

LE MOTION CONTROL

INTELLIGENCE ET PERFORMANCE AU COEUR DES MACHINES



Imprimerie
papeterie
conditionnement



Textile



Manutention
étiquetage



Produits
électroniques



Alimentation

Cette Édition 2 du Guide Motion a été voulue par le comité de direction «Motion control» du Gimelec, qui depuis plus d'une dizaine d'années et de manière spécifique, permet aux industriels de la profession d'œuvrer ensemble en échangeant des points de vue, en comparant des expériences... en un mot en partageant la passion du motion control car on ne met pas de l'intelligence au cœur des machines sans passion.

Comme toutes les passions, celle du « Motion Control » doit se transmettre.

L'Édition 2 de ce guide prend en compte les évolutions technologiques depuis l'édition 1 de 2009, ainsi que les commentaires qui ont été apportés par les nombreux lecteurs de la première version et par les représentants du Ministère de l'Éducation nationale.

Pour nous tous, c'était une nouvelle occasion de faire profiter le lecteur des expériences cumulées d'entreprises ou de groupes reconnus.

Cet ouvrage couvre la totalité des aspects du contrôle du mouvement qui est, par nature, pluridisciplinaire: mécanique, électronique de puissance, électromécanique, automatisme, traitement du signal, économie d'énergie, sécurité

Pour cette édition, les auteurs ont essayé de rendre l'approche encore plus accessible, mais non simpliste afin que chacun puisse trouver les réponses précises à ses interrogations.

Cet ouvrage a été rendu possible par la collaboration des sociétés Leroy-Somer, Bosch Rexroth, Rockwell Automation, Schneider Electric, SEW Usocome et Siemens.

Il a été piloté et rédigé par la société JUXEO.

Qu'un grand merci soit donné aux membres du comité de direction «Motion Control» du Gimelec pour leur engagement leur expertise et leurs conseils qui ont permis de mener à bien cet ouvrage malgré des emplois du temps plus que chargés. Saluons également l'excellent climat entre les membres:

Frédéric Barbarit / Leroy-Somer

Bernard Giraud et Vincent Caulet / Bosch Rexroth

Michel Maissant et Manuel Ribier / Rockwell Automation

Dominique Leduc et Alexandre Perrat (Président du comité de direction) / Schneider Electric

Christian Sibileau et Olivier Anacker / SEW Usocome

Thierry Bouchaud et Jocelyn Peynet / Siemens

Christian Duquesne / Gimelec (Directeur marketing, technique et environnement)

Dominique Bazin / Gimelec (Délégué General Adjoint du Gimelec et animateur du comité)

Alexandre Perrat

(pour les membres du comité)



Dominique Bazin

(Délégué General Adjoint du Gimelec)



1- Préface.....	1
2- Introduction.....	2
3- L'entraînement.....	6
- 3-1- Le guidage	6
- 3-2- La conversion de mouvement.....	7
- 3-3- Les réducteurs	10
- 3-4- Les moteurs	16
- 3-5- Le dimensionnement des moteurs	41
- 3-6- Les freins	44
- 3-7- Les codeurs.....	46
- 3-8- L'offre moteur	49
4- La conversion de puissance.....	53
- 4-1- Les variateurs	53
- 4-2- L'offre.....	63
5- Les mouvements et fonctions	65
6- Le dimensionnement.....	71
- 6-1- La stratégie de commande.....	71
- 6-2- Les outils.....	79
7- La mise en œuvre des produits	82
- 7-1- L'installation	82
- 7-2- Le raccordement.....	84
- 7-3- La structure d'un système.....	87
- 7-4- Les architectures	88
- 7-5- Les bus de communication	90
- 7-6- Les entrées-sorties des variateurs	93

8- Le réglage de l'asservissement.....	95
9- Les applications industrielles.....	98
- 9-1- Maximisation de la production d'électricité d'une centrale photovoltaïque	99
- 9-2- Manutention : Système de levage d'une rame TGV complète.....	100
- 9-3- Ensacheuse horizontale sur base de servomoteurs avec variateurs intégrés.....	101
- 9-4- Solution complète (matériels et applicatifs) de portique de manutention	102
- 9-5- ROBOTIQUE et PACKAGING : Intégration des robots Delta dans les lignes de machines d'emballages	103
- 9-6- THERMOFORMAGE : Solution globale et ouverte d'automatisme et d'entraînement	104
- 9-7- Machine d'impression sérigraphie 2 couleurs	105
- 9-8- Machine évolutive d'étiquetage de bouteilles.....	106
- 9-9- Convoyeur avec économies grâce à technologie Movigear®	107
- 9-10- Installation de conditionnement et d'emballage de lames de parquet stratifié.....	108
- 9-11- Ligne d'impression «commercial».....	109
- 9-12- Machine de bobinage de fibres synthétiques	110
10- Les économies d'énergie.....	111
11- La sécurité.....	115
- 11-1- Les exigences.....	115
- 11-2- Les fonctions intégrées.....	116
12- Conclusion.....	120
13- Glossaire.....	122

Le «Motion Control» ou contrôle de mouvement... un intérêt incontesté

Le marketing produit et le design intervenant de plus en plus dans le succès commercial et financier d'un produit en orientant le choix du consommateur, les industriels doivent faire face à un marché très fluctuant et volatil.

Pour répondre aux attentes du client (en terme de formats, de couleurs, de textures, de design, de goûts...), ils doivent investir dans des outils de production et des machines évolutifs, flexibles, de plus en plus performants avec un taux de rendement synthétique (TRS) le plus élevé possible.

Cet investissement doit alors se faire de façon judicieuse et doit aussi être rentabilisé au plus vite. Les cadences machines doivent aussi être de plus en plus élevées, avec des précisions de plus en plus serrées afin de réduire les rebuts et augmenter la qualité du produit fini. Une maintenance facilitée et rapide est également recherchée, ainsi qu'une transparence de l'information aux différentes strates de l'entreprise afin que les décisions puissent être prises en temps réel, tant au niveau du personnel de production et maintenance, qu'au niveau direction générale de l'entreprise. Ceci au travers d'outils de suivi de production et d'ordonnancement, d'outils qualité et de traçabilité, indispensables à la survie des usines.

Les fabricants de machines et intégrateurs doivent apporter toutes les réponses à ces contraintes et enjeux majeurs. C'est pourquoi les machines évoluent dans leurs architectures matérielles et logicielles. Les solutions traditionnelles purement mécaniques et/ou basées essentiellement sur des technologies pneumatiques ou hydrauliques sont en perte de vitesse.

Ces anciennes technologies sont inadaptées à la flexibilité exigée, sont limitées en performances en termes de vitesse, accélération et répétabilité, et laissent ainsi place à de nouvelles technologies articulées autour de la motorisation électrique et des actionneurs rotatifs et linéaires associés.

Face à ces exigences, les solutions de contrôle de mouvement communément appelées « Motion Control » apportent la convergence des fonctions et des matériels pour :

- faciliter l'interfaçage,
- simplifier le paramétrage et la mise en service,
- minimiser les coûts machine et de possession,
- mutualiser les compétences,
- réaliser une combinaison synergique et systémique de la mécanique, de l'électronique et de l'informatique temps réel (mécatronique),
- décliner l'offre en solutions par application, sur une plate-forme matérielle standard et les bibliothèques de fonctions technologiques .

La structure du document doit permettre une lecture linéaire ou contextuelle et a pour vocation de répondre aux interrogations des industriels, fabricants de machines et intégrateurs. Il est à caractère pédagogique, et permet aux automaticiens généralistes de mieux comprendre et appréhender les problématiques d'intégration de ces solutions technologiques innovantes.

Les mécaniciens des bureaux d'études trouveront également dans ce référentiel un exposé exhaustif des solutions de motorisation électrique. Ils pourront apprécier l'approche didactique et applicative afin de mieux cerner le champ d'application du Motion control.

Les étudiants d'écoles d'ingénieurs ou d'universités technologiques, ainsi que les élèves de BTS pourront également se faire une très bonne idée du sujet, et pénétrer ainsi dans le monde industriel, au sein des machines de production.

Le Motion Control est l'intégration matérielle et logicielle qui s'articule autour d'un contrôleur de mouvement, appelé encore carte d'axes ou commande numérique, qui pilote des variateurs de vitesse (ou «servodrive»), assurant le contrôle de puissance et les asservissements des moteurs ou servomoteurs qui équipent ces machines.

Les fournisseurs d'automatismes et de solutions d'entraînement proposent ici de faire un état des lieux de ces solutions industrielles, en passant en revue les technologies des moteurs, des variateurs, des alimentations, des contrôleurs de mouvement.

La mise en oeuvre de ces produits avec les tendances technologiques des réseaux industriels, les différentes architectures matérielles et les fonctionnalités-types du contrôle de mouvement qu'on retrouve au cœur des machines, sont abordées de façon détaillée.

Le lecteur pourra également prendre connaissance d'applications industrielles concrètes réalisées par les auteurs de cet ouvrage.

Enfin, les solutions de sécurité-machine et les économies d'énergie donnent les axes majeurs d'orientation des fabricants de solutions d'automatisme et/ou d'entraînement pour répondre aux attentes des industriels et fabricants de machines.

Nous vous proposons de pénétrer dans cet univers et de vous familiariser avec le « Motion Control », qui apporte les performances et les innovations incontournables au cœur de vos machines, pour rester compétitif.

Les processus industriels sont la combinaison d'opérations plus ou moins complexes qui selon les applications auront des performances différentes.

La Figure 1 positionne les applications en trois familles:

- contrôle du moteur
- contrôle du mouvement
- contrôle des trajectoires.

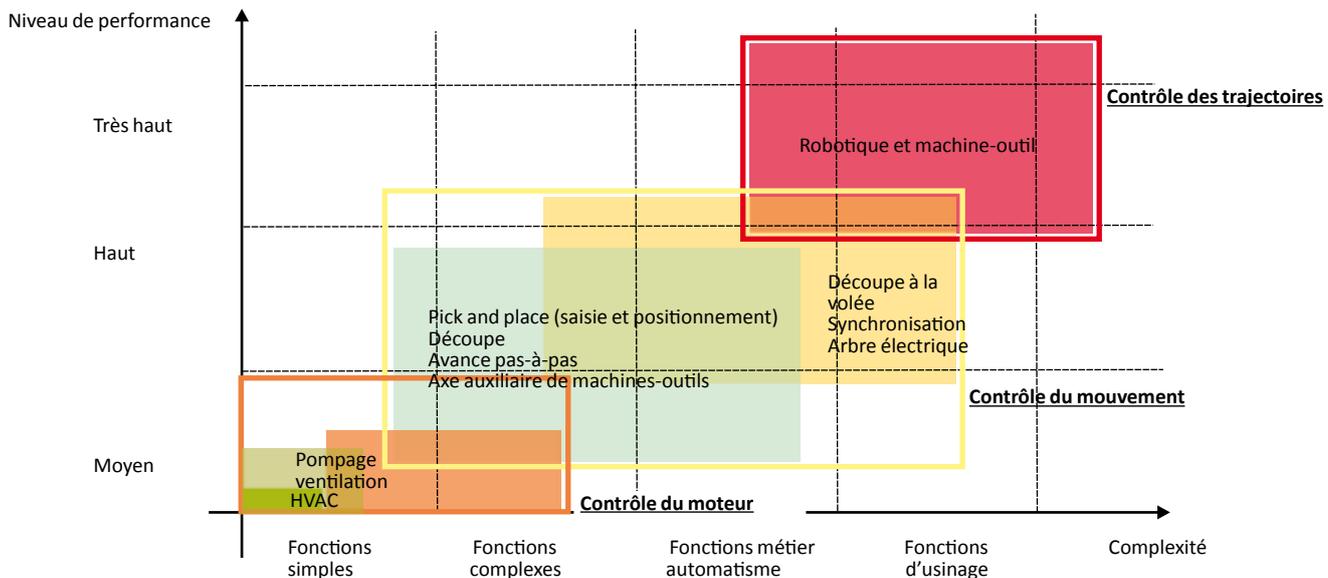


Figure 1 Positionnement des applications

Le contrôle du moteur peut se faire de manière basique en tout ou rien par un contacteur ou de manière plus élaborée par un démarreur électronique ou un variateur de vitesse.

Le contrôle du mouvement exige des asservissements dotés de performances dynamiques élevées. La réponse est donnée par les servomoteurs: moteur à courant continu, moteur pas-à-pas, moteur asynchrone avec contrôle vectoriel de flux, servomoteur synchrone, moteur DC brushless, moteur linéaire ou moteur piézoélectrique, associés à des organes de régulation dotés de moyens de communication rapides.

Le contrôle de trajectoire est du domaine de la machine-outil qui réclame une très large plage de vitesse ou des coordinations de mouvement très précis et une tenue de positionnement extrêmement serrée. C'est le domaine de la commande numérique. Le bas du tableau est le domaine du contrôle du moteur qui est assuré par les variateurs de vitesse pour moteurs standard. Entre les deux est le domaine du contrôle du mouvement. Les frontières sont mouvantes et l'évolution des techniques fait que les do-

maines se recouvrent.

Le contrôle du mouvement peut se faire suivant un ou plusieurs axes, indépendants ou synchronisés avec un organe de la machine, par exemple dans la coupe à la volée.

Les asservissements portent le plus souvent sur le positionnement, mais aussi sur la vitesse ou sur le couple en fonction de l'application.

Le contrôle du mouvement réclame des temps de réponse les plus brefs possible, une bande passante large, c'est-à-dire la possibilité de suivre un signal de commande à fréquence élevée et une parfaite stabilité du système, souvent qualifiée par le mot robustesse.

Très souvent la machine réclame un couple élevé à basse vitesse ou à l'arrêt et, dans tous les cas, des possibilités d'accélération et d'arrêt très rapides sans dépassement.

Le but recherché est l'automatisation d'un process pour réaliser une tâche répétitive ou offrir la possibilité de modifier rapidement la configuration d'une machine, par exemple, pour l'ajustement des couteaux sur une machine de coupe.

Rapidité, précision, productivité et flexibilité sont les critères qui conduisent à adopter les solutions de contrôle de mouvement.

Historique

La commande du mouvement est une activité récente qui s'est développée dès l'apparition de l'électronique de puissance.

À l'origine, la machine-outil a été le secteur d'application exclusif et le contrôle du mouvement a été résolu avec des moteurs à courant continu.

Afin d'accroître les performances, dans les années 60, les constructeurs ont développé des moteurs particuliers comme les moteurs-disques et pour exploiter les possibilités dynamiques de ces moteurs, les fabricants de variateurs ont imaginé des solutions innovantes; citons le variateur Var 3000 Telemecanique produit à cette époque et qui utilisait déjà une technique à découpage d'une tension continue. L'association de ce moteur et de ce type de variateur permettait déjà une bande passante de l'ordre de la centaine de hertz.

Une autre technologie, développée en parallèle, dite moteur-couple à courant continu, utilisait des moteurs à aimants permanents, en général des ferrites. Ce type de moteur permettait des surcharges importantes à basse vitesse, ce qui est parfaitement adapté à la commande d'axe des machines-outils.

En effet, l'enlèvement de copeaux nécessite l'emploi de moteurs pouvant développer un fort couple à basse vitesse pendant des temps prolongés. Ces moteurs comportaient nécessairement des balais et un collecteur. La technique de commande la plus appropriée faisait appel à des variateurs réversibles à courant de circulation. La bande passante ne pouvait dépasser quelques dizaines de hertz. En raison des fortes capacités de surcharge de ces moteurs, les accélérations et décélérations des associations motovariateurs étaient particulièrement élevées.

Le développement de la commande de mouvement n'a réellement pris son essor qu'à partir des années 80.

Plusieurs facteurs ont contribué :

- l'utilisation de microprocesseurs dans les variateurs de vitesse,
- le développement de composants de puissance fiables et performants,
- le développement des moteurs synchrones ou à courant continu sans balais.

Les microprocesseurs ont permis de mettre en pratique des techniques de commande, connues, mais techniquement irréalisables avec une électronique analogique. Ainsi, il est devenu possible d'effectuer économiquement l'auto-pilotage des moteurs synchrones et asynchrones.

Les composants de puissance : transistors bipolaires, MOS-FET puis IGBT ont permis d'obtenir des variateurs robustes et fiables.

Le développement des moteurs actuels est l'extrapolation des moteurs-couples à courant continu. Le collecteur a disparu et les aimants sont constitués de terres rares. Les moteurs ainsi fabriqués sont extrêmement compacts et présentent de fortes capacités de surcharge.

L'association moteur et variateur permet d'obtenir économiquement les performances demandées : fort couple à basse vitesse, grande dynamique, bande passante élevée de plusieurs centaines de hertz, stabilité des systèmes complets et facilité de réglage.

Secteurs d'application

De nos jours la commande de mouvement s'est élargie bien au-delà de la machine-outil et s'est étendue à beaucoup d'applications dans les secteurs manufacturiers discontinus: robotique, travail de la tôle, manutention, assemblage, emballage, textile, imprimerie, semi-conducteur...

Les machines de production se sont automatisées. Ce qui était réalisé de manière mécanique s'effectue, à présent avec des axes synchronisés électriquement. Les cadences de production se sont accrues. On retrouve la commande de mouvement sur une multitude de machines, chacune comportant un ou plusieurs axes pour effectuer des opérations réclamant une forte dynamique comme :

- prendre et positionner,
- découper,
- réaliser des avances pas-à-pas,
- commander des axes auxiliaires de machine-outil,
- faire de la découpe à la volée,
- synchroniser des mouvements,
- etc.

Certaines de ces applications seront décrites en fin de cet ouvrage.

La machine-outil et la robotique restent des domaines privilégiés où les performances exigées sont les plus élevées. La commande de mouvement se situe un cran en dessous et est destinée à couvrir des fonctions complexes ou particulières à un métier donné.

La commande de mouvement apporte des solutions parfaitement adaptées dans des métiers divers comme :

- l'industrie textile,
- la manutention,
- l'imprimerie,
- l'emballage,
- la déformation et la découpe du métal,
- l'assemblage,
- etc.

Objectif de cet ouvrage

Pour obtenir la qualité du contrôle de mouvement exigée, les offreurs présentent des solutions complètes qui associent à une mécanique connue un réducteur, un moteur, un contrôleur et une interface. L'ensemble doit être soigneusement dimensionné et doit tenir compte des cycles de fonctionnement de la machine.

L'objectif de cet ouvrage est d'apporter des informations sur les technologies, les offres, les architectures, les bus de communication ainsi que la sécurité des machines.

Présentation

L'équipement d'une machine peut être divisé en deux familles de constituants : ceux qui convertissent l'énergie provenant du réseau en énergie mécanique et ceux qui traitent les signaux et transmettent les consignes.

La première famille constituée de composants mécaniques, électromécaniques, électriques et électroniques comprend :

- le guidage,
- les organes transformant un mouvement de rotation en un déplacement,
- les réducteurs,
- les moteurs équipés ou non d'un frein et d'un codeur,
- les variateurs de vitesse adaptés aux moteurs,
- l'alimentation électrique à partir du réseau.

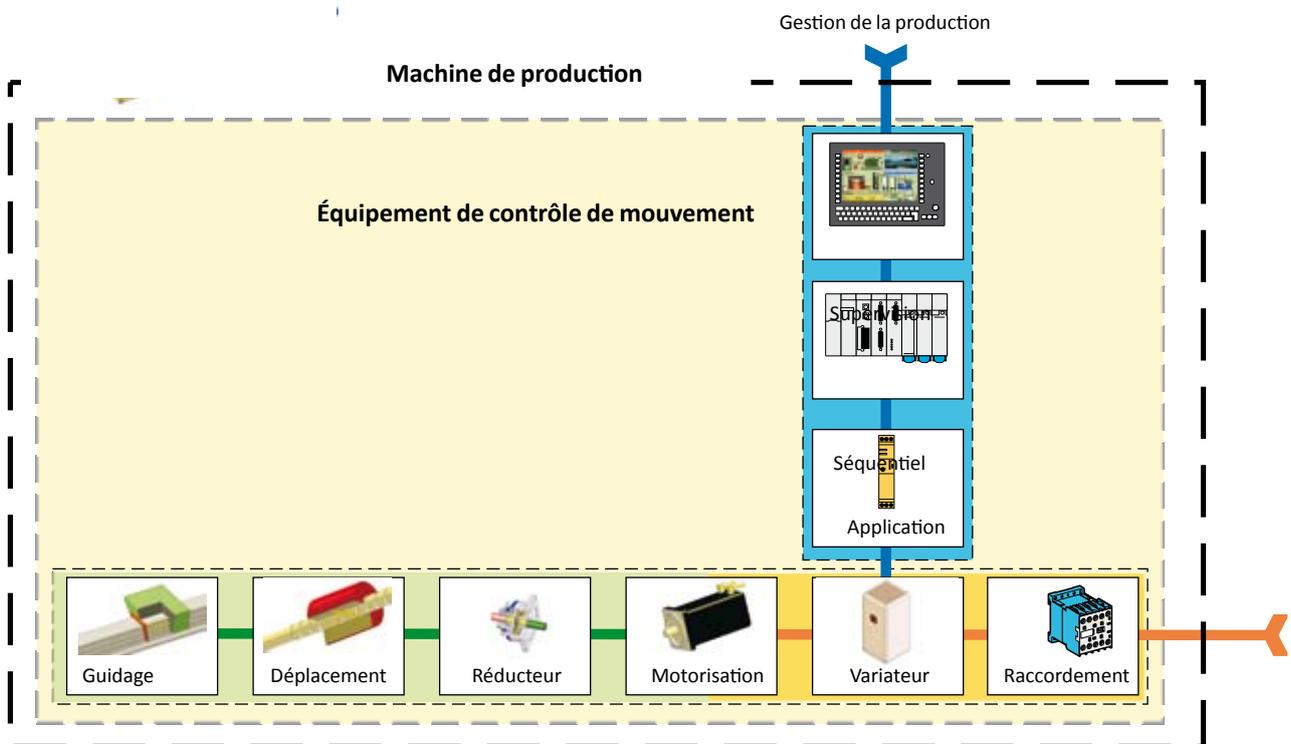


Figure 2 Représentation du contrôle de mouvement

La deuxième famille est essentiellement électronique et comprend :

- la gestion des axes et des mouvements,
- le traitement de la partie séquentielle
- la supervision,
- la gestion de la production.

Le travail du concepteur de la machine est de choisir correctement la structure de l'installation et la nature des produits qui la composent en fonction de l'application visée et de l'environnement dans lequel la machine va opérer : règles d'hygiène (agroalimentaire), risques d'explosion, présence de copeaux ou de liquides, température ambiante.....

Il devra, également, prendre en compte un certain nombre d'objectifs comme les économies d'énergie et les règles de sécurité.

Il est aidé dans sa tâche par les logiciels mis à sa disposition par les fournisseurs de constituants pour sélectionner le variateur, le moteur et le réducteur, permettre de modéliser de façon très précise les cinématiques de la machine, axe par axe, d'optimiser les choix mécaniques pour le bureau d'études, d'estimer des durées de vie des systèmes intégrés (guidages linéaires) et d'optimiser la conception

de la machine.

À ce stade, on dispose, conceptuellement, d'une machine capable de répondre à une application donnée.

La machine sera opérationnelle quand les réglages définitifs auront été réalisés, ce qui ne peut se faire qu'à la mise en service. Ces réglages ont pour objet d'obtenir la stabilité des axes et la meilleure performance dynamique et d'effectuer les prises d'origine. La plupart des variateurs disposent de fonctions d'autoréglage et d'aides logicielles.

Mentionnons également les aides au diagnostic et au dépannage fournis par ces logiciels.

Nous traiterons successivement :

- les éléments de la machine (transmission de mouvement, réducteurs, moteurs, variateurs, alimentation)
- le paramétrage,
- les applications typiques du contrôle du mouvement,
- les économies d'énergie et la sécurité.

Nous n'abordons pas la partie mécanique qui est conçue en fonction de l'application à réaliser ; elle sera juste évoquée dans la partie traitant des applications.

3- L'entraînement

3-1- Le guidage

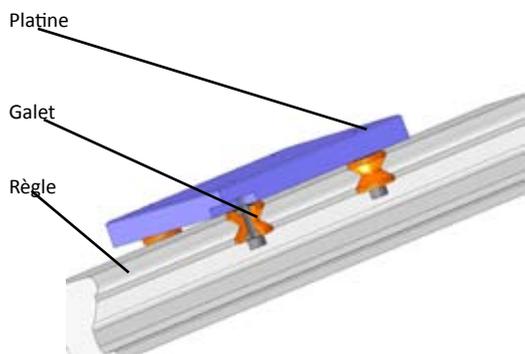


Figure 3 Guidage par galets

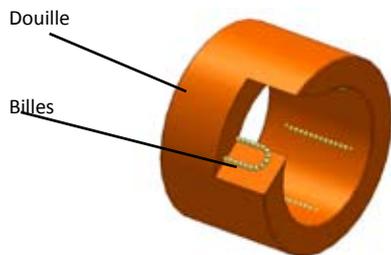


Figure 4 vue en coupe d'une douille à recirculation de billes

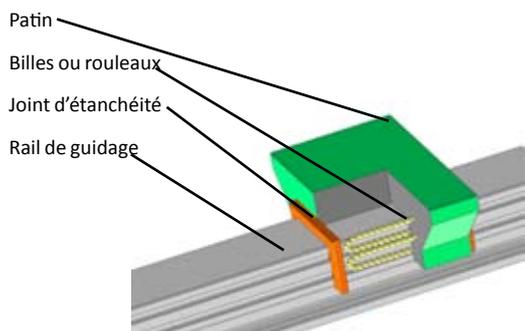


Figure 5 Guidage par règle à billes ou à rouleaux

Le guidage permet de déplacer une charge suivant une trajectoire linéaire avec un haut degré de précision. De nombreuses solutions existent et nous ne pouvons pas toutes les décrire. Leur objectif commun est d'offrir le jeu mécanique le plus réduit possible, le rendement maximum et une durée de vie élevée. Des trajectoires complexes seront obtenues par une combinaison de guidages croisés permettant une grande souplesse de déplacement.

Guidage par galets

La figure 3 représente un guidage par galet. Il se compose d'une règle profilée et d'une platine solidaire de galets qui tourbillonnent sur des roulements.

Guidage par douille à billes et arbre cylindriques

La figure 4 représente une vue simplifiée d'une douille à recirculation de billes. Pour la clarté de la représentation, l'arbre cylindrique a été omis.

Les billes sont logées dans la douille, construite en plusieurs parties et recirculent à l'intérieur par des conduits.

La tige cylindrique rectifiée qui vient se loger dans l'alésage de la douille prend contact avec plusieurs rangées de billes affleurantes. On obtient ainsi une faible résistance à l'avancement et un jeu réduit.

Guidage par règles à billes ou à rouleaux

Ce système représenté Figure 5 comprend une règle profilée et un patin. La réduction des frottements s'obtient par un ensemble de billes ou de rouleaux qui parcourent un circuit fermé logé dans le patin.

Solution	Variante	Charge admissible	Vitesse de déplacement	Performances			Prix	Endurance mécanique
				Rigidité	Jeu	Rendement		
Galet		modérée	élevée	bonne	faible	moyen	faible	moyenne
Douille à billes		modérée	élevée	bonne	très faible	bon	modéré	bonne
Rail	billes	élevée	très élevée	très bonne	très faible	très bon	modéré	très bonne
	rouleaux	très élevée	élevée	excellente	nul (précontrainte)	très bon	élevé	très bonne

Figure 6 Comparatif des dispositifs de guidage

3- L'entraînement

3-2- La conversion de mouvement

La conversion de mouvement a pour objectif de transformer un mouvement rotatif en un mouvement linéaire. Cette opération est effectuée classiquement par des vis, des crémaillères, des courroies crantées, des systèmes bielle-manivelle... Les exigences du contrôle du mouvement imposent un jeu nul ou aussi faible que possible, un rendement élevé et une durée de vie égale à celle de la machine.

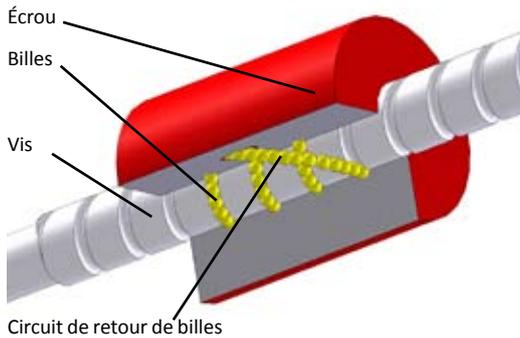


Figure 7 Vue en coupe d'une vis à recirculation de billes

Vis à recirculation de billes

Le système (Figure 7) comprend une vis et un écrou.

La transmission du mouvement s'obtient par un ensemble de billes qui parcourt un circuit fermé logé dans l'écrou.

La rotation de la vis entraîne le déplacement de l'écrou qui est lié à l'organe à déplacer.

L'utilisation de billes permet, à l'instar d'un roulement à billes, de réduire les pertes liées au frottement et de réduire les jeux de fonctionnement. Chaque bille présente un contact ponctuel qui est donc soumis à une forte pression, d'où la nécessité d'un nombre élevé de billes pour limiter les contraintes.

Vis à rouleaux

Avec les vis à rouleaux, la transmission des efforts s'effectue par des rouleaux, la surface de contact étant plus élevée, les couples transmis sont supérieurs à ceux des vis à billes. Elles permettent de dépasser les performances des transmissions par vis en autorisant des couples et des vitesses plus élevés, une rigidité et une précision accrues.

Plusieurs réalisations sont possibles :

- écrou à mouvement planétaire, dispositif Spiracon (Figure 8),
- rouleaux à mouvement planétaire (Figure 9),
- rouleaux à mouvement planétaire et à recirculation (non représenté).

Écrou à mouvement planétaire (Figure 8)

Le dispositif comporte une vis à filets multiples de profil triangulaire et, en un nombre égal aux filets, des rouleaux satellites à gorges annulaires. Ces rouleaux, qui engrènent avec elle, ont le même profil que le filetage assurant ainsi un contact linéaire total. Les rouleaux tourbillonnent dans un boîtier par l'intermédiaire de cages à aiguilles.

Ils engrènent également avec un écrou comportant le même pas et le même nombre de filets que la vis. Cet écrou transmet l'effort au boîtier par l'intermédiaire de butées à rouleaux.

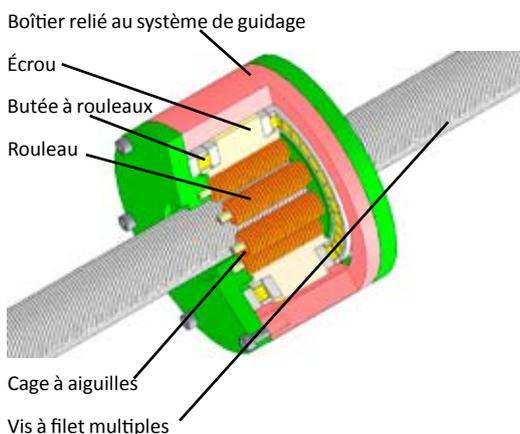


Figure 8 Vis à rouleaux avec écrou à mouvement planétaire

3- L'entraînement

3-2- La conversion de mouvement

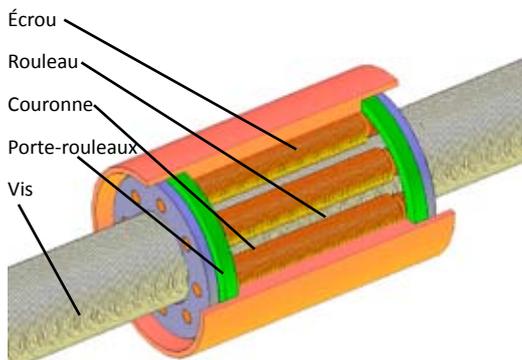


Figure 9 Vis à rouleaux à mouvement planétaire

Vis à rouleaux à mouvement planétaire (Figure 9)

Le dispositif comporte une vis à filets multiples de profil triangulaire. L'écrou possède un filetage intérieur identique à celui de la vis. Les rouleaux en nombre égal aux filets de la vis et de l'écrou possèdent un seul filetage, dont l'angle d'hélice correspond à celui de l'écrou.

Les rouleaux possèdent aux extrémités une denture et un arbre. Cet arbre est monté, de part et d'autre, dans les alésages des porte-rouleaux. Les rouleaux sont ainsi maintenus à des distances régulières. Les porte-rouleaux sont disposés flottants dans l'écrou. Ils sont maintenus axialement par des joncs non représentés. Les dentures des rouleaux engrènent dans celles des couronnes fixées dans l'écrou

Lors de la rotation de la vis, les rouleaux décrivent une rotation autour de la vis et entraînent l'écrou en déplacement linéaire.

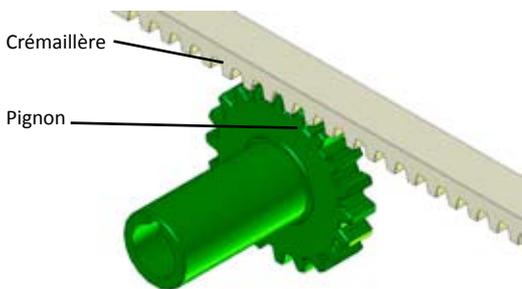


Figure 10 Entraînement par pignon et crémaillère

Pignon / crémaillère

Le système est représenté Figure 10.

Il comporte deux éléments : un pignon solidaire de l'arbre moteur et une crémaillère reliée à la partie à déplacer. Le pignon engrène dans la crémaillère et sa rotation entraîne le déplacement du mobile. Le taillage utilisé est, en général, un taillage hélicoïdal, ce qui permet de réduire le jeu et le bruit de fonctionnement. Un dispositif de rattrapage de jeu peut, également, être prévu.

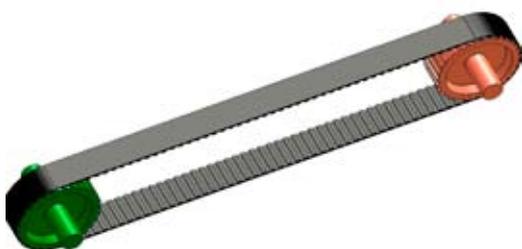


Figure 11 Ensemble poulies courroie

Courroie crantée

La transformation du mouvement circulaire en mouvement linéaire est réalisée par un ensemble de poulies et d'une courroie crantée, comme représenté Figure 11. La courroie crantée est solidaire d'un dispositif de guidage non représenté. La courroie, en matière synthétique, possède une armature métallique ou en matériau polymère (kevlar), ce qui permet de réduire sensiblement son élongation sous charge.

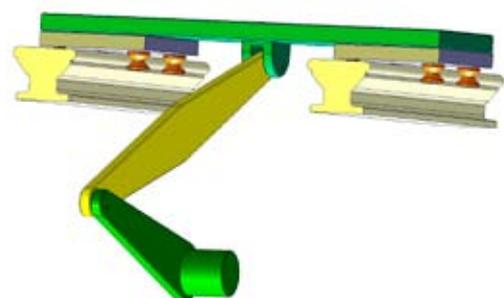


Figure 12 Ensemble bielle-manivelle, associé à un guidage par galets

Système bielle-manivelle

Ce système peut être utilisé en combinaison avec un des guidages décrits dans les pages qui précèdent pour réaliser un mouvement alternatif. Un exemple est représenté Figure 12.

3- L'entraînement

3-2- La conversion de mouvement

En fonction des exigences des mouvements de la machine, plusieurs solutions peuvent se trouver utilisées sur le même équipement. Le tableau Figure 13 regroupe comparativement les solutions possibles.

Solution	Variante	Charge admissible	Vitesse	Performances				Réversibilité	Endurance mécanique
				Rigidité	Jeu	Précision de positionnement	Rendement		
Vis à billes	filets roulés	élevée	<2500 mm/s	bonne	faible	bonne	>80 %	bonne	bonne
	filets rectifiés	moyenne	<3000 mm/s	bonne	très faible	très bonne	>80 %	bonne	très bonne
Vis à rouleaux	écrou planétaire	très élevée	>3000 mm/s	très élevée	très faible	très bonne	>85 %	bonne	excellente
	rouleaux planétaires	très élevée	>3000 mm/s	très élevée	nul avec précontrainte	très bonne	>90 %	très bonne	excellente
	recirculation de rouleaux	très élevée	>3000 mm/s	très élevée	nul avec précontrainte	très bonne	>90 %	très bonne	excellente
Crémaillère		élevée	<4500 mm/s	très bonne	très faible	bonne à très bonne suivant réalisation et rattrapage de jeu	< 60%	très bonne	bonne
Courroie		modéré	<3000 mm/s	faible	faible	moyenne	< 70%	bonne	bonne
Bielle-manivelle		modéré	Vitesse de déplacement périodique non uniforme	modérée	faible	moyenne	< 60 %	variable	modérée

3- L'entraînement

3-3- Les réducteurs

Pour exploiter au mieux la puissance du moteur, il est préférable d'utiliser un réducteur plutôt que de surdimensionner le moteur.

Ce réducteur doit présenter les caractéristiques suivantes :

- jeu adapté au besoin de précision,
- compacité,
- inertie réduite,
- absence d'élasticité,
- rapport de réduction adapté à l'application,
- capacité à supporter les cycles de fonctionnement.

Un réducteur se présente sous la forme d'un boîtier tel que représenté Figure 14.

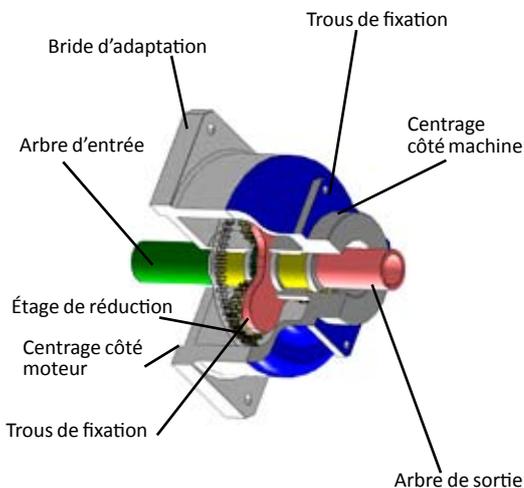


Figure 14 Représentation d'un réducteur

Un réducteur se présente sous la forme d'un boîtier qui adopte des allures diverses en fonction des technologies. Il renferme l'étage de réduction et comporte deux axes qui peuvent être coaxiaux comme sur l'exemple Figure 14, parallèles dans des plans différents ou perpendiculaires suivant la technologie de l'étage de réduction.

L'arbre de sortie peut être creux, traversant ou plein. Le réducteur peut être incorporé par construction au moteur ou être choisi dans un guide proposé par le fabricant du moteur.

Les arbres sont reliés d'un côté au moteur et de l'autre à la machine. Ils sont équipés de roulements (à billes ou à rouleaux) et les logements sont dotés de bagues d'étanchéité.

Le corps du réducteur comporte, côté moteur, une bride de centrage, standardisée selon la norme ISO 9409, permettant la fixation à la machine et, côté moteur, d'une bride amovible spécifique au fabricant du moteur, ce qui permet de limiter les variantes.

Le boîtier est rempli de graisse ou d'huile qui ne nécessitent aucun remplacement durant la durée de vie du réducteur.

Nous allons décrire les réducteurs les plus utilisés en attirant l'attention sur le fait que certains peuvent être combinés, par exemple, un réducteur à renvoi d'angle et un réducteur planétaire.

Le réducteur planétaire ou épicycloïdal

Le réducteur planétaire présente la particularité de comporter un arbre d'entrée et de sortie concentriques. Le réducteur peut être à simple étage ou à étages multiples (2 ou 3). Les rapports de réduction varient de 3/1 à plus de 100/1.

Le taillage des engrenages est une opération de haute précision pour garantir des jeux extrêmement réduits et un rendement élevé. En exécution à jeu réduit, cette valeur peut être inférieure à 2 minutes d'angle pour un réducteur à simple étage. Le rendement d'un réducteur de ce type est de l'ordre de 93 à 98 % à pleine charge.

Le réducteur planétaire est, avec le réducteur harmonique (voir plus loin), le dispositif qui permet d'obtenir un rapport de réduction élevé dans un petit volume. Ce réducteur est schématisé Figure 15.

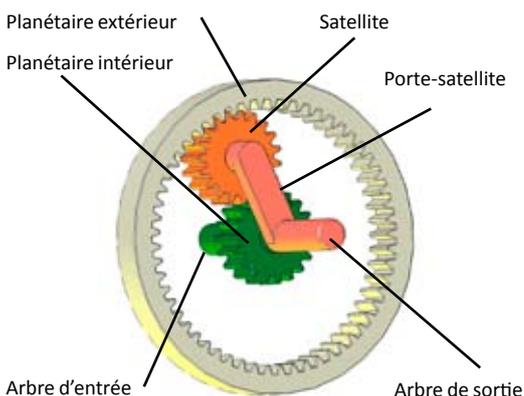


Figure 15 Principe d'un réducteur épicycloïdal

Le réducteur comporte quatre éléments :

3- L'entraînement

3-3- Les réducteurs

- un planétaire intérieur, ou pignon intérieur, qui est relié à l'arbre d'entrée,
- un planétaire extérieur ou couronne qui est solidaire du boîtier,
- des pignons satellites,
- un porte-satellites qui est relié à l'arbre de sortie.

La géométrie donne un arbre de sortie coaxial à l'arbre d'entrée, ce qui en facilite la mise en oeuvre. En général, on dispose trois satellites sur le porte-satellite. Ainsi, les efforts dans les engrenages ne sont pas repris par les paliers. De ce fait, ces réducteurs sont très adaptés à la transmission de couples importants.

Par souci de clarification, le schéma Figure 15 ne représente qu'un seul de ces satellites.

L'arbre d'entrée, en tournant, force le satellite à rouler à l'intérieur de la couronne. Dans son mouvement, celui-ci entraîne le porte-satellites comme s'il s'agissait d'une manivelle. Le porte-satellites constitue l'arbre de sortie du dispositif. Dans cette configuration, la sortie tourne dans le même sens et moins vite que l'entrée.

Le rapport de réduction dépend du nombre de dents de ces engrenages.

En nommant n_1 le nombre de dents du planétaire intérieur et n_2 le nombre de dents des satellites le rapport de réduction r est égal à :

$$r = \frac{n_1}{2(n_2 + n_1)}$$

Dans notre exemple un planétaire de 19 dents, attaquant un satellite de 19 dents constitue un réducteur avec un rapport de réduction de 4.

Le réducteur épicycloïdal est de ce fait très compact. En effet avec un train d'engrenages classique, ce fonctionnement exigerait un pignon 4 fois plus gros que le pignon d'attaque soit donc 76 dents. À titre de comparaison, si on prend un train d'engrenages classique avec le même pignon d'attaque (à 19 dents), l'encombrement radial de ce réducteur est de 95 dents (19+76) alors que le train épicycloïdal n'occupe que 57 dents (19+2×19).

Le diamètre du réducteur sera déterminé par le diamètre de la couronne fixe. Pour obtenir des rapports de réduction importants dans un diamètre donné, plusieurs trains de réduction peuvent être mis en cascade.

Réducteur à engrenages cylindriques

Dans son exécution la plus simple, réducteur à un seul étage tel que représenté Figure 16, le système de réduction ne comporte que deux pièces principales: un pignon figuré en vert, entraîné en rotation par le moteur qui engrène avec une roue de sortie figurée en rouge.

Le rapport de réduction est égal au rapport du nombre de dents des deux pignons. Pour obtenir des rapports de réduction élevés dans un encombrement raisonnable, les constructeurs font appel à plusieurs trains de réduction en fonction du rapport souhaité et de la place disponible.

Dans la pratique, les engrenages utilisés sont à denture oblique pour réduire le bruit de fonctionnement et minimiser les jeux. Les arbres d'entrée et de sortie sont parallèles et peuvent être coaxiaux dans le cas de réduc-

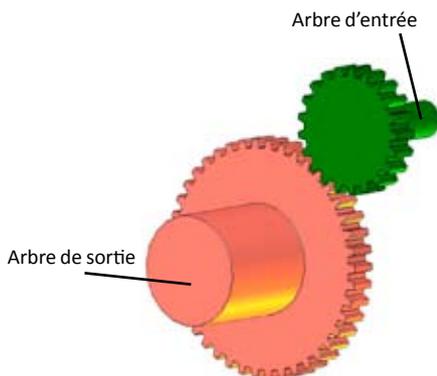


Figure 16 Réducteur à engrenages cylindriques

3- L'entraînement

3-3- Les réducteurs

teurs à plusieurs trains d'engrenage.

Le rendement est fonction du rapport de réduction et se détériore quand celui-ci augmente. Le rendement est typiquement compris entre 75% et 90% en denture droite et 93% à 97% en denture hélicoïdale.

Le jeu peut atteindre 1 minute d'angle voir inférieur sur des versions à jeu réglable.

Ce réducteur présente l'avantage d'être une solution économique pour avoir un très faible jeu, une haute rigidité et un renvoi d'angle permettant une implantation plus aisée.

Ce réducteur est une solution particulièrement économique offrant une très bonne dissipation thermique dans les cas de fonctionnement intensif.

Réducteur conique (renvoi d'angle)

Le réducteur conique, aussi dénommé à renvoi d'angle, peut être utilisé seul ou en combinaison avec un réducteur à engrenage cylindrique ou épicycloïdal. L'arbre de sortie est dans la pratique perpendiculaire à l'arbre d'entrée et dans le même plan. Le rapport de réduction peut atteindre 10/1. Le jeu est d'environ 4 minutes d'arc et le rendement supérieur à 90%. Le schéma Figure 17 représente un réducteur conique à denture droite. Le pignon d'entrée (vert) est couplé au moteur et engrène avec la roue conique de sortie (rouge).

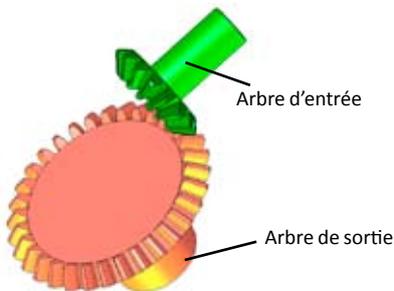


Figure 17 Réducteur conique

Dans la pratique, on trouve principalement des réducteurs à denture hélicoïdale ou à denture spirale qui permettent une réduction importante du jeu et du bruit et une augmentation du couple admissible. Le réducteur à couple conique est une alternative économique et propose une solution d'implantation intéressante de par sa forme orthogonale.

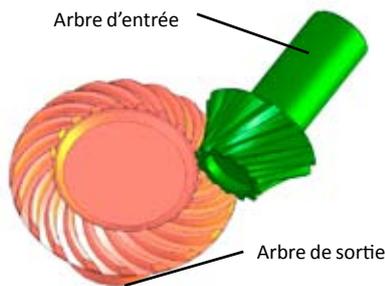


Figure 18 Réducteur hypoïde

Réducteur à denture hypoïde

Ce réducteur, représenté Figure 18, utilise une denture particulière dénommée hypoïde, ce qui a pour effet de désaxer l'arbre d'entrée par rapport à celui de sortie. Par rapport à un réducteur à renvoi d'angle, la surface de contact entre les dents est plus importante, ce qui autorise de meilleures performances (bruit et précision).

Ce réducteur est intermédiaire entre le réducteur à renvoi d'angle et le réducteur à vis.

Réducteur à vis

Le réducteur à vis est d'une construction plus simple; entrée et sortie sont en général perpendiculaire comme représenté Figure 19. Le système de réduction ne comporte que deux pièces principales : une vis figurée en vert, entraînée en rotation par le moteur engrenant avec une roue dentée de sortie figurée en rouge.

Le rapport de réduction est égal au rapport du nombre de dents de la roue au nombre de filets de la vis sans fin. Il est aisé d'obtenir des rapports de réduction élevés. Le rendement varie en fonction de ce rapport et se dété-

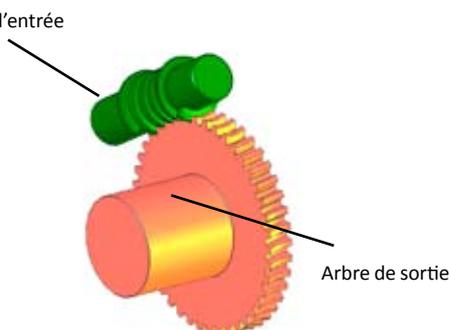


Figure 19 Réducteur à vis

3- L'entraînement

3-3- Les réducteurs

rière quand celui-ci augmente. Pour une réduction de 90/1, le rendement est typiquement de 75% et de 90% pour une réduction de 20/1. Typiquement, au-dessus d'un rapport de 40/1, ce réducteur est complètement irréversible au sens *statique*. Toutefois, avant d'en déduire qu'il est possible de se passer d'un frein, il y a lieu de s'assurer de l'irréversibilité *dynamique*, c'est à dire la garantie de l'irréversibilité en présence de vibrations. En fait, c'est le nombre de filets de la vis sans fin et leur inclinaison qui sont déterminants pour l'irréversibilité. Chaque cas est particulier et demande le conseil du fournisseur.

