^{-1}} = \mathbf{95.5tr/min}$$

Jeu du réducteur en option « jeu réduit » : 4' (couple moyen), correspondant à un déplacement linéaire :

$$\Delta x = \Delta \theta R_p = \frac{4 * \pi * R_p}{60 * 180} = \mathbf{7.563 * 10^{-4}} = \mathbf{75.63\mu m}$$

Dans ce cas, la valeur calculée est dans la limite de la valeur de la répétabilité 80 μ m. Le déplacement ayant toujours lieu dans le même sens, le jeu n'intervient pas sur la précision de positionnement. On conserve le rapport de réduction présélectionné $r = 40$ pour l'instant.

Inertie de réducteur : SP+ 060MF- B11 : $J_r = \mathbf{0.057 * 10^{-4}kg.m^2}$

Etape 4 : Calcul du couple moteur nécessaire pour déplacer la charge

Gain de vitesse du transformateur de mouvement poulie – courroie :

$$k = \frac{V}{\omega_r} = R_p = \mathbf{0.065m}$$

Données :

- Accélération de la charge : $\alpha = 13m/s^2$
- Effort sur la charge : $F = 10N$
- Gain en vitesse de la chaine cinématique :

$$\lambda = \frac{k}{r} = \frac{R_p}{r} = \frac{V}{\omega_m} = \frac{0.065}{40} = 1.625 * 10^{-3}$$

- Rendement global estime : $\eta = 0.8$
- Inertie du transformateur de mouvement : $J_t = 8 * 10^{-3}kg.m^2$

Calculs :

- inertie de la charge ramenée à l'arbre moteur :

$$J_c = \frac{(J_t + k^2M)}{r^2} = \frac{8*10^{-3} + 0.065^2*1}{40^2} = 7.64 * 10^{-6}kg.m^2$$

- Couple d'accélération :

$$C_{ma} = \frac{J_c * \alpha}{\lambda} = \frac{7.64*10^{-6}*13}{1.625*10^{-3}} = 0.061N.m$$

- Couple permanent :

$$C_{mp} = \frac{F*\lambda}{\eta} = \frac{10*1.625*10^{-3}}{0.8} = 0.02N.m$$

- Couple crête :

$$C_{max} = \left(\frac{J_c * \alpha}{\lambda} \right) + \left(\frac{F * \lambda}{\eta} \right) = 0.02 + 0.061 = 0.081N.m$$

On remarque que le couple permanent est plus petit que le couple d'accélération, ce qui signifie que le couple d'accélération est plus important.

Etape 5 : Présélection d'un moteur

On choisit un moteur dont le couple permanent est supérieur au couple crête déterminé en **étape 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. Plus un moteur est gros, plus il consomme de couple pour s'accélérer lui-même.

On présélectionne le servo moteur : **SMGMMV – A3A**

- Vitesse nominale : 6 000 *tr/min*
- Couple nominal : 0,0955 *N.m*
- Inertie du rotor : $J_m = 0.00668 * 10^{-4}kg.m^2$
- Puissance nominale : 30 *W*

Etape 6 : Calcul du couple nécessaire en tenant compte du moteur**Données :**

- Accélération de la charge : $\alpha = 13m/s^2$
- Effort sur la charge : $F = 10N$
- Coefficient de transmission de la chaine cinématique:

$$\lambda = \frac{k}{r} = \frac{V}{\omega_m} = \frac{R_p}{r} = \mathbf{1.625 * 10^{-3}}$$

- Rendement global estime : $\eta = 0.8$
- Inertie moteur : $J_m = 0.00668 * 10^{-4}kg.m^2$
- Inertie réducteur : $J_r = 0.057 * 10^{-4}kg.m^2$
- inertie de la charge ramenée à l'arbre moteur : $J_c = 7.64 * 10^{-6}kg.m^2$

Calculs :

- Inertie équivalente totale ramenée à l'arbre moteur :

$$J_{eq} = J_m + J_r + \frac{(J_t + k^2M)}{r^2} = J_m + J_r + J_c = \mathbf{1.401 * 10^{-5}kg.m^2}$$

- Couple d'accélération :

$$C_a = \frac{J_{eq} * \alpha}{\lambda} = \frac{1.401 * 10^{-5} * 13}{1.625 * 10^{-3}} = \mathbf{0.112N.m}$$

Couple d'accélération supérieure à couple nominal de moteur

- Couple permanent :

$$C_{mp} = \frac{F * \lambda}{\eta} = \frac{10 * 1.625 * 10^{-3}}{0.8} = \mathbf{0.02N.m}$$