La vis peut être cylindrique, mais, dans la pratique, la réalisation est celle représentée figure 19 où le taillage, nommé vis globique, est réalisé suivant un tore qui épouse l'extérieur du pignon. Le nombre de dents en contact étant plus important, le couple maximal transmissible est plus élevé et le jeu plus faible.

Le jeu minimal peut atteindre 1 minute d'angle, voir inférieur à la minute sur des versions à jeu réglable.

Ce réducteur présente l'avantage d'être une solution économique présentant un très faible jeu, une haute rigidité et un renvoi d'angle permettant une implantation plus aisée.

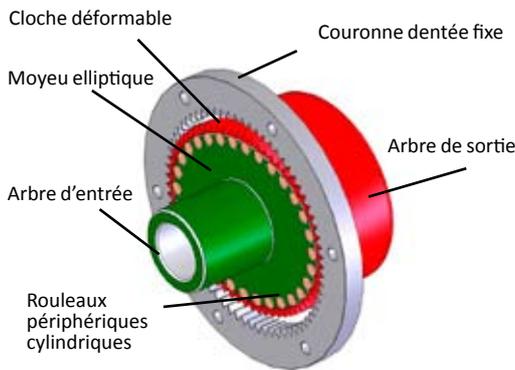


Figure 20 Réducteur harmonique

Réducteur harmonique (*harmonic drive*)

Ce type de réducteur est de conception récente. Le brevet a été déposé en 1955 par l'américain Walton Musser et les premières utilisations datent des années 1970. Le fonctionnement du réducteur, illustré Figure 20, repose sur la déformation élastique d'un des éléments constitutifs. Le réducteur comprend trois parties principales:

- une couronne dentée cylindrique fixe, figurée en gris, portant une denture intérieure
- une cloche cylindrique, figurée en rouge, portant une denture extérieure avec un nombre de dents inférieur au pignon fixe. Cette cloche a la particularité de comporter des parois fines et déformables. Son fond rigide est la sortie du réducteur (pour des besoins de clarté, la déformation est très fortement exagérée sur la Figure 20).
- un moyeu intérieur de profil elliptique (dénommé «générateur d'onde», muni de rouleaux à la périphérie). Ce moyeu est relié au moteur.

Quand le moyeu est mis en rotation, il vient, par déformation élastique de la cloche, faire engrener la denture extérieure avec la couronne dentée, en deux zones situées sur le grand axe de l'ellipse.

Le rapport de réduction est fonction du rapport de la différence du nombre de dents au nombre de dents de la cloche. Par exemple, si le pignon fixe comporte 202 dents et la cloche 200 dents, le rapport de réduction sera de 1/100.

Ce réducteur présente les avantages suivants :

- rapport de réduction élevé dans un petit volume,
- jeu extrêmement réduit, car la came assure une précharge des dents d'engrenage,
- arbres d'entrée et de sortie coaxiaux,
- le rendement typique est de 70%, pouvant atteindre 85%,
- grande précision de positionnement, inférieure à une minute d'angle.

3- L'entraînement

3-3- Les réducteurs

Pour des rapports de réduction élevés, cette technologie permet des réducteurs particulièrement compacts. À titre d'exemple, un réducteur harmonique d'un rapport de 1/100 aura une vitesse de sortie de 20 tr/min pour 2000 tr/mm en entrée. Son couple nominal de sortie sera de 2270Nm et la surcharge possible de 9000 Nm. Les caractéristiques sont les suivantes :

- diamètre 280 mm ,
- longueur 150 mm,
- masse 42 kg,
- rendement 70%.

Pour obtenir le même rapport de réduction, avec des couples transmis identiques, un réducteur à vis aurait une masse de 330 kg. Ce réducteur trouve sa place dans des applications de robotique, de machines-outils, dans le domaine médical, l'aérospatial, le positionnement d'antennes.....

Choix d'un réducteur.

Les données indispensables sont :

- le couple permanent,
- le temps d'accélération et de décélération,
- le couple de surcharge éventuel,
- le cycle de fonctionnement,
- la température ambiante,
- le jeu acceptable,
- la vitesse de rotation du moteur,
- la vitesse de rotation de l'arbre de sortie du réducteur,
- la position de montage,
- les exigences de durée de vie des roulements,
- l'ambiance (atmosphère corrosive, lavage sous pression....)
- le type de sortie (axiale ou orthogonale),
- la fixation (à bride, à pattes, pendulaire),
- la sortie d'arbre (plein avec clavette, creux).

La première étape consiste à examiner les exigences de précision de l'axe à équiper. En effet, en dépit de la précision de fabrication des engrenages, les réducteurs présentent tous un jeu angulaire, de l'ordre de quelques dizaines de minutes d'arc en construction standard.

Le jeu acceptable, la place disponible, l'environnement (température en particulier), la position de montage, la contribution au refroidissement du réducteur par le bâti de la machine détermineront la technologie et l'exécution (jeu standard ou jeu réduit).

Le bruit du réducteur peut être également un critère à prendre en compte.

La deuxième étape est liée au fonctionnement de la machine. Les réducteurs sont toujours définis pour deux cycles de fonctionnement, le fonctionnement cyclique dit S5, et le fonctionnement continu dit S1. Le fonctionnement S5 correspond aux conditions générales de contrôle du mouvement (durée de fonctionnement <60% et <20 minutes). Un coefficient minorateur sur le couple de sortie pourra être également appliqué en fonction du nombre de démarrages par heure. Ce type d'information se trouve dans les catalogues des fournisseurs.

3- L'entraînement

3-3- Les réducteurs

Le choix se fera sur les critères du cycle de fonctionnement et du nombre de démarrages par heure, ce qui permettra de choisir dans une gamme le réducteur le mieux adapté (lubrification, élévation de température). Il pourra être nécessaire de modifier le choix du réducteur en fonction des moteurs disponibles (vitesse de rotation, rapport d'inertie, couple maximum, couple nominal....)



Figure 21(a) Réducteur à arbres concentriques

Versions disponibles

Les fabricants de réducteurs ne produisent pas tous des moteurs. Pour faciliter l'adaptation, la bride qui relie le réducteur au moteur est souvent amovible et spécifique au fournisseur du moteur. Les réducteurs sont disponibles en diverses versions qui permettent une parfaite intégration à la machine.



Figure 21(b) Réducteur à renvoi d'angle

On trouvera sur le marché des réducteurs à sorties concentriques, décalées ou à angle droit, permettant d'installer un servomoteur dans un encombrement réduit. La figure 21 (a et b) illustre deux offres classiques.

Le tableau Figure 22 est un récapitulatif des réducteurs usuels. Les performances sont des valeurs minimales indicatives et les termes utilisés ne sont que qualitatifs.

Type de Réducteur	Variante	Couple d'entrée admissible	Performances			Encombrement	Réversibilité	Endurance mécanique
			Rapport de réduction	Jeu typique	Rendement typique			
Épicycloïdal	un étage	élevé	10/1	3 minutes d'arc	<98%	faible	oui	très bonne
	étages multiples	élevé	100/1	5 minutes d'arc	<90%	faible	oui	bonne
Pignons/roues dentées à arbres parallèles	un étage	modéré	20/1	3 minutes d'arc	< 93%	modéré	oui	bonne
	étages multiples	modéré	100/1	5 minutes d'arc	< 80%	élevé	oui	bonne
Coniques		modéré	10/1	5 minutes d'arc	< 95 %	faible	oui	bonne
Vis	cylindrique	modéré	100/1	3 minutes d'arc	<70%	modéré	à examiner au cas par cas	faible
	globique	élevé	100/1	3 minutes d'arc	<80 %	modéré	à examiner au cas par cas	faible
Hypoïde		élevé	50/1	5 minutes d'arc	< 90%	élevé	oui	bonne
Harmonique		élevé	300/1	nul	< 70 %	très faible	oui	bonne

Figure 22 Récapitulatif des réducteurs usuels

3- L'entraînement

3-4- Les moteurs

Les moteurs sont essentiels dans la chaîne de commande de mouvement.

Il doivent réagir rapidement aux ordres de commande, être capables de fonctionner de l'arrêt jusqu'à plusieurs milliers de tours par minute, accepter les surcharges et nécessiter le moins d'entretien possible.

Les constructeurs ont imaginé de nombreuses solutions pour concilier toutes ces exigences.

Les moteurs peuvent être de plusieurs types :

- les moteurs à courant continu,
- les moteurs pas-à-pas,
- les moteurs synchrones,
- les moteurs asynchrones,
- les moteurs DC brushless,
- les moteurs linéaires,
- les moteurs piézoélectriques.

Un moteur en exécution standard (Figure 23) comporte une carcasse protégeant un stator et un rotor lié à un arbre de sortie, lisse ou muni d'une rainure de clavetage.

La face, côté arbre de sortie, comporte des trous de fixation et une bride permettant de fixer le moteur, soit à la machine, soit à un réducteur de vitesse.

Le moteur peut être équipé d'un frein et d'un codeur dans un boîtier placé à l'opposé de l'arbre de sortie

La carcasse est fréquemment noire et munie d'ailettes pour améliorer le refroidissement.

Le refroidissement est le plus souvent naturel. Pour des puissances élevées, on peut trouver des ventilations forcées ou un refroidissement par liquide.

Le moteur est équipé de connecteurs étanches pour la sortie des connexions de puissance, du raccordement du frein, de la ou des sondes de température et des signaux du codeur.

Les moteurs utilisés en contrôle de mouvement sont souvent précédés du préfixe «servo» qui sous-entend des performances dynamiques supérieures

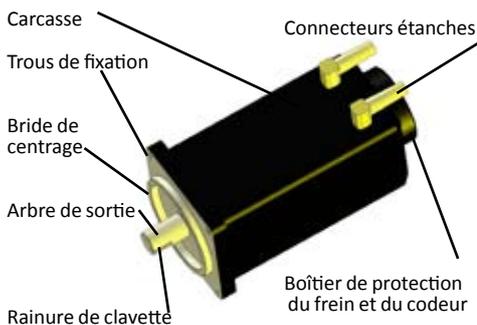


Figure 23 Représentation d'un moteur en exécution standard

3-L'entraînement

3-4- Les moteurs

Le servomoteur à courant continu

Les moteurs à courant continu ont été les premiers utilisés en commande de mouvement. Plusieurs techniques ont été développées pour optimiser le moteur, accroître les performances dynamiques et minimiser l'entretien.

Le moteur peut avoir une structure conventionnelle ou très particulière, mais le fonctionnement reste identique.

Ce moteur comprend un stator équipé d'aimants permanents et un rotor bobiné équipé d'un collecteur.

Suivant la construction, l'inertie thermique du rotor peut autoriser des surcharges importantes à basse vitesse (environ 10 fois le courant nominal).

Ce moteur a été largement utilisé pour la commande d'axes des machines-outils dans les années 70.

L'avantage de ce type de moteur repose dans la simplicité du variateur de vitesse, les inconvénients principaux sont liés à la présence de balais et du collecteur :

- la durée de vie des balais, bien que longue, impose une inspection régulière et des remplacements éventuels,
- le courant maximal autorisé diminue avec l'augmentation de la vitesse de rotation pour des problèmes de commutation.

Les moteurs à rotor disque

Le moteur AXEM (Figure 24) en est le modèle le plus répandu.

C'est un moteur à courant continu dont le rotor est un disque mince portant un bobinage lamellaire formé de conducteurs libres (sans fer) et dont le stator est pourvu d'aimants permanents permettant la production d'un champ magnétique intense.

Le courant est amené par une ou plusieurs paires de balais frottant directement sur le bobinage.

L'objectif de cette construction est de réduire l'inertie du rotor.

Avec plus de 2 millions d'unités produites, le moteur AXEM est l'un des servomoteurs les plus répandus dans le monde.

Avantages principaux :

- excellente régularité de vitesse en raison du grand nombre de lames et de l'absence de fer dans le rotor,
- pas de limite de commutation (rotor sans fer),
- régularité exceptionnelle à basse vitesse,
- sans entretien (peu ou pas d'usure des balais),
- haute dynamique (très faible inertie du rotor),
- variateur de vitesse simple.

L'inconvénient principal est lié à la faible inertie thermique du rotor qui n'autorise pas des surcharges de longue durée. Le courant instantané est limité à environ 5 fois le courant nominal (In) et le courant de surcharge à

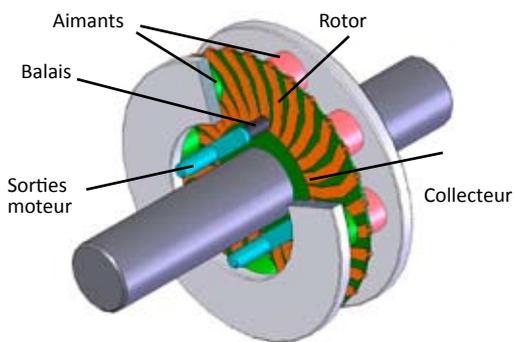


Figure 24 Représentation simplifiée d'un moteur à rotor disque

3- L'entraînement

3-4- Les moteurs

1,5 In pendant une minute.

Moteur de référence durant de nombreuses années en robotique, AXEM, par ses qualités exceptionnelles, trouve sa place dans les applications requérant une très bonne qualité de rotation (bancs de mesure tridimensionnelle par exemple). Dans de nombreuses applications médicales, ses atouts sont principalement liés à sa fiabilité, son niveau sonore et son aspect économique.

Le moteur à rotor cloche

Le moteur à rotor cloche, utilise une technologie de construction similaire au moteur disque, avec le même objectif: la réduction de l'inertie. Le moteur cloche est schématisé figure 25.

Le rotor est une cloche en fibre de verre sur laquelle est disposé le bobinage d'induit. Le diamètre du rotor est faible vis-à-vis de sa longueur. L'intérieur de la cloche est occupé par un aimant, le flux se refermant par la carcasse

La construction du rotor donne une inertie minimale.

Ces moteurs sont capables d'accélération impressionnantes. Par exemple, un moteur non chargé est capable de réaliser des cycles de démarrage vitesse maximum / arrêt près de 50 fois par seconde.

La faible inertie thermique de leur rotor ainsi que la fragilité de ce bobinage en réduit l'utilisation.

La puissance maximale est de 250 W environ.

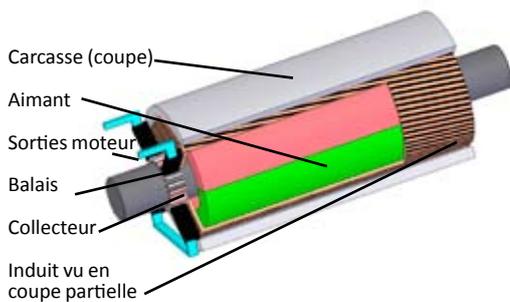


Figure 25 Représentation schématique d'un moteur à rotor cloche

Fonctionnement des servomoteurs à courant continu

Le fonctionnement des servomoteurs à courant continu est identique aux machines classiques.

Nous avons représenté figure 26 un schéma simplifié d'un moteur à courant continu. Le champ magnétique créé par les aimants "rentre" dans l'induit du côté du pôle Nord de l'inducteur et "sort" de l'induit du côté du pôle Sud de l'inducteur.

Quand l'induit est alimenté, ses conducteurs situés sous un même pôle inducteur (d'un même côté des balais) sont parcourus par des courants de même sens et sont donc, d'après la loi de Laplace, soumis à une force. Les conducteurs situés sous l'autre pôle sont soumis à une force de même intensité et de sens opposé. Les deux forces créent un couple qui fait tourner l'induit (rotor) du moteur.

Lorsque l'induit du moteur est alimenté sous une tension continue ou redressée U et que le rotor est en rotation, il se produit une force contre-électromotrice E dont la valeur est $E = U - RI$.

RI représente la chute de tension ohmique dans l'induit. La force contre-électromotrice E est liée à la vitesse et à l'excitation par la relation

$$E = k \omega \phi, \text{ dans laquelle :}$$

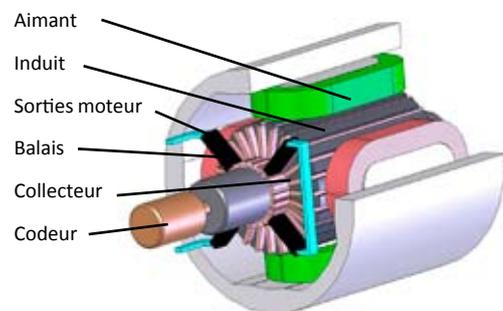


Figure 26 Représentation simplifiée d'un moteur à courant continu tétrapolaire

3- L'entraînement

3-4- Les moteurs

- k est une constante (sans unité) propre au moteur,
- ω la vitesse angulaire en radians par seconde,
- ϕ le flux en webers.

Cette relation montre qu'à flux constant, la force contre-électromotrice E , proportionnelle à ω , est une image de la vitesse. Le couple est lié au flux et au courant dans l'induit par la relation $C = k I \phi$, dans laquelle :

- k est une constante (sans unité) propre au moteur,
- I le courant d'induit en ampère,
- ϕ le flux en webers.

Avec ces unités, la constante de vitesse et la constante de couple sont identiques.

Dans les catalogues constructeurs, on trouvera deux unités différentes :

- une constante de tension en Volts/tour par minute,
- une constante de couple en mN/A.

Les servomoteurs (sauf les moteurs disque et cloche) sont conçus pour supporter des surcharges, c'est-à-dire un couple maximum transitoire important.

Cependant, les pertes Joule étant localisées dans le rotor, la dissipation n'est pas optimum et le temps de surcharge est donc limité.

Comme le montrent les courbes de couple (Figure 27), ces surcharges ne peuvent être maintenues sur toute la gamme de vitesse. En effet, exception faite du moteur à rotor plat, des problèmes de commutation interviennent dès que la vitesse dépasse une certaine valeur.

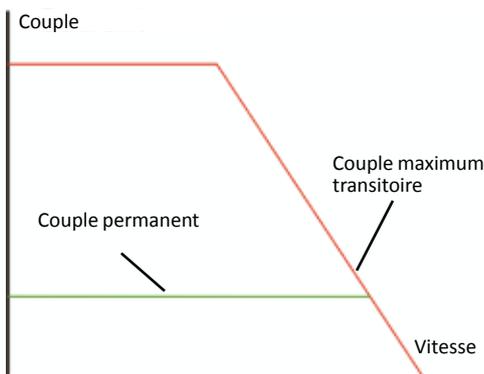


Figure 27 Courbes typiques d'un servomoteur à courant continu

Domaine d'application des servomoteurs à courant continu

Ces servomoteurs sont disponibles dans une gamme de puissance variant de quelques watts à environ 10 kW. Ils sont fortement concurrencés par les servomoteurs synchrones.

Les servomoteurs à courant continu trouvent leur emploi dans les applications où une grande précision et une forte dynamique sont demandées. En raison du collecteur, ils sont plus coûteux à réaliser que les moteurs à courant alternatif, mais, pour les puissances élevées, ils peuvent être une alternative économique aux servomoteurs synchrones.

Cependant, ils nécessitent un entretien régulier et ils ne possèdent pas une capacité de surcharge aussi performante que les servomoteurs synchrones.

Le moteur pas-à-pas

3- L'entraînement

3-4- Les moteurs

Le moteur pas-à-pas fut inventé par Marius Lavet en 1936 pour l'industrie horlogère. Un moteur pas-à-pas permet de transformer une impulsion électrique en un mouvement angulaire. Ce type de moteur est très courant dans tous les dispositifs où l'on souhaite faire du contrôle de vitesse ou de position en boucle ouverte. L'usage le plus connu du grand public est dans les imprimantes reliées à un ordinateur.

On trouve trois types de moteurs pas-à-pas :

- le moteur à réluctance variable,
- le moteur à aimants permanents,
- le moteur hybride, qui est une combinaison des deux technologies précédentes.

Tous ces moteurs comprennent un stator polyphasé bobiné et un rotor. La différence fondamentale entre ces différents moteurs se situe au rotor.

Le rotor du moteur à réluctance variable est constitué d'une pièce magnétique en fer doux comportant un certain nombre de pôles formant des protubérances à la périphérie d'un cylindre.

Le moteur à aimants est constitué d'un cylindre avec des aimants situés à la périphérie

Le moteur hybride, qui nous servira dans notre explication du fonctionnement comprend des aimants et des pièces polaires.

Principes communs

Le principe de fonctionnement repose sur l'alignement des pôles du rotor en vis-à-vis des pôles du stator quand ceux-ci sont alimentés. Quelle que soit la technologie du moteur, la position d'équilibre est obtenue quand l'entrefer entre les pôles est minimum.

Le fait, pour le moteur pas-à-pas, de disposer d'aimants permettra de maintenir un couple à l'arrêt en l'absence d'alimentation des bobines.

Le moteur pas-à-pas tourne en fonction des impulsions électriques alimentant ses bobinages. Selon son alimentation électrique, il peut être de type :

- unipolaire si ses bobinages sont toujours alimentés dans le même sens par une tension de signe constant,
- bipolaire lorsque ses bobinages sont alimentés tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre,
- triphasé.

L'angle de rotation minimal entre deux modifications des impulsions électriques s'appelle un pas. On caractérise un moteur par le nombre de pas par tour (c'est-à-dire pour 360 °).

La rotation du moteur se fait donc de manière discontinue. À chaque impulsion, l'arbre du moteur parcourt un angle égal à $360/\text{nb}$ de pas du moteur. Un moteur à 200 pas tournera donc de 1,8 degré par pas.

L'électronique permet de piloter la chronologie de ces impulsions et d'en comptabiliser le nombre. Les moteurs pas-à-pas et leur circuit de comman-

3- L'entraînement

3-4- Les moteurs

de permettent ainsi la rotation d'un axe avec beaucoup de précision de vitesse et de position.

Leur fonctionnement s'apparente donc à celui d'un moteur synchrone quand l'arbre est en rotation continue, les plus rapides dépassent rarement la vitesse maximale de 3 000 tr/min.

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

- l'inertie de la charge à entraîner (en kg.m^2),
- le type d'entraînement mécanique (vis, courroie crantée, crémaillère, etc.) pour estimer le rendement de la chaîne cinématique,
- le type de guidage, afin d'estimer les frottements (secs et visqueux),
- le couple de travail ramené à l'arbre du moteur,
- le déplacement le plus critique (distance en fonction d'un temps),
- les temps d'accélération de décélération.

La charge a une influence directe sur le calcul du couple moteur via les paramètres du calcul inertiel (en kg.m^2) et de l'accélération (en m/s^2). Pour des paramètres d'accélération et de chaîne cinématique identiques, un moteur pas-à-pas n'aura pas besoin du même couple selon la charge mise en jeu.

Pour une application industrielle, le dimensionnement d'un moteur pas-à-pas doit être calculé de façon rigoureuse ou être surdimensionné afin d'éviter toute perte de pas. Le moteur pas-à-pas fonctionnant en boucle ouverte (sans asservissement), il ne récupère pas sa position de consigne en cas de surcharge par exemple.

Pour pallier cet inconvénient, certains fabricants proposent un codeur associé au moteur.

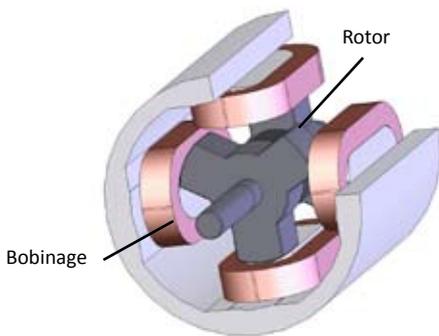


Figure 28 Représentation d'un moteur pas-à-pas

Fonctionnement du moteur pas-à-pas

Pour expliquer le fonctionnement d'un moteur pas-à-pas, nous allons prendre un modèle rudimentaire de moteur hybride tel que reproduit Figure 28. Le stator consiste en un cylindre comportant quatre protubérances. Les bobines sont enroulées autour de celles-ci.

Le rotor de cet appareil consiste en deux pièces ferromagnétiques possédant chacune trois dents (voir Figure 29). Entre ces deux pièces se trouve un aimant permanent magnétisé dans le sens de l'axe du rotor, créant ainsi un pôle sud sur une pièce, et un pôle nord sur l'autre. On a donc un rotor comportant 3 paires de pôles sud/nord. Nous avons choisi une disposition simple pour faciliter la description du fonctionnement, mais il est évident que l'on peut, sans problème, augmenter le nombre de dents et multiplier ainsi le nombre de positions.

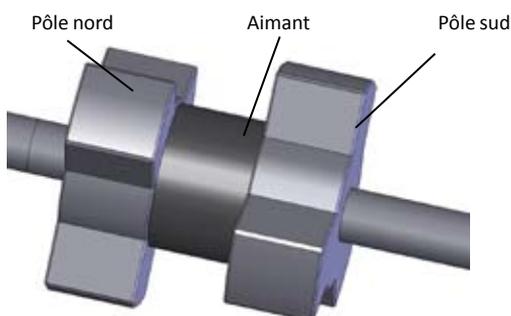


Figure 29 Représentation d'un rotor de moteur pas-à-pas hybride

3- L'entraînement

3-4- Les moteurs

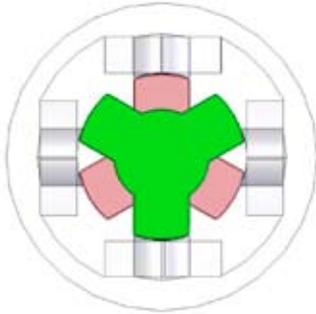


Figure 30 Illustration d'une des positions possibles à l'arrêt du moteur

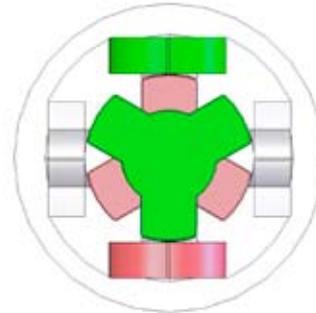


Figure 31 Position de départ du rotor, bobines alimentées

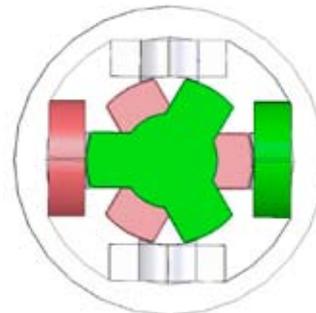


Figure 32 Rotation d'un pas (30°)

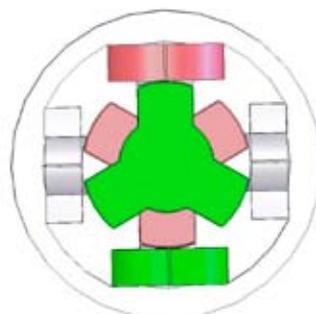


Figure 33 Rotation de 2 pas (60°)

Position du rotor, moteur non alimenté

Lorsqu'aucun courant ne circule dans les bobines, le rotor va prendre la position illustrée Figure 30, car l'aimant permanent du rotor essaie de minimiser la réluctance (ou résistance magnétique) du champ magnétique et donc de placer le rotor devant un pôle du stator. Cette position est nommée position de détente le couple pour déplacer le rotor est dénommé couple de détente.

Pour faciliter la compréhension du fonctionnement, les bobines non alimentées sont représentées transparentes, le pôle sud est figuré en rouge et le pôle nord en vert.

Une bobine produisant un pôle sud sera représentée également en rouge et une bobine produisant un pôle nord sera représentée en vert. La même convention sera retenue par la suite de l'étude du fonctionnement.

Il est aisé de voir que le moteur a 12 positions de détente possibles (c'est-à-dire le produit du nombre de pôles du stator par ceux du rotor). Comme déjà indiqué, seuls les moteurs à aimants permanents et les moteurs hybrides ont ces positions d'équilibre en absence d'alimentation.

Position du rotor quand les bobines sont alimentées

Plusieurs fonctionnements sont possibles.

Fonctionnement en pas complet

Si le courant circule dans une paire de bobines du stator créant un pôle sud et un pôle nord, comme le montre la Figure 31, le champ magnétique produit va attirer la dent de la polarité inverse des pôles du rotor. Nous avons choisi de représenter le rotor dans la position où il se trouvait à l'arrêt, mais le couple requis pour déplacer le rotor de sa position stable est maintenant beaucoup plus grand, car nous avons en présence deux flux magnétiques, celui du rotor dû à la présence des l'aimant et celui développé par les bobines du stator.

En changeant le courant du premier au second ensemble de bobines (Figure 32), le champ du stator tourne de 90 degrés et attire la paire de pôles du rotor la plus proche. Le résultat est que le rotor tourne de 30 degrés, ce qui correspond à un pas complet.

En alimentant l'autre paire de bobines avec un courant inverse de la position de départ, on fait encore tourner le champ magnétique du stator de 90 degrés supplémentaires, et le rotor tourne encore de 30° (Figure 33).

La séquence d'alimentation des bobines peut se poursuivre et à chaque étape, le rotor tournera de la même valeur angulaire.

À la fin d'un cycle complet, le moteur aura accompli 12 pas.

Si on alimente les bobines en inversant la séquence, le moteur tourne dans le sens inverse.

La rotation est donc discontinue et d'autant plus régulière que le nombre de pas est élevé.

3- L'entraînement

3-4- Les moteurs

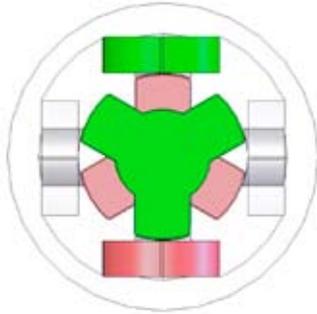


Figure 34 Fonctionnement en demi-pas, position de départ

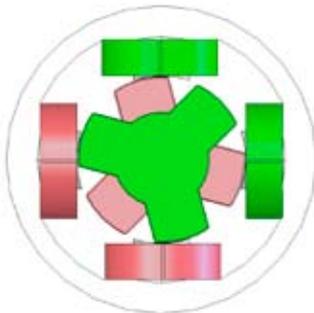


Figure 35 Rotation d'un demi-pas (15°)

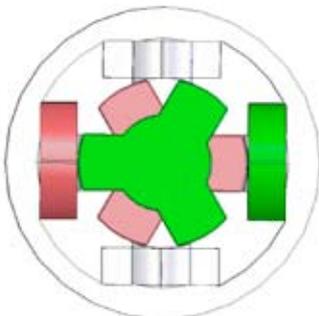


Figure 36 Rotation du demi-pas suivant

Fonctionnement en demi-pas

La régularité de fonctionnement peut être améliorée en adoptant une commande faisant fonctionner le moteur en demi-pas.

Le principe est illustré sur les figures 34,35,36. La position de départ consiste à alimenter une paire de bobines (Figure 34).

La commande suivante consiste à alimenter l'autre paire de bobines tout en conservant l'alimentation des bobines précédentes (Figure 35).

Le champ résultant produit fera tourner le rotor de 15°, car le rotor sera soumis à l'influence des deux champs.

La troisième étape (Figure 36) sera d'annuler le courant dans la première paire de bobines tout en conservant le courant dans la deuxième paire; le rotor tournera encore de 15 degrés.

On double ainsi le nombre de pas et on augmente la régularité de la rotation.

Fonctionnement en micro-pas

En extrapolant le fonctionnement précédent, on voit aisément qu'il est possible d'obtenir n'importe quelle position d'équilibre du rotor en modulant le courant dans les bobines. En effet, si en alimentant les bobines avec des courants égaux, le rotor prend une position intermédiaire de 15°, il sera possible, en déséquilibrant les courants de positionner le rotor sur n'importe quelle position, le rotor se décalant vers le pôle parcouru par le courant le plus fort. On peut ainsi créer une multitude de pôles virtuels.

Cette commande s'appelle la commande en micro-pas. Un multiplicateur de 500 est une valeur usuelle (pour plus d'information sur la commande, voir la partie de cet ouvrage dédiée aux variateurs de vitesse).

Notre moteur rudimentaire qui était doté de 12 pas aura donc 6000 positions.

Le courant a une forme qui se rapproche d'une sinusoïde et le fonctionnement est proche d'un moteur synchrone.

Caractéristiques du moteur pas-à-pas

Mise en vitesse

Le couple maximum n'est obtenu que si le courant dans les bobines est égal au courant nominal. Compte tenu de l'inductance des bobines, le temps de montée du courant ne peut être instantané.

Il y a donc un léger retard à l'apparition du couple.

On pallie ce problème en alimentant les bobines sous une tension élevée et en régulant le courant par un système à découpage (voir la partie de cet ouvrage dédiée aux variateurs).

Pour la mise en vitesse, à partir d'une position d'équilibre à vitesse nulle, le rotor doit accélérer pour se positionner à la position d'équilibre suivante.

3- L'entraînement

3-4- Les moteurs

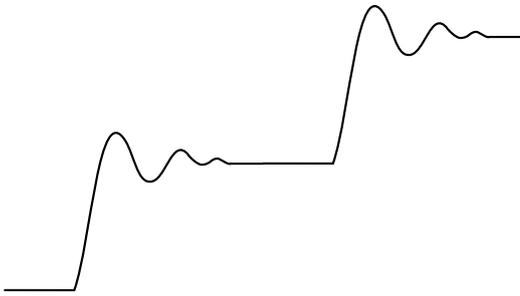


Figure 37 Changement de position du rotor

Il est donc nécessaire de développer un couple suffisant pour vaincre les couples résistants (machine et moteur) et mettre en mouvement l'ensemble des inerties (moteur et charge).

Quand le rotor atteint le pôle suivant (réel ou virtuel) qui correspond à une nouvelle position d'équilibre, il y a inévitablement un dépassement de la position et une oscillation parasite avant d'atteindre la position finale.

Un changement de position typique est représenté Figure 37.

La limite de vitesse de rotation sera atteinte si la commande de changement de pas arrive avant que le rotor ait eu le temps d'atteindre sa position d'équilibre. Cette limite sera fonction du couple résistant et de l'inertie de l'ensemble de la chaîne cinématique.

Couple à l'arrêt

Le moteur pas-à-pas dans sa version à aimants ou composite présente un couple à l'arrêt en absence d'alimentation, nommé couple de détente, ce qui pour nombre d'applications est une caractéristique intéressante.

Ce couple peut être augmenté de manière significative si les bobines sont alimentées; on parle alors de couple de maintien.

On obtient le même effet avec un moteur à réluctance variable, mais cela conduit à maintenir l'alimentation des bobines.

L'inconvénient est la puissance dissipée dans le moteur qui réduit le rendement de la motorisation.

Cependant, les bobines étant localisées au stator, la dissipation est optimale et ce fonctionnement peut être prolongé.

Courbes de couple d'un moteur pas-à-pas

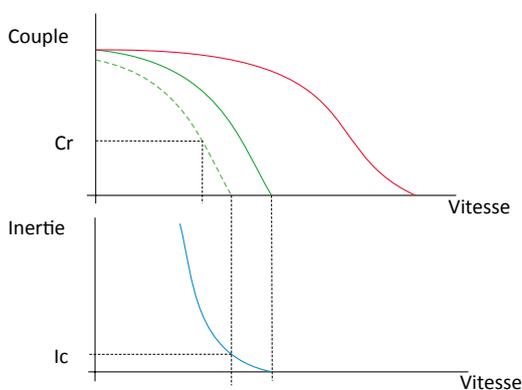


Figure 38 Courbes typiques d'un moteur pas-à-pas

La vitesse d'utilisation d'un moteur pas-à-pas dépend de la charge entraînée ainsi que du mode de commande du moteur.

Les courbes typiques d'un moteur pas-à-pas Figure 38 représentent le domaine de fonctionnement.

La courbe verte correspond à un fonctionnement marche/arrêt sans perte de pas avec une inertie de la charge égale à 0 (moteur à vide). Dans ce cas de fonctionnement, l'annulation de la commande entraînera un arrêt immédiat du moteur dans sa dernière position.

La courbe bleue représente l'inertie maximale possible en fonction de la vitesse. Dans la pratique, pour une charge donnée d'inertie connue I_c , on aura un point d'intersection qui déterminera le décalage de la courbe de couple représentée en pointillés verts.

Sur l'axe vertical est porté le couple résistant (C_r), ce qui détermine sur la courbe verte en pointillés la vitesse maximale sans perte de pas.

La courbe rouge représente la vitesse maximale (à inertie nulle) à laquelle le fonctionnement est possible, mais où un arrêt de la commande se fera inévitablement avec perte de pas.

3- L'entraînement

3-4- Les moteurs

L'arrêt ne sera possible qu'en réduisant progressivement la vitesse dans le domaine limité par la courbe verte et l'annulation de la commande entraînera, bien entendu, l'arrêt du rotor dans une position stable, sans perte de pas. Le ralentissement sera d'autant lent que l'inertie de la charge est élevée.

Au-delà de la courbe rouge, le fonctionnement est impossible.

Domaine d'application des moteurs pas-à-pas

Les moteurs pas-à-pas sont disponibles dans une gamme de puissance variant de quelques watts (moteurs à réluctance variable) à environ 2 kW (moteur composite). Ils peuvent être fournis en version antidéflagrante pour utilisation en zones dangereuses, recevoir un réducteur et, si nécessaire, être équipés d'un frein.

Le fonctionnement se fait en boucle ouverte, c'est donc une solution particulièrement économique.

Le fonctionnement correct implique, cependant, qu'aucune perte de pas n'intervienne. Pour cette raison, ils sont parfois équipés d'un codeur qui est utilisé comme élément de sécurité, si un risque de perte de pas est envisageable (en cas d'un surcouple accidentel). Le nombre de pas par tour est couramment compris entre 200 et 10 000.

Les moteurs pas-à-pas sont particulièrement adaptés à un fonctionnement à basse vitesse et/ou à couple élevé. Ils présentent une résolution élevée, une grande rigidité et un dépassement réduit. En étant capables d'accélération rapide avec une excellente dynamique, ils sont adaptés aux fonctionnements réclamant des arrêts/marches fréquents. Leur conception permet un déséquilibre vis-à-vis des inerties et une tolérance accrue envers les variations de charge. La possibilité d'entraînement direct, sans réducteur et le fonctionnement en boucle ouverte en font une solution particulièrement économique.

3- L'entraînement

3-4- Les moteurs

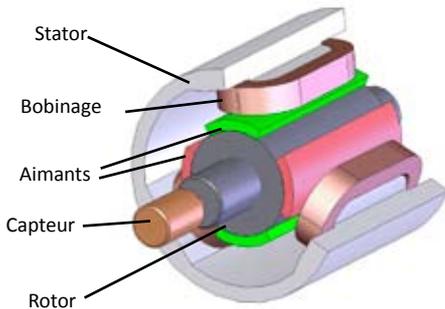


Figure 39 Représentation schématique d'un servomoteur synchrone



Figure 40 Vue interne d'un servomoteur synchrone



Figure 41 Disposition des aimants périphériques

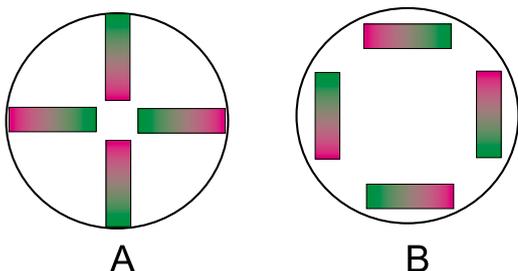


Figure 42 Disposition des aimants au rotor: A concentration de flux, B aimants enterrés

Le servomoteur synchrone

Le servomoteur synchrone ou servomoteur brushless est la solution la plus élégante et la plus performante du contrôle du mouvement.

Ce moteur ne comporte pas de balais et la disposition des bobines à la périphérie du stator permet un refroidissement optimum.

La technologie du moteur bénéficie des aimants permanents à terres rares qui procurent des champs importants dans des volumes réduits.

C'est dans les années 80 que sont apparus les aimants Néodyme Fer Bore qui se sont imposés dans les servomoteurs.

Ces aimants possèdent des caractéristiques remarquables : un champ rémanent très élevé (1,3 Tesla) et un champ coercitif de 1500 kA/m (cette valeur représente le champ qu'il est nécessaire d'appliquer à l'aimant pour le désaimanter).

Le point de Curie, c'est-à-dire la température à laquelle l'aimant perd ses caractéristiques, est de 310°C.

Il est donc possible de réaliser des moteurs, compacts, robustes, pouvant supporter des surcharges importantes sans risque de désaimantation.

Le principe d'alimentation d'un moteur synchrone est une technique connue. Cependant, le système de contrôle devant gérer en temps réel un grand nombre de données, le traitement numérique s'est imposé, facilité par l'apparition des microcontrôleurs.

Constitution d'un servomoteur synchrone

Le servomoteur synchrone comporte un stator et un rotor tel que représenté sur la Figure 39.

Le rotor se présente sous la forme d'un cylindre en matériau magnétique comportant des aimants, ici périphériques, produisant une succession de pôles nord et sud. Le stator, également en matériau magnétique, comporte des enroulements triphasés.

La Figure 40 est une vue interne d'un servomoteur synchrone et la Figure 41, une vue de la disposition des aimants débarrassés de la frette de maintien.

Les aimants périphériques sont une solution, mais il en existe beaucoup d'autres.

A titre d'exemple, nous avons représenté Figure 42, parmi toutes les possibilités, deux autres dispositions des aimants.

Pour la synchronisation du flux dans la machine qui est décrite dans les pages qui suivent, il est nécessaire de connaître la position angulaire du rotor.

Ces moteurs sont donc équipés d'un capteur qui peut être un résolveur, un codeur incrémental ou un codeur incrémental avec sorties sinusoïdales.

3- L'entraînement

3-4- Les moteurs

En plus de la réalisation de l'autopilotage, ce capteur permettra :

- de mesurer la vitesse du servomoteur ,
- de mesurer la position de l'arbre du moteur pour le régulateur de position et pour le contrôleur chargé de réaliser l'application.

Les Figures simplifiées 39 et 42 ne comportent que deux paires d'aimants. On voit distinctement la succession des pôles sud (rouge) et nord (vert), mais, dans la pratique, le nombre de paires de pôles varie de 2 à 10.

Suivant la disposition des aimants, les caractéristiques de la machine varient et certaines dispositions sont plus coûteuses.

Le choix du constructeur se fera sur les critères de performances et de prix.

Pour des applications qui nécessitent des couples élevés et un entraînement direct, certains constructeurs proposent des «moteurs couple».

Le rotor est une couronne comportant les aimants qui vient se monter par frettage sur l'arbre de la machine et le stator est fixé au bâti de la machine. Ce type de moteur est utilisé dans des applications spécifiques, comme par exemple des tables rotatives.

Irrégularités de couple d'un servomoteur synchrone

La valeur élevée du champ magnétique dans l'entrefer du servomoteur introduit des variations de couple préjudiciables à un fonctionnement régulier à très basse vitesse.

En effet les aimants tendent à se positionner en face des pièces polaires et on obtient des oscillations de couple. Ce phénomène est connu sous le nom de couple d'encoches ou, en anglais, cogging torque.

Les fabricants peuvent atténuer fortement ce phénomène par plusieurs artifices, soit en inclinant les aimants suivant une génératrice du rotor, soit en disposant plusieurs aimants décalés suivant la génératrice du rotor, soit en inclinant le bobinage au stator. La Figure 43 illustre cette réalisation.

Noter la sonde de température collée sur le bobinage pour la protection thermique du moteur.

Équations d'un moteur synchrone

Le modèle de la machine synchrone fonctionnant en régime linéaire est le modèle de Behn-Eschenbourg tel que représenté Figure 44 pour une phase de la machine.

La tension V est la tension d'alimentation et la tension E la force électromotrice, le rectangle représente la réactance synchrone de la machine et la résistance d'une phase.

La Figure 45 est la représentation vectorielle des tensions et courants dans cette phase.

Sonde de température



Figure 43 Inclinaison des bobinages du stator d'un servomoteur

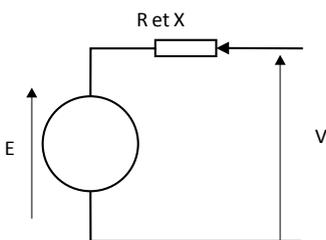


Figure 44 Modèle pour une phase de la machine

3- L'entraînement

3-4- Les moteurs

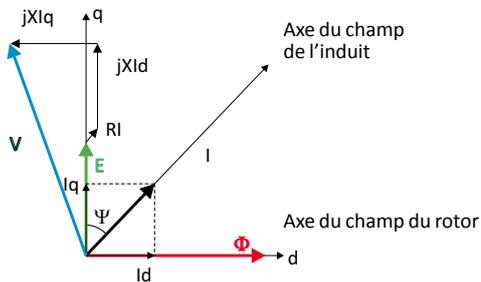


Figure 45 Représentation vectorielle d'une phase de la machine

Nous avons porté les axes d et q ainsi que la projection du vecteur courant I_d et I_q .

Le couple électromagnétique de la machine a pour expression :

$$C_{em} = 3p EI \cos \psi$$

ou p est le nombre de paires de pôles

Le couple est maximum quand ψ est égal à zéro et on voit aisément que le couple ainsi obtenu demandera le courant le plus faible et minimisera les pertes Joule.

La mesure des courants dans les phases de la machine complétée par l'information du codeur permet de reconstituer les courants I_d et I_q , de les contrôler et d'en fixer les limites.

Le système de contrôle générera les tensions triphasées d'alimentation.

Pilotage d'un servomoteur synchrone

Pour obtenir un fonctionnement stable et une dynamique élevée quelles que soient les perturbations, il faut recourir à l'autopilotage. Le fonctionnement du moteur repose sur la création d'un champ tournant. Le synchronisme entre le champ du rotor et le champ tournant est piloté par la commande. L'objectif est d'imposer un écart angulaire entre ces deux champs ou en d'autres termes d'imposer la phase entre la force électromotrice et le courant dans une phase.

Cette grandeur est l'angle d'autopilotage. Cet angle d'autopilotage n'est autre que l'angle ψ (Figure 45).

Le codeur qui est solidaire du rotor permet de connaître précisément la position des aimants du rotor et donc celle du champ généré par ces aimants.

Pour mettre en oeuvre cet autopilotage, schématisé Figure 46, le contrôleur fait appel à la transformation de Park.

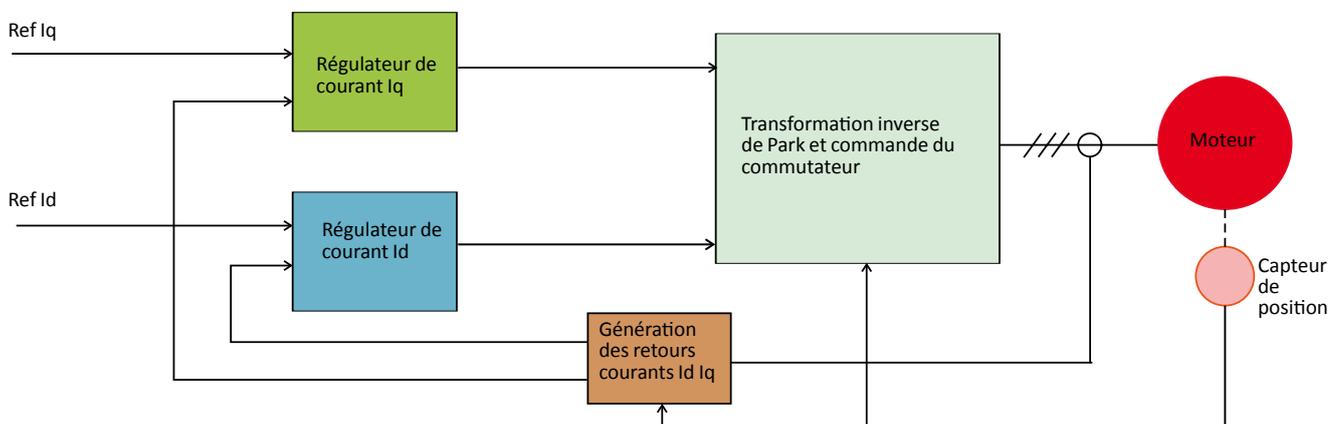


Figure 46 Principe de l'autopilotage

3- L'entraînement

3-4- Les moteurs

La transformée de Park, est un outil mathématique utilisé en électrotechnique afin de réaliser un changement de repère entre un système triphasé équilibré et un système diphasé de composantes continues dans un repère tournant. Elle permet de passer d'un repère fixe lié au stator d'une machine électrique à un repère tournant lié à son rotor ou au champ magnétique.