- Couple crête :

$$C_{max} = \left(\frac{J_{eq} * \alpha}{\lambda} \right) + \left(\frac{F * \lambda}{\eta} \right) = \mathbf{0.132N.m}$$

Couple crête supérieure à couple nominal**Etape 5 : -2 Présélection d'un moteur**

On présélectionne le servo moteur : **SGM7A – A5A**

- Vitesse nominale : $3\ 000\ tr/min$
- Couple nominal : $0,159\ N.m$
- Inertie du rotor : $J_m = 0.0217 * 10^{-4}kg.m^2$

- Puissance nominale : 50 W

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

Données :

- Accélération de la charge : $\alpha = 13m/s^2$
- Effort sur la charge : $F = 10N$
- Coefficient de transmission de la chaine cinématique:

$$\lambda = \frac{k}{r} = \frac{V}{\omega_m} = \frac{R_p}{r} = 1.625 * 10^{-3}$$

- Rendement global estime : $\eta = 0.8$
- Inertie moteur : $J_m = 0.0217 * 10^{-4}kg.m^2$
- Inertie réducteur : $J_r = 0.057 * 10^{-4}kg.m^2$
- inertie de la charge ramenée à l'arbre moteur : $J_c = 7.64 * 10^{-6}kg.m^2$

Calculs :

- Inertie équivalente totale ramenée à l'arbre moteur :

$$J_{eq} = J_m + J_r + \frac{(J_t + k^2M)}{r^2} = J_m + J_r + J_c = 1.551 * 10^{-5}kg.m^2$$

- Couple d'accélération :

$$C_a = \frac{J_{eq} * \alpha}{\lambda} = \frac{1.401 * 10^{-5} * 13}{1.625 * 10^{-3}} = 0.124N.m$$

Couple d'accélération OK

- Couple permanent :

$$C_{mp} = \frac{F * \lambda}{\eta} = \frac{10 * 1.625 * 10^{-3}}{0.8} = 0.02N.m$$

- Couple crête :

$$C_{max} = \left(\frac{J_{eq} * \alpha}{\lambda} \right) + \left(\frac{F * \lambda}{\eta} \right) = 0.144N.m$$

Couple crête OK

Etape 7:-2 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 y a deux mises en garde à faire lorsque l'on considère le maximum de l'application et sa relation avec la zone de fonctionnement intermittent du moteur :

- 1) La durée du couple maximal doit être comprise dans la limite de temps définie par le fabricant du moteur pour le fonctionnement intermittent.
- 2) Le couple maximal et la vitesse maximale doivent tous deux se situer dans la zone d'intermittence. Si l'un ou l'autre de ces paramètres se situe en dehors des limites de fonctionnement du moteur, ce dernier risque d'être endommagé.

Dans notre cas la vitesse de moteur calculé est inférieure à la vitesse maximale de moteur mais supérieure à la vitesse nominale

Etape 8 : Vérification du rapport d'inertie

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

$$\text{Rapport d'inertie} = \frac{J_c}{J_m + J_r} = \frac{7.64 \cdot 10^{-6}}{0.0217 \cdot 10^{-4} + 0.057 \cdot 10^{-4}} = \mathbf{0.97:1}$$

Inférieure à 6 : 1

Etape 9 : Vérification du couple thermique

Lorsque le cycle de fonctionnement du moteur laisse peu de temps pour le refroidissement, le temps de refroidissement, le couple équivalent thermique est déterminé. Couple équivalent thermique, qui ne doit pas dépasser le couple permanent du moteur.

- Couple en phase dynamique :

$$C_{ma} = \frac{J_{eq} \cdot \alpha}{\lambda} = \frac{1.551 \cdot 10^{-5} \cdot 6.5}{1.625 \cdot 10^{-3}} = \mathbf{0.062 N \cdot m}$$

- Couple thermique :

$$C_{th} = \sqrt{\frac{\sum C_i t_i}{\sum t_i}} = \sqrt{\frac{0.062 \cdot 0.1 + 0.062 \cdot 0.1}{0.7}} = \mathbf{0.133 N \cdot m}$$

Cette valeur est inférieure de couple nominale, ce qui signifie que nous restons dans la zone permanente (application à haute vitesse et à faible couple efficace.)