La transformation de Park prendra pour axes l'axe d lié au rotor dans le sens du flux et l'axe q qui lui est perpendiculaire dans sens du couple (voir Figure 44).

Sans détailler la transformée de Park, notons que celle-ci permet de « figer » la position du rotor dans sa rotation et de définir les deux grandeurs continues I_d et I_q qui sont respectivement le courant qui contrôle le flux de la machine et I_q le courant qui contrôle le couple. Cet artifice permet de contrôler indépendamment les courants et de se ramener à la commande d'une machine à courant continu.

Pour un servomoteur synchrone, I_d sera égal à 0, car le flux est assuré par les aimants, sauf si l'on veut faire travailler le moteur à puissance constante, ce qui est rarement utilisé avec les servomoteurs.

En revanche, avec les moteurs couple que nous avons cités, cette possibilité est souvent exploitée. Il suffit d'imposer $I_d < 0$ pour opérer une réduction du flux dans la machine.

La régulation travaille donc sur des valeurs continues qui, après génération des grandeurs de contrôle, feront l'objet d'une transformation inverse de Park en utilisant la position du rotor donnée par le capteur fixé sur l'arbre, ce qui permet de reconstituer le système triphasé alimentant le moteur.

Dans ces conditions, pour une valeur de I_d , le couple électromagnétique de la machine est directement imposé par l'amplitude du courant I_q .

L'autopilotage permet donc d'assurer le contrôle du couple de la machine.

Le servomoteur fonctionne donc alors comme un moteur à courant continu (mais sans balais). Notons, au passage, que, dans un moteur à courant continu à collecteur, le calage des balais impose mécaniquement l'angle d'autopilotage.

Pour cette raison le servomoteur synchrone est souvent nommé servomoteur DC brushless (courant continu sans balais).

Caractéristiques des servomoteurs synchrones

Les servomoteurs synchrones sont caractérisés par leur compacité vis-à-vis des couples qu'ils sont capables de développer. Ceci est la conséquence de la technologie utilisée et en particulier des aimants à terres rares qui permettent d'obtenir des champs magnétiques importants qu'il serait impossible à obtenir par d'autres moyens comme un bobinage rotorique par exemple.

L'absence de collecteur les rend virtuellement sans maintenance ; seule la durée de vie des roulements est la limite pratique de ces moteurs.

Le bobinage étant localisé au stator, la dissipation thermique est optimale.

Les moteurs sont réalisés en version IP40 à IP65 pour s'adapter

3- L'entraînement

3-4- Les moteurs

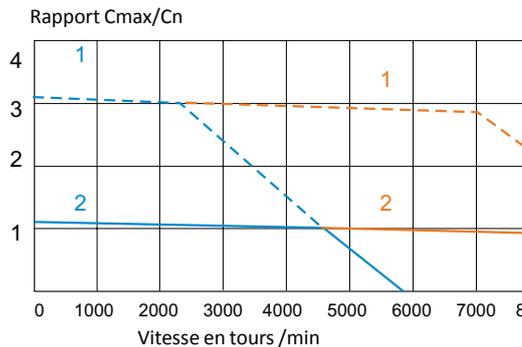


Figure 47 Courbes typiques d'un servomoteur synchrone

à l'installation. Des versions antidéflagrantes ou inoxydables pour l'industrie agroalimentaire sont également disponibles.

Les constructeurs fournissent pour chaque moteur les courbes de couple en service continu et en service intermittent. Les courbes varient suivant la taille du moteur et la technologie de fabrication utilisée. Les courbes de couple ont l'allure représentée Figure 47.

Le fonctionnement du moteur est compris entre les limites suivantes :

- la limite 1 qui est le couple-crête que le moteur est capable de délivrer de manière intermittente, c'est-à-dire pour les phases d'accélération et de décélération ; le couple est maximum à l'arrêt et décroît plus ou moins sensiblement avec la vitesse en fonction des moteurs,
- la limite 2 qui est le couple en régime continu qui correspond à l'échauffement admissible en régime permanent ; le couple permanent diminue lui aussi avec la vitesse.

Le diagramme couple-vitesse peut indiquer également la vitesse maximale absolue qui est la limite mécanique du moteur.

La zone de travail devra être déterminée en fonction de l'application et dans tous les cas se situer dans les limites fixées par les courbes 1 et 2.

La vitesse maximale de travail et la vitesse nominale varient suivant la tension d'alimentation délivrée par le variateur. Pour cette raison, les constructeurs fournissent les courbes d'association moteur/variateur.

Sur la Figure 46, nous avons représenté deux courbes superposées du même moteur, l'une avec un variateur alimenté en 115 V monophasé (courbes bleues), l'autre en 230V monophasé (courbes rouges).

Domaine d'application des servomoteurs synchrones

La gamme de puissance des servomoteurs synchrones s'étend de quelques dizaines de watts à 10 kW environ. La puissance nominale étant fonction de la tension d'alimentation, il est donc préférable d'utiliser les valeurs des associations moteurs/variateurs indiquées dans les catalogues.

La vitesse maximale atteint 30 000 tr/mn.

Les catalogues fournissent à la fois les grandeurs électriques du servomoteur associé à un contrôleur et les paramètres propres du moteur, indépendants du mode d'alimentation.

Les valeurs associées sont :

- couple-crête à l'arrêt,
- couple continu à l'arrêt,
- couple nominal,
- vitesse nominale,
- courant maximum.

3- L'entraînement

3-4- Les moteurs

Les grandeurs propres au moteur sont:

- la vitesse mécanique maximale,
- les constantes de couple et de FEM,
- le nombre de pôles du rotor,
- le moment d'inertie du rotor sans et avec frein,
- la résistance d'une phase du stator,
- l'inductance d'une phase du stator,
- la constante de temps du stator.

Les servomoteurs synchrones couvrent une multitude d'applications. Les fabricants proposent des bibliothèques d'application et des logiciels de sélection pour faciliter le choix le mieux adapté. Avec ceux-ci, l'utilisateur choisira la taille de moteur convenant à l'application, le type de codeur en fonction de la précision visée, le réducteur et la pose d'un frein si nécessaire.

3- L'entraînement

3-4- Les moteurs

Le moteur asynchrone

Introduction

L'invention du moteur asynchrone est due à Nikola Tesla, le pionnier du courant alternatif. Ce moteur de construction simple et robuste est particulièrement économique et produit en grande série en version standard.

En utilisant un contrôle vectoriel analogue à celui du servomoteur synchrone, ce moteur peut réaliser des applications de contrôle du mouvement.

Constitution et principe (Figure 48)

Le moteur asynchrone comporte trois éléments:

- un stator triphasé, contenant un empilage de tôles magnétiques comportant des encoches dans lesquelles est inséré le bobinage, mono ou triphasé,
- un rotor, dit à cage d'écureuil, constitué d'un cylindre en matériau magnétique comprenant des conducteurs en court-circuit placés à la périphérie,
- Un capteur de retour vitesse ou de position peut être monté afin de connaître la position du rotor avec précision.

Quand le stator est alimenté par une tension triphasée, il se produit, dans la machine, un champ tournant qui induit des courants dans les conducteurs du rotor (Loi de Lenz). Ces courants occasionnent alors un couple électromagnétique entraînant la rotation du rotor dans le sens du champ tournant, sans jamais égaler sa vitesse de rotation. En effet, l'égalité de vitesse aurait pour conséquence la disparition de ces courants induits et donc du couple électromagnétique. L'écart de vitesse croissant avec la charge est dénommé glissement noté g .

Équations d'un moteur asynchrone

Le modèle simplifié pour une phase de la machine asynchrone fonctionnant en régime linéaire est représenté Figure 48.

La tension V_s est la tension d'alimentation, le rectangle X_f et R_s sont respectivement l'inductance de fuite et la résistance du stator, X_m est la réactance produisant le flux dans la machine. La charge est représentée par une résistance R_c .

La Figure 49 est la représentation vectorielle des tensions et courants dans cette phase.

La puissance fournie par le réseau ou le variateur n'est pas transmise intégralement à l'arbre, une partie est dissipée sous forme de pertes :

- magnétiques (ou fer) et par effet Joule dans les conducteurs du stator,
- par effet Joule dans les conducteurs du rotor,

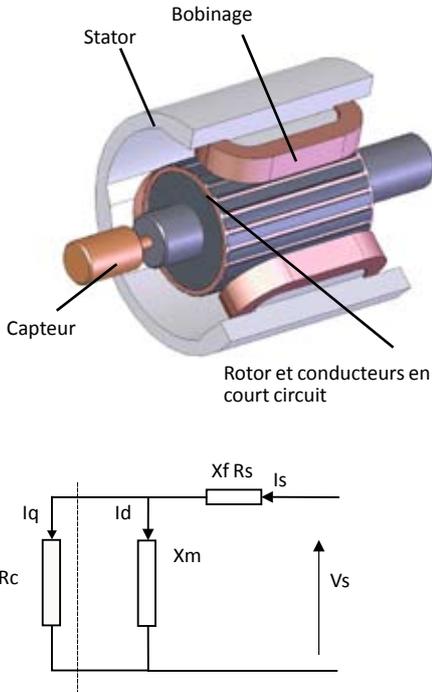


Figure 48 Représentation simplifiée d'un servomoteur asynchrone et schéma d'une phase de la machine

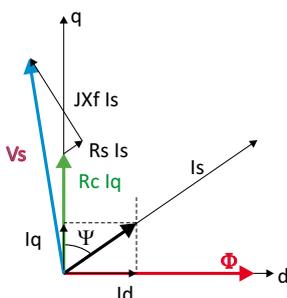


Figure 49 Représentation vectorielle des courants et tension

3- L'entraînement

3-4- Les moteurs

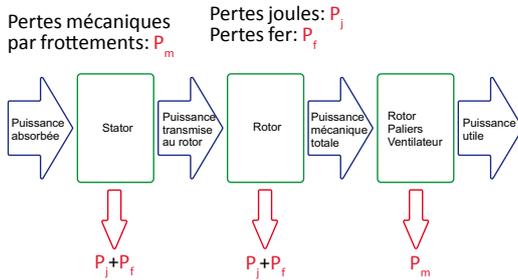


Figure 50 Schéma des pertes dans un moteur asynchrone

■ supplémentaires :

- mécaniques dues aux différents frottements dans les roulements,
- aérauliques au niveau du rotor et du ventilateur,
- supplémentaires liées aux caractéristiques du courant généré par le variateur.

Le niveau de pertes détermine le rendement de la machine. La législation internationale a défini des classes de rendement : IE1, IE2, IE3... auxquelles les constructeurs doivent faire référence dans leurs documentations.

La Figure 50 est la schématisation des pertes dans un moteur asynchrone.

Pilotage d'un moteur asynchrone

Pour obtenir un fonctionnement stable et une dynamique élevée quels que soit le niveau et les impacts de couple, il faut recourir à l'autopilotage.

La commande du moteur consiste à piloter les grandeurs I_d et I_q et le système de contrôle générera les tensions triphasées d'alimentation.

La mesure des courants dans les phases de la machine complétée par l'information du codeur permet de reconstituer les courants I_d et I_q , de les contrôler et d'en fixer les limites.

Pour obtenir le couple nominal du moteur pour un courant donné, la valeur de I_d doit être maintenue constante. Le codeur qui est solidaire du rotor permet de connaître précisément la position du rotor et donc de déterminer la valeur du glissement, car la vitesse du champ tournant dépend de la fréquence de la tension d'alimentation.

Avec la valeur des courants, toutes les données sont connues pour assurer l'autopilotage du moteur qui fait également appel à la transformation de Park telle qu'évoquée avec le servomoteur synchrone.

La différence fondamentale est la régulation du courant I_d qui sera maintenu à une valeur constante, sauf quand la tension nominale est appliquée au moteur et si l'on veut le faire travailler à puissance constante.

La consigne de courant I_q sera élaborée par la boucle de vitesse.

La régulation travaille donc sur des valeurs continues qui, après génération des grandeurs de contrôle, feront l'objet d'une transformation inverse de Park en utilisant la position du rotor donnée par le capteur fixé sur l'arbre, ce qui permet de reconstituer le système triphasé alimentant le moteur.

Dans ces conditions, pour une valeur de I_d , le couple électromagnétique de

3- L'entraînement

3-4- Les moteurs

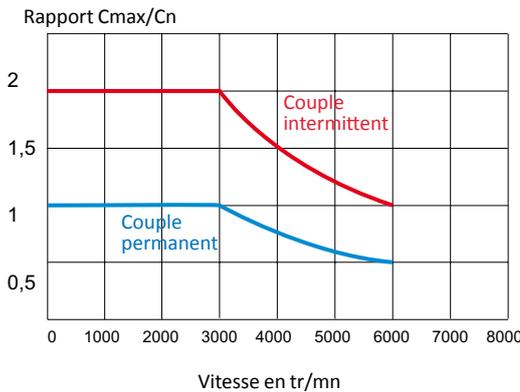


Figure 51 Courbe typique d'un servomoteur asynchrone

la machine est directement imposé par l'amplitude du courant I_q .

Caractéristiques des servomoteurs asynchrones

Les moteurs asynchrones présentent certains désavantages comme des pertes au rotor et au stator. De plus, en raison du mode de fonctionnement qui leur est propre, la constante de temps d'établissement du flux limite la dynamique. Enfin le rapport entre le couple nominal et couple maximum ne dépasse pas 3 alors qu'il peut atteindre 4 avec les servomoteurs synchrones.

La caractéristique typique d'un moteur asynchrone utilisé en contrôle du mouvement est représentée Figure 51. La possibilité de faire varier le courant I_q est exploitée pour le fonctionnement dit «à puissance constante».

Le servomoteur asynchrone et ses avantages

Tout moteur asynchrone triphasé standard peut fonctionner dans une application de contrôle du mouvement. Ce moteur étant produit en grande quantité à des prix attractifs, cette solution est séduisante.

Cependant, la nécessité de le doter d'un capteur et souvent d'un ventilateur indépendant de la rotation de l'arbre du moteur, pour effectuer le refroidissement, rend cette solution parfois plus coûteuse.

Les fabricants proposent donc des servomoteurs asynchrones spécifiques étudiés pour cet usage. Ces moteurs sont dotés d'un capteur, d'un refroidissement autonome, soit air/air, soit liquide.

Ces moteurs sont communément appelés servomoteurs asynchrones du fait de leurs caractéristiques dynamiques et de leurs caractéristiques de précision de positionnement ou de vitesse, qui ne dépendent que de la résolution du capteur et de la régulation, comparables à celles des servomoteurs synchrones.

Ils sont également proposés démontables. Le rotor se place, directement, autour de l'arbre à entraîner et le stator est fixé au bâti de la machine. On trouvera les servomoteurs asynchrones dans des applications de forte puissance, là où les moteurs à aimants deviennent difficiles à construire de manière économique, en particulier pour des applications d'entraînement de broches, de machines d'imprimerie ou de profilage ainsi que pour des presses à injecter. Il se prêtent idéalement au fonctionnement à puissance constante.

3- L'entraînement

3-4- Les moteurs

Les moteurs à courant continu sans balai (DC brushless)

Ce terme est souvent utilisé pour désigner les moteurs synchrones autopilotés et une certaine confusion peut exister. Il désigne, en fait, une famille de moteurs construits de manière similaire. La seule différence réside dans les capteurs utilisés pour connaître la position du rotor et dans le mode d'alimentation du stator.

L'électronique de commande peut être directement intégrée au moteur. Ce moteur est très répandu. Par exemple, les ventilateurs employés dans les ordinateurs utilisent cette technologie.

Constitution (Figure 52)

Le moteur comprend trois éléments :

- une partie fixe, le stator, muni de trois groupes de bobines qui sont, comme sur un servomoteur synchrone, les trois phases du moteur. Elles permettent de générer un champ tournant
- une partie tournante, le rotor, muni d'aimants permanents. Ces aimants vont en permanence entraîner le rotor pour tenter de s'aligner sur le champ magnétique du stator.
- des capteurs magnétiques à « effet Hall ». Ces capteurs permettent de connaître à chaque instant la position des aimants du rotor.

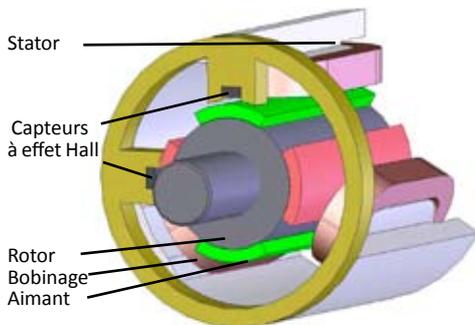


Figure 52 Coupe partielle d'une représentation simplifiée d'un moteur DC brushless

Les capteurs à effet Hall ne donnent pas une information exploitable pour permettre un autopilotage fin et optimisé ; elle est cependant suffisante pour que l'électronique de pilotage puisse déterminer l'orientation à donner au champ magnétique du stator. Au cours de la rotation, elle commande les trois bobines pour ajuster régulièrement l'orientation du champ à la position du rotor, de façon à entraîner celui-ci dans le sens choisi par l'utilisateur.

En modulant le courant dans les bobines, l'électronique peut accélérer ou ralentir le moteur et réguler ainsi sa vitesse. Elle peut aussi orienter le champ magnétique de façon à freiner le rotor dans son mouvement jusqu'à l'arrêt. Le freinage se fait habituellement en dissipant l'énergie dans le moteur.

Le courant dans les bobines du stator est le plus souvent de forme trapézoïdale, ce qui simplifie la commande. L'électronique assure également la limitation de ce courant, ce qui permet de limiter le couple du moteur.

Les informations des capteurs à effet Hall sont mises en forme par l'électronique pour simuler un capteur de position. Généralement cette information est transmise sous la forme de deux signaux décalés dans le temps d'un quart de période afin de discriminer le sens de rotation ; cette information peut être utilisée par un automate ou un superviseur.

Le contrôle de la vitesse peut être réalisé en boucle ouverte ou en boucle fermée.

Une construction particulière du rotor peut permettre d'obtenir un couple à l'arrêt significatif, appelé couple de détente, sans alimenter le moteur. Pour certaines applications, ceci permet de se dispenser d'un frein.

3- L'entraînement

3-4- Les moteurs

Caractéristiques des moteurs à courant continu sans balais

La caractéristique typique d'un moteur à courant continu sans balais est représentée Figure 53. La possibilité de surcharge est de l'ordre de 1,5 à 2 fois le couple nominal.

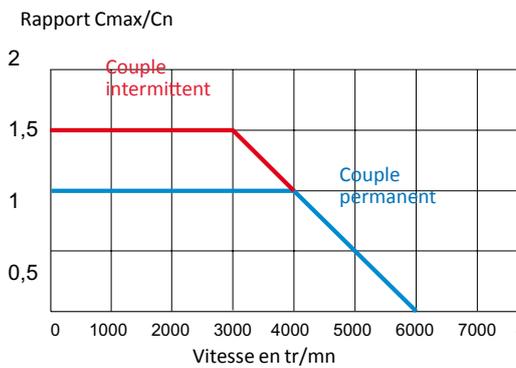


Figure 53 Courbe typique d'un moteur DC brushless

Domaine d'application des moteurs à courant continu sans balais

Les moteurs DC brushless sont proposés pour des puissances faibles (<500W) fréquemment avec le réducteur intégré. La tension d'alimentation est comprise entre 24V DC et 325 V DC.

Sur demande ils peuvent être équipés avec un codeur et un frein.

Le moteur DC brushless est une solution économique et robuste. Les performances sont inférieures au moteur synchrone autopiloté, mais suffisantes dans de nombreuses applications.

3- L'entraînement

3-4- Les moteurs

Les moteurs linéaires

Le contrôle de mouvement impose souvent un déplacement linéaire de la charge. Ce déplacement peut être réalisé en convertissant la rotation de l'arbre du moteur en un déplacement par l'intermédiaire d'un système vis/écrou, généralement à billes.

Une autre solution consiste à utiliser un moteur linéaire.

Le moteur linéaire peut être de deux types : le moteur à induction et le moteur synchrone.

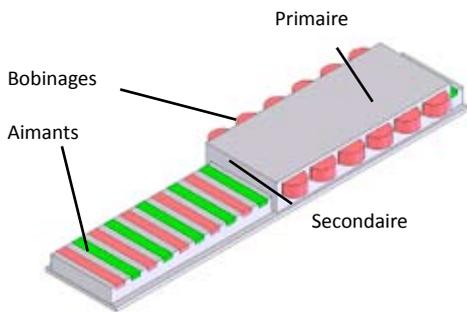


Figure 54 Représentation schématique d'un moteur linéaire synchrone

Principe du moteur linéaire

Le moteur linéaire est un moteur électrique qui utilise les mêmes principes électromécaniques que les moteurs rotatifs.

Le moteur linéaire se présente comme un moteur rotatif qui aurait été déroulé.

La Figure 54 illustre la conception d'un tel moteur. On ne parle plus de stator ou de rotor, mais de primaire et de secondaire.

Le primaire est réalisé avec de tôles magnétiques et incorpore les bobinages. Le secondaire se présente sous la forme d'une règle qui comporte soit des aimants pour un moteur linéaire synchrone, soit des barres en court-circuit pour un moteur linéaire asynchrone. La règle peut être en une seule partie pour des déplacements jusqu'à 2100 mm ou en plusieurs parties.

Le secondaire est solidaire de la machine et ne nécessite généralement pas de refroidissement pour les moteurs linéaires synchrones. Certains constructeurs proposent des ventilations forcées si nécessaire. Le primaire est solidaire de la partie mobile. Il est possible de disposer plusieurs primaires sur une seule règle.

Le primaire et le secondaire sont protégés par des carters, non représentés sur la Figure 54, et des joints pour éviter l'introduction de poussières ou de copeaux dans l'entrefer, ce qui serait préjudiciable au fonctionnement du moteur.

Il est difficile d'équiper d'un frein ce type de moteur. Des butées de sécurité peuvent s'avérer nécessaires pour confiner le mobile dans la zone de mouvement autorisée.

Alimentation du moteur linéaire synchrone

Bien que le champ glisse, le moteur linéaire est conceptuellement un moteur à champ tournant; il peut donc être alimenté par un variateur de servomoteur. Le codeur est constitué par une règle optique qui détecte la position du primaire par rapport au secondaire.

3- L'entraînement

3-4- Les moteurs

Caractéristiques des moteurs linéaires

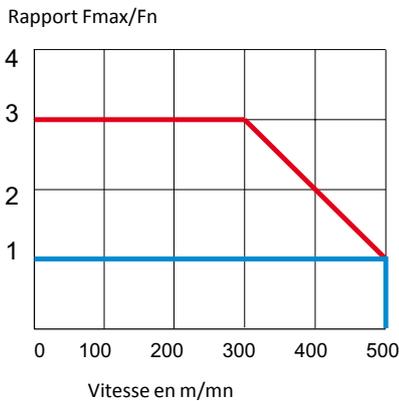


Figure 55 Courbes typiques d'un moteur linéaire

Les moteurs linéaires synchrones ont des pertes au primaire; les variantes asynchrones en ont, en plus, au secondaire. Leur rendement est typiquement de l'ordre de 50%, mais peut atteindre 85%.

En étant, par conception, intimement associé à la partie mobile, l'échauffement dû aux pertes peut avoir un impact sur la précision, ce qui peut nécessiter un refroidissement, le plus souvent à l'eau, pour le primaire et le secondaire (moteur linéaire asynchrone).

La caractéristique typique d'un moteur linéaire est représentée Figure 55.

Domaine d'application des moteurs linéaires

L'offre de moteurs linéaires est relativement limitée et réservée à des machines particulières. La mise en oeuvre de la solution demande un certain nombre de précautions, en particulier vis-à-vis de la contamination (poussières, copeaux...).

Le moteur linéaire permet d'obtenir des forces élevées avec une excellente dynamique. Il trouve son application dans les déplacements à grande vitesse, jusqu'à 600 m/mn pour les machines d'usinage, les systèmes de maintenance, l'emballage....

3- L'entraînement

3-4- Les moteurs

Le moteur piézoélectrique

Le moteur piézoélectrique est apparu en 1973 et les premiers moteurs industriels en 1982.

Ce moteur présente des caractéristiques très spécifiques qui le différencient des moteurs électromagnétiques classiques. Il peut être très facilement miniaturisé et est capable de déplacements nanométriques.

Principe du moteur piézoélectrique

Le moteur piézoélectrique diffère des moteurs électriques décrits dans les pages qui précèdent, car il ne fait pas appel à un champ magnétique pour créer un couple électromécanique.

Le principe repose sur la déformation d'une céramique piézoélectrique qui a la propriété de subir une déformation lorsqu'elle est soumise à l'action d'un champ électrique (effet piézoélectrique inverse). Les moteurs piézoélectriques sont constitués d'un stator vibrant qui entraîne, par friction, un rotor fortement pressé contre lui.

Cette vibration mécanique est entretenue par deux tensions d'alimentation qui l'excitent à une fréquence proche de la résonance. Chaque tension d'alimentation propage une onde stationnaire (les ventres et les noeuds sont situés à des positions fixes sur le stator).

C'est par une alimentation en quadrature des deux tensions qu'une onde progressive se propage et qui entraîne, par adhérence, le rotor.

On obtient ainsi des déformations de l'ordre de 2 à 3 μm capables d'entraîner le rotor. La figure 56 est une représentation schématique d'un moteur piézoélectrique rotatif.

Le même principe peut être utilisé pour la réalisation d'un actionneur linéaire.

Alimentation du moteur piézoélectrique

Le moteur est alimenté par deux tensions à haute fréquence en quadrature, de quelques dizaines de kHz à plus de 100 kHz. Le sens de rotation est déterminé par le déphasage relatif des tensions. La vitesse de rotation ou de déplacement est fonction de la fréquence d'alimentation.

Les moteurs piézoélectriques peuvent fonctionner en boucle fermée.

Caractéristiques des moteurs piézoélectriques

Ce moteur présente un rapport couple/masse élevé, ne génère aucun bruit de fonctionnement et présente un fort couple à l'arrêt sans alimentation. Son mode de fonctionnement, basé sur un entraînement par friction, entraîne un faible rendement (de l'ordre de 30%) et, une durée de vie réduite (quelques milliers d'heures).

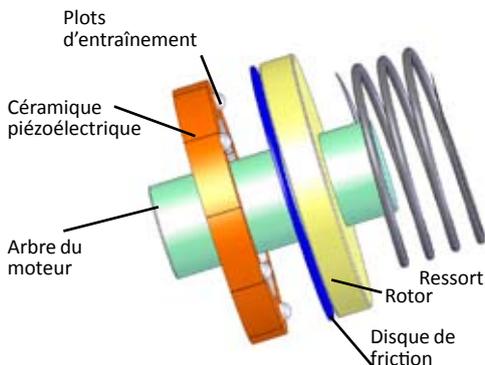


Figure 56 Représentation schématique d'un moteur piézoélectrique (vue éclatée)

3- L'entraînement

3-4- Les moteurs

Domaine d'application des moteurs piézoélectriques

Très peu de fabricants proposent ce type de moteur qui trouve sa place dans des applications de microdéplacements qui peuvent atteindre le nanomètre.

On le trouve principalement dans la fabrication de semi-conducteurs, dans le domaine médical, l'optique de précision, le domaine spatial, la métrologie, etc.

3- L'entraînement

3-5- Le dimensionnement des moteurs

L'utilisation d'un servomoteur réclame un certain nombre de déterminations préliminaires et pour en faciliter le dimensionnement, les constructeurs mettent des utilitaires à disposition des utilisateurs.

Le dimensionnement nécessite la connaissance du couple équivalent thermique et de la vitesse moyenne demandée par la mécanique à associer au servomoteur.

Il faut donc connaître avec une précision convenable le couple résistant et l'inertie de la charge, laquelle inclura, si nécessaire, l'inertie du réducteur. La connaissance de l'inertie permet de calculer le couple d'accélération et de décélération en utilisant la formule:

$$C = J \frac{\Delta\Omega}{\Delta t}$$

où $\Delta\Omega$ est l'incrément de vitesse et Δt le temps d'accélération ou de décélération et J l'inertie totale. Bien que cette formule suppose des accélérations et décélérations linéaires, elle pourra être utilisée dans le cas de rampes en S qui sont utilisées dans le cas de rapport d'inertie élevé ou quand il faut manipuler des objets fragiles.

Le dimensionnement consiste à réaliser les phases suivantes :

Établissement du chronogramme du cycle moteur

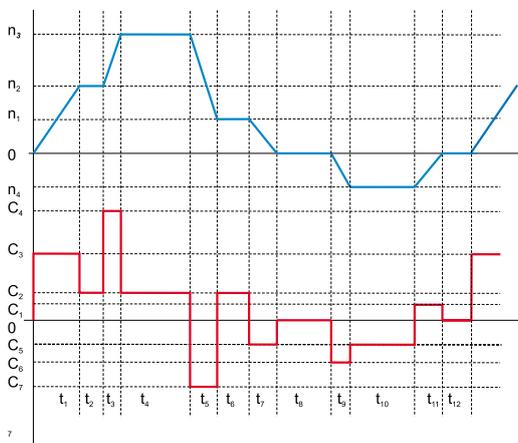


Figure 57 Chronogramme du cycle moteur

Le cycle de fonctionnement du moteur est une succession de sous-ensembles dont la durée de chacun est connue.

Chaque sous-ensemble se décompose en phases correspondant à des durées pendant lesquelles le couple est constant.

Le chronogramme Figure 57 est une illustration d'un cycle possible.

Cette décomposition permet de connaître pour chaque phase:

- sa durée (t_i),
- sa vitesse (n_i),
- la valeur du couple demandé (C_i). t_1, t_3 et t_9 correspondent à des durées d'accélération,
- t_2, t_4, t_6 et t_{10} sont des phases de travail à couple constant,
- t_5, t_7 et t_{11} sont des phases de décélération,
- t_8 et t_{12} sont des phases de repos.

La durée totale du cycle T_{cycle} est la somme des temps de t_1 à t_{12} .

Les vitesses sont numérotées de 0 à n_4 et les couples de 0 à C_7 , les temps d'accélération et de décélération peuvent être identiques ou non, les couples de travail identiques ou non.

Les valeurs sont fixées par les conditions de fonctionnement de la machine.

3- L'entraînement

3-5- Le dimensionnement des moteurs

Calcul de la vitesse moyenne

La vitesse moyenne a pour expression:

Dans cette formule:
$$n_{moy} = \frac{\sum |n_i| \times t_i}{\sum t_i}$$

- n_i correspond aux différentes vitesses de travail,
- n_p , pour une phase d'accélération ou de décélération constante a pour expression:

$$n_i = \frac{n_f + n_d}{2}$$

où n_f est la vitesse finale atteinte en fin d'accélération ou de décélération et n_d la vitesse de départ pour la plage considérée,

- t_i est la durée de chaque phase.

Dans l'exemple choisi n_{moy} aura pour expression:

$$n_{moy} = \frac{\frac{n_2}{2} \times t_1 + n_2 \times t_2 + \frac{n_3 + n_2}{2} \times t_3 + n_3 \times t_4 + \frac{n_3 + n_1}{2} \times t_5 + n_1 \times t_6 + \frac{n_1}{2} \times t_7 + \frac{n_4}{2} \times t_9 + n_4 \times t_{10} + \frac{n_4}{2} \times t_{11}}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 + t_8 + t_9 + t_{10} + t_{11} + t_{12}}$$

Calcul du couple thermique équivalent

L'objectif est de déterminer l'échauffement du moteur.

Le couple du moteur étant proportionnel au courant, le calcul du couple thermique sur un cycle est donc justifié.

Cependant avec cette estimation, les pertes du moteur sont supposées constantes quelle que soit la vitesse, ce qui n'est pas strictement exact, car les pertes augmentent avec la vitesse.

Ce phénomène est plus ou moins marqué suivant les moteurs. Dans la pratique cette méthode donne cependant des résultats parfaitement exploitables. Il faudra néanmoins s'assurer qu'aucun point de fonctionnement ne se trouve hors des limites du constructeur. En préliminaire, on déterminera le couple thermique équivalent, qui a pour expression:

$$C_{eq} = \sqrt{\frac{\sum C_i^2 \times t_i}{T_{cycle}}}$$

Dans notre exemple le couple thermique équivalent a pour valeur :

$$C_{eq} = \sqrt{\frac{C_3^2 \times t_1 + C_2^2 \times t_2 + C_4^2 \times t_3 + C_2^2 \times t_4 + C_7^2 \times t_5 + C_2^2 \times t_6 + C_5^2 \times t_7 + C_6^2 \times t_9 + C_5^2 \times t_{10} + C_1^2 \times t_{11}}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 + t_8 + t_9 + t_{10} + t_{11} + t_{12}}}$$

Vérification de la taille du servomoteur (exemple avec un servomoteur synchrone)

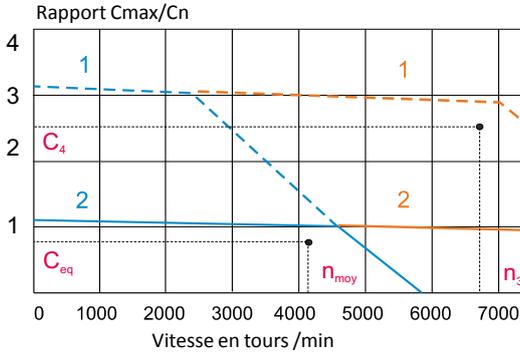


Figure 58 Vérification du point de fonctionnement

C_{eq} et n_{moy} déterminent le point de fonctionnement qui doit se situer dans la zone délimitée par la courbe 2 et la vitesse de travail fixée par le constructeur du servomoteur, comme représenté sur la Figure 58.

Il faudra également vérifier, avec les données ayant servi à la création du chronogramme Figure 57, que tous les points de fonctionnement C_i, n_i , pris individuellement, se situent dans la zone de travail délimitée par la courbe 1 et la vitesse nominale spécifiée dans le catalogue.

Dans notre exemple, la vitesse n_3 associée au couple C_4 impose d'alimenter le moteur avec un variateur travaillant sous 230V (courbe représentée en rouge).

3- L'entraînement

3-6- Les freins

La nature du moteur, de la charge où les règles de sécurité nécessitent souvent l'utilisation d'un frein.

Le frein est inutile dans certains cas. En fonction du réducteur utilisé, le système mécanique peut être irréversible, comme avec certaines transmissions par vis ou les réducteurs à vis à partir d'un certain rapport de réduction ou encore si le moteur possède un couple de détente convenable comme avec les moteurs pas-à-pas à aimants ou les moteurs DC brushless. Cette éventualité est à étudier au cas par cas avec le fournisseur de la motorisation.

Le frein est le plus souvent imposé par des règles de sécurité qui exigent l'immobilisation immédiate de l'axe si un danger potentiel existe. Il faut noter également que les performances dynamiques du moteur sont affectées par la présence du frein qui apporte une inertie supplémentaire.

Constitution d'un frein

Les freins utilisés sont tous des freins électriques fonctionnant à manque de courant, c'est-à-dire que le frein est appliqué si la tension d'alimentation est absente.

La Figure 59 représente un frein de ce type vu en coupe, dans la position désengagée, c'est à dire alimenté.

Le frein comprend 6 parties :

- un boîtier qui renferme le mécanisme et est solidaire de la carcasse du moteur,
- un plateau de friction cannelé solidaire de l'arbre de sortie du moteur; ce plateau porte des garnitures de freinage,
- un plateau de freinage en matière magnétique qui est la partie mobile d'un électroaimant; ce plateau peut coulisser suivant l'axe du moteur, mais est immobilisé en rotation par des tiges solidaires de la culasse,
- une bobine qui, alimentée, permet d'attirer le plateau de freinage et désengager le frein,
- des ressorts de pression qui viennent appliquer le plateau de freinage sur le plateau de friction quand l'alimentation de la bobine est coupée,
- une culasse qui ferme le boîtier.

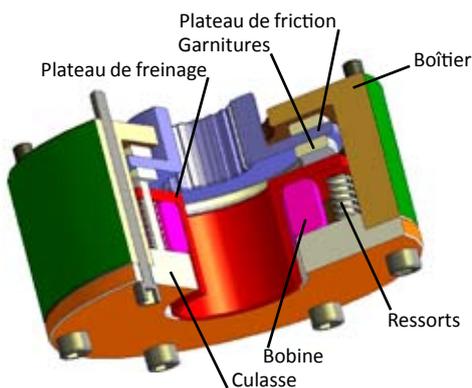


Figure 59 Vue en coupe d'un frein à manque de courant

Quand la bobine est alimentée, le plateau mobile figuré en rouge est attiré et libère le frein; le moteur est alors libre en rotation. En cas de coupure de courant, les ressorts déplacent le plateau de freinage ce qui a pour effet d'immobiliser l'axe.

Le temps nécessaire à la libération et à l'application du frein est de quelques dizaines de millisecondes (typiquement 50 ms).

L'utilisation usuelle de ces freins se fait à l'arrêt du moteur et le couple exercé est suffisant pour maintenir la charge, mais certains constructeurs proposent des produits pouvant supporter des arrêts d'urgence depuis la pleine vitesse.

La procédure d'arrêt normale d'un axe est la suivante :

- freinage électrique initial par récupération d'énergie (voir le chapitre des

1- L'entraînement

3-6- Les freins

variateurs),

- maintien de l'arbre en position par le variateur par la boucle de position,
- application du frein en cas d'arrêt du variateur, par exemple arrêt de la machine ou mise en sécurité du variateur comme décrit dans la partie de cet ouvrage dédiée à la sécurité.

Le frein est contrôlé et alimenté par le variateur pour respecter la séquence de fonctionnement et assurer la bonne reproductibilité de la manoeuvre. Si le frein est utilisé de manière répétée pour des freinages d'urgence, il pourra être nécessaire de vérifier son état. L'usure dépend du nombre de freinages, de l'inertie totale et de la vitesse à partir de laquelle le freinage est exercé. Le frein étant toujours monté par le fournisseur du moteur, celui-ci dispose des informations utiles.

3- L'entraînement

3-7- Les codeurs

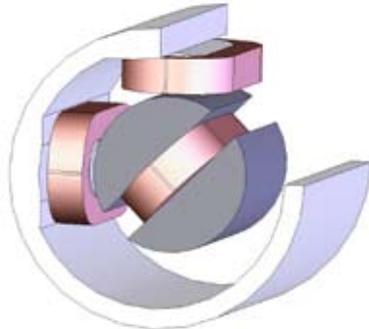


Figure 60 Représentation simplifiée d'un résolveur



Figure 61 Réalisation industrielle

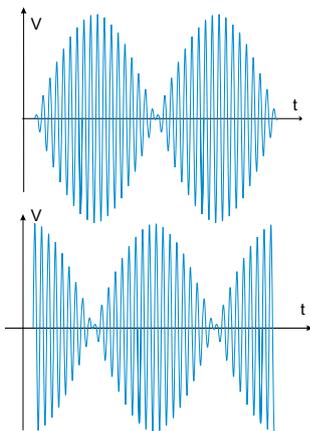


Figure 62 Allure des tensions du résolveur, moteur en rotation

Le codeur est un organe essentiel pour le fonctionnement du servomoteur.

Pour que les boucles d'asservissement aient la plus large bande passante possible et permettent une rotation sans à-coup à très basse vitesse, les mesures de vitesse et de position du moteur doivent être faites avec le maximum de résolution et de précision.

Le capteur de position joue un rôle très important dans la boucle d'asservissement, car ses indications sont utilisées pour réaliser la commande de vitesse/position, mais aussi pour assurer le fonctionnement de l'autopilotage. Le choix du capteur dépend des besoins de l'application: les modèles les plus fréquemment rencontrés sont les résolveurs, les codeurs incrémentaux et les codeurs sinusoïdaux.

Le résolveur

Le résolveur (Figure 60 et 61) est un composant électromécanique (pour simplifier, un transformateur tournant) constitué, au minimum, d'une bobine rotor et de deux bobines stator disposées en quadrature.

L'excitation primaire (ou porteuse) du rotor est une tension sinusoïdale, de fréquence comprise entre 4 et plus de 10 kHz.

Les tensions induites dans les deux enroulements orthogonaux du stator ont une forme sinusoïdale qui restitue la position angulaire θ_t de l'arbre (Figure 62). Les deux tensions sont de la forme:

$$V1 = k Va \sin \theta_t$$

$$V2 = k Va \cos \theta_t$$

où k est le rapport de transformation du résolveur, Va la tension alternative d'alimentation du résolveur et θ_t l'angle, fonction du temps, entre le rotor et une bobine. Le rapport $V1/V2$ donne directement la tangente de l'angle θ_t en éliminant le rapport de transformation et la porteuse.

Le résolveur est capable de fonctionner dans une large plage de température.

C'est aussi un capteur de position fiable et robuste pour les environnements difficiles. Il donne une information de position absolue sur un tour, condition indispensable pour l'autopilotage d'un servomoteur synchrone ou asynchrone.

L'unité de traitement qui alimente le moteur exigeant des signaux numériques, les informations du résolveur devront donc être converties.

Il existe deux approches possibles. L'une consiste à utiliser un convertisseur RDC (Résolver to Digital Conversion). Cette technique de conversion fournit une sortie numérique avec une bonne immunité au bruit. Cependant, il faut tenir compte du retard introduit par le filtre présent à l'intérieur du convertisseur RDC.

La deuxième fait appel à un circuit intégré dédié de type DSP (Digital Signal Processor). Les tensions en sinus et cosinus des enroulements secondaires

3- L'entraînement

3-7- Les codeurs

du résolveur sont appliquées à deux convertisseurs analogiques/numériques.

Le traitement numérique DSP, en déduit la position de l'arbre du moteur. La résolution obtenue sur la position numérique dépend de la résolution des convertisseurs analogique/numérique (12 ou 16 bits).

La valeur de la vitesse est dérivée de la valeur de la position, ce qui introduit du bruit sur le calcul de la vitesse et affecte le courant moteur.

La précision de la mesure de la position dépend principalement de la qualité du résolveur (assemblage de l'enroulement de la bobine et excentration lors du montage du rotor et du stator). La conversion analogique numérique (RDC ou DSP) intervient également. L'erreur de la mesure de position est généralement inférieure à ± 30 minutes d'arc.

Les codeurs digitaux

Deux types de codeurs peuvent être utilisés : les codeurs incrémentaux et les codeurs sinusoïdaux. Tous les deux utilisent des techniques similaires de balayage optique. La lumière, émise par une DEL (diode électroluminescente), passe à travers un disque en rotation (solidaire de l'axe du moteur) comportant des marques fixes, transparentes et opaques, et arrive sur un réseau de phototransistors (Figure 63).

Le signal délivré se présente sous la forme d'une succession d'impulsions dont la période est représentative de la vitesse.

Le nombre de paires de marques opaques et transparentes régulièrement espacées sur la circonférence du disque correspond à la résolution du codeur ou, en d'autres termes, au nombre de périodes du signal de sortie sur un tour.

La précision de la mesure de la position dépend essentiellement de la précision de l'assemblage mécanique du codeur. Cette valeur est en général inférieure à un pas du disque tournant, de sorte que la précision du codeur dépend de sa résolution (soit un quart de la période du signal).

Par conséquent, pour un codeur incrémental avec une résolution de 4096 pas, l'erreur de la mesure de position est d'environ 1,5 minute d'arc.

Le codeur incrémental a un inconvénient : comme la mesure est obtenue en comptant le nombre de périodes du signal de sortie à partir du moment où le capteur est mis sous tension, il fournit une mesure relative et on ne connaît pas la position du moteur au démarrage.

Comme l'autopilotage nécessite de connaître la position des aimants, un dispositif auxiliaire doit être prévu, ce qui peut être réalisé en équipant le moteur de capteurs à effet Hall montés dans le boîtier du moteur.

La position de l'arbre, donc du mobile est également inconnue, ce qui oblige à chaque mise sous tension à effectuer une prise d'origine, soit par un déplacement, soit à l'aide d'un capteur externe pour attribuer une valeur précise à la position du mobile.

Une autre possibilité consiste à garder, en mémoire dans le codeur, la position absolue du moteur, sur un tour, lors de l'arrêt précédent. En complément, certains capteurs connus sous le nom de codeurs multitours (Figure



Figure 63 Disque optique d'un codeur incrémental

3- L'entraînement

3-7- Les codeurs



Figure 64 Train de réduction (à droite) et capteurs à effet Hall (à gauche) d'un codeur multitours

64), permettent, par l'intermédiaire d'un train de réduction associé à des capteurs à effet Hall de garder en mémoire la position sur plusieurs tours (jusqu'à 4096 tours dans la pratique). On évite ainsi la prise d'origine à chaque mise sous tension.

Le codeur absolu mesure la position absolue de l'arbre du moteur et il est donc bien adapté aux asservissements de position et à l'autopilotage. En contrepartie, cette solution est plus onéreuse que le codeur incrémental.

La recherche de la performance exige l'augmentation de la résolution du codeur incrémental et donc le nombre de points par tour. Mais, aux vitesses de rotation élevées, la fréquence du signal de sortie du codeur devient très élevée et est limitée par l'électronique du système d'asservissement.

Pour cette raison les codeurs incrémentaux avec sorties sinus/cosinus sont souvent préférés aux codeurs incrémentaux classiques, car l'information de la position est tout le temps disponible pour l'électronique de l'asservissement à l'intérieur d'une période de la résolution de base.

Les codeurs incrémentaux avec sorties sinus/cosinus (schéma de principe Figure 65) permettent de réaliser les asservissements les plus performants. La précision, le temps de réponse, la bande passante, la stabilité de la rotation à basse vitesse et la robustesse sont nettement améliorés.

Ce type de codeur fournit plusieurs informations, indispensables au fonctionnement de l'asservissement :

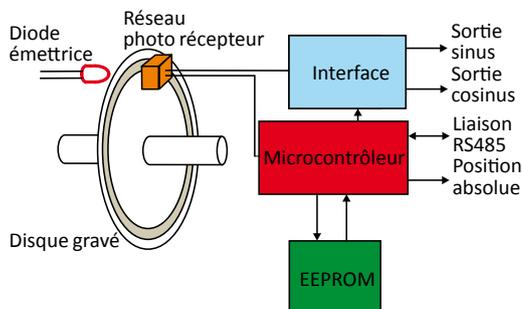


Figure 65 Schéma de principe d'un codeur sinus cosinus

- la position absolue du mobile, ce qui permet de connaître la position réelle de l'axe. Cette information est stockée dans le codeur et ne dépend pas de son alimentation. Elle peut être stockée dans une mémoire non volatile, de manière mécanique ou dans une mémoire sauvegardée par une batterie,
- des informations sur les caractéristiques du moteur auquel le codeur est associé. Ces informations seront utilisées par le variateur pour réaliser son auto-ajustement,
- les informations sinus et cosinus pour le pilotage du moteur. La sortie est une tension analogique (Figure 66) et, suivant les codeurs, le nombre de périodes par tour moteur varie de 16 à 1024.

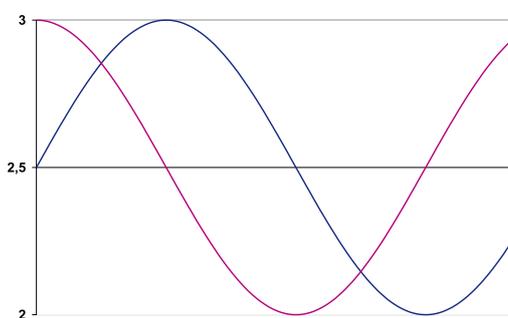


Figure 66 Forme du signal de sortie d'un codeur sinus cosinus

3- L'entraînement

3-8- L'offre moteur

L'offre est le reflet du savoir-faire et de l'historique des constructeurs. Elle correspond à leur approche du marché et au service qu'ils peuvent apporter à leurs clients.

En raison du nombre élevé de variantes et de spécifications, il est risqué d'associer un variateur d'un fabricant à un moteur quelconque.

On constate également que le marché du contrôle de mouvement est très dynamique et bénéficie constamment d'améliorations pour tous les éléments de la chaîne : moteurs avec de nouvelles approches, variateurs avec de nouvelles fonctions, logiciels de programmation, bus de communication pour n'en citer que quelques-uns.