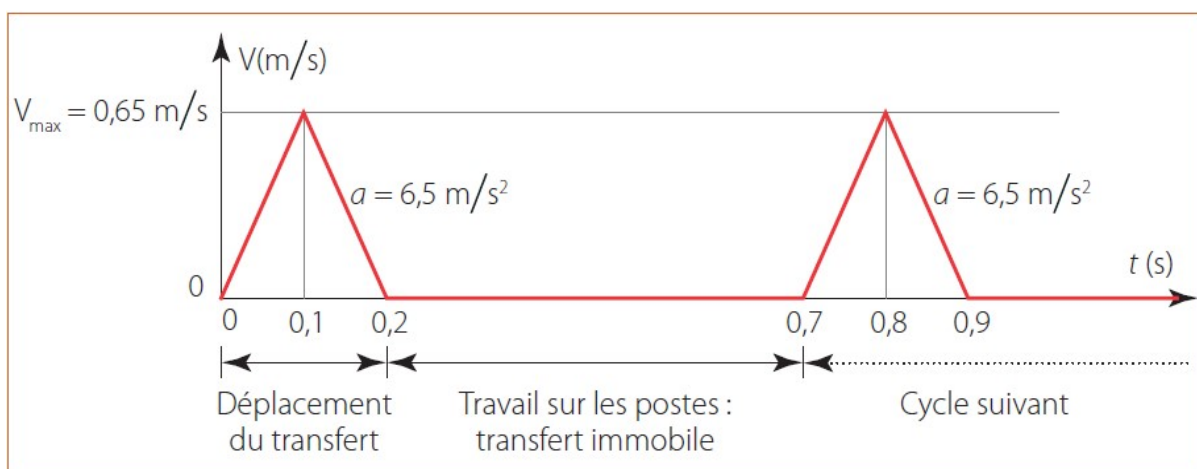


Figure IV.7: Le cycle de transfert linéaire

IV.1.1 Le choix des solutions techniques

Après avoir fait tous les calculs nécessaires, nous sommes censés choisir les bonnes solutions techniques en tenant compte de toutes les contraintes.

IV.1.1.1 Solution choisit auprès les calculs

Après les calculs, voici la solution technique

- Moteur Yaskawa : **SGM7A – A5A** :
 - Vitesse nominale : 3 000 *tr/min*
 - Vitesse maximale : 6 000 *tr/min*
 - Couple nominal : 0,159 *N.m*
 - Couple maximal : 0,557 *N.m*
 - Inertie du rotor : $J_m = 0.0217 * 10^{-4} kg.m^2$
 - Puissance de nominale : 50 *W*

- Réducteur Wittenstein à jeu réduit : **SP+060MC-B11** :
 - Inertie réducteur : $J_r = 0.057 * 10^{-4} kg.m^2$
 - Rapport de réducteur $r = 40$; Jeu réduit $\leq 4'$

IV.1.1.2 Solution alternative : pour atteindre la marge confortable de vitesse (environ 25%)

Pour diminuer la vitesse il faut diminuer le rapport de réduction.

Calculons le rapport d'inertie avec $r = 16$; $J_r = 0.077 * 10^{-4} kg.m^2$

$$\omega_m = \frac{V * r}{R_p} = \frac{0.65 * 16}{0.065} = 160 \text{rads}^{-1} = 1527 \text{tr/min}$$

Cette vitesse est toujours dans la zone permanente avec la marge d'environ 25% (moteur performant).

Vitesse maximale en sortie de réducteur :

$$\omega_r = \frac{\omega_m}{r} = \frac{160}{16} = 10 \text{rads}^{-1} = 95.5 \text{tr/min}$$

Coefficient de transmission de la chaine cinématique:

$$\lambda = \frac{k}{r} = \frac{V}{\omega_m} = \frac{R_p}{r} = 4.063 * 10^{-3}$$

Calculs

- Inertie équivalente totale ramenée a l'arbre moteur :

$$J_{eq} = J_m + J_r + \frac{(J_t + k^2 M)}{r^2} = J_m + J_r + J_c = 5.762 * 10^{-5} \text{kg.m}^2$$

- Couple d'accélération :

$$C_a = \frac{J_{eq} * \alpha}{\lambda} = \frac{5.762 * 10^{-5} * 13}{4.063 * 10^{-3}} = 0.184 \text{N.m}$$

- Couple permanent :

$$C_{mp} = \frac{F * \lambda}{\eta} = \frac{10 * 4.063 * 10^{-3}}{0.8} = 0.051 \text{N.m}$$

- Couple crête :

$$C_{max} = \left(\frac{J_{eq} * \alpha}{\lambda} \right) + \left(\frac{F * \lambda}{\eta} \right) = 0.235 \text{N.m}$$

Couple crête supérieure à couple nominal de moteur

On sélectionne un moteur :