Variantes de présentation de servomoteurs

Les machines sont de plus en plus compactes et l'emplacement dévolu au moteur est crucial. Les constructeurs ont porté leur effort sur la conception de moteurs capables de délivrer le maximum de couple dans un volume donné. Aujourd'hui, tous les constructeurs utilisent des aimants à terres rares, en général néodyme-bore, qui permettent d'obtenir le maximum de flux pour un volume donné.

Les illustrations qui suivent sont extraites de catalogues de fournisseurs et sont représentatives de l'offre du marché.

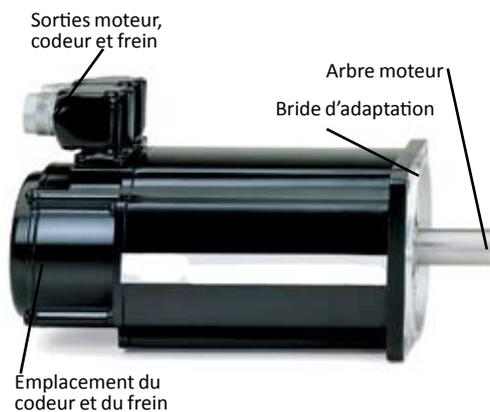


Figure 67 Servomoteur synchrone

Moteur standard (Figure 67)

Les moteurs adoptent la disposition représentée Figure 66. La bride d'adaptation permet un montage direct sur la machine, ou l'adaptation d'un réducteur. La partie arrière du moteur renferme le codeur et le frein éventuel. Le moteur est, dans la plupart des cas, muni de connecteurs. Les servomoteurs à courant continu se distinguent par la présence de bornes d'accès aux balais.

Moteur à arbre creux (Figure 68)

Cette technologie est offerte pour des moteurs synchrones ou asynchrones. Le stator et le rotor peuvent être ou non démontables. Le rotor a la particularité d'être creux et peut être directement enfilé sur l'arbre à entraîner.

Cette disposition permet un gain important d'encombrement, l'entraînement est direct donc sans jeu. En revanche, pour les moteurs synchrones, l'assemblage est délicat en raison de la force d'attraction procurée par les aimants et le codeur doit être ajusté avec précision.



Figure 68 Moteur synchrone à rotor creux

Moteurs pour environnements particuliers

L'environnement des machines a une influence importante sur les moteurs. Le contrôle du mouvement impose que le moteur soit installé au plus près de l'axe à entraîner pour minimiser les jeux et les inerties. Il en découle que le moteur est soumis aux mêmes contraintes que le reste de la machine.

Chaque industrie a ses propres exigences en la matière. L'industrie alimen-

3- L'entraînement

3-8- L'offre moteur



Figure 69 Servomoteur pour l'industrie alimentaire



Figure 70 Moteur inoxydable



Figure 71 Servomoteur ATEX



Figure 72 Ensemble servomoteur / réducteur



Figure 73 Moteur linéaire.

taire, par exemple, impose des normes d'hygiène très strictes qui nécessitent des lavages fréquents. Les produits doivent donc être étanches et les revêtements employés compatibles. Certaines machines peuvent travailler en atmosphère corrosive, susceptibles de dégrader les moteurs.

Une offre unique n'est donc pas envisageable et les fournisseurs proposent des moteurs dont la protection est adaptée aux spécificités des environnements. L'utilisateur pourra trouver des moteurs adaptés à l'industrie alimentaire (Figure 69).

Le revêtement du moteur et les matériaux sont insensibles aux produits de lavage et la forme de la surface est étudiée pour faciliter l'évacuation de toute impureté. Pour les cas extrêmes, des moteurs inoxydables sont également proposés (Figure 70). Ce moteur est utilisable en atmosphère stérile et supporte le lavage à haute pression.

Certaines zones de production telles que les cabines de peinture, l'industrie chimique, les raffineries, les installations pétrolières, les silos, etc. sont susceptibles de présenter des atmosphères explosives.

Un moteur ATEX antidéflagrant ou à sécurité renforcée (Figure 71) est alors indispensable. Un moteur de ce type se différencie d'un moteur standard par un blindage pressurisé et des sorties spécifiques.

Moteur avec réducteur incorporé

Quelques offreurs, habituellement fabricants de réducteurs, proposent dans leur catalogue des associations servomoteur réducteur telles que représentées Figure 72, ce qui peut faciliter le choix de la solution.

Moteurs linéaires

Les moteurs linéaires adoptent la forme représentée Figure 73. Le primaire est refroidi par eau ou par air et le secondaire est d'un seul bloc pour les déplacements de faible amplitude ou constitué d'éléments distincts.

Refroidissement

La recherche des fabricants a porté tout particulièrement sur la réduction des pertes. En effet, le moteur étant par nécessité le plus proche possible de l'axe à commander, l'échauffement du moteur et les dilatations qui en découlent peuvent avoir un effet non négligeable sur la précision des asservissements.

Le servomoteur synchrone présente l'avantage de ne pas développer de pertes au rotor et, pour faciliter le refroidissement du stator, la carcasse du moteur est en alliage léger, le plus généralement de couleur noire, ce qui permet un refroidissement optimum. Le refroidissement du moteur se fait par rayonnement, le réducteur et le bâti de la machine contribuant également à l'évacuation de calories.

Cependant, à partir d'une certaine puissance, ce mode de refroidissement peut devenir insuffisant. Un refroidissement par liquide s'impose. De même, en raison des pertes liées à leur technologie, les servomoteurs synchrones et asynchrones linéaires sont fréquemment refroidis par liquide; il en est de même pour les servomoteurs asynchrones (Figure 74) que l'on

3- L'entraînement

3-8- L'offre moteur

Raccords pour le liquide de refroidissement



Figure 74 Servomoteur asynchrone refroidi par liquide

trouve sur des applications de haute puissance.

Protection thermique des moteurs

Pour éviter d'être endommagés, les moteurs sont protégés thermiquement : soit par une ou plusieurs sondes de température disposées sur les bobinages (voir Figure 43), soit par une image thermique du moteur, générée dans le variateur, à partir de la valeur du courant et du cycle de fonctionnement. Ceci permet par anticipation des stratégies alternatives comme l'arrêt de la machine dans une position particulière. La même fonction peut être obtenue en disposant de sondes analogiques. La protection la plus efficace reste la sonde de température, car l'image thermique ne prend pas en compte la température ambiante.

Récapitulatif des technologies disponibles

Le tableau Figure 75 regroupe les moteurs possibles pour le contrôle du mouvement

Moteur	Variante	Puissance ou couple nominaux usuels	Vitesse maximale	Performances				Contraintes		Durée de vie
				Position	Vitesse	Couple	Dynamique	Installation	Entretien	
Courant continu	disque	< 5 kW	3000 tr/mn	bonne	très bonne	moyenne	très bonne	non étanche	balais	moyenne (collecteur)
	cloche	< 200 W	6000 tr/mn	bonne	très bonne	moyenne	très bonne	non étanche	balais	moyenne (collecteur)
	couple	20 N.m	3000 tr/mn	bonne	très bonne	très bonne	très bonne	non étanche	balais	moyenne (collecteur)
Courant alternatif	pas-à-pas	20 N.m	dépendante de la charge	très bonne	moyenne	bonne	moyenne	aucune	aucun	très élevée
	synchrone	200 Nm	20000 tr/mn	excellente	excellente	excellente	très bonne	aucune	aucun	très élevée
	asynchrone	20 kW	6000 tr/mn	excellent	excellente	bonne	moyenne	pertes au rotor	aucun	très élevée
	couple synchrone	22 000 N.m	500 tr/ mn	excellente	excellente	excellente	très bonne	montage délicat	aucun	très élevée
	couple asynchrone	100 kW	11000 tr/mn	excellent	excellent	bonne	moyenne	■ montage délicat, ■ pertes au rotor	aucun	très élevée
	DC brushless	20 N.m	8000 tr/mn	faible	bonne	bonne	moyenne	aucune	aucun	très élevée
	linéaire asynchrone	6000 N	600 m/mn	excellente	bonne	bonne	moyenne	■ montage délicat, ■ pertes au primaire et secondaire	aucun	élevée
	linéaire synchrone	9000 N	600 m/mn	excellente	excellente	excellente	très bonne	■ montage délicat, ■ pertes au primaire	aucun	élevée
	piézo-électrique rotatif	5 W	50 tr/mn	excellente	excellente	excellente	très bonne	aucune	aucun	faible
piézo-électrique linéaire	600 N	100 mm/s	excellent	excellente	excellente	très bonne	aucune	aucun	faible	

Figure 75 Tableau récapitulatif de l'offre moteur

3- L'entraînement

3-8- L'offre moteur

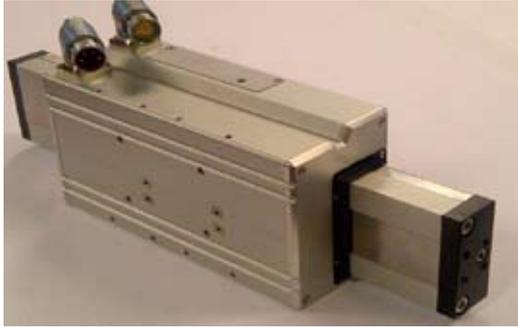


Figure 76 Moteur linéaire à guidage intégré



Figure 77 Ensemble moteur vis à billes

Considérations sur le mode d'entraînement

Pour certaines applications qui ont des contraintes importantes en termes de dynamique (vitesse, accélération) ou de précisions (statiques ou dynamiques), ou d'encombrement, il est avantageux, chaque fois que cela est possible d'utiliser des entraînements directs (voir Figure 67). Ces entraînements directs peuvent être de type linéaire ou rotatif.

Les figures 76 et 77 en donnent deux exemples.

La charge est directement entraînée par le moteur, les éléments intermédiaires de transmissions qui induisent des jeux et réduisent la rigidité torsionnelle sont supprimés.

La charge est donc mieux contrôlée, la réponse du système est meilleure ainsi que sa dynamique. Les entraînements directs permettent de travailler avec des rapports d'inerties, entre la charge et le moteur, qui sont extrêmement importants.

La suppression d'éléments intermédiaires de transmission permet également d'augmenter l'efficacité énergétique, car une transmission est aussi un lieu de perte (rendement, friction...)

Les actions de maintenance sont également réduites (lubrification, contrôle de tension de courroies...)

La conception mécanique est généralement plus simple.

La pertinence de ces solutions est à étudier au cas par cas.

Offre en systèmes intégrés

La plupart des constructeurs proposent des systèmes référencés sur mesure comme des robots cartésiens, des modules linéaires, des axes ou des vérins électriques qui intègrent:

- le guidage utilisant les diverses solutions évoquées,
- sa protection,
- l'entraînement mécanique (en général vis à bille ou courroie)
- le réducteur si besoin,
- le moteur,
- la mesure (codeur intégré au moteur ou règle linéaire),
- les contacts de fin de course.

Pour le bureau d'études ou l'utilisateur, cela signifie un gain de temps et des économies aussi bien au stade des études que de la mise en service.

4- La conversion de puissance

4-1- Les variateurs

L'exploitation des servomoteurs repose sur l'utilisation d'un servovariateur spécifique.

La technologie du moteur aura une influence déterminante sur le servovariateur. Cependant, ils partagent tous un certain nombre de dispositifs et de composants liés aux impératifs de l'application et en particulier :

- le traitement numérique pour le contrôle du positionnement et la commande du moteur,
- l'utilisation de technique d'alimentation à découpage pour assurer des temps de réponse rapides, de meilleures formes de courant, un meilleur rendement et une gamme de vitesse étendue dans les basses vitesses,
- des sécurités imposées par les normes,
- l'emploi de semi-conducteurs de type IGBT.

En préliminaire, nous allons décrire un variateur générique et par la suite nous expliciterons les différences suivant le type de moteur associé

Principe général d'un servovariateur

Un servovariateur (Figure 78) comprend trois parties distinctes :

- un étage d'entrée, qui peut être commun à plusieurs variateurs, assurant la conversion alternatif/continu (redressement) de la tension d'alimentation et une cellule de filtrage constituée d'un ou plusieurs condensateurs,
- un commutateur de sortie qui convertit la tension continue en une tension adaptée au servomoteur ,
- un module de commande.

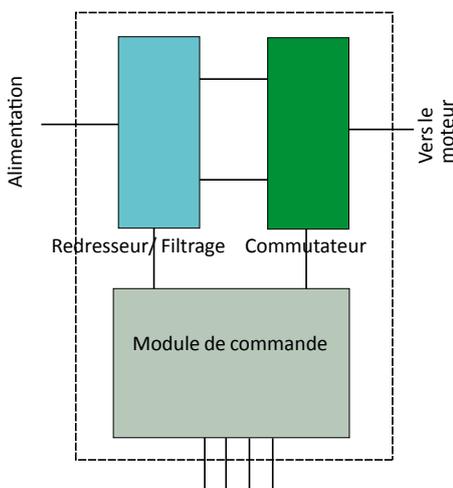


Figure 78 Principe général d'un servovariateur

Conversion alternatif/continu (redressement)

L'étage de conversion (Figure 79) est classiquement constitué d'un pont de diodes. La tension d'alimentation est comprise entre 115V, en général monophasé pour les petits calibres (une dizaine d'ampères) à 440/480 V triphasé pour les modèles les plus puissants.

Occasionnellement, des tensions d'alimentation plus faibles peuvent être rencontrées pour les petits moteurs pas-à-pas.

Pour éviter un appel de courant à la mise sous tension, le pont de diodes est suivi d'un limiteur de courant, constitué le plus souvent d'une résistance qui sera shuntée après temporisation ou parfois par un système purement électronique. Ce circuit permet la charge progressive du condensateur de filtrage.

Les variateurs sont également équipés de filtre CEM pour atténuer les radioperturbations et répondre à la norme des entraînements à vitesse variable IEC/EN 61800-3.

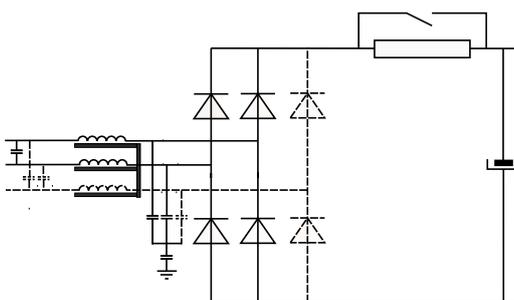


Figure 79 Redresseur, filtrage, filtres CEM et dispositif de limitation de courant à la mise sous tension

4-1- Les variateurs

Commutateur de sortie

Le commutateur de sortie génère les tensions d'alimentation du servomoteur .

La tension de sortie peut être continue, en créneaux ou une tension sinusoïdale.

Les étages de sortie utilisent des semi-conducteurs qui fonctionnent en «tout ou rien» à des fréquences de découpage élevées (plusieurs kHz). Ce procédé connu sous le nom de MLI (Modulation de Largeur d'Impulsions) ou PWM en anglais permet de reconstituer toute forme de tension ou de courant en minimisant les pertes dans le variateur.

Les servovariateurs modernes utilisent presque exclusivement des transistors IGBT, ou en français, transistor bipolaire à grille isolée. Ce composant, combinaison d'un transistor bipolaire et d'un transistor MOS, est commandé par une tension appliquée à une électrode appelée grille ou «gate» isolée du circuit de puissance, d'où son nom « Insulated Gate ».

Ce composant nécessite des énergies infimes pour faire circuler des courants importants (plusieurs centaines d'ampères).

Ses caractéristiques tension/courant sont similaires à celles des transistors bipolaires, mais ses performances en énergie de commande et fréquence de découpage sont très nettement supérieures à tous les autres semi-conducteurs.

Les transistors IGBT peuvent fonctionner à des fréquences de quelques dizaines de kHz.

Pour les variateurs délivrant des courants faibles (10 A max) et alimentés en basse tension (une centaine de volts), le commutateur utilise parfois des transistors MOS de puissance.

L'étage de sortie aura les configurations suivantes :

- ensembles de deux IGBT et leurs diodes de retour associées dans le cas où la charge est un moteur pas-à-pas unipolaire (montage a),
- quatre IGBT et leurs diodes de retour associées dans le cas où la charge est constituée par un moteur à courant continu (montage b),
- six IGBT et leurs diodes de retour associées, quand le moteur est de type triphasé (moteur pas-à-pas, servomoteur synchrone ou asynchrone ou moteur DC brushless) (montage c),
- ensembles de huit IGBT et leurs diodes associées, quand la charge est un moteur pas-à-pas bipolaire (montage d).

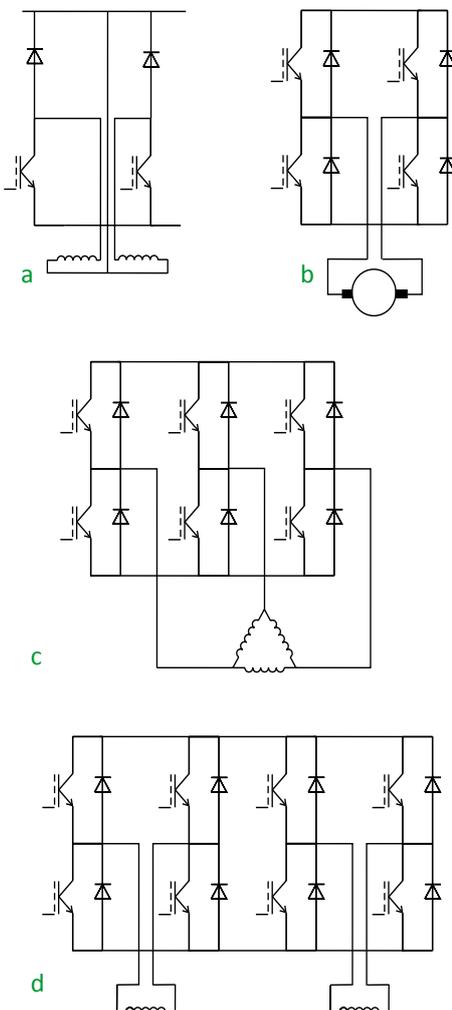


Figure 80 Configurations du commutateur de sortie

La figure 80 représente les quatre possibilités de configurations de l'étage de sortie.

Les commutateurs sont équipés en règle générale de capteurs de courant qui reproduisent en temps réel la forme du courant. On utilise soit des shunts pour les courants faibles soit des capteurs à effet Hall pour les courants élevés.

En complément de cette mesure, les semi-conducteurs sont protégés contre les courts-circuits par une protection instantanée qui assure un verrouillage immédiat.

4- La conversion de puissance

4-1- Les variateurs

Allure des courants de sortie du commutateur

Fonctionnement de l'étage de sortie avec un moteur à courant continu.

Le moteur doit être alimenté avec une tension continue dont la polarité sera fonction du sens de rotation.

Le procédé utilisé consiste à hacher la tension continue fournie par l'étage d'entrée pour restituer un créneau de tension qui sera appliqué au moteur. Les transistors sont alternativement rendus conducteurs et bloqués.

La valeur moyenne de ce créneau dépendra du rapport cyclique. On arrive ainsi aisément à produire une tension continue variable. L'inductance de l'induit du moteur qui, dans le cas d'un moteur à rotor plat, sera une inductance extérieure au moteur produira un courant de forme triangulaire dont l'ondulation sera d'autant faible, pour la même valeur de l'inductance, que la fréquence de découpage sera élevée.

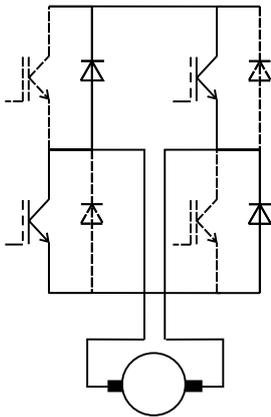


Figure 81 fonctionnement avec un moteur à courant continu

Sur la figure 81, nous avons représenté le fonctionnement de l'étage de sortie pour une polarité donnée appliquée au moteur. Les composants qui assurent la circulation du courant, transistors IGBT et diodes sont représentés en trait plein.

À la mise en conduction des transistors, la tension et le courant prennent l'allure représentée Figure 82. La tension est représentée en rouge et le courant en vert.

Le courant est croissant pendant le temps t_1 qui correspond à la conduction des transistors et décroissant pendant le temps t_2 qui correspond au passage du courant par les diodes de retour, lors du blocage des transistors.

La figure 83 représente un sens de rotation du moteur où la FEM est de polarité opposée à la tension appliquée par l'étage de sortie. Elle vient donc se soustraire à cette tension et la pente de la croissance du courant est, de ce fait, plus lente que la décroissance. Le produit de la tension moyenne par le courant moyen est positif et le variateur fournit de la puissance au moteur. Si à présent la tension appliquée au moteur est inversée, avec le même sens de rotation, la FEM s'ajoute à la tension fournie par le commutateur, en conséquence la pente de croissance est plus rapide que la décroissance, comme montré figure 80. La puissance est alors négative, ce qui correspond à un freinage ou, en d'autres termes, un fonctionnement régénératif. L'énergie est donc restituée à la source continue. L'étage d'entrée à diodes étant, par sa conception, incapable de la retourner à la source, les constructeurs incorporent à leurs servovariateurs une résistance destinée à dissiper cette énergie. En fonction de l'énergie restituée et du cycle de fonctionnement, il peut être nécessaire d'ajouter une résistance extérieure au servovariateur.

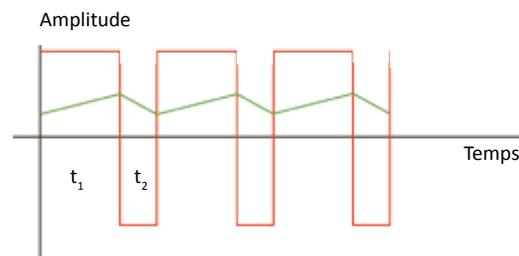


Figure 82 Tension et courant moteur (fonctionnement en moteur)

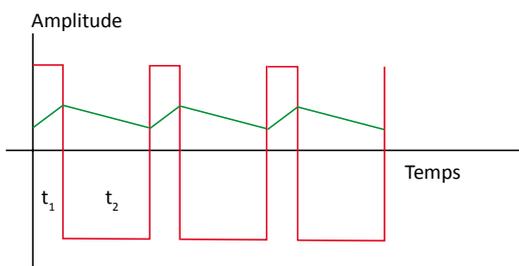


Figure 83 Tension et courant (fonctionnement en frein)

Fonctionnement avec un moteur pas-à-pas.

Le moteur peut être à alimentation bipolaire, unipolaire ou triphasée, ce qui ne change rien au mode de fonctionnement.

4- La conversion de puissance

4-1- Les variateurs

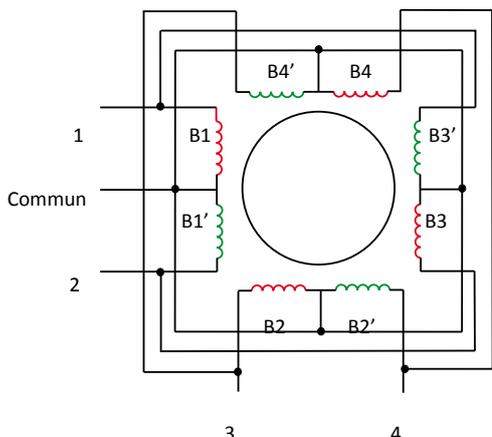


Figure 84 Positions des bobines dans un moteur à alimentation unipolaire

Dans un moteur unipolaire, le courant dans les bobinages est toujours du même sens alors qu'il s'inverse dans un moteur à alimentation bipolaire.

La Figure 84 représente un moteur pas-à-pas à alimentation unipolaire et la position des bobines.

Toutes les bobines ont un point commun qui est la partie médiane du bobinage. Ce point commun sera relié à la source continue. Par convention, nous avons représenté en rouge une bobine qui produit un pôle sud quand un courant la traverse et en vert une bobine qui produit un pôle nord. Les bobines sont notées de B1 à B4 et de B1' à B4'.

Pour mettre en mouvement le rotor, il suffit d'alimenter les bobinages par des créneaux de courant suivant une séquence qui produira alternativement des pôles sud et des pôles nord au stator. Le rotor se positionnera en face du pôle correspondant soit à sa propre aimantation soit à la position correspondant à la réluctance la plus faible. L'alimentation des bobines fait le plus souvent appel à des techniques de découpage MLI (expliqué dans les pages qui suivent) pour permettre à la fois un meilleur temps d'établissement du courant et sa limitation.

La Figure 85 représente une succession possible.

Nous avons représenté les enroulements avec la couleur, leur appellation et la position géométrique de la Figure 84.

Après quatre changements, le cycle se reproduit à l'identique.

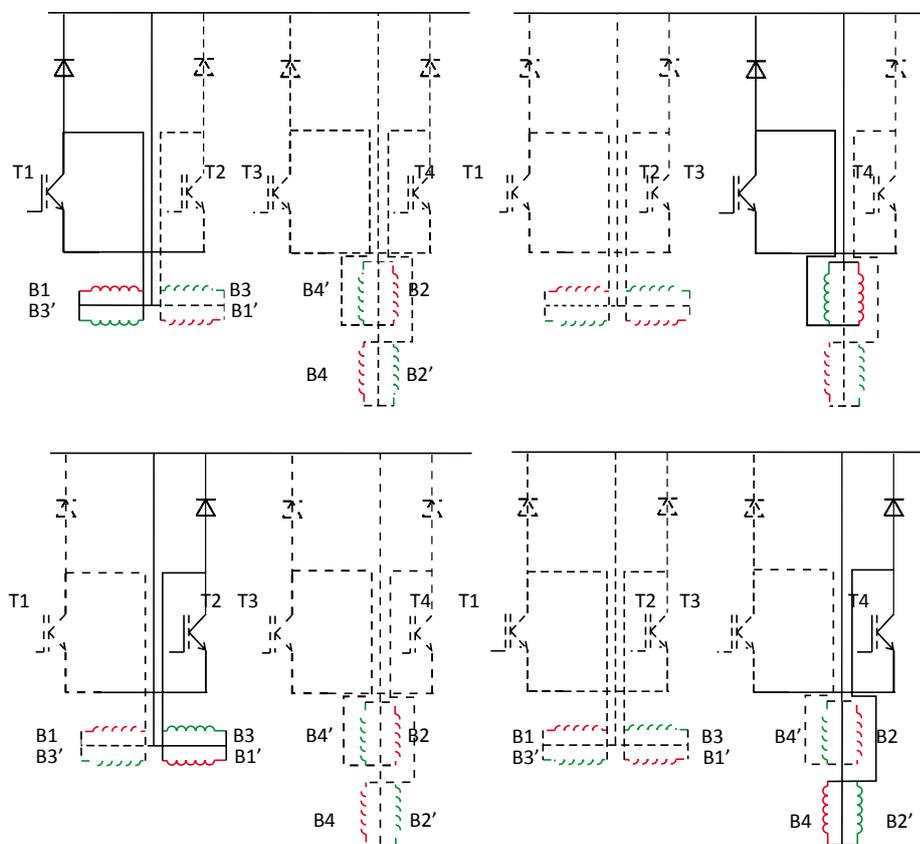


Figure 85 Exemple de séquence d'alimentation d'un moteur pas-à-pas

4- La conversion de puissance

4-1- Les variateurs

T1	T2	T3	T4	Position du flux
1	0	0	0	1
0	0	1	0	2
0	1	0	0	3
0	0	0	1	4

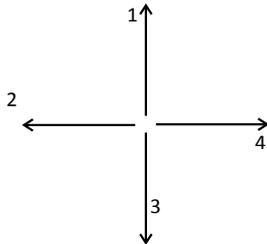


Figure 86 «pas complet», position du flux

T1	T2	T3	T4	Position du flux
1	0	1	0	1
0	1	1	0	2
0	1	0	1	3
1	0	0	1	4

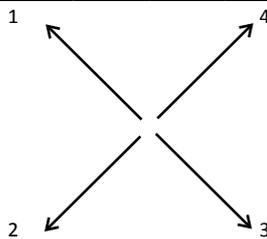


Figure 87 «pas complet» amélioré, position du flux

T1	T2	T3	T4	Position du flux
1	0	0	0	1
1	0	1	0	2
0	0	1	0	3
0	1	1	0	4
0	1	0	0	5
0	1	0	1	6
0	0	0	1	7
1	0	0	1	8

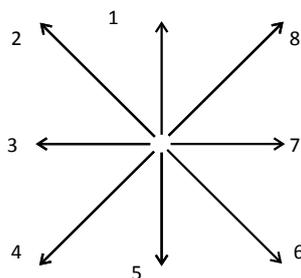


Figure 88 «demi-pas», position du flux

Si les conditions de couple et d'inertie de la charge sont respectées, la vitesse du moteur sera imposée par la fréquence de permutation des bobines.

L'inversion de la succession des étapes change le sens de rotation, sans perte de pas.

Il en sera de même pour l'arrêt qui sera immédiat et le rotor restera figé dans sa dernière position.

La succession représentée Figure 85 est la plus simple possible. Cette commande est dite à «pas complet», c'est-à-dire que le rotor tourne d'un pas à chaque ordre successif.

Le fonctionnement est discontinu et peut donner lieu à des phénomènes de résonance et de bruit dans la machine.

La commande des transistors et l'orientation du flux dans la machine sont représentées Figure 86.

Cette commande peut être améliorée en commandant deux enroulements simultanément.

Le fonctionnement est toujours à «pas complet», mais le couple résultant obtenu est augmenté de manière significative (multiplicateur $\sqrt{2}$)

La commande des transistors et l'orientation du flux dans la machine sont représentées Figure 87.

Pour limiter les bruits dans la machine, une solution simple consiste à effectuer une commande en «demi-pas».

On multiplie ainsi par 2 les pas du rotor et le fonctionnement est notablement amélioré, car la rotation est plus régulière.

La commande des transistors et l'orientation du flux dans la machine sont représentées Figure 88.

Cette constatation conduit à une solution plus sophistiquée consistant à alimenter les bobines par un signal pseudo sinusoïdal où chaque palier correspond à une position du rotor.

Cette commande est désignée sous le nom micro-pas ou «micro-step» en anglais.

Ce procédé permet de multiplier artificiellement le nombre de pas et de réduire de manière très efficace l'irrégularité de rotation propre au moteur pas-à-pas. Le bruit et les phénomènes de résonance sont éliminés.

Le facteur multiplicateur peut atteindre 500.

On obtient ainsi des moteurs / contrôleurs possédant plusieurs milliers de pas.

La forme du courant pour une bobine est schématisée Figure 89.

Chaque pas successif est obtenu par une technique de découpage comme figurée dans le cercle rouge.

Ce procédé ne se justifie que dans les basses vitesses, là où les pulsations de couple sont les plus prononcées et préjudiciables à la régularité du fonctionnement.

4- La conversion de puissance

4-1- Les variateurs

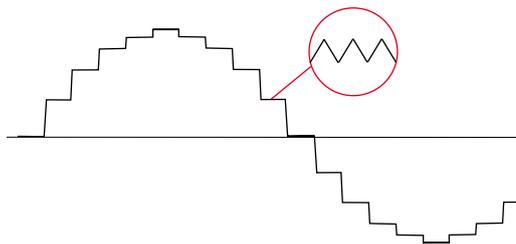


Figure 89 Forme du courant dans une bobine avec une commande micro-pas

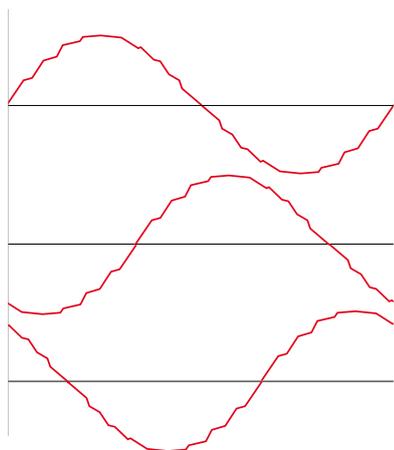


Figure 90 Courants d'alimentation d'un servomoteur synchrone

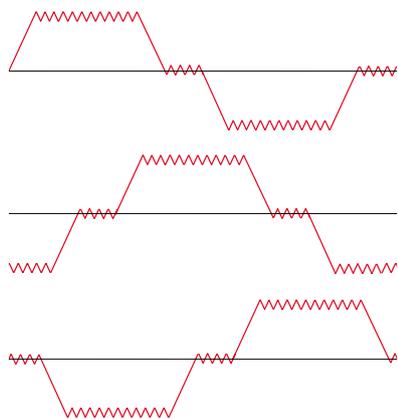


Figure 91 Allure des courants dans un enroulement d'un moteur DC brushless

Fonctionnement avec un servomoteur synchrone

Le servomoteur synchrone en mode autopiloté réclame des courants triphasés sinusoïdaux. Le commutateur sera piloté de telle sorte que la modulation de largeur d'impulsions reproduise une tension sinusoïdale. La modulation de largeur d'impulsions permet de faire varier la tension efficace du moteur dans toute la plage de vitesse. Le découpage s'effectue à fréquence élevée (4 à 8 kHz) et, compte tenu de l'inductance propre des bobinages, le courant est très proche d'une sinusoïde, ce qui a pour effet de réduire les éventuelles irrégularités de rotation à basse vitesse.

La Figure 90 est une reproduction du courant dans les phases moteur

Fonctionnement avec un moteur DC Brushless

La tension de sortie du commutateur est triphasée. Cette tension de sortie est fonction de la vitesse de rotation et est obtenue, ici encore, par un découpage MLI.

Le courant est de forme trapézoïdale pendant 120°. L'ondulation de courant est réduite par l'utilisation d'un découpage à fréquence élevée. Compte tenu de la forme du courant, il y a une légère ondulation de couple.

La figure 91 illustre le courant à une vitesse donnée.

Dimensionnement, élaboration des tensions de sortie des variateurs

Dimensionnement des variateurs

Mis à part les contrôleurs pour moteur pas-à-pas, les variateurs pour commande du mouvement doivent être capables de fournir des courants impulsifs importants de l'ordre de 3 fois le courant nominal du moteur.

Ces surcharges sont nécessaires pour pouvoir accélérer ou freiner le mobile très rapidement. Ces temps de fonctionnement sont par nature limités dans leur durée.

Trois critères dicteront le choix du motovariateur le mieux adapté :

- le cycle thermique,
- les points de fonctionnement vitesse/couple pour l'ensemble du cycle,
- le couple permanent à l'arrêt.

Pour faciliter le choix, les fabricants indiquent dans leurs catalogues les associations possibles de moteurs et de variateurs. Y sont indiqués les couples en continu à l'arrêt, le couple-crête à l'arrêt et la vitesse maximale.

La connaissance de la constante de couple du moteur permet de calculer les courants correspondants. Chez les constructeurs, un même moteur peut être connecté à différents variateurs, ce qui donne un large choix de vitesses maximales.

Élaboration de la tension de sortie des variateurs

La tension de sortie est toujours élaborée par une commande en «tout ou rien» des semi-conducteurs. La technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) est quasi-universelle, sauf pour de tout petits moteurs pas-à-pas où la commande pourra être faite de créneaux de tension.

Comme déjà évoqué, la MLI consiste à découper à fréquence élevée une tension continue, ce qui permet de reproduire tout type de signal. Cette technique présente plusieurs avantages.

Les semi-conducteurs du commutateur n'ont que deux états : un état bloqué et un état passant. Les pertes dans le semi-conducteur à l'état bloqué sont quasi-nulles et faibles à l'état passant. Elles dépendent alors de la tension de déchet, de la résistance interne du semi-conducteur et du courant qui le parcourt.

Les pertes dans le commutateur sont essentiellement produites pendant les temps de commutation, c'est-à-dire de changement d'état. Les semi-conducteurs tels que les MOS et les IGBT ont des temps de commutation particulièrement brefs et donc de faibles pertes de commutation, ce qui autorise un fonctionnement à fréquence élevée avec des pertes acceptables. Une fréquence élevée permet de réduire l'ondulation de courant dans le moteur, ce qui a pour effet d'améliorer la qualité de rotation. La fréquence de découpage sera un compromis entre le rendement du variateur et l'ondulation tolérable du courant. De plus, pour conserver de bonnes performances dynamiques, la fréquence de la MLI doit se situer largement au-delà de la fréquence de coupure de la régulation et en particulier de la boucle de courant (un rapport de 5 est un minimum). Avec une fréquence de découpage de quelques kHz (8 kHz est une valeur courante), tous ces critères sont satisfaits et le rendement obtenu est excellent (+ de 90%), ce qui permet de réduire les radiateurs des semi-conducteurs et conduit à des variateurs particulièrement compacts.

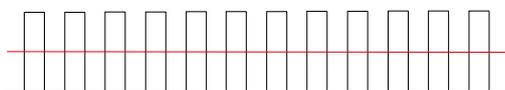


Figure 92 Production d'une tension continue.

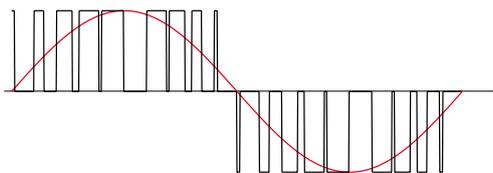


Figure 93 Production d'une tension sinusoïdale.

Les figures 92 et 93 représentent, en rouge, les tensions moyennes obtenues avec une MLI.

Un découpage MLI avec un rapport cyclique de 50% (Figure 89) donne une tension moyenne égale à la moitié de la tension continue disponible, un découpage MLI sinusoïdal (Figure 93) reproduit une tension sinusoïdale.

La commande MLI présente des avantages complémentaires.

En premier, elle permet de réguler et de limiter le courant dans la charge en disposant des capteurs dans les sorties du commutateur. La limitation se fera tout simplement en réduisant la tension de sortie.

Le deuxième avantage est de permettre d'obtenir des établissements de courant plus rapides, en particulier pour les moteurs pas-à-pas. En effet, comme pour tout autre moteur, le couple nominal ne peut être obtenu que lorsque le courant atteint sa valeur nominale. Malheureusement, l'inductance des bobinages interdit un établissement instantané du courant et la pente de montée, fonction de la tension d'alimentation, aura l'allure représentée Figure 94.

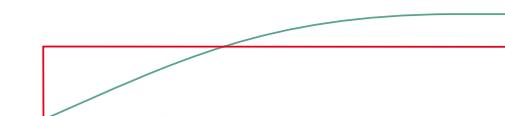


Figure 94 Établissement du courant dans un enroulement

Ce phénomène a pour effet de diminuer le couple, de limiter la fréquence maximale des créneaux de commande et donc la vitesse de rotation.

En adoptant une tension d'alimentation plus élevée et en utilisant une commande par MLI, il est possible de réduire sensiblement le temps de

4- La conversion de puissance

4-1- Les variateurs

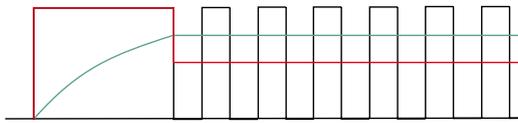


Figure 95 Établissement du courant avec une commande MLI

montée du courant et d'augmenter les performances de couple et de vitesse. La figure 95 représente cette technique. Dans notre exemple, la tension appliquée est maintenue au double de la tension nominale, jusqu'à l'obtention du courant nominal, puis le rapport cyclique de la MLI est ramené à 1/2. Pour simplifier la figure, l'ondulation du courant n'est pas représentée.

Fonctions de régulation, de protection et de sécurité réalisées par les variateurs

Le variateur réalise trois fonctions liées à l'axe qu'il contrôle :

- la fonction de régulation,
- la fonction de protection,
- la fonction de sécurité.

La fonction de régulation

Hormis les variateurs pour moteurs pas-à-pas, la plupart des variateurs fonctionnent en boucle fermée appelée aussi boucle de régulation. Ce procédé permet d'obtenir des systèmes de contrôle du mouvement capables de réagir à une perturbation extérieure et de maintenir une valeur imposée. On obtient ainsi la rapidité de réponse, la stabilité et la précision, car il devient possible de réduire l'erreur à une valeur négligeable.

En contrepartie, la régulation en boucle fermée impose la présence de capteurs pour disposer des informations en temps réel des états du système à contrôler.

Le moteur sera donc équipé d'un codeur permettant d'obtenir la vitesse et la position ainsi que la position d'origine si ce dernier incorpore cette fonction. Le variateur disposera également d'une mesure du courant dans la machine.

La précision dépendra essentiellement de la résolution des capteurs, c'est-à-dire de leur capacité à détecter la plus petite variation. Un capteur délivrant 4096 points par tour permettra une résolution meilleure que 1,5 minute d'arc.

Certaines informations sont fournies sous forme analogique. C'est le cas en particulier de la mesure de courant. Pour être exploitées, ces informations sont converties en signaux digitaux par des convertisseurs analogiques / digitaux. Du nombre de bits de conversion (10 à 12 dans la pratique) découle la précision de la régulation.

La structure usuelle est la régulation cascade où sont contrôlées toutes les dérivées successives de la grandeur principale à asservir. Le contrôle des dérivées successives permet d'obtenir la stabilité du système.

Dans le contrôle du mouvement, cette grandeur est la position de l'axe que l'on peut traduire par un angle pour une machine tournante. La première dérivée est la vitesse et la deuxième est l'accélération ou, ce qui est équivalent, le courant dans la machine.

La première boucle sera donc un régulateur de position, la suivante un ré-

4- La conversion de puissance

4-1- Les variateurs

variateurs. Le courant dans les bobinages est soit fixé par la tension d'alimentation (cas des moteurs pas-à-pas), soit par la charge de la machine. La fonction de limitation a pour objet d'éviter la destruction du moteur par échauffement suite à un fonctionnement prolongé en surcharge ou du variateur par dépassement des capacités des semi-conducteurs. Cette fonction est réalisée par la boucle de régulation de courant déjà évoquée.

La protection contre les courts-circuits entre phases ou entre phase et masse est incontournable. Cette protection doit être instantanée, car les semi-conducteurs ne peuvent accepter les surintensités sans dommages irréversibles.

On pourra également disposer d'une fonction de limitation de vitesse, en particulier quand une boucle de position est présente. Une limitation de la tension machine peut également être prévue.

Enfin, on trouvera souvent des limitations d'accélération et de décélération sous la forme de rampes de vitesse.

Les limitations seront ajustables par l'utilisateur, soit en local, soit à distance par l'intermédiaire du bornier ou par un bus de terrain.

La fonction de sécurité

Le variateur seul ne peut assurer la protection de la machine, il n'en est qu'un des éléments constitutifs. Cependant, les constructeurs intègrent dans leurs produits les fonctions complémentaires qui, en association avec les autres équipements de la machine, permettent de répondre aux exigences des normes.

Cette fonction est explicitée page 115 et suivantes.

4- La conversion de puissance

4-2- L'offre



Figure 97 Variateur indépendant

L'offre variateur adopte des dispositions multiples qui résultent d'un choix ou d'un compromis technique et économique. Il n'y a pas de solution universelle et il est indispensable de recourir à l'expertise des offreurs pour obtenir la solution la mieux adaptée à un besoin particulier.

On peut cependant définir les «briques» qui constituent l'ossature de l'offre.

Variateur indépendant (Figure 97)

Le variateur indépendant comprend dans une seule enveloppe tous les éléments de la Figure 78. Ce type de variateur est tout à fait adapté à la commande d'un seul axe.



Module contrôleur

Figure 98 Variateur avec module contrôleur

Variateur avec module contrôleur (Figure 98)

Le variateur possède un emplacement qui peut recevoir un module contrôleur pour réaliser l'application mono-axe ou une fonction complexe multi-axes, en liaison avec d'autres variateurs.



Figure 99 Variateurs à source continue commune

Variateurs avec source d'alimentation commune (Figure 99)

Pour les commandes multi-axes, il peut devenir intéressant d'avoir une source d'alimentation commune à l'ensemble des variateurs. Certains fournisseurs proposent des variateurs catalogués qui sont dimensionnés pour en alimenter d'autres démunis de redresseurs d'entrée.



Figure 100 Moteur pas-à-pas avec variateur intégré

Variateur incorporé au moteur (Figures 100 et 101)

Dans cette offre, l'électronique de régulation et le servomoteur se combinent dans une unité ultra compacte. L'unité de contrôle de mouvement est en général extérieure et peut commander une chaîne complète de motovariateurs.

En raison de la difficulté de loger la cellule de filtrage, l'alimentation du variateur incorporé est en général en courant continu.

La Figure 100 représente un moteur pas-à-pas avec le contrôleur intégré et la figure 101 un servomoteur avec une technologie similaire.

L'intégration du variateur au moteur présente certains avantages :

- les semi-conducteurs qui alimentent le moteur et génèrent des pertes ne se trouvent plus dans une armoire ce qui permet une réduction sensible de la taille de celle ci,
- le nombre de connexions est réduit : seul un bus continu est nécessaire pour la puissance et le codeur se trouve directement relié au variateur,
- un bus de communication relie l'ensemble des variateurs à une commande décentralisée.



Figure 101 Servomoteur synchrone avec variateur intégré

4- La conversion de puissance

4-2- L'offre

Cette solution nécessite une source d'alimentation commune qui doit être déterminée avec précision. Elle ne peut se concevoir que pour des moteurs de faible puissance en raison de la taille du variateur.

Accessoires additionnels

Les variateurs sont prévus pour répondre à une utilisation standard en ce qui concerne l'accélération, le couple permanent et le ralentissement avec un dispositif incorporé au variateur pour dissiper l'énergie de freinage. Si l'utilisation du variateur s'écarte des valeurs typiques exposées dans les catalogues, il sera nécessaire d'adjoindre des condensateurs additionnels et/ou des résistances de freinage proposées par les offreurs.

Certaines combinaisons, plus coûteuses, permettent la réinjection d'énergie sur le réseau d'alimentation sans ou avec courant sinusoïdal. Ces dispositifs permettent de se dispenser de résistances de freinage, sauf si un arrêt contrôlé est exigé en cas de perte de la tension d'alimentation. L'étude précise du fonctionnement permettra de sélectionner la solution la mieux adaptée au point de vue technique et économique.

Les fournisseurs proposent également un certain nombre de filtres permettant de respecter les normes de perturbations harmoniques et radioélectriques.

Le contrôle de mouvement couvre un nombre quasi illimité d'applications et chacune est la combinaison de «mouvements de base» et de «fonctions de base».

Les dénominations utilisées par les constructeurs pour qualifier leurs offres ne sont pas strictement identiques et peuvent, parfois, introduire une certaine confusion préjudiciable à la comparaison des solutions proposées.

Nous nous proposons de lister les dénominations pour aider le non-spécialiste à s'appropriier les termes utilisés dans les catalogues. La définition de ces dénominations se trouve dans le glossaire.

Les constructeurs utilisent quasi unanimement les termes «mouvements de base» et «fonctions de base».

Mouvements de base

Le «mouvement de base» doit être compris comme étant l'organe qui sera utilisé pour réaliser une «fonction de base».

L'organe sera donc un axe soit physique, c'est-à-dire un ensemble mécanique (vis à billes, crémaillère...) tel que nous l'avons décrit, soit un axe virtuel qui pourra être un capteur lié à un objet (tapis, moteur...) et dont les informations seront interprétées par le système de contrôle, soit un signal généré par un contrôleur.

Le «mouvement de base» est donc, comme son nom ne l'indique pas, un objet inerte.

Dans la pratique on trouvera:

- des axes indépendants,
- des axes coordonnés,
- des axes maîtres-esclaves.

Fonctions de base

Ces axes seront utilisés pour réaliser des «fonctions de base» qui caractérisent la manière dont les axes se déplacent, soit individuellement soit collectivement.

Les termes «fonctions de base» les plus utilisés que l'on trouvera dans la documentation sont, par ordre alphabétique, les suivants (voir définitions dans le glossaire):

- arbre électrique,
- came électrique,
- contour,
- embrayage électrique,
- interpolation circulaire,
- interpolation linéaire,
- mise en phase,
- mode jog,
- mode modulo,
- mouvement absolu,

- mouvement point à point,
- mouvement relatif,
- mouvement synchronisé,
- positionnement,
- prise de référence ou prise d'origine,
- réducteur électronique,
- registration,
- régulation de couple,
- serrage,
- suivi de trajectoire.

Ces différentes briques permettront de réaliser des déplacements complexes que nous qualifierons sous le thème «fonctions applicatives»

Ces «fonctions applicatives» sont répertoriées et documentées par les constructeurs de servovariateurs qui proposent des logiciels simplifiant grandement la tâche de l'utilisateur.

Dans cet ouvrage, nous nous sommes limités à en décrire quelques-unes de manière volontairement simplifiée qui ne représentent pas une machine existante. L'utilisateur aura tout intérêt à contacter son fournisseur ou un bureau d'études spécialisé si nécessaire.