- Moteur Yaskawa : **SGM7A – 01A** :
 - Vitesse nominale : 3 000 *tr/min*
 - Vitesse maximale : 6 000 *tr/min*
 - Couple nominal : 0,318 *N.m*
 - Couple maximal : 1.11 *N.m*
 - Inertie du rotor : $J_m = 0.0337 * 10^{-4} \text{kg.m}^2$
 - Puissance de nominale : 100 *W*

Calculs

- Inertie équivalente totale ramenée à l'arbre moteur :

$$J_{eq} = J_m + J_r + \frac{(J_t + k^2 M)}{r^2} = J_m + J_r + J_c = 5.882 * 10^{-5} \text{kg.m}^2$$

- Couple d'accélération :

$$C_a = \frac{J_{eq} * \alpha}{\lambda} = \frac{5.762 * 10^{-5} * 13}{4.063 * 10^{-3}} = 0.188 \text{N.m}$$

- Couple permanent :

$$C_{mp} = \frac{F * \lambda}{\eta} = \frac{10 * 4.063 * 10^{-3}}{0.8} = 0.051 \text{N.m}$$

- Couple crête :

$$C_{max} = \left(\frac{J_{eq} * \alpha}{\lambda} \right) + \left(\frac{F * \lambda}{\eta} \right) = \mathbf{0.239N.m}$$

- Calcul de rapport d'inertie :

$$\text{Rapport d'inertie} = \frac{\frac{k^2 * M + J_t}{r^2}}{J_m + J_r} = \frac{\frac{0.065^2 * 1 + 8 * 10^{-3}}{16^2}}{0.0337 * 10^{-4} + 0.077 * 10^{-4}} = \mathbf{4.31:1}$$

Ce rapport est encore inférieure à 6 :1

Calcul de couple thermique pour ce rapport de réduction :

- Couple en phase dynamique :

$$C_{ma} = \frac{J_{eq} * \alpha}{\lambda} = \frac{5.762 * 10^{-5} * 6.5}{4.063 * 10^{-3}} = \mathbf{0.09N.m}$$

- Couple thermique :

$$C_{th} = \sqrt{\frac{\sum C_i t_i}{\sum t_i}} = \sqrt{\frac{0.09 * 0.1 + 0.09 * 0.1}{0.7}} = \mathbf{0.16N.m}$$

Le couple thermique est dans la zone permanent ; ce rapport de réducteur est acceptable alors notre solution technique est :

- Moteur Yaskawa : **SGM7A – 01A** :
 - Vitesse nominale : 3 000 *tr/min*
 - Vitesse maximale : 6 000 *tr/min*
 - Couple nominal : 0,318 *N.m*
 - Couple maximal : 1.11 *N.m*
 - Inertie du rotor : $J_m = 0.0337 * 10^{-4} kg.m^2$
 - Puissance nominale : 100 *W*
- Réducteur Wittenstein à jeu réduit : **SP+060MC-B11** :
 - Inertie réducteur : $J_r = 0.077 * 10^{-4} kg.m^2$
 - Rapport de réducteur $r = 16$ Jeu réduit ≤ 4

On ajoute le moteur et réducteur dans la liste des moteurs choisi.

IV.1.1.3 Entraînement direct

L'entraînement direct élimine le jeu et réduit le nombre de composants mécaniques, ce qui rend le système plus petit, plus facile à entretenir et à manipuler et réduit également le coût. Il augmente également la précision de la position, de la vitesse et de la dynamique, ce dont notre

application a particulièrement besoin. Voyons si nous pouvons utiliser un entraînement direct dans notre cas.

Calculs :

1. Vitesse maximale de moteur :

$$\omega_m = \frac{V * r}{R_p} = \frac{0.65 * 1}{0.065} = \mathbf{10\text{rads}^{-1}} = \mathbf{95.5\text{tr/min}}$$

- inertie de la charge ramenée à l'arbre moteur :

$$J_c = \frac{(J_t + k^2 M)}{r^2} = \frac{8 * 10^{-3} + 0.065^2 * 1}{1^2} = \mathbf{0.012\text{kg.m}^2}$$

- Couple d'accélération :

$$C_{ma} = \frac{J_c * \alpha}{\lambda} = \frac{J_c * \alpha * r}{R_p} = \frac{0.012 * 13 * 1}{0.065} = \mathbf{2.445\text{N.m}}$$

- Couple permanent :

$$C_{mp} = \frac{F * \lambda}{\eta} = \frac{F * R_p}{r * \eta} = \frac{10 * 0.065}{0.8 * 1} = \mathbf{0.813\text{N.m}}$$

- Couple crête :

$$C_{max} = \left(\frac{J_c * \alpha}{\lambda} \right) + \left(\frac{F * \lambda}{\eta} \right) = 2.445 + 0.813 = \mathbf{3.258\text{N.m}}$$

Ce couple maximale nécessite un moteur plus grand que notre choix et avec l'inertie plus grand. Même si cette solution est valable, il ne faut pas oublier que nous voulons déplacer de petites quantités de charge horizontalement et qu'utiliser un moteur avec un couple plus élevé serait inutile.