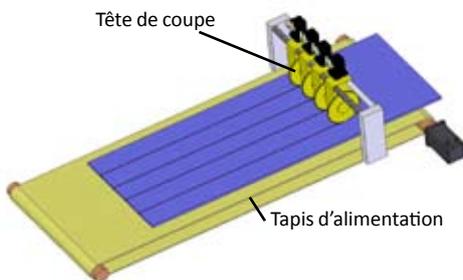


Figure 102 Découpe de bande

Positionnement (exemple: découpe de bandes)

Dans cette application, un produit placé sur un tapis d'alimentation est découpé en bandes de largeurs programmables. Les têtes de coupe sont mobiles et indépendantes et se positionnent, en fonction de la programmation.

La machine est schématisée Figure 102

Chaque tête doit se positionner l'une par rapport à l'autre et par rapport par rapport au bord de la bande pour respecter la largeur de la coupe voulue. Chaque tête de coupe est munie d'un moteur pour assurer le déplacement voulu. Un moteur pas-à-pas convient parfaitement pour cette application.

Le mouvement de déplacement des têtes ne nécessite pas des accélérations et décélérations particulièrement courtes. Le réglage des têtes se fait avant l'introduction de la matière sur le tapis. Pendant la phase de travail, les têtes restent immobiles.

Cette technique peut être étendue à d'autres applications par exemple la dépose d'une substance comme de la colle, le marquage, la perforation du produit.....

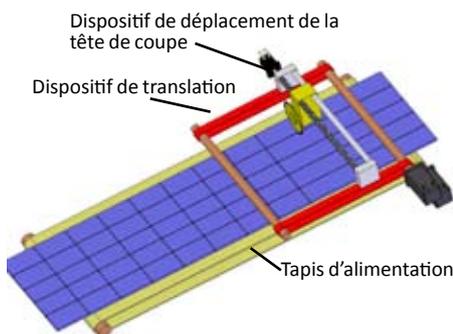


Figure 103 Machine de coupe à la volée

Déplacement synchronisé (exemple : coupe à la volée).

Dans cette application, un produit issu d'une machine de production est découpé sans interrompre son déplacement. La structure de la machine est illustrée Figure 103.

La machine comprend un tapis d'alimentation sur lequel est déposé le produit.

Ce tapis fonctionne à vitesse constante ajustée en fonction du débit de la machine qui élabore le produit. Au-dessus de ce tapis est disposé un système de translation qui porte la tête de coupe.

Le dispositif de translation travaille suivant deux axes croisés, l'un parallèle et l'autre perpendiculaire au tapis.

L'entraînement du tapis ne nécessite pas généralement un entraînement par un servomoteur. En revanche, les dispositifs de translation en sont nécessairement équipés.

Au début de cycle, le dispositif de coupe se trouve en position de parking. Le défilement du tapis est mesuré par un capteur.

À la réception d'un signal correspondant à une longueur précise, le dispositif de translation se met en mouvement et la tête de coupe se déplace de sa position de parking vers l'extrémité opposée.

La combinaison des vitesses de translation est telle que la tête de coupe décrit la trajectoire programmée par l'utilisateur. Dans notre exemple, la trajectoire est rectiligne, afin de découper des rectangles de produit, mais rien n'interdit, dans son principe, une coupe de profil plus complexe.

Dans cette opération on retrouve une phase d'accélération rapide pour que la tête de coupe se mette en mouvement, un déplacement synchronisé des

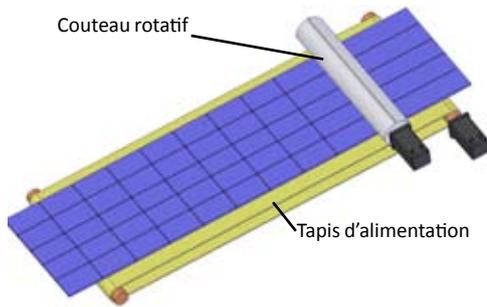


Figure 104 Machine de coupe à couteau rotatif

axes de translation asservi au déplacement du tapis pour que la tête de coupe suive la trajectoire programmée et un retour rapide à la position de parking en attente de la nouvelle coupe.

La technique de coupe à la volée peut être étendue à d'autres applications, par exemple la dépose d'une substance sur un produit, le marquage d'un emballage, le remplissage de containers

Synchronisation de vitesse (mouvements discontinus. Exemple : couteau rotatif)

Dans cette application, un produit placé sur un tapis d'alimentation est découpé en bandes de largeurs programmables. Le couteau qui effectue la coupe est porté par un cylindre se trouvant au-dessus de la bande transporteuse. La machine est schématisée Figure 104.

Le produit défile sous le couteau rotatif à vitesse constante. Un capteur mesure la longueur de produit et, pour une valeur donnée, provoque une accélération ou décélération rapide du cylindre afin que la vitesse périphérique du couteau soit identique à celle du tapis.

La découpe s'effectue au passage de la lame. La découpe effectuée, la rotation du rouleau peut s'arrêter, ralentir ou s'accélérer pour s'adapter à la longueur voulue du produit.

Il est indispensable que la vitesse défilement du produit soit égale à la vitesse périphérique de la lame pour effectuer une coupe sans arrachement. Durant le cycle de fonctionnement, les temps d'accélération/décélération doivent être parfaitement contrôlés pour que la synchronisation de vitesse s'effectue avant de procéder à la coupe. Le temps entre le top de départ de la rotation du couteau et son impact sur le produit doit également être maîtrisé avec une grande précision.

Cette technique est très utilisée en imprimerie et dans l'industrie de l'emballage.

Synchronisation de vitesse (mouvement continu. Exemple : arbre électrique)

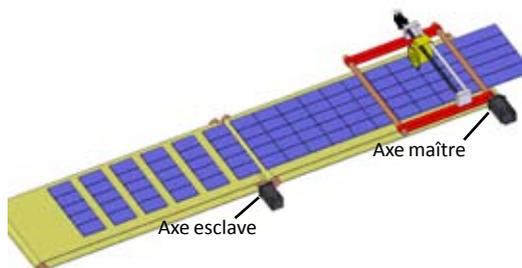


Figure 105 Synchronisation de vitesse: arbre électrique

Dans cette application, une boîte d'engrenages est remplacée par des entraînements indépendants. Chaque arbre est équipé d'un servomoteur et le variateur qui l'alimente reçoit sa consigne de vitesse soit de l'arbre qui le précède, soit d'un contrôleur centralisé. Les rapports de vitesse peuvent être quelconques. Par contre, les temps d'accélération et de décélération sont identiques pour que la mise en vitesse se fasse de manière synchronisée. La machine schématisée Figure 105 comporte deux trains de tapis successifs. Le tapis d'alimentation situé à droite de l'image apporte un matériau découpé en rectangles. La vitesse de ce tapis est la vitesse-maître.

Le tapis d'évacuation qui lui succède opère à une vitesse légèrement supérieure avec un rapport constant afin d'espacer les produits. Le rapport de vitesse permettra de modifier l'espacement des produits découpés. La fonction arbre électrique est très utilisée dans les machines sectionnelles et chaque fois que l'on désire modifier la vitesse de rotation de différents arbres, dans un rapport voulu sans la contrainte de changer des rapports

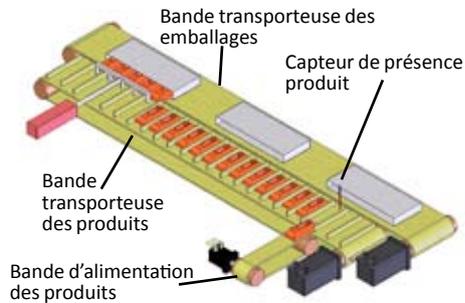


Figure 106 Synchronisation de position: machine de groupage

de pignons.

Le changement de rapport peut s'effectuer sans arrêter la machine.

Il faut également noter que cette disposition permet un nombre infini de combinaisons de rapports, ce qui est quasi-impossible à réaliser de manière purement mécanique

Synchronisation de position (exemple : groupage)

Dans cette application, un produit doit être groupé par cinq dans un emballage. La structure de la machine est illustrée Figure 106.

Le produit qui se trouve sur la bande d'alimentation est introduit dans les alvéoles de rangement.

La bande crantée doit donc se positionner précisément devant la bande d'alimentation et s'immobiliser le temps nécessaire à la dépose du produit. Un capteur de présence détecte que le produit est correctement introduit dans l'alvéole avant d'autoriser le déplacement et le positionnement de l'alvéole suivant.

Le fonctionnement de la bande d'alimentation en produit n'est autorisé que si un alvéole vide se trouve en vis à vis et à l'arrêt, ce qui exige la synchronisation des mouvements pour un positionnement précis.

Une troisième bande approvisionne les emballages. Lors de l'arrêt de la bande transporteuse, un vérin équipé d'un râtelier vient introduire les produits dans l'emballage qui doit être positionné parfaitement en vis à vis.

Dans cette opération d'emballage, le fonctionnement de chaque bande est discontinu et chaque positionnement est suivi d'un temps d'arrêt pour effectuer l'opération requise.

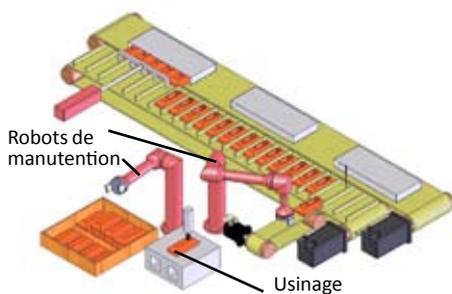


Figure 107 Saisie et positionnement (Pick and place)

Enchaînement de mouvements (exemple : saisie et positionnement)

Dans cette application, un produit est déplacé d'une position à une autre. La Figure 107 représente la machine.

Dans cet exemple, un produit doit être usiné avant d'être rangé sur une bande d'alimentation. Les opérations de manutention sont effectuées par des robots multiaxes.

La machine est équipée de deux robots. Chaque robot est muni d'une pince de saisie, le servovariateur qui équipe cette pince est réglé en couple pour ne pas détériorer le produit.

Un premier robot prélève un objet brut dans un conteneur et le positionne sur une table pour subir une opération d'usinage. L'usinage effectué, la broche d'usinage se place automatiquement en position de repos et un deuxième robot saisit la pièce sur la table pour la déposer sur le tapis d'alimentation.

Les mouvements des robots sont synchronisés pour éviter tout risque de collision et les trajectoires des robots sont établies pour réduire les temps

de manutention, ce qui oblige à réaliser des mouvements coordonnés sur chaque axe des robots.

Des capteurs de vision permettent de détecter la présence et la position des objets dans le conteneur, ainsi que sur le tapis d'alimentation.

Synchronisation simultanée de vitesse et de position (exemple : trancanage Figure 108)

L'opération consiste à déposer du fil sur une bobine. Le fil s'enroule en spires jointives sans chevauchement. Le fil est déplacé par un guide-fil, solidaire de l'écrou d'une vis à billes.

Pour permettre une meilleure tenue de la bobine, les spires les plus proches du mandrin sont enroulées avec une plus forte traction qui décroît quand le diamètre d'enroulement augmente.

Le moteur d'entraînement de la bobine réceptrice est donc piloté en couple avec limitation de vitesse instantanée en cas de rupture de fil.

L'enroulement se fait à vitesse linéaire constante. Cette vitesse est imposée par le dispositif d'alimentation non représenté. De ce fait, la vitesse de la bobine décroît avec l'augmentation du diamètre.

La position du fil sur la bobine réceptrice est assurée par la position du guide-fil et donc par la vitesse de rotation de la vis à billes pour obtenir un pas d'enroulement constant sans chevauchement.

Le mouvement doit s'inverser quasi instantanément dès que le fil atteint un flasque de la bobine.

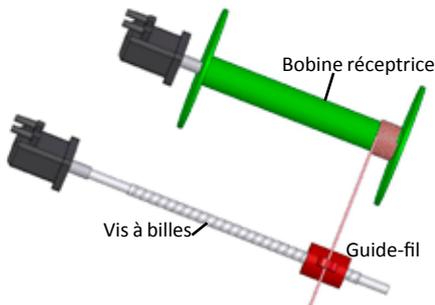


Figure 108 Opération de trancanage

Régulation de couple (exemple : enrouleur)

Le dessin Figure 109 représente un enrouleur avec pantin (rouleau danseur) et Bloc en S qui permet de maintenir la vitesse de déroulement du produit, le rouleau danseur, dont la cinématique n'est pas représentée permet de maintenir sa tension.

L'enrouleur est piloté par la boucle de courant du variateur associé.

Les outils logiciels permettent de couvrir tous les types de régulation de courant. Il est possible de choisir un des modes paramétrables suivants :

- régulation de la position du rouleau danseur avec correction de la vitesse de rotation,
- régulation de la tension avec limitation de couple,
- régulation de la tension avec correction de la vitesse de rotation et commande couple (régulation indirecte de la tension).

La dureté d'enroulement est également aisément ajustable (interpolation linéaire, hyperbolique, table de points).

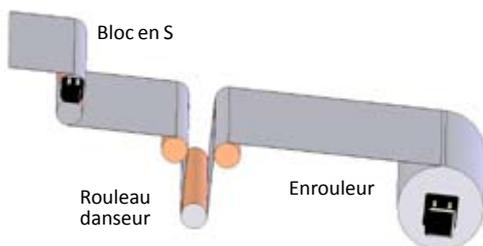


Figure 109 Enrouleur

6-1- La stratégie de commande

La diversité des applications Motion Control et des types de machines de production amène une grande variété de mouvements. Il est nécessaire de contrôler les mouvements d'un ou de plusieurs axes, de façon synchronisée ou non. Dans ce type de fonctionnement, l'asservissement est souvent réalisé au niveau de la position.

Qu'il s'agisse de réaliser un déplacement d'un point A à un point B lors d'un positionnement, ou d'amener un entraînement d'un état d'arrêt à une vitesse constante lors d'une synchronisation par exemple, un profil de mouvement est indispensable. Ce profil représente l'évolution de la consigne de position en fonction du temps.

Le choix du profil de mouvement ne doit pas être sous-estimé, car c'est un des éléments essentiels d'une solution mécatronique performante. Ce choix a un gros impact sur le dimensionnement des différents composants qu'ils soient électriques ou mécaniques (variateur, moteur, réducteur, paliers, etc.), mais également sur le processus et le temps de cycle de la machine.

Le profil de mouvement utilisé aura un gros impact sur la précision et la dynamique du déplacement, mais également sur les à-coups générés au niveau de la mécanique et donc sur la durée de vie de l'installation.

Notions de positionnement

Pour effectuer un déplacement, une synchronisation angulaire ou une interpolation entre plusieurs axes, une consigne de position est générée par le système Motion Control. Cette consigne peut être élaborée de nombreuses façons.

Déplacement sans contrôle des variables de commande (Figure 110)

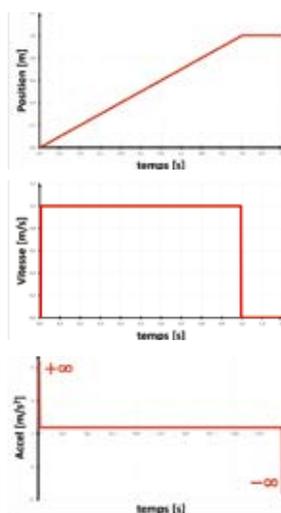


Figure 110 Déplacement sans contrôle des variables de commande

La commande la plus simple consiste en un positionnement par rapport au temps sans aucun contrôle de la vitesse et de l'accélération : ce type de commande est dit « tout ou rien ». Le déplacement se fait alors à vitesse constante et l'accélération/décélération est infinie en début et en fin de mouvement.

Cette commande présente plusieurs impossibilités et inconvénients:

- dans la pratique il est impossible de réaliser strictement cette commande. La vitesse n'est pas limitée et dépend de la distance à parcourir et du temps de déplacement. L'accélération est infinie en début et en fin de mouvement. Le variateur ne sera pas capable de fournir le courant nécessaire pour ces accélérations et, en fonction du déplacement demandé, la vitesse ne pourra peut-être pas être atteinte (limitation du moteur ou du variateur, limitation de la mécanique ou du process).
- sans aucun contrôle de la vitesse et de l'accélération, le positionnement effectué ne pourra donc pas suivre fidèlement la consigne de position ce qui est très gênant pour des opérations de synchronisation ou d'interpolation.
- de plus la variation de l'accélération est infinie et se traduira par des à-coups très importants pouvant entraîner des oscillations mécaniques nécessitant un temps de stabilisation pénalisant le temps de cycle de la ma-

6- Le dimensionnement

6-1- La stratégie de commande

chine. Pour stabiliser le positionnement, le variateur cherchera à corriger l'erreur due aux oscillations et fournira alors un couple beaucoup plus important que nécessaire entraînant une surchauffe des composants qui pourrait amener l'utilisateur à diminuer la cadence de la machine pour ne pas dépasser les limites thermiques du moteur.

- ces à-coups peuvent en outre endommager la mécanique, accélérer l'usure des paliers et du réducteur, et donc réduire la durée de vie de la machine.

Déplacement contrôlé : fonctionnement à accélération limitée

Pour toutes ces raisons, il est donc nécessaire de contrôler les paramètres de commande et notamment l'accélération. En général il existe deux versions basiques de profils de déplacement pour un positionnement à accélération limitée :

- un profil de vitesse triangulaire si la valeur maximale de vitesse n'est pas atteinte ou seulement ponctuellement au milieu du déplacement.
- un profil de vitesse trapézoïdal si la vitesse atteint une valeur maximale pendant un certain temps.

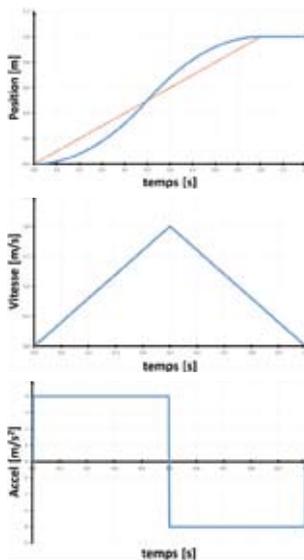


Figure 111 Profil de vitesse triangulaire

Profil de vitesse triangulaire (Figure 111)

Cette commande permet de fixer la valeur d'accélération.

En revanche pour un déplacement équivalent en distance et en temps, la vitesse maximale est deux fois supérieure à la vitesse maximale de la commande « tout ou rien ».

Les variations d'accélération, appelées « Jerk » sont cependant infinies (l'accélération n'étant pas continue). Ces variations peuvent être pénalisantes aussi bien pour la mécanique que pour le process même de la machine.

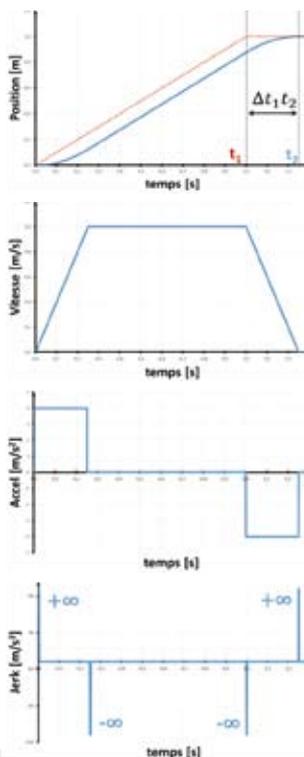


Figure 112 Profil de vitesse trapézoïdal

Profil de vitesse trapézoïdal (Figure 112)

Cette loi permet de fixer une valeur **maximale d'accélération et de vitesse**. Prenons le même exemple que la loi de commande « tout ou rien » : déplacement de [1m] avec une vitesse maximale fixée à [1m/s]. Dans cet exemple l'accélération et la décélération sont limitées à une valeur constante pendant 250ms chacune.

À vitesse maximale équivalente [1m/s], la limitation de l'accélération entraîne un allongement du temps de déplacement. L'accélération est contenue contrairement à la commande « tout ou rien », et la vitesse est limitée contrairement au profil « triangle ». Le temps de déplacement est d'autant plus long que la valeur maximale d'accélération est réduite.

6- Le dimensionnement

6-1- La stratégie de commande

Le contrôle du «jerk»

Les lois de commande proposées jusqu'à présent sont très simples à élaborer, mais elles présentent toutes un inconvénient majeur: les variations d'accélération, couramment appelées « Jerk », sont infinies.

Ces variations peuvent être pénalisantes aussi bien pour la mécanique que pour le process même de la machine.

La dérivée de l'accélération permet de déterminer ces variations. Cette dérivée s'exprime en $[m/s^3]$.

D'un point de vue électrique : le variateur n'est pas capable de faire varier instantanément le courant en raison de la constante de temps électrique du moteur et du temps de réponse du variateur. Il est donc nécessaire de contrôler le jerk pour que le positionnement soit le plus fidèle possible à la consigne (écart de traînage réduit). Cet écart doit être minimisé lors d'opérations de synchronisation ou d'interpolation.

D'un point de vue mécanique : les variations d'accélération engendrent une variation de couple moteur. Ce couple est transmis par le moteur à la charge et lorsque les variations de couple sont trop rapides, cela se traduit par des «à-coups» sur la charge.

Ces «à-coups» peuvent rendre le système instable (oscillations plus ou moins longues à s'atténuer), ce qui va pénaliser le temps de cycle machine et échauffer les composants (le variateur essayant de corriger ces oscillations).

Les «à-coups» peuvent également endommager ou user la mécanique prématurément et réduire la durée de vie de certains éléments (paliers, réducteur, etc.).

Revenons à l'exemple précédent : même déplacement $[1m]$, même vitesse maximale $[1m/s]$, et même accélération maximale $[4m/s^2]$. Le jerk est limité pendant $100ms$ (Figure 113).

Cette nouvelle limitation pénalise une fois de plus le temps de déplacement comme on peut le voir sur la courbe de position où sont superposées la commande «tout ou rien», la commande « trapèze à accélération limitée» et la commande «trapèze à jerk limité».

En résumé : les limitations de vitesse, d'accélération et de jerk sont nécessaires pour le fonctionnement optimal d'une machine de production. Ces limitations permettent de suivre fidèlement un profil de position, de respecter les limitations électriques liées au moteur et au variateur, mais également les limitations mécaniques imposées par les paliers, les réducteurs, le processus et la machine. Ces limitations peuvent impacter le temps de déplacement et donc limiter la cadence machine.

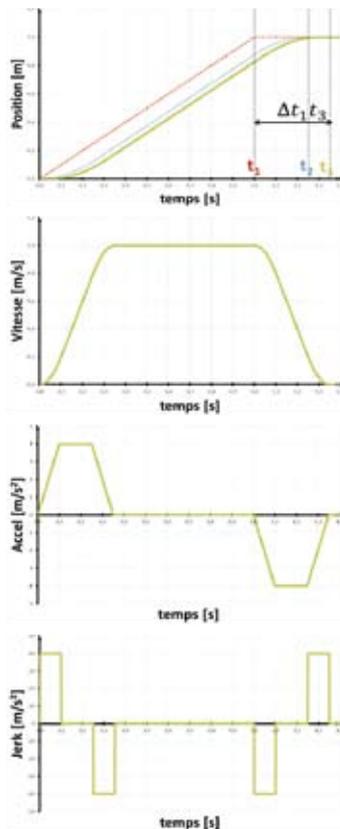


Figure 113 Contrôle du jerk

Les lois de commande

Il existe un nombre important de lois de commande, chacune ayant ses avantages et ses inconvénients. De nombreuses lois de commande existent et permettent généralement de trouver un bon compromis entre temps de déplacement, souplesse et précision du mouvement et dimensionnement «raisonnable» des composants. Le choix du profil de mouvement n'est pas anodin, car il peut également jouer sur la longévité de la machine.

6- Le dimensionnement

6-1- La stratégie de commande

La norme VDI 2143 fait généralement référence dans le domaine. Cette norme a été définie par l'association allemande des ingénieurs (VDI) pour décrire les profils de cames mécaniques. Ces profils sont parfaitement utilisables comme lois de commande des servomoteurs.

La normalisation

Les différents profils de mouvement sont définis de façon normalisée pour un déplacement de 1m effectué en 1s. Il en découle différents coefficients:

C_v : Coefficient de vitesse maximale

C_a : Coefficient d'accélération maximale

C_j : Coefficient de jerk maximal

Cette normalisation permet de comparer très facilement les différentes lois de commande et il est alors possible de déduire très facilement les valeurs maximales de vitesse, accélération et jerk pour des déplacements de longueurs et de durées différentes. Notons également le coefficient C_m qui donne une bonne indication de la puissance mécanique maximale nécessaire. Ce coefficient est la valeur maximale de la courbe (produit des courbes de vitesse et d'accélération). Il est alors très simple d'obtenir les valeurs dynamiques maximales pour un déplacement quelconque (D) pendant un temps (T) grâce aux formules ci-dessous :

$$v_{max} = C_v (D/T)$$

$$a_{max} = C_a (D/T^2)$$

$$J_{max} = C_j (D/T^3)$$

Ces données sont très importantes, car elles sont un des facteurs déterminants dans le choix du moteur et du réducteur.

Lois à accélération discontinue (jerk infini)

Vitesse constante (Figures 114 et 115),

Loi de commande normalisée:

$$x(t) = t$$

Loi «vitesse constante»	C_v	1
	C_a	∞
	C_j	∞
	C_m	∞

Figure 115 Loi à vitesse constante

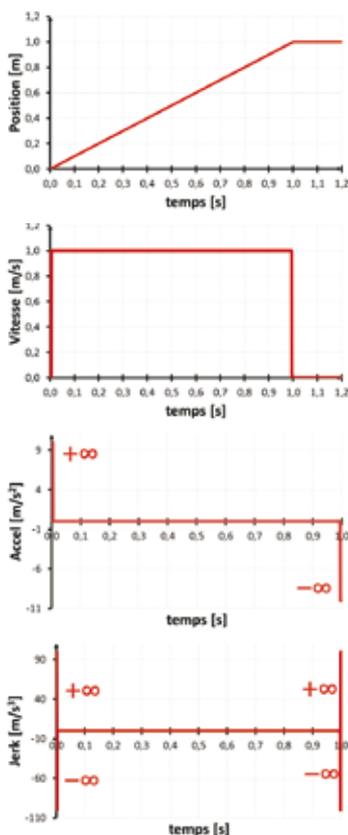


Figure 114 Loi à vitesse constante

Cette loi de mouvement permettrait d'obtenir le déplacement le plus rapide à vitesse maximale donnée, mais comme nous l'avons vu précédemment cette commande nécessite des accélérations infinies impossibles à fournir.

6- Le dimensionnement

6-1- La stratégie de commande

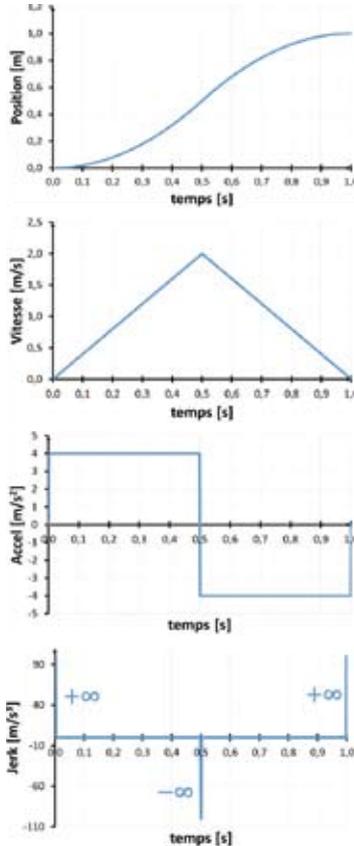


Figure 116 Loi à vitesse triangle

Vitesse triangle – Accélération constante (Figures 116 et 117)

Loi de commande normalisée:

$$x(t) = 2t^2 \quad \text{pour} \quad t \leq 0,5$$

$$x(t) = 1 - 2(1 - t)^2 \quad \text{pour} \quad t \geq 0,5$$

Loi «accélération constante»	C_v	2
	C_a	4
	C_j	∞
	C_m	8

Figure 117 Loi à vitesse triangle

Cette loi de commande conduit à une vitesse maximale deux fois supérieure à la commande «tout ou rien». L'accélération est limitée, mais le jerk est infini en début, milieu et fin de mouvement.

Il est très facile de réaliser cette loi de commande, mais les sauts d'accélération infinis vont générer des «à-coups».

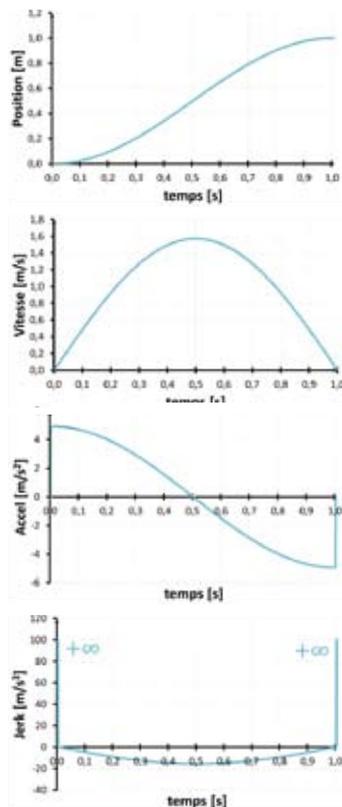


Figure 118 Loi à vitesse demi-sinusoidé

Demi-Sinusoidé (Figures 118 et 119)

Loi de commande normalisée:

$$x(t) = (1/2) [1 - \cos(\omega t)]$$

Loi «Demi-Sinusoidé»	C_v	1.57
	C_a	4.93
	C_j	∞
	C_m	3.8 - ∞

Figure 119 Loi à vitesse demi-sinusoidé

Ce profil permet de limiter l'accélération tout en ayant une vitesse maximale la plus faible possible.

Par rapport au profil à accélération constante, la vitesse maximale est moins élevée, mais l'accélération maximale est un peu plus grande. Le jerk est également infini en début et en fin de mouvement.

Cette commande est un peu plus complexe à élaborer car il faut approximer une sinusoidé.

6- Le dimensionnement

6-1- La stratégie de commande

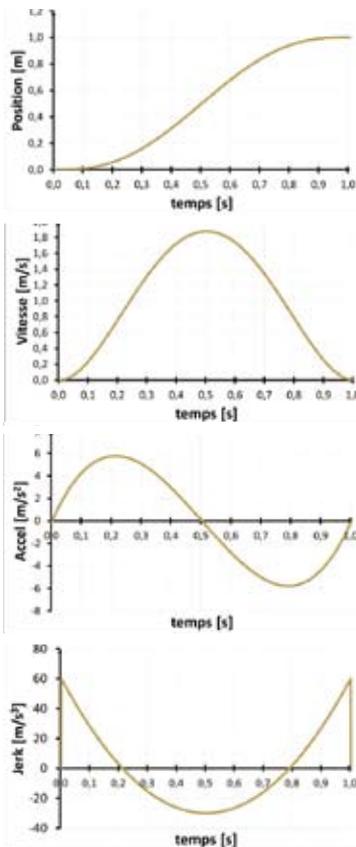


Figure 120 Loi à polynôme du 5ème degré

Lois à accélération contenue (jerk fini)

Polynôme du 5ème degré (Figures 120 et 121)

Loi de commande normalisée:

$$x(t) = 10 t^2 - 15 t^4 + 6 t^5$$

Loi «polynome du 5 ^{ème} degré»	C_v	2
	C_a	5.78
	C_j	60
	C_m	6.69

Figure 121 Loi à polynôme du 5ème degré

Comparée à toutes les lois citées jusqu'à présent, celle-ci permet de limiter le jerk.

Elle est un des meilleurs compromis dans tous les domaines.

Loi Sinusoïdale (Figures 122 et 123)

Loi de commande normalisée :

$$x(t) = t - (1/2) \sin(2\pi t)$$

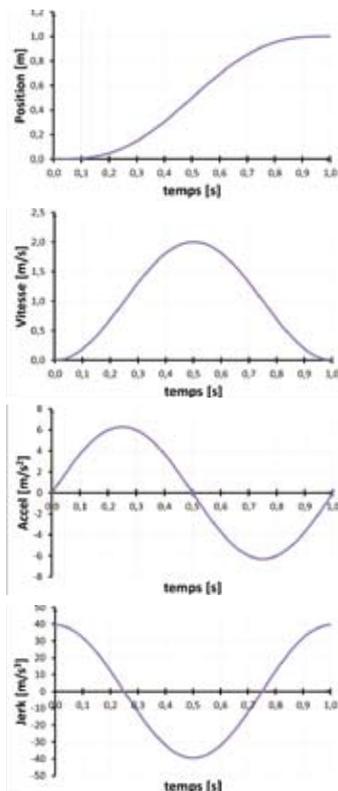


Figure 122 Loi sinusoïdale

Loi «Sinusoïdale»	C_v	2
	C_a	6.28
	C_j	39.5
	C_m	8.16

Figure 123 Loi sinusoïdale

Meilleure que le polynôme du 5ème degré au niveau des «à-coups», cette loi est à privilégier si la limitation des «à-coups» est le point critique de la machine.

En revanche elle peut nécessiter un surdimensionnement du variateur ou du moteur par rapport à un polynôme du 5ème degré, car les valeurs maximales d'accélération, de vitesse et de puissance sont plus élevées.

6- Le dimensionnement

6-1- La stratégie de commande

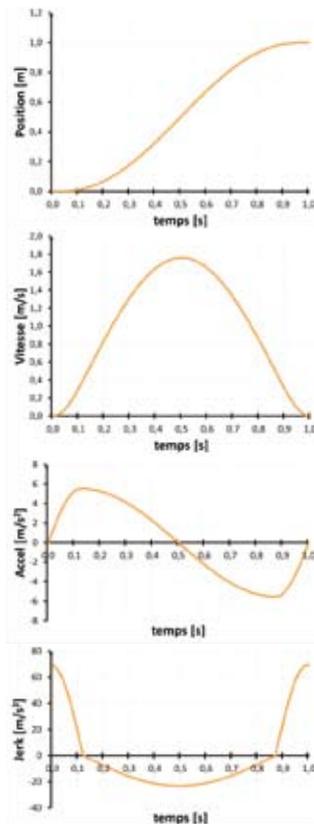


Figure 124 Loi sinusoidale modifiée

Loi Sinusoïdale modifiée (Figures 124 et 125)

Loi de commande normalisée:

$$x(t) = [\pi/(4+\pi)] [t-(1/4\pi) \sin 4\pi t] \quad \text{pour } 0 \leq t \leq 1/8$$

$$x(t) = [\pi/(4+\pi)] [(2/\pi)+t-(9/4\pi) \sin (\pi/3)(1-4t)] \quad \text{pour } 1/8 \leq t \leq 7/8$$

$$x(t) = [\pi/(4+\pi)] [(4/\pi)+t-(1/4\pi) \sin \pi t] \quad \text{pour } 1/8 \leq t \leq 7/8$$

Loi «sinusoïdale modifiée»	C_v	1.76
	C_a	5.53
	C_j	69.5
	C_m	5.4

Figure 125 Loi sinusoidale modifiée

Cette loi va demander le couple max dans les basses vitesses du moteur et comme le couple crête du moteur va chuter au delà d'une certaine vitesse, cela permet de toujours travailler sur la plage où le C_{max} moteur est disponible.

Cette loi est la meilleure possible des lois à accélération modifiée citées pour la vitesse, l'accélération et la puissance maximales.

En revanche cette loi est la moins bonne au niveau de la limitation des «à-coups».

Choix du profil de commande

Comme le montre le tableau récapitulatif (Figure 126), les vitesses maximales sont assez peu influencées par la loi de commande.

Les profils à accélération limitée sont à privilégier pour limiter les «à-coups» et augmenter la précision du mouvement ainsi que la durée de vie de la machine. Ils nécessitent cependant une accélération bien supérieure à celle d'un profil triangle classique.

Le Polynôme du 5ème degré représente généralement un bon compromis, car il permet un dimensionnement raisonnable des composants tout en limitant les à-coups.

6- Le dimensionnement

6-1- La stratégie de commande

	Loi de commande	Avantages	Inconvénients	C_v	C_a	C_j	C_m
Accélération Discontinue (jerk infini)	Tout ou rien	<ul style="list-style-type: none"> ■ Vitesse maximale la plus faible pour un déplacement donné dans un temps donné ■ Commande la plus simple 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Accélérations et jerk infinis → irréalisable ■ Puissance et couple moteurs maximum 	1	∞	∞	∞
	Vitesse Triangle	<ul style="list-style-type: none"> ■ Accélération contrôlée ■ Commande simple 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Jerk infini → «à-coups» ■ Puissance importante nécessaire à la fin de l'accélération 	2	4	∞	8
	Demi-Sinusoïde	<ul style="list-style-type: none"> ■ Bon compromis au niveau des valeurs maximales de vitesse, couple et puissance 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Jerk infini → «à-coups» ■ Commande un peu plus complexe 	1.57	4.93	∞	3.88
Accélération Continue (jerk infini)	Polynôme 5	<ul style="list-style-type: none"> ■ Bon compromis au niveau des valeurs maximales de vitesse, couple et puissance 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Le polynôme 5 est moins gourmand au niveau de la vitesse, accélération et puissance 	1.88	5.78	60	6.69
	Sinusoïde	<ul style="list-style-type: none"> ■ Meilleure loi d'un point de vue mécanique car «à-coups» très réduits. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ La loi Sinus est meilleure au niveau de la limitation du Jerk ■ Composants potentiellement sur dimensionnés par rapport aux autres lois. 	2	6.28	39.5	8.16
	Sinusoïde modifiée	<ul style="list-style-type: none"> ■ Bon compromis au niveau des valeurs maximales de vitesse, couple et puissance 	<ul style="list-style-type: none"> ■ La loi Sinus est meilleure au niveau de la limitation du jerk 	1.76	5.53	69.5	5.4
	Toutes les lois à accélération continue	<ul style="list-style-type: none"> ■ Meilleur suivi de trajectoire ■ Moins de vibrations car le jerk est contrôlé, «à-coups» limités 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Accélérations maximales supérieures aux lois à accélération discontinue ■ Lois plus complexes 				

Figure 126 Récapitulatif des lois de commande

6-2- Les outils

Le dimensionnement d'un système de contrôle de mouvement doit prendre en compte une quantité de données qui interagissent et influent plus ou moins directement sur les performances.

Pour faciliter le choix, les constructeurs proposent des systèmes de dimensionnement qui permettent de déterminer les éléments mécaniques, les moteurs, variateurs, réducteurs, alimentations, résistances de freinage... à partir d'un cahier des charges.

Le cahier des charges est un élément primordial pour dimensionner au mieux la solution. Les résultats dépendent de la justesse des informations données dans le cahier des charges.

Étude mécanique et environnementale

Nous avons choisi d'illustrer les possibilités offertes par le logiciel d'un des constructeurs impliqué dans la rédaction de cet ouvrage.

Cet outil prend en compte les éléments mécaniques (type de mécanique et caractéristiques), des transmissions, des cycles, des contraintes environnementales et propose des solutions moteurs, réducteurs, variateurs.

Les copies d'écran illustrent les capacités et la convivialité de ce logiciel.

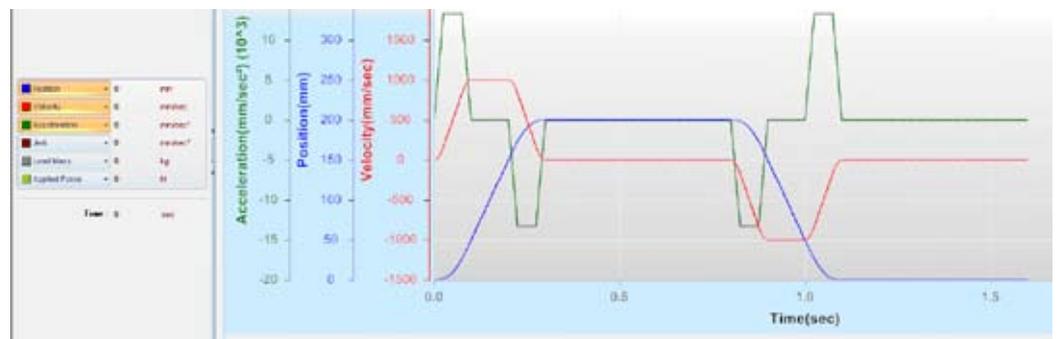


Figure 127 Analyse des cycles (saisie d'écran)

Parmi les possibilités offertes par les logiciels citons:

- la simulation des asservissements à partir des données mécaniques et de la solution choisie ce qui permet de mettre en évidence, entre autres, l'importance d'un accouplement dont la rigidité torsionnelle serait trop faible (et permettre d'éviter des soucis lors des démarrages),
- l'analyse du bus continu pour savoir si une résistance de freinage est nécessaire.
- l'interfaçage direct avec les logiciels de conception mécanique pour des échanges bidirectionnels entre le logiciel de calcul de moteur variateur et l'outil de conception mécanique ce qui permet alors d'obtenir des données très fines, permettant ainsi la sélection du moteur (Figure 128) .

6- Le dimensionnement

6-2- Les outils

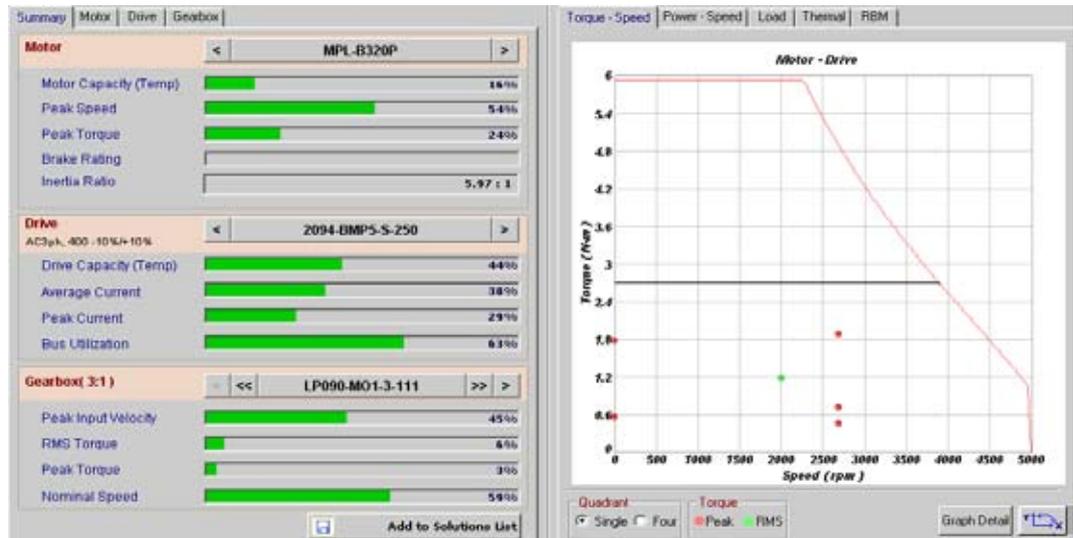


Figure 128 Sélection du moteur

Sur la Figure 128, le point vert est le couple thermique de l'application, les points rouges sont les couples des divers segments correspondant à la trajectoire et la courbe en rouge le couple crête moteur. L'utilisateur peut ainsi visualiser le rapport d'inertie, le couple thermique, les couples demandés en fonction des phases du cycle.

Étude de l'application

Les applications mettent en oeuvre un certain nombre de fonctions de base qui, combinées, permettent de réaliser des opérations complexes. Les fabricants proposent des logiciels permettant de simuler une machine complète (Figure 129)

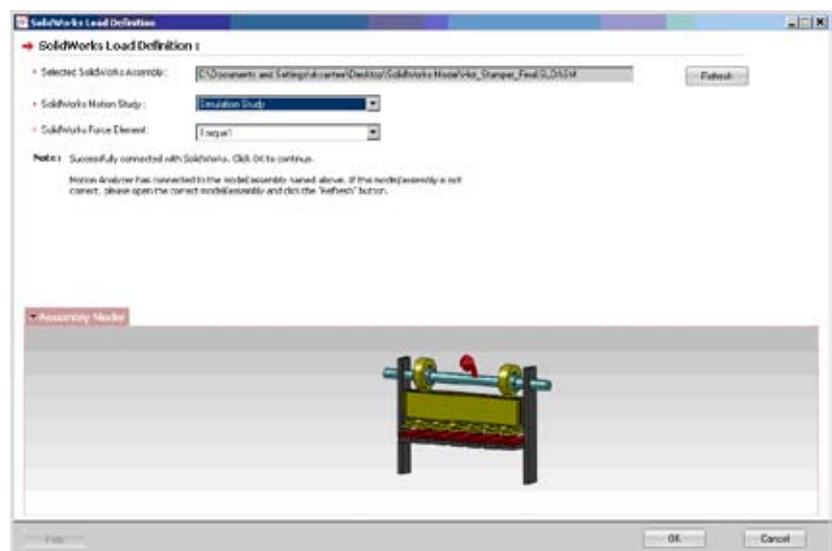


Figure 129 Solidworks & Motion Analyzer

6- Le dimensionnement

6-2- Les outils

D'autres logiciels qui permettent de paramétrer les axes participant au contrôle de mouvement.

Par exemple, en entrant un certain nombre de données comme le diamètre

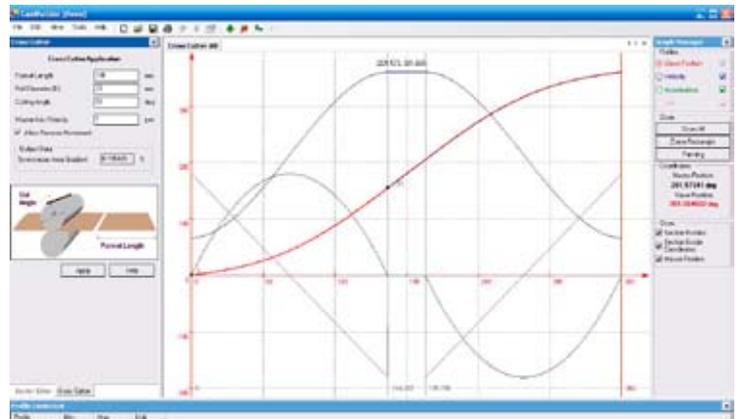


Figure 130 Exemple de logiciel applicatif

du rouleau porte-lame, la longueur de la coupe..., le logiciel trace le graphique de la position du rouleau, sa vitesse, son accélération, etc.

La bibliothèque contient un certain nombre d'applications usuelles et l'utilisateur peut créer aisément ses propres profils.

Ces logiciels disposent d'une ergonomie conviviale facilitant la prise en main et ne nécessitent pas de connaissances particulières de programmation. La mise en service est grandement facilitée et accélérée.

7-1- L'installation

Précautions contre les échauffements

Quand ils ne sont pas intégrés aux moteurs, les variateurs de vitesse et leurs accessoires ne possèdent pas le degré de protection requis pour être installés sans précaution dans un environnement industriel. Ils seront installés dans des coffrets et armoires disposés soit dans la machine soit dans une salle électrique avec les précautions de câblage évoquées précédemment. Malgré le rendement élevé des produits, il est nécessaire d'évacuer les calories produites, ce qui sera délicat avec une température ambiante élevée. Les enveloppes isolantes en matériaux synthétiques sont à éviter en raison de leur faible conductivité thermique.

Les variateurs sont protégés contre une élévation de température et se mettent en sécurité, une installation ne répondant pas aux exigences pourra donc avoir un fonctionnement erratique.

Lors de l'implantation du servovariateur dans une enveloppe, il convient de respecter les consignes suivantes en matière de température:

- garantir un refroidissement suffisant du servovariateur en respectant les distances minimales de montage,
- ne pas monter le servovariateur à proximité de sources de chaleur,
- ne pas monter le servovariateur sur des matériaux inflammables,
- ne pas réchauffer l'air de refroidissement du servovariateur par des courants d'air chauds en provenance d'autres appareils et composants, par exemple d'une résistance de freinage externe,
- monter le servovariateur de manière à permettre la circulation de l'air

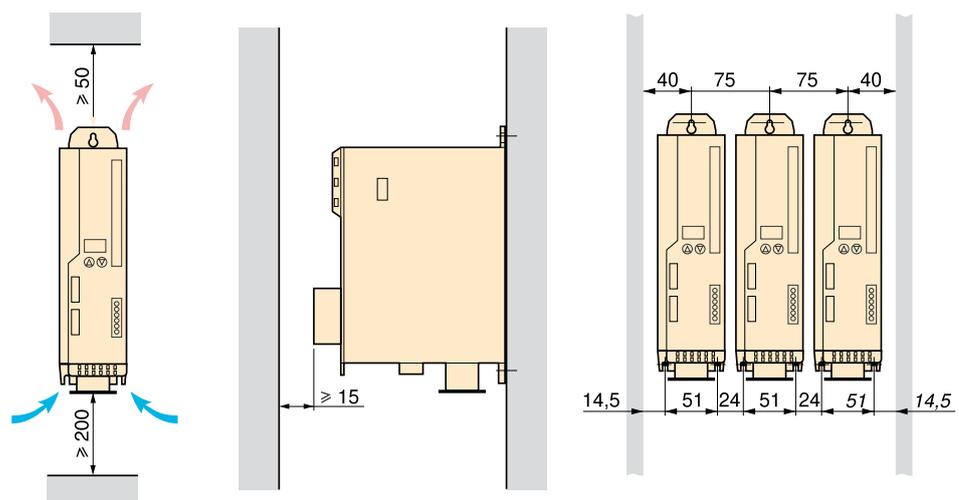


Figure 131 Montage de variateurs et distances minimales requises

La Figure 131 illustre les distances minimales requises pour un variateur d'un constructeur.