IV.2 Comparaison des moteurs

Ce que le constructeur a choisi

La configuration installée sur la machine est la suivante:

Moteur *brushless* Infranor :

- Couple nominal : 0,54 Nm
- Vitesse maximale : 6 500 tr/min
- Inertie du rotor : $J_m = 1,5 * 10^{-5} \text{kgm}^2$
- Puissance : 367 W

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

- Rapport de réduction $r = 12$
- Jeu $< 5'$
- Inertie : $J_r = 4 * 10^{-6} \text{kgm}^2$

Moteur		Moteur choisit par constructeur	Moteur choisit après calculs	
		Brushless Infranor	Yaskawa servo brushless SGM7A- A5A	Yaskawa servo brushless SGM7A-01A
Réducteur A faible jeu	Type	MHP 65-Ra 1/12	SP+060MC-B11	SP+060MC-B11
	Jeu réduit	$< 5'$	$\leq 4'$	$\leq 4'$
	Inertie J_r	$0.04 * 10^{-4} kgm^2$	$0.057 * 10^{-4} kgm^2$	$0.077 * 10^{-4} kgm^2$
	Rapport r	12	40	16
Vitesse maximale de moteur		6500tr/min	6000tr/min	6000tr/min
Couple nominal C_m		0.54N.m	0.159N.m	0.318N.m
Inertie de moteur J_m		$0.15 * 10^{-4} kgm^2$	$0.0217 * 10^{-4} kgm^2$	$0.0337 * 10^{-4} kgm^2$
Puissance		360W	50W	100W
Répétabilité		$< 94\mu m$	$< 76\mu m$	$< 76\mu m$

Tableau IV.2: Tableau de comparaison des choix

La solution choisit par le constructeur est :

1. Plus puissant que les autres moteurs choisis après les calculs (360W contre 50W et 100W)
2. Le couple est très élevé pour l'application ce qui veut dire que le moteur est plus gros donc plus cher
3. Un réducteur à faible jeu entraînant un jeu linéaire $< 94 \mu m$. Il est à noter que ce jeu maximal est supérieur à celui autorisé par le cahier des charges.

En conclusion, les moteurs choisis après les calculs ont une répétabilité plus serrée par rapport à celui choisi par le concepteur. Ils sont également plus petits, ce qui signifie qu'ils économisent de l'espace, de l'énergie et de l'argent, ce qui est notre principal objectif.

CONCLUSION

Les solutions pour le dimensionnement du moteur sont nombreuses et ne sont limitées que par le choix du constructeur. Il faut tenir compte du fait qu'après avoir choisi les solutions techniques, elles doivent également être économiques en termes de stockage et de fourniture de pièces de rechange et de réduction de la maintenance.

Le surdimensionnement d'un moteur est la règle car le sous-dimensionnement cause plus de problèmes que de solutions. Dans certains cas, comme dans celui-ci, le redimensionnement est impossible en raison des dimensions déjà imposées de la machine et de la répétabilité de la position.

Au fil des ans, les ingénieurs ont trouvé des solutions pour réduire le processus de sélection des moteurs, qui est long et fastidieux. Dans le cadre de ce travail, j'ai également pu découvrir les différents programmes informatiques que les ingénieurs ont créés pour faciliter le processus de dimensionnement des moteurs, qui prend beaucoup de temps

Ceci est dû à la quantité infinie de moteurs disponibles dans l'industrie. Certains de ces programmes sont intégrés dans le site web du fabricant de moteurs pour faciliter le travail. Ces programmes comprennent VisualSizer Professional, Danaher Motioneering et Alpha gears Cymex (tous basés sur Windows).