7-1- L'installation

Afin d'assurer une bonne circulation de l'air dans le servovariateur:

- prévoir des ouïes de ventilation sur l'enveloppe,
- s'assurer que la ventilation est suffisante, sinon installer une ventilation forcée avec filtre,
- les ouvertures et/ou ventilateurs éventuels doivent permettre un débit au moins égal à celui des ventilateurs des servovariateurs indiqués dans les catalogues des constructeurs.

Le montage du servovariateur dans une enveloppe étanche est nécessaire dans certaines conditions d'environnement: poussières, gaz corrosifs, forte humidité avec risques de condensation et de ruissellement, projection de liquide.

Dans ce cas, l'enveloppe est chargée de rayonner la chaleur produite et de maintenir la température interne au-dessous d'une certaine valeur pour que le variateur puisse fonctionner à ses caractéristiques nominales.

Il sera alors nécessaire de déterminer la dimension de l'enveloppe en fonction de:

- la température maximale dans le coffret (en général 40°C),
- la température extérieure maximale,
- la puissance dissipée par les servovariateurs,
- la puissance dissipée par les autres constituants de l'équipement.
- la résistance thermique de l'enveloppe.

Le fonctionnement au-delà de la température maximale est possible moyennant déclassement du variateur tel que spécifié dans les documentations.

7-2- Le raccordement

Filtre d'entrée : inductance de ligne

Le redresseur qui équipe les variateurs de vitesse opère un prélèvement de courant non sinusoïdal sur le réseau, ce qui peut entraîner des perturbations ou surcharger le pont redresseur si l'inductance du réseau est très faible (voir le chapitre économie d'énergie).

L'inductance de ligne permet d'assurer une meilleure protection contre les surtensions du réseau et des pics de courant qui en résultent ainsi que de réduire les harmoniques de courant produits par le pont redresseur.

Les inductances recommandées permettent de limiter le courant de ligne. Elles sont développées en correspondance avec les normes UL 506 et EN 61558-2-20 (VDE 0570). Les valeurs préconisées sont définies pour une chute de tension comprise entre 3 et 5 % de la tension nominale du réseau. Une valeur plus importante entraînerait une perte de couple. Ces inductances sont à installer en amont du servovariateur.

Partage de l'alimentation continue (Figure 134)

De nombreuses machines comportent des axes multiples. Étant donné que certains peuvent être en phase de ralentissement alors que d'autres sont en phase de travail, il est séduisant de mettre en commun l'énergie disponible dans chaque variateur et de mettre en parallèle les bus continus. Ceci permet d'améliorer le rendement global. Cette disposition est systématique avec les variateurs représentés Figure 99 et les moteurs avec variateurs intégrés (Figure 100 et 101) qui ne possèdent pas de convertisseur d'entrée. Il est donc indispensable de disposer d'un bus continu commun qui devra être dimensionné pour l'ensemble des axes.

Celui-ci est placé dans un module séparé et les variateurs ne comportent que l'étage de sortie qui alimente le moteur.

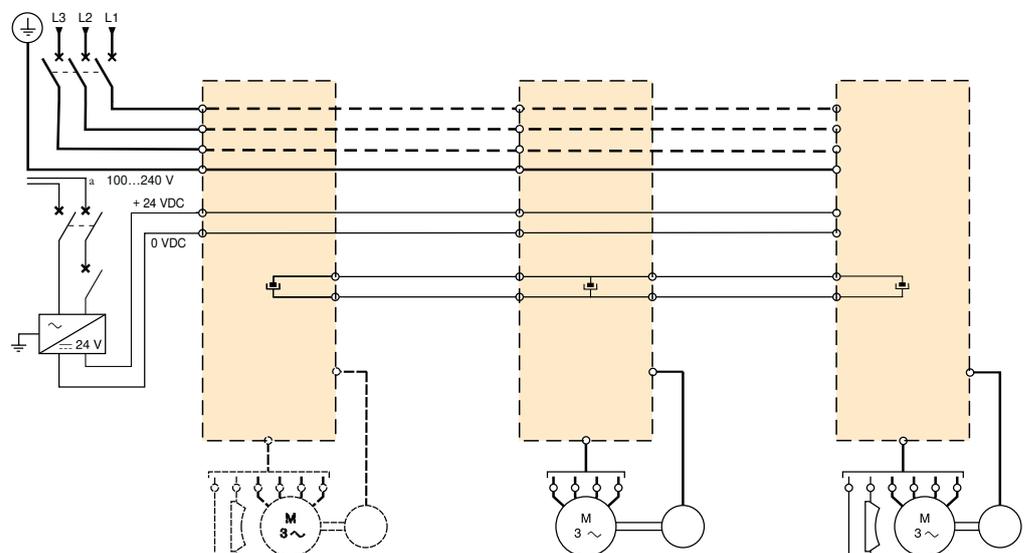


Figure 134 Mise en commun des bus continu

7-2- Le raccordement

Les fournisseurs de cette solution ont une gamme de sources cataloguées pouvant couvrir tous les cas pratiques. L'énergie de freinage en excès peut être dissipée dans une résistance ou être, sur certains modèles, restituée au réseau par un circuit d'entrée réversible (voir le chapitre économie d'énergie).

La Figure 134 représente un raccordement typique en montrant plusieurs possibilités :

- la source commune est un module particulier qui n'effectue que la fonction redresseur et le filtrage, éventuellement réversible et parfois à prélèvement sinusoïdal. Les variateurs sont alimentés à partir de cette source continue,
- les variateurs, identiques ou non, sont tous alimentés à partir du réseau par un contacteur unique, seules les sources continues sont mises en commun,
- la source commune est un variateur disposant d'un redresseur surdimensionné, éventuellement réversible et parfois à prélèvement sinusoïdal. Les variateurs sont alimentés en courant continu à partir de ce variateur.

Le tableau Figure 135 regroupe les choix possibles. Les termes qualificatifs sont utilisés à des fins de comparaison.

Technologie	Particularités	Perturbations vis-à-vis du réseau d'alimentation	Mise en oeuvre	Coût
Variateur indépendant	Une résistance de freinage par variateur	Modérées à élevées	Aisée	Faible
Variateurs à source courant continu partagée	<ul style="list-style-type: none"> ■ partage de l'énergie entre les variateurs, ■ une résistance de freinage commune 	Modérées à élevées	À étudier au cas par cas	Modéré
Variateurs à source courant continu partagée réversible	<ul style="list-style-type: none"> ■ partage de l'énergie entre les variateurs, ■ récupération de l'énergie de freinage vers le réseau d'alimentation 	Modérées	À étudier au cas par cas	Elevé
Variateurs à source courant continu partagée réversible à prélèvement de courant sinusoïdal	<ul style="list-style-type: none"> ■ partage de l'énergie entre les variateurs, ■ récupération de l'énergie de freinage vers le réseau d'alimentation 	Très faibles	À étudier au cas par cas	Très élevé
Variateur intégré au moteur	<ul style="list-style-type: none"> ■ alimentation des variateurs par bus continu, ■ partage de l'énergie entre les variateurs, ■ une résistance de freinage commune 	Très faibles à élevées	À étudier au cas par cas	Modéré

Figure 135 Récapitulatif des technologies des variateurs de vitesse

7- La mise en œuvre des produits

7-3- La structure d'un système

Une application de contrôle de mouvement comporte toujours un contrôleur qui pilote un variateur connecté au moteur. La constitution de cet ensemble varie d'un offreur à l'autre ou en fonction de la gamme de produits.

Dans certains cas, le variateur est incorporé physiquement dans le moteur. Souvent, le contrôleur et parfois le programme applicatif se trouvent dans le variateur.

Les consignes peuvent parvenir au variateur sous des formes diverses :

- analogique,
- trains d'impulsions avec bit de sens de rotation,
- digitales par un bus machine.

Les bus sont omniprésents dans les offres avec les avantages qui en découlent pour le câblage : par exemple, une connexion Sercos remplace jusqu'à 18 fils par axe. Le bus Sercos est très utilisé, car il a été conçu pour le contrôle de mouvement, mais on trouve également CanOpen, Profibus, Interbus-S, Devicenet et les Ethernet industriels déterministes.

Un système de contrôle de mouvement ne se limite pas à la gestion d'un servomoteur. En général, le contrôle de mouvement s'intègre dans un automatisme pour réaliser une application plus ou moins complexe.

La vitesse de traitement de l'information structure l'architecture du système, le choix des constituants et des bus de communication.

Le tableau Figure 136 positionne les constituants en fonction des niveaux de l'automatisme.

Niveau	Vitesse de traitement	Constituant	Communication avec le niveau immédiatement inférieur	Outils logiciels
Supervision	> 1 seconde	<ul style="list-style-type: none"> ■ PLC, ■ HMI ■ Scada 	Bus de supervision	<ul style="list-style-type: none"> ■ atelier de développement, ■ bibliothèque d'objets.
Logique séquentielle	< 100 ms	<ul style="list-style-type: none"> ■ PLC, ■ carte embarquée dans le variateur. 	Bus de terrain	<ul style="list-style-type: none"> ■ atelier logiciel 1131, ■ bibliothèque de fonctions
Application	< 200 μ s	<ul style="list-style-type: none"> ■ carte applicative dans le PLC, ■ contrôleur externe, ■ carte embarquée dans le variateur. 	Bus rapide	<ul style="list-style-type: none"> ■ bibliothèque d'applications standard, ■ logiciels de développement d'applications
Commande du moteur	<200 μ s et > 50 μ s	Variateur		<ul style="list-style-type: none"> ■ autoréglage ■ logiciels de réglage assisté

Figure 136 Positionnement des constituants d'un système de contrôle de mouvement

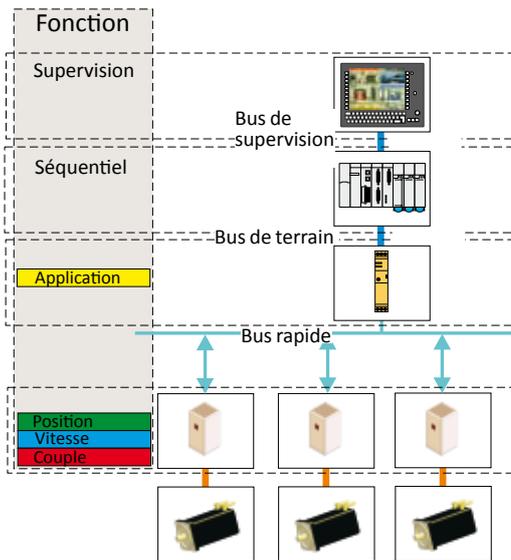


Figure 137 Contrôleur de mouvement délocalisé

Contrôleur de mouvement délocalisé

La figure 137 représente une organisation faisant appel à un contrôleur décentralisé.

Celui-ci est porteur de l'application.

Il communique avec un ou plusieurs variateurs par l'intermédiaire d'un bus rapide dédié machine.

Il est relié par un bus de terrain avec un automate qui traite la partie séquentielle.

Ce dernier est en communication avec la supervision par un bus de terrain.

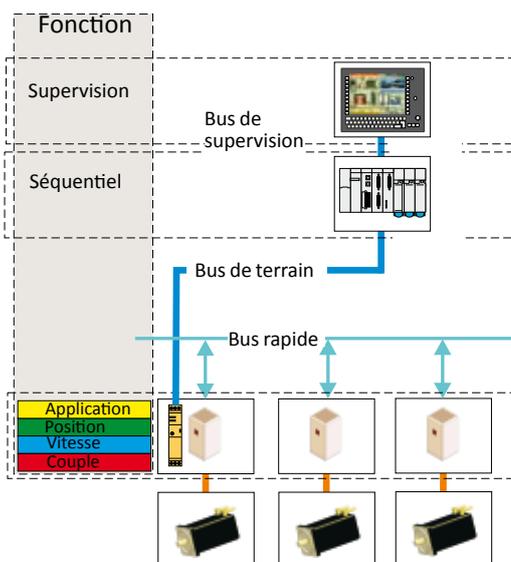


Figure 138 Contrôleur intégré à un variateur pilote

Contrôleur intégré dans un variateur pilote

Dans cette architecture, représentée Figure 138, le contrôleur et l'application sont embarqués dans un des variateurs.

La liaison entre l'automate et ce variateur-maître s'effectue par un bus de terrain et la liaison inter-variateurs par un bus rapide pour réaliser l'application.

L'automate traite la partie séquentielle et est également connecté à un superviseur par un bus de terrain.

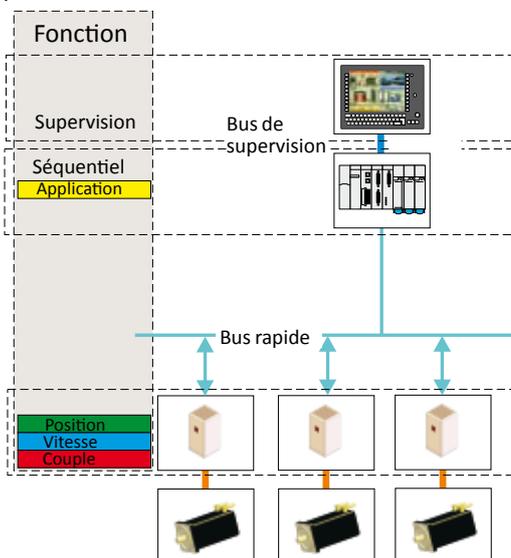


Figure 139 Contrôleur incorporé à l'automate

Contrôleur intégré dans l'automate

Dans cette architecture, représentée Figure 139, le contrôleur, porteur de l'application, est intégré à l'automate.

L'automate traite la partie séquentielle et est également connecté à un superviseur par un bus de terrain.

L'automate est également relié aux variateurs par un bus rapide pour réaliser l'application.

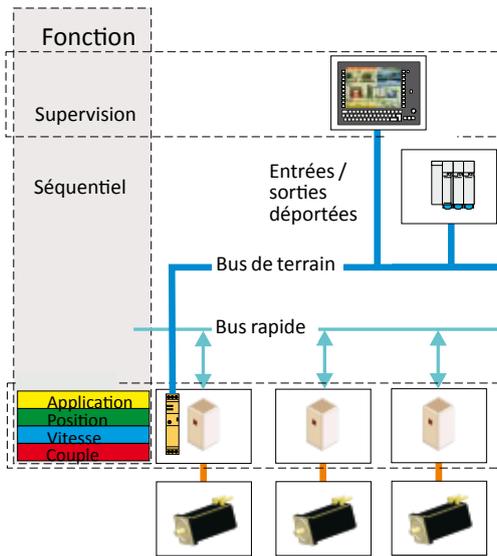


Figure 140 Contrôleur embarqué dans un variateur-maître avec fonctions séquentielles

Contrôleur intégré dans un variateur pilote avec fonctions séquentielles

Dans cette architecture, représentée Figure 140, le contrôleur et l'application sont embarqués dans un variateur-maître qui pilote les autres variateurs pour réaliser l'application.

Ce variateur-pilote possède également une fonction séquentielle permettant de commander des entrées/ sorties déportées, ce qui permet, en général, de se dispenser d'un automate.

Les entrées sorties déportées sont raccordées par un bus de terrain.

Le tableau Figure 141 regroupe les choix possibles. À noter que les architectures illustrées Figure 139 et 140 permettent la réalisation de machines de génération 3

Architecture	Particularités	Traitement des consignes	Usage préférentiel
Contrôleur de mouvement décentralisé	<ul style="list-style-type: none"> le contrôleur est une unité indépendante, moins d'informations traitées par l'automate 	<ul style="list-style-type: none"> les consignes sont adressées en analogique ou en impulsions/sens, éventuellement transmises par un bus rapide aux autres variateurs 	Nombre d'axes réduit
Contrôleur de mouvement incorporé à un variateur	<ul style="list-style-type: none"> moins d'informations traitées par l'automate, parfaite compatibilité, sauvegarde dans un seul appareil, moins de raccords. 	<ul style="list-style-type: none"> les consignes sont traitées en local, éventuellement transmises par un bus rapide aux autres variateurs 	Système mono-axe ou nombre réduit
Contrôleur de mouvement incorporé à l'automate	<ul style="list-style-type: none"> nécessité d'utiliser un bus rapide, charge de l'automate élevée, le fournisseur de l'automate doit de préférence être le fournisseur des variateurs/ moteurs 	Les consignes sont traitées dans l'automate	Systèmes à axes multiples
Contrôleur de mouvement incorporé à un variateur et disposant de fonctions séquentielles	Pas d'automate	<ul style="list-style-type: none"> les consignes sont traitées en local, éventuellement transmises par un bus rapide aux autres variateurs 	<ul style="list-style-type: none"> système mono axe ou nombre réduit, petites machines

Figure 141 Récapitulatif des architectures possibles

Les équipements modernes utilisent massivement les bus de communication. Cette technique permet de réduire les coûts de câblage, de réaliser des fonctions sophistiquées et d'améliorer la sécurité de fonctionnement.

Le contrôle de mouvement fait souvent appel à plusieurs axes qu'il s'agit de synchroniser pour réaliser une trajectoire ou un positionnement bien précis. La consigne de position étant rafraîchie, habituellement, toutes les 250 μ s, le bus de communication devra avoir la possibilité d'adresser des messages à l'ensemble des axes dans cet intervalle de temps. Pour un temps de cycle donné, le nombre d'adresses est donc forcément limité.

Les bus doivent répondre aux impératifs suivants :

- besoin de services de synchronisation pour synchroniser toutes les stations de commande ou d'entraînement du système sur une base de temps commune avec une précision inférieure à la microseconde (jitter < 1 μ s).
- besoin d'une bande passante et puissance de traitement des paquets suffisante pour garantir l'échange ponctuel des données cycliques entre les nombreuses stations de commande ou d'entraînement à des fréquences de rafraîchissement inférieures à la milliseconde.
- besoin de fournir une interface commune à la grande variété des appareils de commande de mouvement actuels, aussi bien pour des simples variateurs de fréquence U/f que pour des variateurs à contrôle vectoriel de flux.

Le bus de communication doit également être déterministe pour éviter qu'une information non prioritaire circule intempestivement sur le réseau.

Le coût du point de connexion est également un critère important.

Les constructeurs proposent plusieurs solutions qui répondent à cette demande, en fonction du nombre d'adresses à gérer.

Offres de bus de communication pour contrôle de mouvement

Les bus de communication motion sont en nombre restreint. Ces bus reposent sur des technologies fortement implantées dans l'industrie comme le bus CANopen, le bus de communication Sercos ou Ethernet.

Outre les capacités offertes par Ethernet, l'adoption de la technologie de raccordement propre à cette technologie de communication, largement diffusée, permet de réduire notablement le coût des connexions. Dans son principe, le protocole Ethernet n'est pas déterministe et n'est donc pas directement utilisable. Les constructeurs ont donc imaginé des variantes qui contournent cette caractéristique.

Nous allons dans les lignes qui suivent décrire brièvement les bus les plus répandus offerts par les fabricants de dispositifs de contrôle de mouvement. Pour le lecteur désirant approfondir ses connaissances, les catalogues des fabricants donnent des informations détaillées sur les caractéristiques physiques et électriques ainsi que la structure des télégrammes échangés.

Bus Profidrive <http://www.profibus.com/pb/profibus/drives/>

Ce bus de communication est utilisé pour connecter des variateurs d'une machine ou d'une installation en utilisant le protocole de communication Profibus ou Profinet, ce qui permet l'interopérabilité de variateurs de fournisseurs différents.

Le bus Profidrive recourt à la communication temps réel isochrone (IRT) sur base matérielle. La communication IRT permet d'atteindre un temps de cycle de 250 μ s avec une gigue (jitter) inférieure à 1 μ s. Pour ce faire, par le biais d'une réservation de bande passante, le cycle de communication est subdivisé en une partie déterministe et une partie ouverte et imposée aux autres stations sur le réseau par le biais d'un maître de synchronisation.

Les deux transmissions coexistent sans se gêner.

Ce traitement fiable des processus rapides est dû au fait que les appareils supportant la communication IRT garantissent des temps d'exécution réduits.

Bus CANopen dédié motion <http://www.canopen-solutions.com/index.html>

Ce bus de communication offre un débit de 1Mb/s et la possibilité de connecter 8 servovariateurs. Le cycle réseau assure la mise à jour des consignes de positions afin de garantir la synchronisation des axes.

CAN est un bus série basé sur un modèle publication-souscription utilisant une architecture de type "broadcast".

L'expéditeur (éditeur) émet le message accompagné d'un identifiant sur le bus. Chaque servovariateur surveille le trafic sur le bus. Si le message lui est destiné, il va alors le lire et le traiter. Un servovariateur peut déclencher l'envoi d'un message à partir d'une demande de transmission distante.

7-5- Les bus de communication

Bus de communication Ethernet Powerlink <http://www.ethernet-powerlink.org/>

Ethernet Powerlink (EPL) est un réseau Ethernet temps réel dont un des atouts est de pouvoir utiliser des produits Ethernet tout à fait standards et, autre point fort, il intègre la couche application de CANopen.

Le comportement déterministe est obtenu en interrogeant cycliquement tous les noeuds connectés au réseau. Le cycle se compose d'une phase isochrone et d'une phase asynchrone.

Dans le domaine temps réel, l'exécution du cycle est contrôlée par le noeud gestionnaire du réseau (Managing Node). C'est lui qui permet l'accès au médium en émettant des messages spécifiques. Ainsi, un seul et unique noeud accède au réseau et tout risque de collision est écarté. La logique d'accès dite CSMA/CD, à l'origine du comportement non déterministe d'Ethernet, ne rentre donc pas en ligne de compte lors du fonctionnement normal d'Ethernet Powerlink.

Parmi les caractéristiques d'Ethernet Powerlink, trois sont plus particulièrement importantes :

- transmission garantie des données critiques dans le temps, au cours de cycles isochrones très courts et dans un temps configurable,
- synchronisation dans le temps de tous les noeuds du réseau avec une très grande précision (moins d'une microseconde),
- transmission des données moins critiques dans la tranche asynchrone réservée à cet effet.

À l'heure actuelle, Ethernet Powerlink permet d'atteindre des temps de cycle inférieurs à 200 μ s, ainsi qu'un «jitter» inférieur à 1 μ s.

Bus de communication Sercos <http://www.sercos.org/>

Le bus Sercos (SErial Real-time COmmunications System) est le premier à avoir été utilisé en contrôle de mouvement, car développé spécifiquement pour cette application. La première version a été introduite en 1987 avec une vitesse de transmission de 4 Mbt/s et un temps de cycle de 62,5 μ s.

Une évolution a vu le jour en 1999 avec une vitesse de transmission portée à 16 Mbits/s. Le médium physique utilisé par Serco I et Sercos II est la fibre optique. La seule configuration possible est la configuration en anneau.

En 2005 est apparu Sercos III qui supporte le protocole Ethernet. La vitesse de transmissions est portée à 100 Mbits/s, le temps de cycle minimum est de 31,25 μ s. La disposition en anneau est offerte, mais une configuration en ligne est également possible.

Le médium peut être une fibre optique pour Sercos II, le câble Ethernet industriel pour Sercos III

Sercos III combine la communication en temps réel pour le Motion Control, les entrées/sorties, les fonctions sécurisées et, sur un autre canal, les trames Ethernet basées sur les protocoles TCP/IP. Ceci permet de transférer des télégrammes provenant d'un réseau usine sans détériorer le débit du système (100 Mbits /s).

En faisant appel à la technologie Ethernet et à une configuration full duplex en anneau, on augmente la sécurité, car en cas de défaillance d'un des esclaves ou du réseau, le fonctionnement est encore assuré et un dépannage possible sans arrêter l'équipement.

Bus de communication EtherCat <http://www.ethercat.org/>

EtherCat est le nom d'une technologie de bus de terrain basée sur Ethernet, soutenue par une organisation internationale baptisée EtherCat Technology Group, composée de plus de 140 sociétés membres, utilisateurs et constructeurs.

EtherCat, qui a été reconnu comme standard de communication par l'IEC en septembre 2007, supporte les protocoles Sercos et CANopen.

EtherCat est une technologie temps réel où les paquets Ethernet ne sont désormais plus reçus, interprétés et stockés au niveau de chaque équipement. Les esclaves EtherCat lisent et écrivent les données durant le passage de la trame à l'intérieur du noeud et ils ne lisent que celles qui leur sont spécifiquement adressées. Les trames subissent ainsi des retards de l'ordre de quelques nanosecondes seulement.

Grâce au mode full duplex intégral, 100 axes sont contrôlés en 100 μ s. Durant ce laps de temps, tous les axes reçoivent des valeurs de commande et de contrôle et renvoient leur position ainsi que des informations concernant leur état de fonctionnement.

Ethernet/IP et CIP Motion <http://odva.org/default.aspx>

Compte tenu des besoins d'une application motion control et des caractéristiques du réseau Ethernet, le déterminisme est généralement obtenu avec des modifications au niveau des couches basses du réseau Ethernet et/ou l'utilisation de

switchs propriétaire, ou l'impossibilité d'utiliser un switch.

Ethernet/IP avec la technologie CIP Sync permet la synchronisation des horloges d'une architecture Ethernet distribuée. CIP Sync utilise IEEE 1588 pour synchroniser les horloges. Cette technologie permet d'utiliser un Ethernet standard non modifié qui peut parfaitement être utilisé pour des applications de motion control puisque la synchronisation des horloges est inférieure à 200 ns et que le « jitter » obtenu est inférieur à 1 μ s.

La définition des échanges entre les variateurs et le contrôleur, et les profils des équipements constituent CIP motion.

Les échanges sont de plus tous horodatés, ce qui permet,

en cas de problèmes d'avoir une action corrective automatique au niveau de l'équipement.

Ethernet/IP avec CIP sync et CIP motion autorise l'ensemble des topologies d'architectures afin d'adapter au mieux la topologie en fonction des besoins actuels et futurs

- anneau pour une meilleure disponibilité,
- étoile pour une modularité maximale,
- ligne,
- mixte étoile/ anneau/ ligne.

Il est ainsi possible de réaliser des architectures qui utilisent le même réseau sur l'ensemble des équipements d'une machine ou d'une ligne et de s'interfacer d'une manière naturelle avec les équipements des niveaux supérieurs par une intégration aisée vers du N2, ou du N3.

7-6- Les entrées-sorties des variateurs

Les variateurs peuvent fonctionner à partir d'un bus comme déjà évoqué, mais également en utilisant des entrées-sorties analogiques ou des entrées pilotables en fréquence et sens.

Les informations qui sont adressées aux variateurs ou qui en proviennent sont de type: les consignes qui agissent sur le fonctionnement du moteur et les informations tout ou rien.

Consignes

Les consignes des variateurs peuvent se présenter de différentes manières :

- analogiques,
- impulsion-sens,
- transmises par bus.

Les exemples qui suivent sont, à des détails près, représentatifs des offres des différents fabricants.

Consignes analogiques

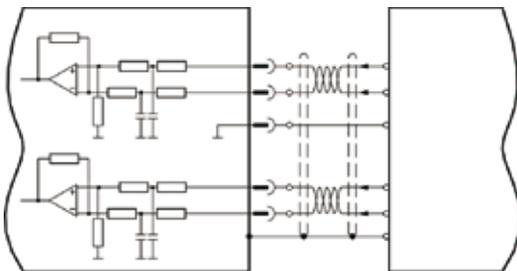


Figure 142 Utilisation des entrées analogiques d'un variateur

Les consignes sont transmises, le plus souvent, sous la forme d'un signal analogique ± 10 v, volts, comme représenté Figure 142.

Elles sont parfois également transmises en 0..10 volts, 0..20mA ou 4..20 mA avec une entrée supplémentaire pour le sens de rotation.

À noter l'utilisation d'entrées différentielles pour la réjection des perturbations de mode commun et l'utilisation de câbles torsadés et blindés. Une des entrées est utilisée pour piloter la vitesse, l'autre, le couple du moteur.

Consigne impulsions-sens (Figure 143)

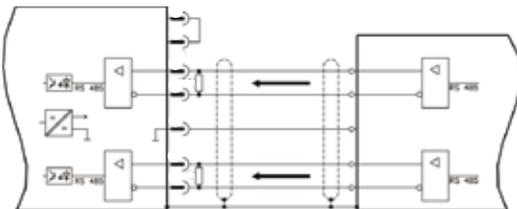


Figure 143 Utilisation des entrées impulsions - sens d'un variateur

Les consignes prennent la forme d'impulsions à fréquence variable. Une entrée détermine la vitesse de rotation, l'autre déterminera le sens de rotation

Cette interface peut être utilisée pour connecter le servovariateur à un contrôleur d'impulsion-sens.

Les réglages du servovariateur sont définis à l'aide d'un outil de paramétrage afin de permettre la compatibilité avec les signaux de pas-sens de n'importe quel contrôleur d'impulsion-sens.

Transmission par bus (Figure 144)

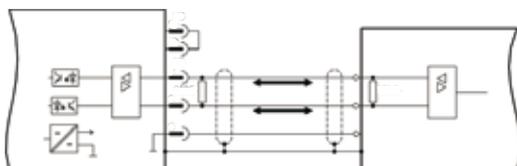


Figure 144 Interface CANopen d'un variateur

L'exemple Figure 144 illustre une interface de connexion au bus CAN (500 kBauds par défaut). Le profil intégré repose sur le profil de communication CANopen.

Les fonctions suivantes sont disponibles:

- exécution pas-à-pas avec vitesse variable,
- traverse de référence (remise à zéro),
- démarrage de tâche de mouvement,
- démarrage de tâche directe,
- mise en oeuvre d'une consigne numérique,
- fonctions de transmission de données.....

Entrées/sorties tout ou rien

Les entrées tout ou rien sont destinées à recevoir des signaux digitaux permettant, par exemple, de verrouiller le variateur.

Les sorties du variateur permettent de transmettre des informations sur l'état du variateur pour activer, entre autres, des circuits de sécurité.

Le schéma Figure 145 représente les entrées TOR d'un variateur. L'organe situé à droite peut être les sorties d'un automate.

Les variateurs sont également équipés d'entrées sorties tout ou rien générales.

Les fonctions de ces entrées sont multiples, parfois paramétrables citons par exemple :

- entrée de validation,
- entrées de prise d'origine, de surcourses,
- entrée de démarrage de mouvement, d'arrêt,
- entrée rapide de détection,
-

Pour les sorties on trouve également des fonctions multiples

- état du variateur,
- pilotage du frein,
- sortie réflexe,
- indicateur de mouvement en cours,
-

Les variateurs modernes possèdent également des E/S liées uniquement à la sécurité. En fonction des niveaux de sécurité gérés, des besoins, et de la méthode de gestion, ce nombre d'entrées sorties va être différent. Un organe de sécurité, contrôleur ou relais peut donc parfaitement, si nécessaire, activer certaines entrées d'un variateur.

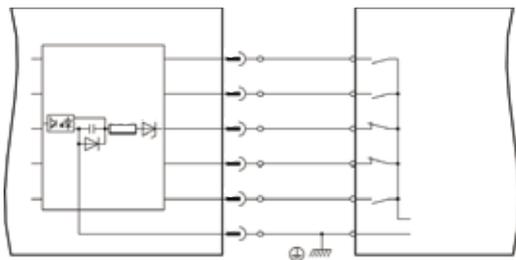


Figure 145 Entrées TOR d'un variateur

Un système est dit stable quand, écarté de sa position d'équilibre, il y revient spontanément et s'y maintient. Il peut y revenir avec dépassement avec ou sans oscillations. Dans un contrôle de mouvement, il est impératif que l'atteinte de la position finale se fasse sans dépassement ni oscillations. Hormis les variateurs pour moteurs pas-à-pas, les contrôleurs utilisent des boucles de retour. Dans certaines conditions, ces boucles peuvent devenir instables et un réglage minutieux doit être effectué pour éliminer cette éventualité.

Pour simplifier la mise en service, les contrôleurs sont dotés de fonctions d'auto ajustement ou d'ateliers logiciels d'aide au réglage. Les ajustements s'effectuent toujours de la dernière boucle, c'est-à-dire la boucle de courant, vers la première : la boucle de position. L'ajustement de la boucle de courant est le plus critique. Il nécessite de connaître avec précision les caractéristiques électriques du moteur en particulier l'inductance et la résistance des bobinages.

L'ajustement de la boucle de courant peut se faire, tout simplement, en appairant le moteur et le variateur. Les caractéristiques du moteur étant connues, les réglages de gain sont paramétrés à la fabrication du variateur. Cette association moteur/variateur est figée.

Une autre possibilité, qui apporte plus de souplesse, consiste à inscrire dans la mémoire interne du codeur associé au moteur les paramètres de celui-ci. À la première mise en marche du dispositif avec le moteur branché, le dispositif lit automatiquement le bloc de données du codeur qui contient des informations techniques sur le moteur comme les couples de pointe et nominal, le courant et la vitesse de rotation nominaux, le nombre de paires de pôles, la résistance et l'inductance des bobinages. Avec ces informations, les gains de la boucle ou des boucles de courant sont automatiquement réglés.

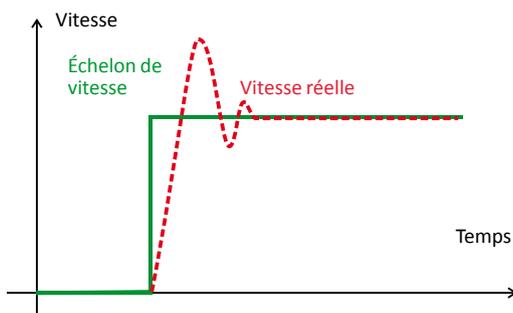


Figure 146 Réponse du servomoteur à un échelon de vitesse

L'ajustement de la boucle de vitesse peut être fait automatiquement ou par le mettre en service avec un logiciel de réglage. Ces logiciels implantés sur PC disposent de la fonction oscilloscope qui permet de visualiser la réponse indicelle des différentes boucles.

Le réglage ne peut être fait qu'avec le moteur associé à la partie mécanique. Les performances de la mécanique, inertie, rigidité, jeu et couple de frottements influent considérablement sur les gains de la boucle de régulation de vitesse et sur le résultat final.

Pendant la phase de réglage, le variateur délivre de petits échelons de vitesse, ce qui permet l'ajustement des réglages internes pour obtenir le meilleur résultat.

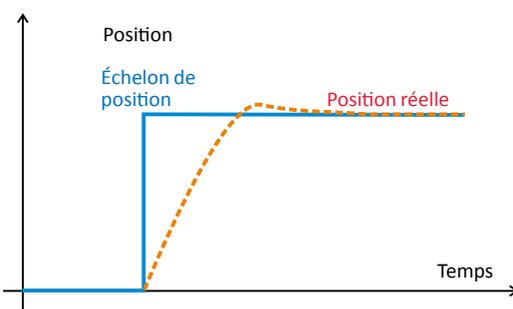


Figure 147 Réponse du servomoteur à un échelon de position

Le régulateur est correctement réglé lorsque la réponse à un échelon correspond au tracé du signal représenté Figure 146.

Les éléments suivants sont caractéristiques d'un comportement de régulation correct :

- mise en vitesse rapide,
- suroscillation maximum 40 %, recommandée 20 %.

Ce réglage effectué, une opération similaire est réalisée pour la boucle de position. Le réglage optimal est représenté Figure 147.

Ces ajustements automatiques ou assistés permettent d'obtenir l'optimum des performances.

En complément, les variateurs disposent, en interne, de fonctions complémentaires permettant d'améliorer la rapidité de réponse, d'autres qui permettent d'éliminer les dépassements de vitesse ou encore de réduire les variations de couple à basse vitesse («anti-cogging»).

Le réglage des boucles pourra être vérifié avec la fonction déplacement manuelle et procéder à la prise d'origine, opération préliminaire qui permettra par la suite de réaliser des déplacements en absolu avec un codeur incrémental. Cette opération consiste à associer une position du servomoteur à une position mécanique. Cette position devient la référence pour tout mouvement ultérieur.

La prise d'origine peut se faire soit par l'écriture immédiate du registre de position réelle (dans ce cas la position courante du servomoteur devient la position de référence) soit par déplacement de la position du servomoteur jusqu'à un capteur de référence.

Les pages qui suivent illustrent des applications industrielles réalisées avec les matériels des fournisseurs.

- Leroy-Somer
- Rexroth,
- Rockwell,
- Schneider Electric ,
- SEW Usocome,
- Siemens.



Figure 148 Maximisation de la production d'une centrale photovoltaïque (Document Leroy-Somer)

Exigences du cahier des charges:

- augmenter la productivité des panneaux photovoltaïques et le rendement de l'installation,
- motoriser les panneaux en limitant l'investissement,
- demande d'expérience dans les domaines d'entraînement, d'asservissement et de production d'énergie,
- avoir une solution clé en main,
- assurer la pérennité de l'installation.

Solution proposée:

- la poursuite du soleil est gérée par un PC et le profil est envoyé via PROFIBUS DP aux variateurs Unidrive SP pilotant les moteurs asynchrones. Le programme applicatif positionnement SM POS est intégré "dans l'intelligence" de l'Unidrive SP,
- entraînement de l'axe d'orientation en azimut (journalier) par motoréducteur axial à pignon arbré, motorisation de l'axe zénith (saisonnier) par motoréducteur frein à renvoi d'angle. Les moteurs freins IP65 sont équipés de codeur absolu SSI,
- solution personnalisée regroupant l'ensemble variateurs et composants amont dans un coffret,
- échanges inter variateurs Unidrive SP assurés par le bus de communication déterministe CT Net,
- offre système onduleur photovoltaïque SPV modulaire.

Intérêts pour le client:

- gains sur installation :
 - réponses simples et rapides aux exigences avec un programme positionnement standard,
 - solution « outdoor » diminuant l'impact du génie civil,
 - fonctions Motion Control embarquées dans l'Unidrive SP réduisant le nombre de composants et le câblage,
 - mise en service rapide par SMARTCARD avec paramétrage dédié ou par logiciel avec assistant de configuration et fonctions oscilloscope,
 - assistance à la mise en service.
- jusqu'à 45% d'augmentation de la productivité selon les sites :
 - en garantissant un ensoleillement maximum aux panneaux dans la journée et selon la saison par tracking du soleil et concentration du rayonnement,
 - par rendement élevé sous faible ensoleillement grâce au recalibrage automatique des modules SPV en fonction de la puissance produite.
- expérience et savoir-faire d'un seul constructeur,
- offre Leroy-Somer globale, complète, flexible, économique, cohérente et compétitive permettant de satisfaire l'ensemble des demandes de la simple motorisation de panneaux à la fourniture complète du système de production (onduleurs, boîtiers, appareillage de coupure BT/HT, transformateur...).

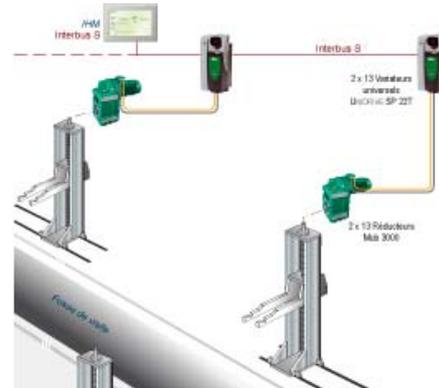


Figure 149 Système de levage d'une rame TGV complète (Document Leroy-Somer)

Exigences du cahier des charges:

- optimiser et sécuriser le processus de manutention en levant une rame complète de TGV pour les opérations de maintenance des organes de roulement,
- assurer avec une très grande précision l'alignement de chaque caisse tout le temps de l'opération,
- réduire les temps de manutention,
- être compatible avec les différents types de matériel roulant à traiter : TGV, Corail Inter cités, TER.

Solution proposée:

- 26 crics sont répartis de part et d'autre de la rame ; chaque vis à bille est entraînée par un réducteur pendulaire à arbre creux Manubloc équipé d'un moteur frein asynchrone pour vitesse variable LSMV équipé de codeurs absolus,
- synchronisation de l'ensemble des variateurs UNIDRIVE SP et échanges inter variateurs par module Interbus S intégré; le même bus de terrain assure la communication avec l'interface homme-machine de contrôle de la ligne,
- application positionnement embarquée dans module SM-POS,
- gestion du retour vitesse / position par module SM-Universal Encoder.

Intérêts pour le client:

- ce record mondial en termes de rapport précision / masse / volume pour lever une charge de 386 tonnes sur 200 mètres de long a été possible par les performances de l'ensemble de la motorisation :
 - temps de montée de seulement 10 minutes,
 - mise en position avec une précision de moins d'un millimètre sur toute la longueur.
- grâce à ces performances, le Technicentre Est Européen peut assurer la centaine de maintenances préventives annuelles nécessaires pour assurer l'ensemble des roulements de la Région Est de la SNCF.
- rapidité de mise en œuvre : recopie du programme d'un variateur à l'autre par carte à puce,
- flexibilité d'utilisation : shuntage rapide des crics non utilisés pour les rames TER plus courtes,
- garantie globale de performance :
 - expérience et savoir-faire acquis de longue date,
 - un seul fournisseur et interlocuteur pour l'ensemble de la motorisation et commande,
 - offre LS complète et économique.

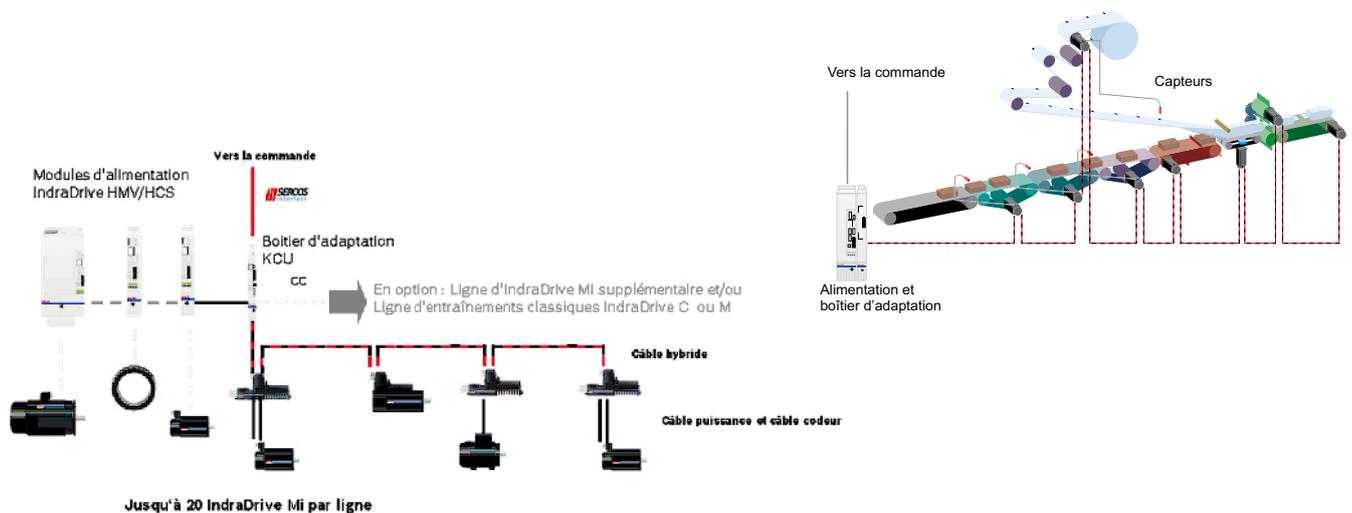


Figure 150 Ensacheuse horizontale sur base de servomoteurs avec variateurs intégrés (Document Rexroth).

La solution IndraMotion For packaging inclut :

- 1 contrôleur multi axes base automate MLC,
- une alimentation à réinjection avec module de couplage KCU,
- les servomoteurs à variateur intégré IndraDrive MI (1 par axe) chaînés en série par câble unique hybride ainsi que les blocs E/S déportés,
- communication temps réel entre le contrôleur, les axes et E/S par réseau Sercos III,
- fonctions de sécurité intégrées EN13849,
- ouverture multi-Ethernet (Sercos III, Ethernet IP, Etercat, Profinet RT, Profibus).

Avantages de la solution :

- flexibilité et modularité d'exploitation permettant une évolution aisée de la machine,
- programmation et mise en route facilitée (fonctions métier paramétrables),
- volume des armoires électriques réduit de 70 % permettant de les placer en hauteur,
- câblage réduit de 85%,
- design hygiénique,
- meilleure efficacité énergétique grâce à:
 - la suppression des climatisations dans les armoires électriques,
 - la réinjection de l'énergie de freinage sur le réseau,
 - l'optimisation de la consommation d'énergie par le raccordement du bus continu.

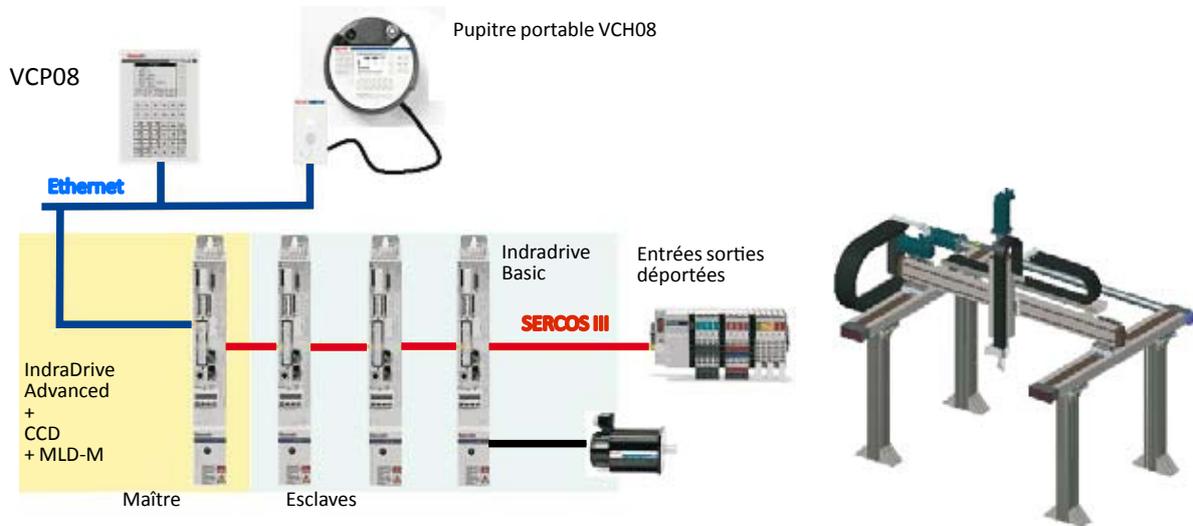


Figure 151 Portique de manutention (Document Rexroth).

Exigences du cahier des charges :

- respect des temps de cycle du client,
- facilité et rapidité de mise en oeuvre et de programmation,
- coût optimisé.

La solution proposée :

- robots cartésiens jusqu'à 6 axes linéaires et/ou rotatifs pour:
 - systèmes pick and place,
 - palettisation.

Description de la solution Easy Handling :

- système complet mécanique et électrique assemblé et opérationnel,
- constitué à partir de modules mécaniques intégrés (éléments de structure, guidage, transmission, servomoteur, câblage),
- variateurs IndraDrive ou IndraDrive Cs avec un variateur-maitre, les autres variateurs étant esclave, blocs E/S déportés, tous reliés par réseau SerCOS III,
- variateur-maitre avec automate programmable intégré suivant IEC11131,
- package logiciel IndraMotion For Handling dans le variateur-maitre et l'interface graphique pré configuré (sur pupitre fixe, ou portable) incluant Easy Wizzard (auto configuration système et axes).

Avantages de la solution :

- solution robotique au prix d'une solution d'automatisme,
- coûts de développement et de mise en route très réduits,
- bibliothèque de fonctions intégrée,
- optimisation des mouvements,
- cycle d'investissement raccourci.

9-5- ROBOTIQUE et PACKAGING : Intégration des robots Delta dans les lignes de machines d'emballages

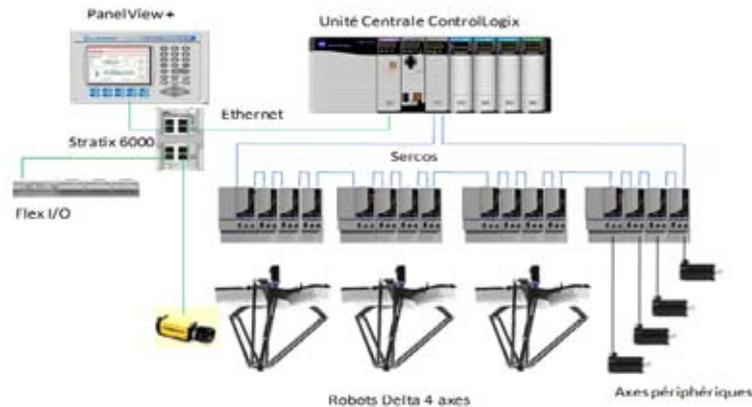


Figure 152 Intégration de robots Delta dans les lignes de packaging (Document Rockwell Automation)

Les robots Delta, ou « robots-araignées», sont des robots « parallèles» constitués de trois bras connectés à des articulations sur une base située au-dessus des matériels déplacés. La géométrie du robot lui permet de se déplacer rapidement dans un espace en trois dimensions et d'orienter une charge autour de son axe vertical. La capacité de basculer facilement d'un produit à un autre est un avantage-clé de cette technologie. Comme les moteurs sont montés sur une base fixe, les câbles du moteur n'ont pas à être flexibles.

Avantages des robots Delta :

- les durées de cycle très rapides, jusqu'à 180 pièces par minute, permettent un rendement élevé,
- les avancées dans la technologie de vision industrielle permettent une identification et une localisation de produit aléatoire très rapide,
- la conception mécanique simple réduit les interférences, allonge la durée de vie avec une maintenance réduite et facilite l'accès aux pièces mobiles,
- grande souplesse, avec changement de produit rapide, permettant de traiter une grande diversité de configurations de produits
- utilisation de la bibliothèque complète d'instructions d'application courantes «Logix» avec robot Delta qui intègre la commande de trajectoire Pick and Place, la commande d'axe auxiliaire, les algorithmes de suivi de convoyeur, l'interface du système de vision, l'apprentissage de l'interface-opérateur, la commande de sortie de positionnement sur la trajectoire,
- par leur conception suspendue, les machines sont plus compactes,
- la solution d'architecture ouverte permet d'utiliser le meilleur équipement disponible,
- réduction du coût du système grâce à l'élimination de l'automate robotique autonome/armoire de commande et des composants redondants, comme l'interface-opérateur,,
- utilisation de composants courants, comme les Entrées/Sorties, les variateurs, les moteurs et la sécurité pour toute la cellule ou la chaîne,
- RSLogix 5000 est l'unique logiciel nécessaire pour la commande totale de la chaîne, de la cellule et du robot.

Avantages et bénéfices clients :

- utilisation d'une seule unité centrale pour piloter les trajectoires des robots, le séquentiel machine ainsi que les périphériques (E/S, axes, vision),
- utilisation d'une seule interface homme-machine pour accéder aux paramètres robots et machine,
- utilisation d'un environnement logiciel unique,
- réduction des coûts grâce :
 - à la standardisation du matériel,
 - à la suppression des échanges entre systèmes ,
 - aux gains de programmation et de mise en œuvre,
 - au gain de formation ,
 - au gain de câblage,
- gestion des zones de sécurité facilitée,
- programmation modulaire aisée,
- centralisation en un point de toutes les informations de maintenance, de paramétrage, de production,
- Intégration aisée via Ethernet des divers produits comme la vision,
- Intégration aisée vers les niveaux supérieurs grâce à l'utilisation d'Ethernet TCP/IP.

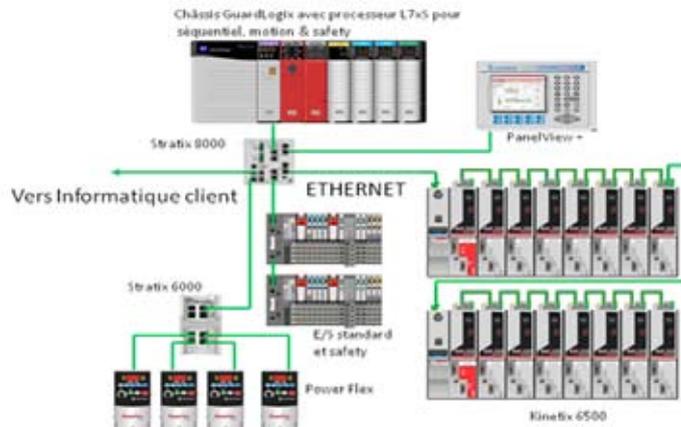


Figure 153 THERMOFORMAGE : Solution globale et ouverte d'automatisme et d'entraînement (Document Rockwell Automation)

Besoins de l'application :

- fonction de déroulage du film plastique (régulation de tension du film),
- positionnement des convoyeurs de façon très précise (1/100e mm),
- vitesse de déplacement des axes élevée (cadence maxi de 400 cycles/minutes),
- précision dans les mouvements de dépose des produits,
- gestion de l'ensemble du synchronisme de la machine,
- modification en ligne des cadences machines,
- gestion de nombreuses recettes, car de nombreux produits finis passent par la ligne,
- besoin d'une maintenance rapide à partir d'un diagnostic simplifié,
- ouverture réseaux : nécessiter de dialoguer avec l'usine.

La solution comporte:

- un Contrôleur ControlLogix de sécurité ,
- des axes brushless entre 20 et 30 suivant les options de la machine. Les moteurs sont pilotés par des Kinetix 6500 qui incorporent des fonctions de sécurités permettant d'obtenir un niveau SIL3-Plc,
- des entrées sorties point I/O qui permettent de mixer des entrées sorties standard et de sécurité,
- des variateurs pour moteurs asynchrones avec fonctions de sécurité.

Avantage de la solution :

- tous les bénéfices de l'architecture intégrée de Rockwell Automation avec l'ensemble des disciplines traitées de manière native par le processeur Logix : la sécurité, le séquentiel, le motion, la variation de vitesse,
- l'utilisation d'un réseau unique pour les éléments de l'architecture : Ethernet TCP/IP avec les protocoles CIP Safety, CIP Motion,
- l'intégration simple dans l'infrastructure informatique du client, Ethernet TCP/IP, grâce à l'utilisation de switchs administrables,
- transparence des informations et accès simplifié aux données ,
- une maintenance simplifiée avec un point de connexion unique et une IHM permettant d'accéder nativement à l'ensemble des composants,
- une réduction des coûts grâce à la plateforme logicielle unique qui permet d'optimiser la formation, les échanges inter-systèmes,
- des temps d'arrêt et de redémarrage réduits grâce aux fonctions de sécurité intégrées aux variateurs Kinetix et Power Flex.

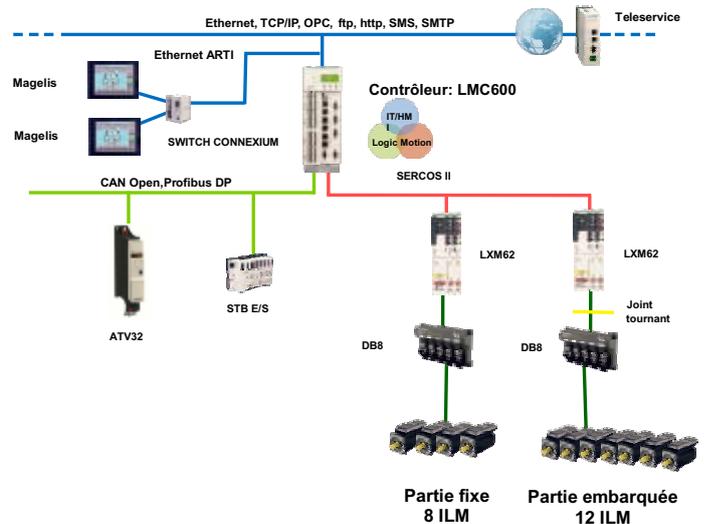


Figure 154 Machine d'impression sérigraphie 2 couleurs (Document Schneider Electric)

Cette machine imprime en sérigraphie des tubes de plastique (domaine cosmétique) en 2 couleurs.

Cette machine multiformat, équipée d'un plateau tournant, a multiplié par 2 la cadence et permet d'avoir une machine avec une surface au sol réduite.

La cadence machine est de 4000 tubes à l'heure.

La solution ILM62 (moteur avec électronique embarquée) est l'atout technique majeur de la réussite de cette machine associé à un contrôleur d'axe centralisé et synchronisé.

Solution retenue :

- PAC DRIVE, Contrôleur LMC600 en réseau Sercos.
- motorisation ILM62 (pour les variateurs embarqués sur les moteurs).
- architecture centralisée et synchronisée sur les 20 axes dont 12 embarqués.

Avantages client :

- solution centralisée qui pilote l'ensemble des axes , l'automatisme et les entrées, sorties.
- motorisation avec l'électronique embarquée (car 12 axes embarqués)
- machine compacte et flexible.
- pilotage de la machine par 2 dialogues opérateurs en communication avec le contrôleur

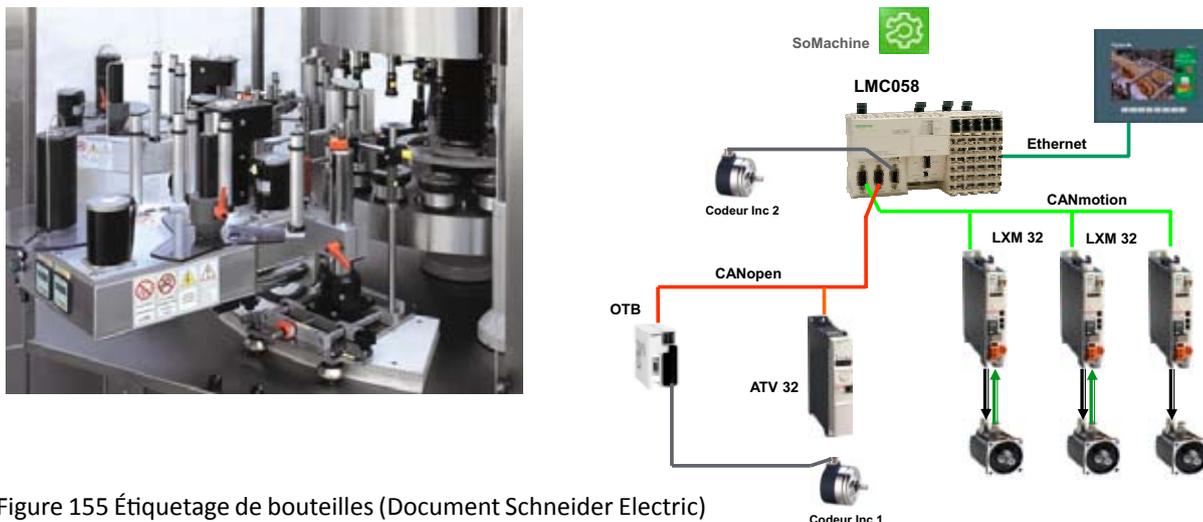


Figure 155 Étiquetage de bouteilles (Document Schneider Electric)

Cette machine effectue sur une seule ligne l'étiquetage de bouteilles. Six étiquettes peuvent être apposées sur une bouteille.

L'opération peut être divisée en 3 phases.

Phase 1 : transport des bouteilles sur un convoyeur, l'insertion est faite par un système pneumatique avec synchronisation du mouvement.

Phase 2 : immobilisation de la bouteille.

Phase 3 : l'étiquette est collée sur la bouteille par un axe esclave asservi à l'axe maître (profil de came) qui déplace l'étiquette avec la position correcte.

Description du matériel:

- encodeur 1 (Inc. 1) positionné dans la machine et chargé de détecter la position de serrage de la bouteille,
- encodeur 2 (Inc. 2) encodeur maître pour l'appareil distributeur d'étiquettes,
- cellules photoélectriques raccordées directement aux entrées «capture» du LXM05 pour obtenir une précision élevée même à fortes cadences de production. Un encodeur supplémentaire est utilisé pour effectuer l'étiquetage à l'arrière de la bouteille à coût réduit.

Fonctions de base utilisées:

- contrôle et détection de marquage,
- profil de came.

Performances:

- temps de cycle moyen de la tâche mouvement : 1,9 ms,
- temps de cycle moyen de configuration de la tâche mouvement: 4 ms,
- temps de cycle moyen de configuration des tâches auxiliaires: 5ms,
- vitesse de production: 1000 - 2500 prod. /h,
- vitesse de défilement des étiquettes: 40 - 45 m/min,
- précision de positionnement des étiquettes: 0.5 mm.

Avantages client :

- solution évolutive,
- cadences de fabrication,
- précision,
- facilité de communication: Motion Bus, Ethernet, CANopen, Master Encoder...

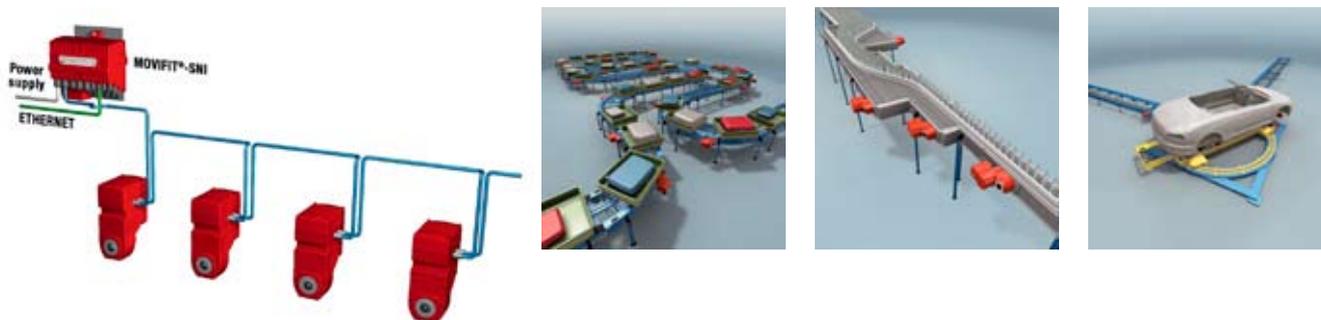


Figure 156 Technologie Movigear et applications typiques: transport de bagages, convoyeur à bandes, table tournante (Document SEW Usocome)

Cette application, qui ne nécessite pas de dynamique particulière, est réalisée avec le produit MOVIGEAR- SNI®, dérivé d'un servomoteur , ce qui se traduit par les avantages suivants pour le client :

- produit mécatronique : électronique, moteur et réducteur intégrés dans le même bloc:
 - grande compacité et auto refroidissement optimisé : puissance massique élevée,
 - formes aseptiques, IP65 et bonne tenue aux produits de nettoyage en standard ; variante IP69K pour l'agro alimentaire avec auto ruissellement (non accrochage) de l'humidité,
 - installation/échange rapide et aisé sans besoin de moyen de manutention.
- excellent rendement (meilleur que les exigences IE3 "Premium efficiency") quelles que soient la charge instantanée et la vitesse :
 - meilleur de 10 à 25%, en moyenne, selon la vitesse et la charge par rapport aux solutions traditionnelles,
 - contrairement aux moteurs à rendement augmenté, cet avantage comparatif reste qualitativement conservé, même dans le cas de démarrages fréquents,
 - facture énergétique réduite de 15 à 30%, en moyenne, qui rentabilise rapidement la plus-value à l'achat. Ensuite, les économies générées pendant toute la durée de vie de l'installation, contribuent à rembourser au fil du temps le coût de l'installation elle-même.
- pilotage par Ethernet : un même module de communication (MOVIFIT-SNI® en IP65), unique interface avec l'automate, gère jusqu'à 10 variateurs MOVIGEAR®,
- moins d'électronique,
- câblage simplifié : signaux de commande transmis par les câbles de puissance,
- moindre surdimensionnement : la très forte capacité de surcharge du MOVIGEAR® rend disponible la puissance-crête nécessaire en installant une puissance pourtant beaucoup plus proche de la puissance nécessaire à vitesse stabilisée et en tout cas plus faible que ce ne serait le cas en motorisation asynchrone traditionnelle,
- vitesses basses possibles durablement sans ventilation forcée,
- mise en service rapide. En cas de positionnement, programmes applicatifs prêts à l'emploi disponibles, qu'il suffit de paramétrer selon l'application, sans besoin préalable de connaissances en programmation,
- sauvegarde centralisée des paramètres sur PC,
- plusieurs variantes mécaniques de montage,
- peu de rapports de réduction nécessaires, un même appareil convenant à plusieurs besoins. Rationalisation du stock de pièces de rechange du client.
- architecture décentralisée :
 - CEM facile à réaliser en raison de la dispersion des variateurs,
 - armoires plus petites et chauffant moins : surface disponible augmentée pour la production et donc pas de budget «refroidissement» à prévoir,
 - moins de liaisons et chaînage des liaisons d'où de considérables économies de longueur de câbles, grande clarté du câblage et extension aisée de l'installation si besoin est,
 - entrées/sorties déportées : économie supplémentaire de longueur de câble,
 - pas de décâblage en cas d'intervention de maintenance ; un bon câblage initial est un acquis définitif.

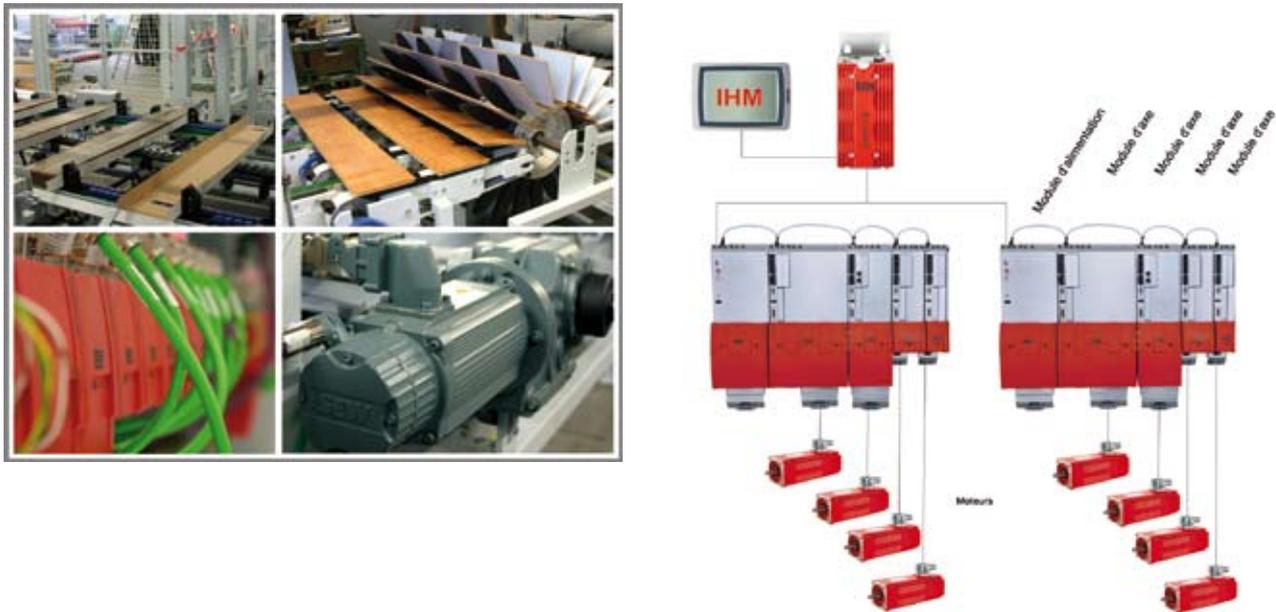


Figure 157 Photos du procédé et la topologie de l'automatisme (Document SEW Usocome).

Cahier des charges :

- 3 sections de conditionnement distinctes devant fonctionner en synchronisme parfait,
- cadence de conditionnement : 160 lames de parquet / minute,
- coupe et collage à la volée de la sous-couche acoustique optionnelle.

Configuration de l'installation :

Le concept de contrôle du mouvement scinde l'installation en 3 sections :

- l'amenée : les lames sont retournées, scannées, triées et redirigées en fonction de l'option de process suivante vers l'une des sections en aval,
- le collage : la sous-couche acoustique, débitée à partir d'un rouleau, est coupée à la volée aux dimensions exactes du format en cours de conditionnement, puis collée à la volée sur les lames en transit,
- l'emballage : le nombre prédéfini de lames est empilé et conditionné en emballage-carton.

Concept d'entraînement et de contrôle du mouvement :

- La référence de cadencement de l'installation est fournie par un capteur Hiperface-Multitours installé en amont sur l'unité de production des lames. Les informations du codeur-maître sont acquises au niveau du contrôleur MOVI-PLC. Les différents mouvements de la machine sont synchronisés par came électronique. Ces comes permettent par exemple de calculer les courbes de solidarisation et de désolidarisation du couteau rotatif. Tous les axes sont liés par un arbre électronique.
- Le mouvement de l'installation est assuré par 38 entraînements (moteur brushless + servoréducteur). La gestion des axes est assurée par des ensembles servovariateurs multiaxes (module de puissance + modules d'axes) associés à la carte contrôleur. Cette topologie d'installation permet de réduire les coûts d'intégration électrique et favorise également le transfert d'énergie entre les axes. Ce qui se traduit par des économies d'énergie.



Figure 158 Schéma synoptique de la ligne d'impression (Document Siemens)

La ligne comprend un dérouleur avec fonction « splice » (changement de bobine pendant le fonctionnement), un système de tirage, plusieurs groupes d'impression, un sécheur et un système de pliage.

Les technologies utilisées permettent de garantir une qualité optimale à des vitesses supérieures à 1000 mètres/minute.

Le système de recalage automatique optimise le réglage de la machine, afin que les couleurs se juxtaposent à la perfection.

Intérêts de la solution:

- configuration matérielle et logicielle modulaire et évolutive,
- standard d'impression "ouvert",
- synchronisation de chaque section de très haute précision et très fiable,
- plate-forme intégrée pour tous les éléments de la ligne de presse d'impression,
- avec PROFINET, un seul réseau pour le synchronisme et les communications,
- sécurité intégrée dans les variateurs SINAMICS et les automates SIMATIC,
- composants standard des gammes SINAMICS, SIMOTION, SIMATIC,
- étendue de la gamme de variateurs SINAMICS et servomoteurs (synchrone et asynchrone),
- expertise mécatronique, connaissance du métier de l'impression, pour élaborer un concept adapté aux besoins de la machine.

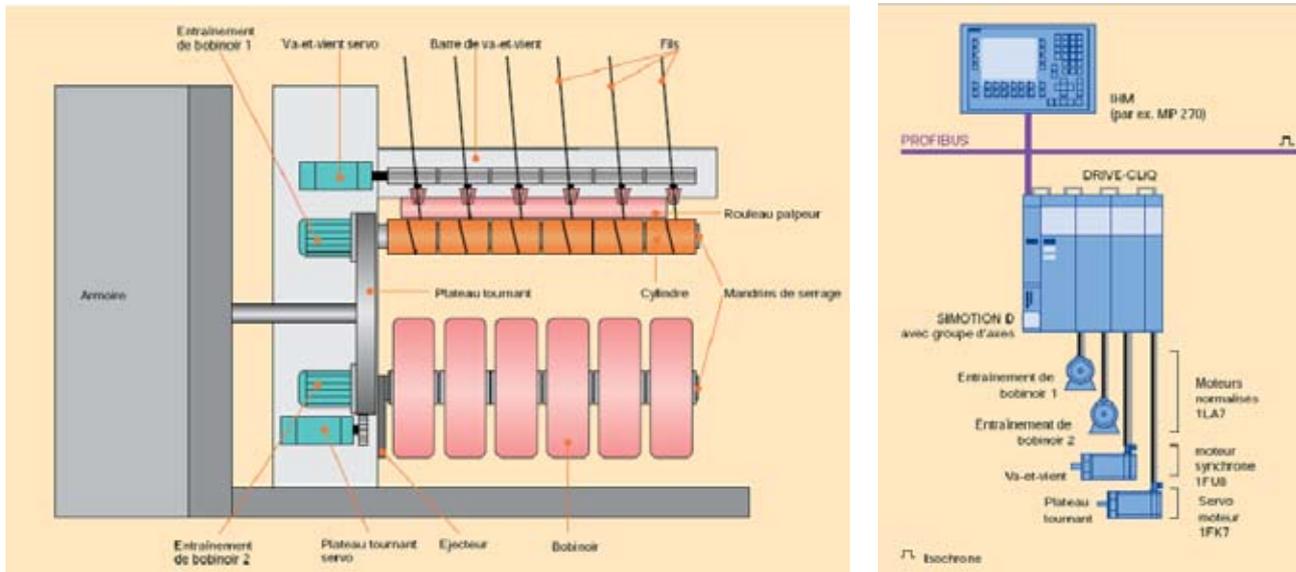


Figure 159 Schéma de principe du bobinoir et structure de l'automatisme (Document Siemens)

Exigences en matière de machine:

- dans une installation de filature de fibres synthétiques, le bobinage constitue la dernière étape du process,
- vitesses de filage très élevée : 8000 m/min,
- changement des bobines pleines au vol sans interruption du filage.

Principales exigences concernant le système d'entraînement et d'automatisation :

- les bobinoirs défectueux doivent pouvoir être remplacés très rapidement en cours de production, ce qui impose un concept d'automatisation et d'entraînement modulaire,
- l'adressage et le paramétrage du bobinoir de rechange doit se faire automatiquement,
- au lieu de trois systèmes, un seul système pour les entraînements U/f, Vector et Servo, la logique et la technologie.

Rendement d'un système complet

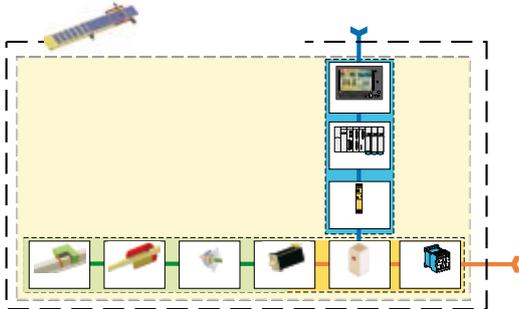


Figure 160 Les éléments générateurs de pertes

Tout système (Figure 160), aussi soigné soit-il, est le siège de pertes. Ces pertes se matérialisent par un échauffement. Les pertes sont liées aux frottements, plus le coefficient de frottement est important plus le rendement baisse.

Une construction soignée est donc incontournable pour obtenir l'optimisation du système.

Les systèmes de contrôle de mouvement n'échappent pas à cette règle. Les pertes sont localisées aux endroits suivants :

- le guidage,
- conversion de mouvement,
- réducteur,
- moteur (pertes joules et courants de Foucault),
- la conversion d'énergie (pertes joules, pertes de commutations dans les composants de puissance, harmoniques...).

Le rendement de l'ensemble est égal au produit des rendements de chaque élément cité ci-dessus.

En imaginant que le rendement de chacun est égal à 90%, on voit aisément que le rendement global est de 59% seulement. Il est donc primordial de rechercher à optimiser chaque constituant à un prix acceptable.

Pour être exhaustif, il faudrait inclure dans la liste précédente les systèmes électriques associés (automates, superviseurs, relais, contacteur etc..).

Pertes dans le guidage

Le rendement de ces systèmes est supérieur à 90%. Rangées par ordre de rendement et de prix croissants, les solutions possibles sont les suivantes :

- galets,
- douille à billes,
- règle à billes,
- règle à rouleaux.

Le choix de la solution dépendra des masses à déplacer, des vitesses de déplacement et du coût acceptable.

Pertes dans conversion de mouvement

Le rendement de ces systèmes varie de 60% à plus de 90%.

Par ordre de rendement et de prix croissants, les solutions utilisables sont :

- bielle-manivelle,
- courroies crantées,
- crémaillère,
- vis à recirculation de billes,
- vis à rouleaux,
- vis à recirculation de rouleaux.

En dehors du prix, le choix de la solution dépendra en particulier des jeux acceptables et des vitesses de déplacement.

Il faut également noter que les systèmes de conversion de mouvement, en particulier les vis, peuvent avoir des rendements différents à l'accélération et à la décélération. En d'autres termes, quand le mobile ralentit, une partie significative de l'énergie cinétique peut être perdue.

Pertes dans les réducteurs

Le rendement de ces systèmes varie de 80% à plus de 90%. Le jeu du réducteur est souvent l'élément principal du choix, car cela déterminera la précision du positionnement, avec une incidence sur le rendement; un des réducteurs qui permet un jeu nul est le réducteur harmonique, au détriment du rendement qui, au mieux, est de l'ordre de 80%.

Pour les autres réducteurs, le jeu et le rendement sont directement liés à la précision du taillage des engrenages, à leur nombre, ainsi qu'à leur état de surface. L'utilisation de la technologie épicycloïdale permet d'obtenir un rendement pouvant dépasser 95%

A noter que les réducteurs peuvent avoir des rendements différents à la mise en mouvement et au ralentissement. C'est particulièrement vrai pour les réducteurs à vis.

Pertes dans les moteurs

Les servomoteurs sont le siège de deux types de pertes: les pertes mécaniques et les pertes électriques. Pour les moteurs conventionnels, les pertes mécaniques sont liées aux roulements et à l'entraînement des divers éléments liés au moteur comme le capteur de position et le frein. Ces pertes peuvent être considérées comme négligeables et sont susceptibles d'évoluer dans le temps en raison de l'usure ou d'un défaut de lubrification.

La constante de couple joue un rôle primordial sur la consommation d'énergie elle indique le nombre de N.m générés par Ampère. Plus cette constante est élevée moins le moteur consommera d'énergie pour la même puissance mécanique fournie.

En ce qui concerne les moteurs linéaires, les pertes mécaniques sont liées au système de guidage. Quant aux moteurs piézoélectriques, une partie significative de l'énergie est dissipée dans le système d'entraînement par friction.

Les autres pertes sont d'origine électrique et magnétique :

- pertes dans les masses métalliques ferromagnétiques (courant de Foucault et hystérésis)
- perte dans le collecteur pour les servomoteurs à courant continu (tension de seuil et commutation),
- pertes dans les enroulements du stator (effet Joule),
- pertes dans le rotor pour les machines asynchrones rotatives (effet Joule),
- pertes dans le secondaire pour les moteurs linéaires (effet Joule),
- occasionnellement pertes liées au système de refroidissement du moteur (circuit de refroidissement liquide, ventilation forcée).

Le tableau Figure 161 compare les rendements typiques des différents servomoteurs. Les notions utilisées pour qualifier les pertes sont utilisées à titre de comparaison entre les solutions et n'ont aucune signification sur la valeur de ces pertes.

Type de moteur	Pertes				Rendement typique minimum
	Mécaniques	Collecteur	Stator/primaire	Rotor/secondaire	
Synchrone	Très faibles	Sans objet	Faibles	Faibles	95%
Asynchrone	Très faibles	Sans objet	Élevées	Élevées	85%
Linéaire synchrone	Très faibles	Sans objet	Élevées	Faibles	80%
Courant continu	Faibles (frottements au collecteur)	Faibles	Faibles	Élevées	90%
DC Brushless	Très faibles	Sans objet	Faibles	Faibles sauf au freinage	80%
Pas-à-pas à aimants et composites	Très faibles	Sans objet	Élevées	Faibles sauf au freinage	50%
Linéaire asynchrone	Très faibles	Sans objet	Élevées	Élevées	70%
Pas-à-pas à réductance	Très faibles	Sans objet	Très élevées	Faibles sauf au freinage	40%
Piézoélectrique	Très élevées	Sans objet	Sans objet	Sans objet	20%

Figure 161 Rendements typiques des différents moteurs

Pertes découlant du fonctionnement en MLI

Les variateurs de vitesse travaillent tous par modulation de largeur d'impulsion, c'est-à-dire que les semi-conducteurs sont soit passants, soit bloqués.

À l'état passant, ils présentent un seuil de tension E (ordre de grandeur du volt) et une résistance r. Les pertes sont donc de la forme:

$$P = E I_t + r I_t^2$$

I_t est le courant qui circule dans les semiconducteurs.

À l'état bloqué, le composant présente un courant de fuite de quelques milliampères et les pertes sont négligeables.

Le passage de l'état bloqué à l'état passant et le retour à l'état bloqué occasionnent des pertes, dites pertes de commutation, d'autant plus élevées que le temps pour changer d'état est long et que la fréquence de commutation est élevée.

Les composants majoritairement utilisés tels que le IGBT ont des temps de commutation extrêmement rapides (inférieurs

à la μs), ce qui autorise le fonctionnement à fréquence élevée (4 à 8kHz) avec des pertes acceptables. En diminuant la fréquence de découpage, on réduit les pertes dans le variateur, au détriment de la bande passante et de l'ondulation de courant dans le moteur.

Pertes dans les systèmes de contrôle

Pour fonctionner, les variateurs ont besoin d'une électronique de contrôle, alimentée en basse tension, obtenue dans la quasi-totalité des cas à partir de la tension du réseau et d'un système d'alimentation à découpage.

L'électronique de contrôle consomme une faible énergie (une dizaine de watts), que l'on peut considérer comme négligeable sauf pour les petits variateurs.

Pertes dans les systèmes annexes

Pour limiter les perturbations rayonnées et conduites, les variateurs nécessitent des accessoires de filtrage. Le courant qui les traverse, très souvent riche en harmoniques, occasionne des pertes supplémentaires.

Ces composants sont, en général, installés dans des armoires et il est parfois indispensable de prévoir une ventilation forcée voire même une climatisation dans des cas extrêmes.

Tout cela contribue à la dégradation du rendement. Le variateur incorporé au moteur est une solution attractive permettant de limiter la dissipation dans les armoires.

Rendement global des variateurs de vitesse

Soucieux de réaliser des variateurs les plus compacts possible afin de réduire leur volume qui est déterminé par la taille des radiateurs, les fabricants cherchent à réduire les pertes et les variateurs atteignent des rendements de 98%. Si on inclut les composants additionnels, le rendement est de l'ordre de 95%.

Pertes liées au mode de fonctionnement

La machine équipée de contrôle de mouvement est soumise à des cycles d'accélération, de travail et de ralentissement. Lors de l'accélération, le moteur stocke dans les parties mobiles une énergie cinétique qui sera restituée en grande partie lors du ralentissement.

La majorité des variateurs utilisent un pont de diodes pour

Le présent document est la propriété des entreprises qui ont contribué à sa rédaction et du GIMELEC. Il est protégé par le droit d'auteur. Il ne peut être reproduit, modifié, diffusé, exploité sans l'autorisation écrite des propriétaires.

redresser la tension d'alimentation en une tension continue qui sera ensuite découpée pour reconstituer la tension d'alimentation du moteur.

Ce système est, par nature, non réversible, et aucune énergie ne peut être restituée au secteur.

Lors du freinage, l'énergie est stockée dans les condensateurs de filtrage et, à partir d'une certaine tension, dissipée dans une résistance par un dispositif annexe.

On peut sensiblement améliorer le rendement en partageant cette énergie entre les divers variateurs, soit par une alimentation commune à l'ensemble des variateurs, soit en connectant en parallèle les sources continues individuelles. Néanmoins, il est souvent nécessaire de prévoir une résistance de freinage commune.

Une autre solution séduisante, mais coûteuse consiste à utiliser une alimentation commune réversible qui permet de restituer au réseau l'énergie qui provient du ralentissement de la machine. Dans ce cas, la résistance de freinage est inutile, sauf si un freinage électrique contrôlé est exigé lors de la disparition de la tension réseau. Avec cette solution, le rendement est maximum.

Pertes liées à la forme du courant d'alimentation

Le pont de diodes, associé aux condensateurs de filtrage, prélève un courant non sinusoïdal Figure 162.

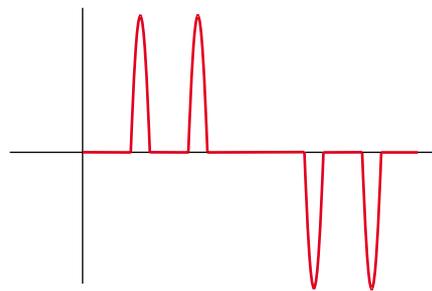


Figure 162 Courant absorbé par un variateur muni d'un pont de diodes triphasé et d'un condensateur de filtrage

Cette forme de courant typique se retrouve avec les variateurs démunis d'inductance de ligne et de lissage. L'amplitude du courant dépend de l'inductance propre de la ligne d'alimentation et de la valeur des condensateurs.

La puissance absorbée est proche de la puissance restituée au moteur, en revanche, la valeur efficace du courant prélevé au réseau est très supérieure au courant fondamental.

Ce courant a pour expression :

$$I_{\text{eff}} = (I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2)^{1/2}$$

I_1 , c'est-à-dire le premier harmonique, est le fondamental du courant.

C'est ce courant qui détermine la puissance active prélevée au réseau qui, multipliée par le rendement, est la puissance fournie au moteur.

Tous les autres termes sont des harmoniques, qui surchargent et échauffent les conducteurs et les transformateurs qui doivent être dimensionnés en conséquence.

Il est apparu récemment sur le marché des variateurs dont le pont de diode d'entrée a été remplacé par un pont à diodes et d'IGBTs commutant à la fréquence du réseau.

Ces variateurs sont réversibles. Ils permettent de restituer dans le réseau d'alimentation l'énergie provenant du freinage de la machine tout en conservant un rendement identique aux variateurs classiques.

De plus, ces variateurs ne nécessitent pas de self de ligne pour limiter les harmoniques.

Compte tenu du prix d'une telle solution, cette disposition est encore peu répandue dans l'offre des constructeurs.

11- La sécurité

11-1- Les exigences

Lors de la construction d'une machine, l'évaluation et, le cas échéant, la réduction des risques sont d'une importance décisive pour maintenir les risques résiduels dans des limites tolérables. L'évaluation des risques sert, d'une part, à optimiser « pas à pas » la sécurité de la machine et, d'autre part, à fournir des « preuves » en cas de dommage.

Les défauts fonctionnels d'une machine représentent un danger potentiel pour les hommes, les machines, et le process. C'est la raison pour laquelle les machines doivent respecter un niveau de sécurité fonctionnelle approprié.

Les règles relatives à la sécurité des machines sont spécifiques à des pays ou des régions. Les normes et prescriptions nationales relatives à la réalisation technique des machines ont fait l'objet d'une vaste harmonisation au niveau européen. Dans l'Union Européenne, chaque machine vendue doit avoir le marquage « CE ».

La directive machine européenne spécifie que chaque constructeur de machines ou fournisseur d'équipement doit réaliser une analyse et évaluation des risques.

La sécurité exige une protection contre de multiples dangers, qui peuvent être maîtrisés comme suit :

- conception selon des principes visant à réduire le risque et évaluation du risque de la machine (EN ISO 12100-1, EN ISO 14121-1),
- mesures de protection techniques (sécurité fonctionnelle selon EN 62061 ou EN ISO 13849-1),
- sécurité électrique (EN 60204-1).

La suite traitera de la sécurité fonctionnelle. Il s'agit de la partie de la sécurité de la machine ou de l'installation qui dépend du fonctionnement correct des dispositifs de commande ou de protection.

Deux normes traitent de ce sujet : EN 62061-1 :2005 et EN ISO 13849-1 :2007

- EN 62061-1 :2005 : Norme sectorielle de la norme de base IEC 61508. « Sécurité des machines – Sécurité fonctionnelle des systèmes de commande électriques, électroniques et électroniques programmables relatifs à la sécurité ».
- EN ISO 13849-1 :2007 : Norme révisée remplaçant la norme EN 954-1, cette dernière s'avérant insuffisante en ce qui concerne les catégories. « Sécurité des machines – Parties des systèmes de commande relatives à la sécurité – Partie 1 : Principes généraux de conception »

Fonctions de sécurité intégrées aux variateurs de vitesse

La plupart des variateurs intègrent de nos jours différentes fonctions de sécurité. Ces fonctions de sécurité intégrées permettent de réaliser de manière pratique une protection très efficace des personnes et des machines. Parmi ces fonctions, nous pouvons citer les suivantes (terminologie conforme à CEI 61800-5-2) :

- Safe Torque Off (STO),
- Safe Brake Control (SBC),
- Safe Stop 1 (SS1),
- Safe Stop 2 (SS2),
- Safe Operating Stop (SOS),
- Safely-Limited Speed (SLS),
- Safe Speed Monitor (SSM),
- Safe Direction (SDI),
- Safely-Limited Position (SLP),
- Safely-Limited Increment of Position (SLI),
- Safe Limited Acceleration,
- Safe CAM (SCA).

Les fonctions Safety Integrated peuvent être totalement intégrées à l'entraînement. Elles peuvent être activées comme suit :

- via des bornes (bi-canal),
- via des bornes sur des modules de sécurité,
- via un bus de terrain de sécurité.

Réalisées intégralement sous forme électronique, les fonctions Safety Integrated offrent par conséquent des temps de réaction courts comparés aux solutions utilisant des fonctions de surveillance réalisées en externe. Ces fonctions de sécurité intégrées à l'entraînement répondent la plupart du temps aux exigences de

- catégorie 3 selon EN 954-1 ou EN ISO 13849-1,
- Performance Level (PL) d selon EN ISO 13849-1,
- Safety Integrity Level (SIL) 2 selon EN 61508.

Description des fonctions de sécurité intégrées aux variateurs (désignations conformes à CEI 61800-5-2) :

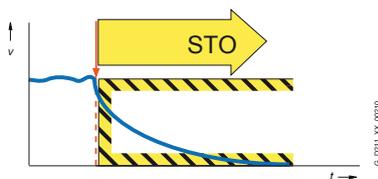


Figure 163 Fonction Safe Torque Off

Safe Torque Off (STO)

Description de la fonction :

cette fonction (Figure 163) est un dispositif permettant d'éviter tout démarrage intempestif selon EN 60204-1, section 5.4.

Avec la fonction Safe Torque Off, les impulsions de l'entraînement sont supprimées et l'alimentation en énergie du moteur coupée (ce qui correspond à la catégorie d'arrêt 0 selon EN 60204-1). L'entraînement ne développe avec certitude aucun couple. Cet état est surveillé en interne dans l'entraînement.

Application, avantages pour le client:

STO a pour effet immédiat d'empêcher l'entraînement de fournir une énergie génératrice d'un couple. STO peut être mis en oeuvre dans toutes les situations dans lesquelles l'entraînement se met par lui-même à l'arrêt dans un temps relativement court du fait du couple résistant ou du frottement, ou dans lesquelles le ralentissement naturel ne représente pas de danger.

11- La sécurité

11-2- Les fonctions intégrées

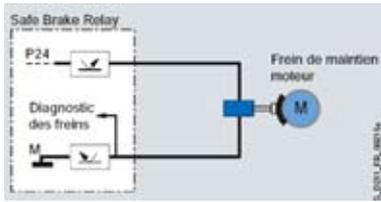


Figure 164 Fonction Safe Brake Control

Safe Brake Control (SBC)

Description de la fonction:

la commande sûre de freinage SBC (Figure 164) sert à commander les freins de maintien à serrage en absence de courant, p. ex. les freins de maintien du moteur. La commande du frein est exécutée en version de sécurité bicanal. La commande sûre de freinage est exécutée à l'activation de la fonction Safe Torque Off et au déclenchement d'une surveillance de sécurité qui entraînent la suppression sûre des impulsions.

Application, avantages pour le client:

en liaison avec STO et SS1, il est également possible d'activer SBC. Après coupure de l'énergie génératrice du couple, SBC offre la possibilité de commander de manière sûre un frein de maintien du moteur, p. ex. pour empêcher l'affaissement de charges suspendues.

Safe Stop 1 (SS1)

Description de la fonction:

la fonction Safe Stop 1 (Figure 165) permet de réaliser un arrêt contrôlé sûr de catégorie d'arrêt 1 selon EN 60204-1. Après activation de la fonction SS1, l'entraînement freine de manière autonome en suivant une rampe d'arrêt rapide (ARRET3) et, après écoulement du temps sûr de décélération réglé, active automatiquement les fonctions Safe Torque Off et Safe Brake Control (si ces dernières sont activées).

Application, avantages pour le client:

si l'activation de la fonction d'arrêt n'entraîne pas un arrêt suffisamment rapide de l'entraînement sous l'effet du couple résistant, l'entraînement peut être freiné activement par le convertisseur. Cette fonction intégrée de freinage rapide permet de supprimer fréquemment les freins mécaniques soumis à l'usure, ou bien ces derniers sont moins fortement sollicités, ce qui réduit les coûts de maintenance et la sollicitation de la machine.

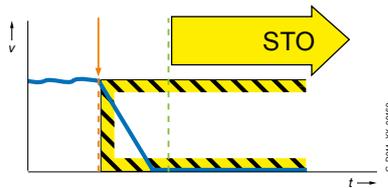


Figure 165 Fonction Safe Stop 1

Safe Stop 2 (SS2)

Description de la fonction:

la fonction Safe Stop 2 (Figure 166) permet de réaliser un arrêt contrôlé sûr de catégorie d'arrêt 2 selon EN 60204-1. Après activation de la fonction SS2, l'entraînement freine de manière autonome en suivant une rampe d'arrêt rapide (ARRET3). Contrairement à SS1, l'entraînement reste opérationnel, c'est-à-dire que le moteur est en mesure de fournir le couple total pour le maintien de la position actuelle. Une surveillance sûre de l'immobilisation est réalisée (fonction Safe Operating Stop).

Application, avantages pour le client:

comme pour SS1, l'activation de la fonction d'arrêt entraîne le freinage autonome de l'entraînement. Cependant, contrairement à SS1, l'entraînement est en mesure de fournir le couple total, même à l'arrêt.

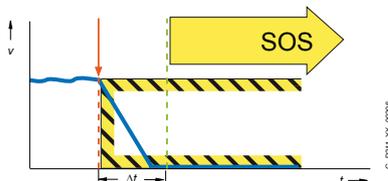


Figure 166 Fonction Safe Stop 2

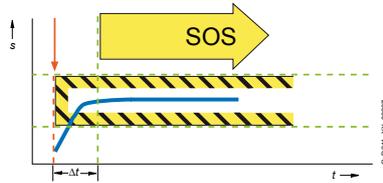


Figure 167 Fonction Safe Operating Stop

Safe Operating Stop (SOS)

Description de la fonction:

la fonction Safe Operating Stop (Figure 167) réalise une surveillance sûre de l'immobilisation. L'entraînement reste opérationnel. Le moteur peut ainsi fournir le couple total pour rester dans la position actuelle. Une surveillance sûre de la position est réalisée. Contrairement aux fonctions de sécurité SS1 et SS2, la consigne de vitesse n'est pas régie en autonomie. Après activation de SOS, la commande de niveau supérieur doit amener l'entraînement à l'arrêt en l'espace d'un temps paramétrable Δt , puis le maintenir dans la position de consigne. Après écoulement du temps Δt , SOS est activé et surveille le maintien de la position d'arrêt actuelle.

Application, avantages pour le client:

SOS convient à toutes les applications dans lesquelles, pour certaines étapes de traitement, la machine ou certaines parties de la machine doivent être immobilisées de manière sûre dans des positions dans lesquelles l'entraînement doit fournir un couple de maintien. La régulation d'entraînement reste opérationnelle et veille à ce que malgré le couple antagoniste, l'entraînement reste dans sa position actuelle. SOS surveille la position d'arrêt actuelle. En cas d'activation de SOS, la consigne de vitesse n'est pas régie en autonomie, contrairement à SS1 et SS2, mais l'entraînement attend que la commande de niveau supérieur réalise en l'espace d'un temps d'attente paramétrable la décélération coordonnée des axes concernés dans le groupe. Ceci permet d'éviter un éventuel endommagement de la machine ou du produit.

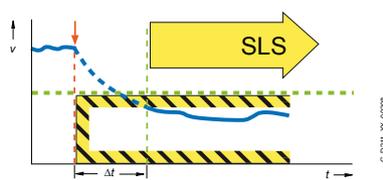


Figure 168 Fonction Safely-Limited Speed

Safely-Limited Speed (SLS)

Description de la fonction:

La fonction Safely-Limited Speed (Figure 168) permet de surveiller la vitesse de l'entraînement par rapport à une valeur maximale paramétrable. Quatre limites différentes peuvent être activées. Comme pour SOS, l'entraînement n'a pas d'influence autonome sur la consigne de vitesse.