ANNEXE

Annexe- A : L'extrait de réducteur Wittenstein Alpha+ SP. Prix : 250USD

SP+ 060 MF 2 étages

			2 étages										
Rapport de réduction	i		16	20	25	28	32	35	40	50	64	70	100
Couple max. ^{1) 2) 4)}	T_{20}	Nm	57	57	67	57	57	67	57	67	48	56	48
Couple d'accélération max. ^{3) 4)} (max. 1000 cycles par heure)	T_{2B}	Nm	50	50	50	50	50	50	50	50	38	50	38
Couple nominal (avec n_{1N})	T_{2N}	Nm	38	40	40	40	38	40	40	40	31	40	31
Couple d'arrêt d'urgence ^{4) 5) 6)} (autorisé 1000 fois pendant la vie du réducteur)	T_{2Max}	Nm	109	109	109	109	109	109	109	109	109	109	100
Vitesse d'entrée moyenne autorisée (avec T_{2N} et une température ambiante de 20 °C) ⁶⁾	n_{1N}	tr/min	4400	4400	4400	4400	4400	4400	4400	4800	4800	5500	5500
Vitesse d'entrée max.	n_{1Max}	tr/min	8500	8500	8500	8500	8500	8500	8500	8500	8500	8500	8500
Moyenne du couple à vide ¹⁾ (avec $n_1 = 3000$ tr/min et à une température ambiante de 20 °C)	T_{012}	Nm	0,28	0,25	0,23	0,22	0,24	0,20	0,20	0,19	0,19	0,17	0,18
Jeu max.	j_1	arcmin	Standard ≤ 6 / Réduit ≤ 4										
Rigidité torsionnelle ¹⁾	C_{121}	Nm/arcmin	3,5										
Force axiale max. ³⁾	F_{2AMax}	N	2400										
Force transversale max. ³⁾	F_{2GMMax}	N	2800										
Couple de basculement max.	M_{2KMax}	Nm	152										
Rendement à pleine charge	η	%	94										

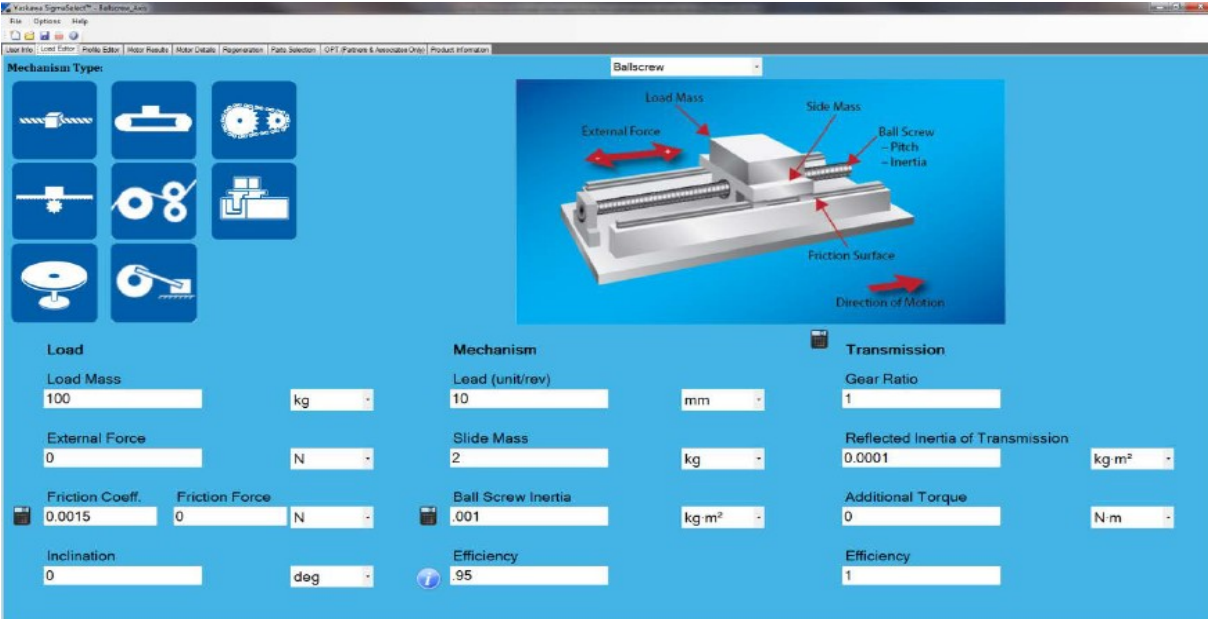
Rendement à pleine charge	η	%	94												
Durée de vie	L_h	h	> 20000												
Poids (avec bride d'adaptation standard)	m	kg	2												
Bruit de fonctionnement (avec le rapport de réduction de référence et la vitesse de rotation de référence. Valeurs spécifiques au rapport de réduction dans cymax®)	L_{FA}	dB(A)	≤ 57												
Température max. admissible du carter		°C	+90												
Température ambiante		°C	-15 à +40												
Lubrification			Lubrifié à vie												
Sens de rotation			Sens de rotation entrée et sortie identiques												
Indice de protection			IP 65												
Accouplement à soufflet métallique (Type de produit conseillé - Vérifier le dimensionnement cymax®)			BC2-00060AA016,000-X												
Diamètre d'alésage de l'accouplement côté application		mm	X = 012,000 - 035,000												
Moment d'inertie (ramené à l'arbre) Diamètre du moyeu de serrage [mm] Version à inertie optimisée disponible sur demande	B	11	J_1	kgcm ²	0,077	0,069	0,068	0,061	0,061	0,061	0,057	0,057	0,056	0,056	0,056
	C	14	J_1	kgcm ²	0,17	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15

Pour un dimensionnement détaillé, utiliser notre outil de dimensionnement cymax® - www.wittenstein-cymex.com¹⁾ Avec maxi 10 % F_{2AMax} ²⁾ Valable pour un diamètre d'accouplement standard³⁾ Valable au milieu de l'arbre ou de la bride, de sortie⁴⁾ En cas de température supérieure, merci de réduire la vitesse⁵⁾ Arbre lisse

Annexe-B : L'extrait de la gamme des moteurs SIGMA 7 Yaskawa. Prix : 5000USD

Rotary Servo Motor Model	Rated Power	Rated Torque	Peak Torque	Rated Speed	Max Speed	Rotor Inertia x10 ⁻⁴ kg·m ²	SGD7S- □□□□	SGD7S- □□□□	SGD7W- □□□□	SGD7S- □□□□	SGD7W- □□□□	
		Nm	Nm	rpm	rpm		100 VAC	200 VAC	200 VAC	400 VAC	400 VAC	
 SGMMV Low Inertia, Ultra-Small Capacity	SGMMV-A1A	10W	0.0318	0.0955	3000	6000	0.00272	R90F	R90A	1R6A, 2R8A		
	SGMMV-A2A	20W	0.0637	0.191	3000	6000	0.00466	R90F	R90A	1R6A, 2R8A		
	SGMMV-A3A	30W	0.0955	0.286	3000	6000	0.00668	2R1F	1R6A	1R6A, 2R8A	N/A	N/A
 SGM7A Low Inertia Small Capacity	SGM7A-A5A	50W	0.159	0.557	3000	6000	0.0217	R70F	R70A	1R6A, 2R8A		
	SGM7A-01A	100W	0.318	1.11	3000	6000	0.0337	R90F	R90A	1R6A, 2R8A		
	SGM7A-C2A	150W	0.477	1.67	3000	6000	0.0458	2R1F	1R6A	1R6A, 2R8A		
	SGM7A-02□	200W	0.637	2.23	3000	6000	0.139	2R1F	1R6A	1R6A, 2R8A	1R9D	2R6D
	SGM7A-04□	400W	1.27	4.46	3000	6000	0.216	2R8F	2R8A	1R6A, 2R8A, 7R6A	1R9D	2R6D, 5R4D
	SGM7A-06A	550W	1.75	6.69	3000	6000	0.315		5R5A	5R5A, 7R6A	N/A	N/A
	SGM7A-08□	600W	1.91	8.36	3000	6000	0.775	N/A	5R5A	5R5A, 7R6A	3R5D	2R6D, 5R4D
	SGM7A-10□	1.0kW	3.18	11.1	3000	6000	0.971		120A	N/A	3R5D	5R4D
 SGM7J Medium Inertia Small Capacity	SGM7J-A5A	50W	0.159	0.557	3000	6000	0.0395	R70F	R70A	1R6A, 2R8A		
	SGM7J-01A	100W	0.318	1.11	3000	6000	0.0659	R90F	R90A	1R6A, 2R8A	N/A	N/A
	SGM7J-C2A	150W	0.477	1.67	3000	6000	0.0915	2R1F	1R6A	1R6A, 2R8A		
	SGM7J-02□	200W	0.637	2.23	3000	6000	0.263	2R1F	1R6A	1R6A, 2R8A	1R9D	2R6D
	SGM7J-04□	400W	1.27	4.46	3000	6000	0.486	2R8F	2R8A	1R6A, 2R8A, 7R6A	1R9D	2R6D, 5R4D
	SGM7J-06A	550W	1.91	6.69	3000	6000	0.8		5R5A	5R5A, 7R6A	N/A	
	SGM7J-08□	750W	2.39	8.36	3000	6000	1.59	N/A	5R5A	5R5A, 7R6A	3R5D	2R6D, 5R4D
	SGM7J-15D	1.5kW	4.77	14.3	3000	6000	4.02		N/A	N/A	5R4D	5R4D
SGM7P-01A	100W	0.318	0.955	3000	6000	0.0592	R90F	R90A	1R6A, 2R8A			

Annexe C : L'extrait de logiciel de dimensionnement des servos Yaskawa SigmaSelect



Mechanism Type:

Load

- Load Mass: 100 kg
- External Force: 0 N
- Friction Coeff.: 0.0015
- Friction Force: 0 N
- Inclination: 0 deg

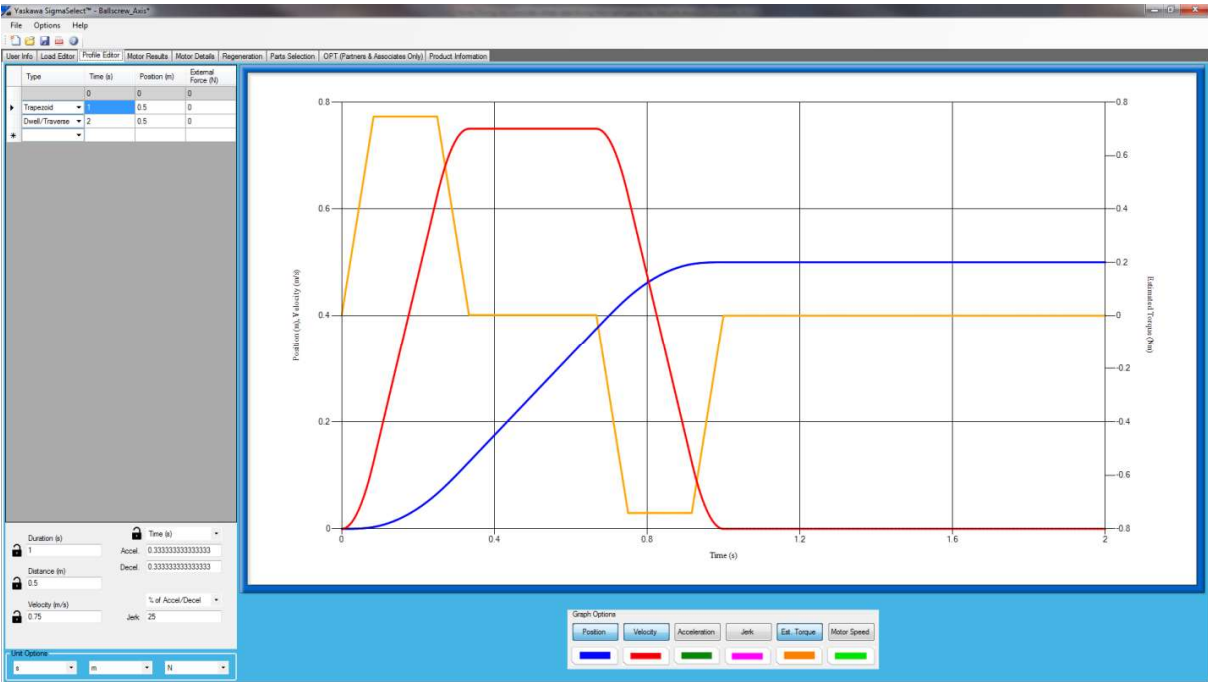
Mechanism

- Lead (unit/rev): 10 mm
- Slide Mass: 2 kg
- Ball Screw Inertia: .001 kg·m²
- Efficiency: .95

Transmission

- Gear Ratio: 1
- Reflected Inertia of Transmission: 0.0001 kg·m²
- Additional Torque: 0 N·m
- Efficiency: 1

Annexe D : Courbe de vitesse/couple issue du logiciel de dimensionnement des servos SigmaSelect de Yaskawa traçant la position (m) et la vitesse (m/s) sur l'axe vertical et le temps en secondes, sur l'axe horizontal.



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Voss, W. (2007). *A Comprehensible Guide to Servo Motor Sizing* (1st ed., Vol. 1). Van Duüren Media. <https://www.copperhilltech.com>
- [2] Binet, F. (2007, Septembre/Octobre). Le dimensionnement d'une motorisation d'axe (première partie). Techno méca.
- [3] Lewotsky, K (Ed.). (2017, October 31). *How to Size a Motor*. Automate. <https://www.automate.org/industry-insights/how-to-size-a-motor>.
- [4] Binet, F. (2007, Novembre/ Décembre). Le dimensionnement d'une motorisation d'axe (seconde partie). Techno méca.
- [5] Taillard, P & Teixido C. (2001, Janvier/Février). Guide de dimensionnement : Les actionneurs rotatifs et linéaires. Techno sans frontier
- [6] Hughes, A., & Drury, B. (2019). *Electric motors and drives: fundamentals, types and applications* (2nd ed.). Newnes, an imprint of Elsevier.
- [7] Repanich, N. A guide to motor sizing.