Après activation de SLS, la commande de niveau supérieur doit amener l'entraînement sous la vitesse limite sélectionnée en l'espace d'un temps Δt paramétrable.

Application, avantages pour le client:

Lors du réglage de nombreuses machines, il est nécessaire que le personnel opérateur travaille sur la machine en marche, soit que le travail s'effectue étape par étape, car l'opérateur doit quitter la zone dangereuse à chaque démarrage de la machine, soit que l'opérateur travaille sur la machine en marche et est par conséquent exposé à un danger potentiel plus grand. La fonction SLS permet dans ce cas une économie de temps notable tout en assurant la sécurité du personnel opérateur. Pour cela, la vitesse de l'entraînement peut être limitée de manière sûre à une vitesse basse non dangereuse. Le temps d'attente paramétrable jusqu'à l'activation de SLS permet à la commande de l'entraînement de gérer la décélération des axes coordonnés. Ceci permet d'éviter un éventuel endommagement du produit.

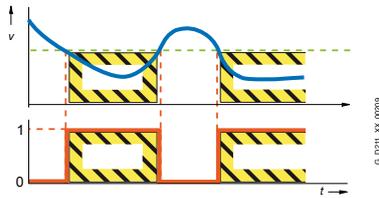


Figure 169 Fonction Safe Speed Monitor

Safe Speed Monitor (SSM)

Description de la fonction:

la fonction Safe Speed Monitor (Figure 169) fournit un signal en retour sûr (actif à l'état haut) lorsque la vitesse de l'entraînement descend en dessous d'une limite paramétrable. Contrairement aux fonctions décrites ci-dessus, il n'y a aucune réaction autonome de l'entraînement en cas de dépassement de la limite.

Application, avantages pour le client:

la signalisation en retour sûre SSM peut être utilisée dans une commande de niveau supérieur pour des réactions de sécurité. Étant donné qu'un dépassement de la limite n'entraîne aucune réaction autonome de l'entraînement, la commande de sécurité de niveau supérieur peut réagir au message de manière flexible, en fonction de la situation. Dans le cas de figure le plus simple, un protecteur peut être déverrouillé avec le signal SSM une fois qu'une vitesse non dangereuse est atteinte.

État de l'art et perspectives

Le contrôle de mouvement est, à présent, une technologie mature et l'offre disponible est capable de satisfaire la quasi-totalité des attentes.

L'évolution prévisible des systèmes d'entraînement portera sur l'amélioration de la précision et des rendements, pour des machines plus performantes et moins consommatrices d'énergie.

Les servomoteurs à aimants, ayant atteint un haut niveau de performance, ne devraient pas évoluer de manière significative.

L'offre en moteur asynchrone devrait augmenter, avec des machines spécifiques présentant un couple-crête plus élevé qu'aujourd'hui et des pertes au rotor en diminution.

En revanche, le déclin du servomoteur à courant continu est inévitable au profit des autres solutions, en particulier les moteurs synchrones et les moteurs asynchrones spécifiquement développés pour les applications de contrôle de mouvement.

Les moteurs piézoélectriques, en plein développement, pourraient se substituer aux moteurs pas-à-pas pour des applications nécessitant des faibles puissances ou des déplacements limités.

L'offre des constructeurs s'étoffe de variateurs incorporés aux moteurs, ce qui permet, pour les machines équipées d'axes multiples, une économie appréciable des coûts d'installation.

Les évolutions les plus significatives pourraient provenir des domaines suivants :

- l'offre variateurs,
- l'offre mécatronique,
- l'offre de services associés.

L'offre variateurs

L'offre pourrait évoluer vers une version d'alimentation dénommée alimentation à pilotage matriciel qui permet, avec des algorithmes de commande appropriés, d'alimenter tout type de moteur alternatif triphasé, mettant ainsi à la disposition du marché un variateur universel.

Cette technologie permet de résoudre la plupart des faiblesses des variateurs actuels et en particulier :

- les harmoniques réseau,
- la réversibilité,
- la nécessité de cellule de filtrage avec des condensateurs électrochimiques vulnérables,
- les problèmes liés à la longueur des câbles.

Ce type de schéma a été étudié dans les années 90, mais n'a pas été développé industriellement pour des raisons technologiques et de prix de revient.

L'apparition récente de modules de puissance spécifiques pour ce type de schéma pourrait permettre, à terme, de rendre cette solution compétitive.

Cette technologie ne permet pas l'alimentation de multiples variateurs par une source commune à courant continu. Cependant, la disparition de la cellule de filtrage pourrait faciliter l'intégration des variateurs dans les moteurs. L'alimentation pourrait se faire, de manière classique, par la distribution d'une tension triphasée et le contrôle du moteur par un bus rapide ou par courant porteur.

L'offre mécatronique

La commande de mouvement est un des domaines privilégiés de la mécatronique qui, pour rappel, est la combinaison synergique et systémique de la mécanique, de l'électronique et de l'informatique temps réel.

Les fournisseurs de produits pour la commande de mouvement possèdent le savoir-faire nécessaire pour la fourniture de :

- la partie opérative à dominante mécanique et électromécanique,
- la partie commande à dominante d'électronique de puissance, de traitement du signal et d'informatique temps réel,
- la partie interface Homme/Machine à dominante ergonomique,
- la connaissance des normes pour la sécurité des machines.

Cette offre mécatronique, déjà disponible pour des produits catalogues, évoluera vers des solutions customisées. Cette approche sur mesure permettrait de réduire les coûts, d'augmenter la fiabilité et la modularité.

L'offre de services

La machine, qu'elle soit autonome ou intégrée dans un processus, est un des éléments-clés de l'économie moderne. Si la mondialisation offre aux constructeurs un marché plus vaste, elle leur impose de nouvelles contraintes. La première est bien entendu celle des coûts.

Ensuite, la nécessaire augmentation des performances a souvent conduit à refondre radicalement la conception en intégrant de nouvelles technologies. De plus, l'exigence de

qualité associée à la réduction des temps d'arrêt et du coût de production a imposé un meilleur suivi du processus et une anticipation des dérives.

Enfin, la personnalisation des produits est devenue une nécessité pour satisfaire les marchés. Il est nécessaire de pouvoir opérer rapidement les changements de séries.

Pour répondre à ces challenges souvent contradictoires, les constructeurs ont dû concentrer leurs investissements sur leur métier de base et ouvrir une nouvelle forme de partenariat avec les fabricants d'automatismes. Ceux-ci s'impliquent plus dans la conception des machines pour proposer des solutions plus globales.

La mise au défi des acteurs du Motion Control est de mettre en pratique:

- l'intégration totale dans la fabrication ,
- les opérations de maintenance des installations ,
- la pérennité des applications malgré le raccourcissement des cycles de vie des produits et composants,
- la collaboration entre les automaticiens et les mécaniciens.

Les offreurs de produits d'automatisme ont, en raison d'une vision partagée avec de nombreux utilisateurs, la capacité de guider les industriels vers la solution présentant les meilleurs rapports performance, qualité, prix et la réponse à ces enjeux est de proposer aux clients constructeurs de machines une approche solution s'appuyant sur :

- une offre multiplateforme de programmation, des architectures d'automatismes et des bus de communication reconnus connectant des actionneurs propriétaires ou non, et le tout mis en oeuvre par un logiciel unique,
- une facilité d'usage; tous les composants doivent répondre à une orientation majeure basée sur la facilité :
 - à choisir,
 - à intégrer,
 - à mettre en oeuvre,
 - à programmer,
 - à paramétrer...,
- une expertise : les clients attendent une relation de confiance avec une prise de risque partagée dans un esprit de conception collaborative.

Accouplement *Coupling* (Mécanique)

Pièce mécanique de liaison entre deux arbres en rotation permettant la transmission du couple tout en permettant un certain désalignement.

Accrochage d'encoche *Cogging* (Moteur)

Voir couple d'encoche.

Amortissement/ Amortissement critique *Damping/Critically damping* (Variateur)

Caractérise l'état d'un signal de sortie lorsque l'on ajuste les régulateurs du servovariateur. La réponse à un échelon de vitesse ou de position est atteinte en un minimum de temps possible et sans dépassement.

API PLC (PC industriel)

L'Automate Programmable Industriel, API (en anglais Programmable Logic Controller, PLC) est un dispositif similaire à un ordinateur simplifié, utilisé pour automatiser des processus comme la commande des machines sur une chaîne de montage dans une usine.

L'API utilise un microprocesseur et des modules suivant les besoins tels que :

- des cartes d'entrée/ sorties TOR ou analogiques,
- des cartes d'entrées pour brancher des capteurs, boutons/poussoirs...
- des cartes de sorties pour brancher des moteurs, voyants, vannes...
- des modules de communication pour dialoguer avec d'autres automates, des entrées/sorties déportées, des supervisions ou autres interfaces homme - machine (IHM)...
- des modules dédiés, comme comptage rapide, positionnement, pesage, sécurité...

La programmation se fait avec des langages spéciaux conçus pour les automaticiens (décrits dans la norme CEI 61131-3).

Arbre électrique *Electronic Gearing* (mouvement de base du variateur)

Désignation d'une configuration d'axes maître(s)/ esclave(s) qui reproduit «électroniquement» un réducteur mécanique.

Axe *Axis* (Mouvement de base d'un variateur)

Nom que l'on utilise couramment pour un système mécanique actionné par un moteur électrique.

Axe indépendant *Independent axis* (Mouvement de base d'un variateur)

Désignation d'un axe qui n'est lié à aucun autre.

Axes maître esclaves *Master slave axis* (Mouvement de base d'un variateur)

Désignation d'axes dont l'un sert de pilote à un ou plusieurs axes dénommés esclaves. Le maître peut être un axe virtuel ou un axe réel. La fonction d'axe-maître peut être permanente ou temporaire.

Axe virtuel *Virtual Master* (Mouvement de base d'un variateur)

Axe dont la vitesse et la position sont générées par un algorithme interne au Contrôleur d'Axe. La vitesse et la position de cet axe servent de référence à d'autres axes.

Axes coordonnés *Coordinated axes* (Mouvement de base d'un variateur)

Terme utilisé pour décrire un système, un API ou une carte d'axe pouvant gérer plusieurs axes. Ces axes peuvent fonctionner de manière dépendante ou indépendante.

Bande morte *Dead band* (Variateur)

Plage dans laquelle un changement de consigne (position, vitesse) est sans effet sur la grandeur que l'on veut faire varier.

Bande passante *Bandwidth* (Variateur)

Plage de fréquence de réponse d'un système. Plus la bande passante est large, plus la réponse du système est rapide.

Boucle de courant *Current Loop* (Variateur)

Boucle fermée qui régule le courant dans les phases du moteur.

Boucle de position *Position loop* (Variateur)

Boucle fermée qui contrôle la position du moteur.

Boucle de vitesse *Velocity loop* (Variateur)

Boucle fermée qui régule la vitesse du moteur.

Boucle ouverte/fermée *Open/closed loop* (Variateur)

La commande en boucle ouverte caractérise un système qui se dispense de régulation.

C'est typiquement le mode de fonctionnement des moteurs pas-à-pas où, pour faire tourner d'un angle donné, il suffit d'envoyer un certain nombre d'impulsions électriques au moteur.

Il n'y a donc ni capteur de vitesse ni de position utilisé par le variateur. En général un capteur de courant est prévu pour assurer la limitation du courant. Dans une commande en boucle fermée, le contrôleur reçoit en entrée un signal de mesure (du processus ou de l'organe à contrôler) et compare cette valeur à une valeur de consigne. Il active alors sa sortie pour faire en sorte que la valeur mesurée soit ramenée à la valeur de consigne. Par exemple, pour réguler la vitesse d'un moteur à courant continu, le contrôleur reçoit en entrée la valeur effective de la vitesse du moteur et la compare à la consigne de vitesse. S'il existe un écart, il va, selon le cas augmenter ou diminuer la tension aux bornes du moteur afin d'annuler cet écart.

Les commandes en boucle ouverte sont plus rapides et moins onéreuses que les commandes en boucle fermée, mais, exception faite des moteurs pas-à-pas, elles sont beaucoup moins précises.

Bruit électrique *Noise* (Variateur)

Signal électrique indésirable. Ces signaux, des impulsions électromagnétiques ou des impulsions-radio, parasitent les consignes d'entrée, les composants du variateur et les signaux du retour codeur. Il peut provoquer un mouvement inattendu et non contrôlé du moteur. Ces signaux peuvent provenir de sources diverses (décharges électriques, interruption de courant, découpage à haute fréquence de tension continue, etc..) et être propagées soit par rayonnement soit par la tension d'alimentation.

Bus de tension continue *DC bus* (Variateur)

Tension continue obtenue par le redressement de la tension alternative du secteur (éventuellement abaissée par un transformateur). Cette tension peut alimenter un ou plusieurs variateurs.

Bus de terrain *Field bus* (Communication)

Terme employé dans l'industrie (en environnement difficile, perturbé) pour qualifier des systèmes d'interconnexion d'appareils de mesure, de traitement, de capteurs, d'actionneurs... en temps réel.

Bus de terrain «Motion» *Motion fieldbus* (Communication)

Il s'agit de réseaux locaux de transfert d'informations (physiquement, câbles électriques ou fibres optiques) entre servo-variateurs et contrôleur (carte d'axe, API). Ces réseaux véhiculent en particulier des informations de mouvement, de position ou de couple avec des débits de transmission très rapides (temps de cycle de l'ordre de la milliseconde). Cela permet de faire des interpolations linéaires et circulaires.

Came électrique / électronique *Electronic Cam profile*
(Fonctions de base du variateur)

Désignation d'axes maître-esclave(s) qui réalisent, «électroniquement», une fonction linéaire pour remplacer une came mécanique.

Classe d'isolation *Insulation class* (Moteur)

La classe d'isolement définit les limites maximales en température des composants isolants dans un moteur. Il existe 4 classes A, B, F, H selon le standard NEMA (USA).

CN CNC (Commande numérique)

Acronyme de Commande Numérique. Dans le domaine de la fabrication mécanique, la commande numérique désigne l'ensemble des matériels et logiciels ayant pour fonction de donner les instructions de mouvement à tous les organes d'une machine-outil.

Codeur absolu *absolute sensor* (Codeur)

Caractérise un codeur qui conserve la position du moteur par rapport à un point d'origine (cf. multitours).

Codeur à effet Hall *Hall sensors* (Codeur)

Codeur utilisé, en particulier, dans un moteur DC brushless pour informer le variateur de la position du rotor pour générer la commande. Le codeur se compose d'une roue magnétique et de capteurs à effet Hall pour générer des signaux de commutation.

Codeur Maître *Master encoder* (Mécanique)

Codeur lié à un élément mécanique de la machine et dont les informations servent à piloter des axes de cette machine. Exemple codeur entraîné par un tapis de convoyeur. Peut également désigner un axe virtuel.

Codeur optique *Optical encoder* (Codeur)

Désigne un capteur angulaire qui transforme un signal optique en signal électrique pour mesurer la position d'un arbre en rotation ou d'un axe en translation.

Commande analogique *Analog mode* (Variateur)

Mode de commande d'un variateur. Une consigne analogi-

que, en général +/-10V, un courant 4 , 20 mA, est fournie à une entrée analogique du variateur et fait varier soit la vitesse du moteur, soit le couple du moteur, soit les deux.

Commande digitale *Digital mode* (Variateur)

Mode de commande d'un variateur. La consigne digitale peut provenir d'entrées / sorties TOR ou d'un bus de terrain et fournit des informations de position, vitesse et de courant.

Commande en courant *Current /Torque mode* (Variateur)

La consigne d'entrée du variateur correspond à une valeur de courant. La consigne peut provenir d'une tension +/-10V, un courant 4 , 20 mA, ou d'une valeur digitale via un bus de terrain. Elle est en général associée à une commande en vitesse pour éviter que le moteur ne s'emballe. Elle s'appelle aussi commande en couple.

Commande en Horloge et Direction *Pulse and direction* (Variateur)

Commande usuelle des moteurs pas-à-pas. Un front d'horloge fait avancer le moteur d'un pas et une entrée TOR donne la direction dans laquelle le moteur tourne. Cette commande s'utilise aussi avec les servovariateurs. L'impulsion d'horloge fait avancer le moteur d'un «point» = incrément codeur x un rapport électronique défini dans le variateur. Elle permet en particulier de faire la fonction «arbre électrique».

Commande en position *Position mode* (Variateur)

La consigne d'entrée du variateur correspond à une valeur de position. La consigne peut provenir de signaux sur des entrées TOR du variateur ou d'une valeur digitale via un bus de terrain.

Commande en vitesse *Velocity mode* (Variateur)

La consigne d'entrée du variateur correspond à une valeur de vitesse. La consigne peut provenir d'une tension +/-10V, un courant 4 à 20 mA ou d'une valeur digitale via un bus de terrain.

Commande prédictive en accélération *Acceleration feed-forward* (Variateur)

Artifice permettant d'améliorer la rapidité d'un système. Pour ce faire, un signal est injecté à l'entrée de la boucle de courant pour compenser les retards inhérents lors de varia-

tions de vitesse très rapides.

Commande prédictive en vitesse *Speed feedforward* (Variateur)

Artifice permettant d'améliorer la rapidité d'un système. On injecte un signal additionnel dans la boucle de vitesse pour compenser les retards inhérents lors de variations de vitesse très rapides.

Communication-série *Serial communication* (Communication)

La communication-série est l'action d'envoyer des données bit par bit, séquentiellement, sur un canal de communication ou un bus de communication. L'interface-série est une interface asynchrone, ce qui signifie que le signal de cette interface n'est pas synchronisé avec celui d'un bus quelconque.

Commutation *Commutation* (Variateur)

Méthode pour orienter convenablement les courants dans les phases pour produire un couple optimal. Pour des servomoteurs à aimants permanents sans balai, les transistors du pont de puissance sont commutés «électroniquement» en fonction de la position du rotor obtenue par un codeur.

Compte-tour *Zero pulse* (Codeur)

Le compte-tour correspond à un point physique sur le capteur. Lorsque le système optique du codeur incrémental le détecte, une impulsion électrique est générée : elle est utilisée pour «compter les tours» par un contrôleur (API, variateur...) et/ou pour une prise d'origine d'un axe.

Contour *Contouring* (Fonctions de base du variateur)

Fonction d'interpolation de plusieurs axes permettant de suivre le contour d'un objet.

Contrôle vectoriel (de flux) *Flux vector Control* (Variateur)

Le contrôle vectoriel de flux est utilisé pour l'alimentation des moteurs à courant alternatif. Cette méthode fait appel

à la transformation de Park (voir Park). Elle peut se faire sans capteur ou avec un capteur pour obtenir de meilleures performances.

Contrôleur d'axes *Motion controller* (PC industriel)

Dispositif programmable dont la fonction principale est de contrôler de manière précise le mouvement d'un ou plusieurs axes coordonnés ou synchronisés. Ce contrôleur est souvent intégré à un automate.

Convertisseur *Converter* (Variateur)

Dispositif à semi-conducteurs permettant de transformer une tension alternative en tension continue (fonction redresseur) ou une tension continue en tension variable, continue (fonction hacheur) ou alternative (fonction onduleur).

Coupe à la longueur *Cut to Length* (Fonctions de base du contrôleur)

Fonction de mouvement de position. Un axe fournit une matière de longueur prédéfinie et un autre effectue une opération ; la notion de rapidité ou de vitesse étant des paramètres secondaires. Le retour codeur du moteur et/ou un retour codeur externe assureront la répétabilité de la procédure. Associée à la fonction couteau rotatif en axes synchronisés.

Coupe/Marque/Impression à la volée *Flying cut/saw/shear* (Fonctions de base du contrôleur)

Synchronisation de 2 axes permettant d'assurer une opération (coupe, marque, impression...) sur un produit sans arrêter l'avance du produit.

Couple constant (zone de) *Constant torque range* (Moteur)

Plage de vitesse où le moteur peut fournir un couple constant sous réserve de ne pas dépasser certaines limites (vitesse, température ...)

Couple-crête/maximum *Peak Torque* (Moteur)

Couple maximum que peut fournir le moteur pendant un temps limité. On utilise souvent le couple-crête pour des phases d'accélération et de décélération ou des surcharges de courte durée (<1sec.).

Couple d'accélération *Pull up Torque* (Moteur)

Couple nécessaire pour accélérer une charge.

Couple de démarrage *Breakaway torque* (Moteur)

Couple nécessaire pour mettre le moteur en mouvement pour vaincre les frottements et le couple demandé par la charge.

Couple de détente (ou couple résiduel) *Detent Torque* (Moteur)

Couple résistant à l'arrêt d'un moteur électrique non alimenté.

Couple de maintien *Stall torque* (Moteur)

Couple que peut fournir en permanence un moteur alimenté et à l'arrêt. Appelé aussi couple à rotor bloqué.

Couple d'engrenages *Cogging torque* (Moteur)

Dans les moteurs à aimants permanents, perturbation de couple provoquée par le passage des aimants du rotor devant les pièces polaires (engrenages) du stator. Il est lié à la construction du moteur.

Couple nominal *Rated torque* (Moteur)

Correspond à la valeur de couple que le moteur peut fournir à vitesse nominale et à courant nominal.

Couple thermique équivalent *Equivalent thermal torque* (Moteur)

Couple équivalent calculé sur un cycle de fonctionnement avec la formule suivante

$$C_{eq} = \sqrt{\frac{\sum C_i^2 \times t_i}{T_{cycle}}}$$

avec :

- C_i les couples mis en jeu pendant chaque phase de fonctionnement,
- t_i la durée de chaque phase,
- T_{cycle} le temps de cycle total.

Ce calcul permet de vérifier que le fonctionnement est compris dans les limites du moteur.

Courant-crête *Peak current (Demag current)* (Moteur)

Courant maximum que l'on peut fournir au moteur sans démagnétisation des aimants permanents.

Courant de maintien *Stall current* (Moteur)

Courant maximum que l'on peut fournir au moteur à l'arrêt sans dommage thermique.

Courant de Foucault *Eddy Current* (Moteur)

Courants induits dans un matériau magnétique soumis à un champ variable. Ces courants produisent des pertes et un échauffement du matériau. Pour les machines à aimants, la rotation du rotor induit des courants de Foucault ce qui se traduit par un couple nominal inférieur au couple rotor bloqué.

Courant nominal *Rated current* (Moteur)

Courant maximum que l'on peut fournir à la vitesse nominale du moteur sans dommage thermique.

Couteau rotatif *Cross-Cutter/Rotating knife* (Fonctions de base du contrôleur)

Synchronisation d'un axe linéaire (maître) et d'un axe rotatif (esclave) permettant une opération (coupe, impression...) sur un produit sans en arrêter son défilement.

Démagnétisation *demagnetization* (Moteur)

Voir courant crête.

Dépassement *Overshoot* (Variateur)

Se dit lorsque la réponse à un signal d'entrée dépasse la valeur attendue en sortie. En particulier lors de l'optimisation des boucles de courant et de vitesse, on cherche à limiter le dépassement en configurant les régulateurs PI.

Dérive *Drift* (Variateur)

Phénomène parasite où la grandeur régulée varie sans que la consigne ait été modifiée. Ce phénomène n'existe pas avec les régulations numériques.

Diagramme de Bode *Bode Plot/ Bode Diagramm* (Variateur)

Diagramme logarithmique qui visualise le comportement d'un système (rapport Sortie/Entrée en valeur réduite) en fonction de la fréquence. L'axe des ordonnées est gradué en décibels et l'axe des abscisses est gradué en hertz.

Embrayage électrique *Electronic Clutch* (Fonctions de base du variateur)

Profil esclave basé sur une position ou un temps cyclique maître qui active/désactive un arbre électrique ou un profil de came.

Emulation (du) codeur *Encoder emulation* (Fonctions de base du variateur)

Conversion d'une information analogique vitesse/position issue du codeur attaché au servomoteur (resolveur, SinCos,) en un signal digital (incrémental, SSI).

EnDat *EnDat* (Codeur)

EnDat, ou Encoder Data, est le nom d'un protocole numérique développé par Heidenhain pour les capteurs de déplacement angulaire (codeurs) ou linéaire (règles de mesure). EnDat utilise un câble de 6 à 12 conducteurs faisant jusqu'à 150 m de long, et une fréquence d'horloge de 100 kHz à 4 MHz.

Comme SSI, le standard EnDat permet de transmettre à un contrôleur (un automate, un variateur de vitesse, etc.), sur demande de celui-ci, les données de position absolue. De plus, le contrôleur peut fixer le point de référence «zéro»

du codeur, ce qui facilite le démarrage ou le redémarrage d'un équipement.

Les capteurs EnDat peuvent transmettre davantage d'informations que les capteurs SSI : ils comportent en effet une mémoire interne dans laquelle sont enregistrées des informations de diagnostic et d'identification du moteur (voire de l'équipement auquel il est associé) et d'alarmes.

Le contrôleur peut accéder en mode lecture et écriture à cette mémoire.

Les informations numériques sont synchronisées avec les signaux d'horloge envoyés au codeur par le contrôleur (EnDat est donc un protocole synchrone). EnDat présente diverses variantes. Une des versions délivre des signaux analogiques classiques sin/cos que l'électronique du contrôleur interpole pour en déduire les données de position incrémentales.

Enrouleur/Dérouleur *Winding/Unwinding* (Fonctions de base du contrôleur)

Contrôle d'un enrouleur ou dérouleur afin d'assurer une vitesse linéaire constante ou une traction constante.

Entraînement direct *Direct drive* (Mécanique)

Entraînement ainsi appelé lorsque la charge à mouvoir est directement couplée au moteur.

Entrée capture, mesure *Touch Probe, Capture* (Variateur)

Entrée rapide (quelques μ s) permettant la capture précise d'une position à la volée.

Erreur de position *Position error/deviation* (Variateur)

Ecart entre la position réelle mesurée et la position de consigne dans la boucle de position.

Erreur de poursuite *Following error/deviation ; Tracking error/deviation* (Variateur)

Erreur de position qui varie en fonction de la vitesse du moteur. L'erreur de poursuite peut être réglée par le gain proportionnel de la boucle de position.

Fenêtre En position *In Position window* (Variateur)

Définit une plage de positions pour laquelle le variateur considère que le moteur est arrivé à destination.

FEM (Force Electromotrice) FCEM (force contre électromotrice) EMF (Electromotive Force) Back EMF (Moteur)

Tension générée par la rotation d'un moteur. Elle est proportionnelle à la vitesse du moteur et est présente indépendamment de l'alimentation des bobines du moteur.

Filtre *Filter* (Variateur)

Un filtre est un opérateur qui agit sur certains signaux et en laisse passer d'autres.

On peut classer les filtres à partir de la forme de leur fonction de transfert. Les filtres les plus courants sont de l'un des quatre types suivants :

- passe-haut qui ne laisse passer que les fréquences au-dessus d'une fréquence déterminée, appelée fréquence de coupure. Il atténue les autres (basses fréquences),
- passe-bas qui ne laisse passer que les fréquences au-dessous de sa fréquence de coupure. Très utilisé pour supprimer des résonances en haute fréquence,
- passe-bande qui ne laisse passer qu'une certaine bande de fréquences (et atténue tout ce qui est au-dessus ou en dessous),
- coupe-bande, aussi appelé filtre trappe, cloche ou réjecteur qui est le complémentaire du passe-bande. Pour une fréquence ou une plage de fréquences donnée, ce filtre inhibe le signal de sortie. Souvent utilisé pour supprimer les phénomènes de résonance dans une plage de fréquence donnée.

Fins de course *Limit switches* (Mécanique)

Capteurs ou limites logicielles qui définissent une plage de position dans laquelle le moteur fonctionne. Les capteurs présents sur la machine sont reliés au variateur via 2 entrées TOR. Les limites logicielles peuvent correspondre soit à 2 positions d'un codeur absolu soit à 2 valeurs d'un compteur interne au variateur. Si le moteur dépasse cette plage, le variateur émet un signal d'alarme ou d'erreur.

Flux *Flux* (Moteur)

Valeur exprimée en webers qui caractérise l'aimantation dans un moteur. Les servomoteurs actuels sont équipés d'aimants en terres rares (Néodyme fer bore) qui permettent d'obtenir des inductions élevées dans un volume restreint.

Frein de parking *Holding brake* (Moteur)

Frein monté sur l'arbre du moteur qui permet de garder une position lorsque le moteur est à l'arrêt. Souvent indispensable pour les axes verticaux. En général, on utilise des freins à manque de courant : le frein est désactivé lorsqu'on lui applique la tension d'alimentation.

Freinage *Braking*, (Moteur)

Opération constituant à ralentir un moteur. L'énergie cinétique résiduelle est soit dissipée dans le moteur (moteur pas-à-pas, DC brushless), soit restituée au variateur (servomoteur alternatif ou à courant continu) pour être ensuite, éventuellement, dissipée dans une résistance.

Freinage par récupération *Regenerative braking* (Moteur)

Lors du freinage du moteur, l'énergie cinétique résiduelle est restituée au réseau d'alimentation par un redresseur réversible. Ce terme est souvent employé, à tort, pour un freinage tel que défini ci-dessus.

Groupage/Dégroupage *Grouping* (Fonctions de base du contrôleur)

Synchronisation de plusieurs axes pour trier ou organiser des produits suivant un profil prédéfini.

Hiperface ^(TM) *Hiperface* ^(TM) (Codeur)

Hiperface est un standard de communication développé à l'origine par Stegmann pour transmettre sous forme numérique les informations de position d'un codeur angulaire. Hiperface utilise un câble de 8 fils (2 pour les données, 2 pour l'alimentation et 4 pour les signaux analogiques sin/cos classiques). Hiperface a deux canaux : l'un véhicule le signal sin/cos, tandis que l'autre est une classique liaison numérique RS485. À la mise sous tension, la position absolue est transmise sous forme numérique via la liaison RS-485 ; les informations de position sont ensuite transmises sous forme incrémentale. Les informations numériques de Hiperface sont transmises en mode asynchrone.

Les codeurs Hiperface peuvent comporter une mémoire interne dans laquelle sont contenues des informations relatives au type de capteur, des informations de diagnostic et d'alarme, des informations sur le moteur (courant, vitesse, inductance, résistance ...). Le contrôleur peut accéder en mode lecture et écriture à cette mémoire et se servir de ces informations enregistrées pour réaliser l'auto réglage.

I²t / *I²t* (Moteur)

Désigne l'image thermique (théorique) du moteur. Cette image peut être générée par le variateur et une valeur de seuil être définie afin pour protéger le moteur.

Incrémental *Incremental* (Codeur)

Le codeur incrémental est surtout utilisé dans les systèmes dont le traitement de l'information est entièrement numérique. Ses impulsions sont comptabilisées de façon à donner une information concernant la position (nombre d'impulsions délivrées depuis la position précédente) ou / et une information concernant la vitesse (fréquence des impulsions). Un codeur incrémental possède généralement plusieurs voies:

- voie Z donnant une impulsion par tour (compte-tour),
- voie A donnant un certain nombre d'impulsions par tour,
- voie B identique à voie A, mais dont les signaux sont déphasés de + ou - 90°, suivant le sens de rotation.

Les voies A et B peuvent être des signaux carrés déphasés de 90° ou des signaux sinusoïdaux Sin/Cos.

Lors d'un démarrage de moteur, le codeur doit se caler sur un point physique (voie Z) pour connaître sa position.

Inclinaison d'encoche *Skew* (Moteur)

Mode de fabrication du stator d'un moteur où les enco-

ches sont disposées suivant une hélice afin de réduire l'accrochage d'encoche (voir couple d'encoche).

Inertie *Inertia* (Mécanique)

Propriété d'un solide stipulant qu'un corps ne peut pas changer la nature de son mouvement sans l'intervention d'une force extérieure. L'inertie est fonction de la masse et de la géométrie d'un solide. Plus l'inertie de la charge est grande, plus les forces nécessaires pour l'accélération et la décélération seront importantes pour un temps de mise en vitesse identique.

Instabilité *Instability* (Variateur)

Est dit instable tout organe qui, écarté de sa position d'équilibre, n'y revient pas spontanément. S'il y revient avec des oscillations faiblement amorties, il n'est pas instable au sens strict, mais il est inutilisable en contrôle de mouvement. Par exemple, pour une consigne de vitesse constante fournie au variateur, le moteur se met à tourner en vibrant anormalement. Pour un moteur à l'arrêt, il oscille autour de la position ou encore, lors d'un changement, la vitesse finale est obtenue avec un dépassement et des oscillations. Ces oscillations peuvent être faiblement amorties, entretenues, ou dans le cas extrême divergentes.

Interface Homme-machine (IHM) *MMI, HMI* (Communication)

Dispositifs électromécaniques (boutons poussoirs) ou électroniques (clavier, écran tactile) permettant à un opérateur d'intervenir dans le process. Dispositifs de signalisation (lampes, alarme sonore ou écrans) donnant des informations à un opérateur.

Interpolation circulaire *Circular interpolation* (Fonctions de base du variateur)

Création d'un mouvement circulaire grâce à deux axes synchronisés. La trajectoire du cercle peut être une série d'interpolations linéaires générées par un programme, issu de la carte d'axe ou de l'API.

Interpolation linéaire *Linear interpolation* (Fonctions de base du variateur)

L'interpolation linéaire est une opération mathématique par laquelle un API ou une carte d'axe calcule un ensemble de points en considérant que deux points successifs sont reliés par une droite. Cette opération se faisant sur 2 dimensions au minimum (X, Y), l'interpolation nécessite deux axes synchronisés.

Jerk *Jerk* (Loi de commande)

Dérivée de l'accélération exprimée en $[m/s^3]$.

Le contrôle du jerk permet un positionnement le plus fidèle possible à la consigne (écart de traînage réduit) et réduit les « à-coups » sur la charge.

K(E) *K(E)* (Moteur)

Constante de force contre-électromotrice. Elle représente la relation linéaire entre la force contre-électromotrice et la vitesse angulaire du moteur. En général exprimée en $mV/(tr/min)$.

K(T) *K(T)* (Moteur)

Constante de couple électromagnétique. Elle donne la relation linéaire entre le couple du moteur et le courant d'alimentation. En général exprimée en mN/A .

Limitation *Limitation* (Variateur)

Dispositifs intégrés aux variateurs destinés à limiter des grandeurs comme le couple (par l'intermédiaire du courant), la vitesse, l'accélération / décélération (rampes).

Linéarité *Linearity* (Variateur)

Caractérise la relation de la grandeur régulée à la consigne. Un rapport constant indique une parfaite linéarité.

Maître / Esclave *Master / Slave* (Mouvements de base du variateur)

Opération de lier la position et/ou la vitesse d'un axe (l'esclave) à la vitesse ou la position d'un autre axe (le maître).

Mise en phase *Phasing* (Fonctions de base du variateur)

Mouvement qui crée un décalage de position constant entre l'axe maître et l'axe esclave, les deux axes tournant à la même vitesse. Donne ainsi une avance ou un retard sur l'axe maître.

MLI PWM (Variateur)

Acronyme de Modulation de Largeur d'Impulsion.

La commande MLI consiste à découper une tension continue avec un rapport cyclique variable. La commande MLI est utilisée pour contrôler la tension d'alimentation du moteur

Mode Jog *Jog* (Fonctions de base du variateur)

Mode de fonctionnement d'un variateur dans lequel un moteur tourne à vitesse constante prédéterminée. Les valeurs de vitesse, d'accélération et de décélération, les commandes de démarrage et d'arrêt sont données par l'utilisateur via le logiciel de mise en service ou la console du variateur.

Mode Modulo (rotatif) *Modulo Mode* (Fonctions de base du variateur)

Caractérise un mouvement rotatif dans lequel la position incrémentale 360° devient la position 0°.

Moteur asynchrone *Asynchronous motor , Squirrel cage motor* (Moteur)

Moteur à courant alternatif, constitué d'un stator et d'un rotor comportant des enroulements en court-circuit et dont la vitesse de rotation de l'arbre est légèrement différente de la vitesse de rotation du champ tournant (glissement).

Moteur pas-à-pas *Stepping Motor* (Moteur)

Moteur qui, lorsqu'on lui envoie une impulsion électrique, se déplace d'un angle mécanique élémentaire appelé pas.

Les moteurs pas-à-pas sont de 3 types: à aimants permanents, à réluctance variable ou hybride (combinaison des deux précédents).

Moteur synchrone *Synchronous motor* (Moteur)

Moteur à courant alternatif dont la vitesse de rotation de l'arbre est égale à la vitesse de rotation du champ tournant.

Mouvement absolu *Absolute move* (Fonctions de base du variateur)

Type de déplacement où tous les positionnements sont référencés à partir d'une position d'origine fixe.

Mouvement Point à Point *Point to Point* (Fonctions de base du variateur)

Déplacement d'une position à une autre en un temps donné, sans tenir compte du profil de vitesse. Dans le cas de plusieurs axes en mouvement point à point, chaque axe fait sa manœuvre individuellement.

Mouvement relatif *Relative move* (Fonctions de base du variateur)

Type de déplacement prenant pour référence la position actuelle.

Mouvement synchronisé *Synchronised motion* (Fonctions de base du variateur)

Mouvement dans lequel la position et/ou la vitesse de chaque axe est dépendante de celle des autres, de sorte que le chemin et la vitesse sont contrôlés de manière très précise.

Multi-Tour *Multiturn* (Codeur)

Caractérise un codeur qui indique le nombre de tours effectués par le moteur. Ces valeurs sont stockées dans une mémoire EEPROM. Le codeur multi-tours est aussi appelé un codeur absolu.

NEMA NEMA (Moteur)

Acronyme de National Electrical Manufacturer's Association

Organisation américaine qui définit les standards des matériels électriques. Dans le contexte moteur, ces standards définissent, entre autres, les dimensions des flasques moteurs.

Norme CEI 61131-3 IEC 61131-3 standard (PC industriel)

Ensemble des cinq langages normalisés pour la programmation des automates programmables :

- Ladder Diagram (LD),
- liste d'instructions (IL),
- diagramme séquentiel (SFC),
- bloc de Fonctions applicatives (FBD),
- littéral (ST).

Norme EN/ISO 13849-1 (Sécurité)

Norme qui définit des prescriptions de sécurité et des conseils sur les principes de conception des parties des systèmes de commande relatives à la sécurité. Pour ces parties, elle spécifie des catégories et décrit les caractéristiques de leurs fonctions de sécurité. Cela inclut les systèmes programmables pour toutes les machines et pour leurs dispositifs de protection. Elle s'applique à toutes les parties des systèmes de commande relatives à la sécurité, indépendamment du type d'énergie utilisée, par exemple électrique, hydraulique, pneumatique, mécanique. Elle s'applique à tous les usages de machines, professionnels ou non. Elle peut également être appliquée pour des parties des systèmes de commande relatives à la sécurité, utilisées à d'autres fins techniques.

Onduleur Converter (Variateur)

Dispositif à semi-conducteurs qui à, partir d'une tension continue, reconstitue une tension alternative. En variation de vitesse, cette tension est à fréquence variable pour alimenter le moteur.

Oscillation Oscillation (Variateur)

Voir instabilité

Park (transformation) *Park Transformation* (Variateur)

Outil mathématique utilisé en électrotechnique afin de réaliser un changement de repère entre un système triphasé équilibré et un système diphasé de composantes continues dans un repère tournant. Elle permet de passer d'un repère fixe lié au stator d'une machine électrique à un repère tournant lié à son rotor ou au champ magnétique. La transformation de Park prendra pour axes l'axe d lié au rotor dans le sens du flux et l'axe q qui lui est perpendiculaire dans le sens du couple.

PDS (SR) *PDS(SR)* (Sécurité)

PDS = Power Drive Systems (Variateur de Vitesse), **SR = Safety Related** (lié à la sécurité).

SR sont les initiales associées à la norme IEC 61800-5-2 pour désigner un variateur de vitesse pouvant être utilisé dans des applications de sécurité.

Pignon-Crémaillère *Rack and Pinions* (Mécanique)

Transmission mécanique composée d'une roue et d'une règle dentées convertissant un mouvement rotatif en mouvement linéaire. En général, la roue dentée est montée sur un moteur et fait déplacer la règle.

Portique *Gantry* (Machines)

Machine assurant de manière automatique la maintenance de pièces vers plusieurs postes d'opération (usinage par exemple).

Position absolue *Absolute position* (Codeur)

Position référencée par rapport à un point d'origine.

Position Zéro *Zero position* (Codeur)

Position d'origine prise pour mesurer les déplacements.

Positionnement *Positioning* (Fonctions de base du variateur)

Type de mouvement défini par une accélération, une vitesse constante de déplacement et un ralentissement pour atteindre la position cible. Le positionnement peut être absolu ou relatif.

Poulie-Courroie *Belt/pulley* (Mécanique)

Type de transmission mécanique fait à partir de deux poulies reliées par une courroie. Le profil de la roue dépend de la courroie utilisée : elle peut être plate, crantée ou trapézoïdale. L'avantage de cette transmission est avant tout économique.

Précision *Accuracy* (Codeur)

Définit l'écart entre la position attendue (consigne) et la position réelle d'un moteur ou d'un système mécanique.

Prélèvement sinusoïdal *Sinewave DC converter* (Variateur)

Technique de redressement qui permet de prélever à la source alternative un courant proche d'une sinusoïde pour réduire les harmoniques et le courant efficace.

Prise de référence, d'origine *Homing* (Fonctions de base du variateur)

Fonction qui assigne une position zéro à un mouvement. Elle peut être faite grâce à des capteurs intégrés dans la machine ou à l'aide du compte-tour du codeur. Indispensable pour les mouvements absolus.

Profil en S *profile* (Variateur)

Mouvement dont la courbe vitesse en fonction du temps ressemble à un S lors de l'accélération et de la décélération. Lors d'une accélération, le début et la fin de l'accélération sont en pente plus douce, ce qui permet un mouvement sans discontinuité donc moins contraignant pour la mécanique et le produit transporté. Ce type de profil peut s'appliquer au courant.

Profil de came *CAM profile* (Fonction de base du variateur)

Voir came électronique

Profil Trapèze *Trapezoid profile* (Variateur)

Mouvement dont la courbe vitesse en fonction du temps ressemble à un trapèze. La pente d'accélération et la pente de décélération sont linéaires. Ce type de profil peut s'appliquer au courant en fonction du temps.

Profil/Tâche de mouvement *Motion profile/task*
(Variateur)

Modèle qui décrit un mouvement par un temps, une position et une vitesse.

Puissance constante *Constant horsepower range* (Variateur)

Fonctionnement particulier du moteur où la tension appliquée à celui-ci est maintenue constante et le flux dans la machine progressivement diminué pour augmenter la vitesse. Procédé rarement utilisé avec les servomoteurs synchrones, utilisé avec les moteurs asynchrones.

Rampe Ramp (Variateur)

Pente de mise en vitesse correspondant aux phases d'accélération et de décélération d'un moteur (commande en vitesse) ou à un changement de fréquence d'horloge d'entrée (commande en position).

Rapport cyclique Duty cycle (Variateur)

Le rapport cyclique désigne, pour un phénomène périodique, le ratio entre la durée du phénomène et la période. En contrôle de mouvement, ce terme est défini par le temps où le moteur fonctionne et le temps d'un cycle total.

$$R (\%) = (T(\text{marche}) / [T(\text{marche}) + T(\text{arrêt})]) \times 100\%$$

Caractérise également la valeur temps de conduction / temps de blocage dans la commande MLI.

Rapport de réduction Gear ratio (Mécanique)

Rapport entre la vitesse de sortie et la vitesse d'entrée dans un réducteur mécanique. Ce terme s'utilise pour la fonction arbre électrique et définit le rapport de la fréquence du signal d'entrée dans la boucle de position à la fréquence du signal d'entrée dans le variateur.

Rapport d'inertie Inertia ratio (Mécanique)

Rapport entre l'inertie de la charge ramenée au moteur et l'inertie du rotor du moteur. En général, ce ratio est 1:5 ~ 1:10.

Réducteur Gearbox (Mécanique)

Ensemble d'engrenages qui réduit la vitesse de rotation et augmente le couple de sortie.

Récupération d'énergie Regenerative braking (Variateur)

Voir freinage par récupération.

Réducteur électronique Electronic gearing (Fonctions de base du variateur)

Voir arbre électrique.

Réducteur planétaire Planetary Gear (Mécanique)

Réducteur faisant appel à trois engrenages ou ensemble

d'engrenages: deux engrenages coaxiaux dits planétaire intérieur et planétaire extérieur et un train d'engrenage mobile dit satellite. Le satellite, observé par rapport au planétaire intérieur, décrit une trajectoire suivant une épicycloïde. Ces réducteurs peuvent fournir des rapports de réduction importants dans un volume réduit. Leur géométrie est telle que l'arbre d'entrée est coaxial avec l'arbre de sortie, ce qui facilite l'installation.

Registration Registration (Fonctions de base du variateur)

Opération consistant à déclencher l'échantillonnage à la volée d'une position, grâce à un signal détecté sur une entrée rapide. L'apparition de cette position étant aléatoire, il faut attendre qu'elle soit atteinte pour en lire la valeur, et ce, le plus vite possible, idéalement avant qu'elle n'ait le temps de varier sensiblement.

Réglage automatique Auto tuning (Variateur)

Fonction du servovariateur qui permet d'ajuster automatiquement les régulateurs des boucles de courant, de vitesse et de position. Ce réglage automatique prend en compte les paramètres du moteur, l'inertie de la charge et la rigidité du système.

Régulateur proportionnel P controller (Variateur)

La grandeur de sortie du régulateur est directement proportionnelle à l'écart entre la grandeur mesurée et la valeur de consigne. Avec ce type de régulation, la valeur mesurée n'atteint jamais la valeur de la consigne : le rôle du régulateur est de minimiser cet écart. Pour un servovariateur, il correspond à la précision du système.

Régulateur proportionnel intégral PI controller (Variateur)

À l'action proportionnelle vient s'ajouter l'action intégrale. Elle permet d'annuler l'écart entre la mesure et la consigne et donc d'améliorer la précision de la régulation. Elle consiste à réaliser une intégration (au sens mathématique du terme) de l'écart. L'action intégrale est pratiquement toujours associée à une action proportionnelle.

Régulateur proportionnel intégral dérivé PID controller (Variateur)

Il associe l'action proportionnelle, intégrale, et dérivée. Celle-ci consiste à dériver (au sens mathématique du terme) l'écart entre la mesure et la consigne. L'action dérivée permet de raccourcir le temps de réponse de la régulation et de

stabiliser la régulation (lorsque les variations de la grandeur contrôlée sont rapides).

Régulation *Controller* (Variateur)

La régulation a pour objectif de maintenir à un niveau prédéterminé un paramètre de processus (une température, une pression, un niveau, un débit, une position, une vitesse, etc.). Pour ce faire, le régulateur agit sur une valeur réglante (pour par exemple commander une résistance chauffante, une vanne, un robinet, un moteur, etc.).

Il existe aussi plusieurs techniques de régulation : proportionnelle, PI, PID, floue, cascade, mixte (association d'un ajustement en boucle ouverte et d'une régulation en boucle fermée).

Régulation de position *Position regulation* (Variateur)

Fonction réalisée par la boucle de position qui a pour objectif d'amener un mobile à une position donnée et de l'y maintenir avec une erreur la plus faible possible.

Régulation de vitesse *Speed regulation* (Variateur)

Fonction réalisée par la boucle de vitesse qui a pour objectif de maintenir un mobile à une vitesse donnée avec une erreur la plus faible possible.

Régulation de courant *Current regulation* (Variateur)

Fonction réalisée par la boucle de courant qui a pour objectif de maintenir le courant du moteur à une valeur donnée avec une erreur la plus faible possible. Cette fonction est utilisée pour protéger le moteur contre un courant excessif lors des phases transitoires et dans certaines applications pour appliquer un effort précis à une charge, par exemple pour une presse ou pour un enrouleur.

Rendement *Efficiency* (Mécanique / électrique)

Le rendement d'un système est le rapport entre la puissance délivrée et la puissance d'entrée.

Résistance *Resistance* (Moteur)

Grandeur physique exprimant l'aptitude d'un matériau conducteur à s'opposer au passage du courant. Pour un moteur, elle est donnée pour un bobinage et est exprimée en ohms.

Résistance Ballast *Ballast resistor* (Variateur)

cf. résistance de freinage

Résistance de freinage *Regenerative/braking resistor* (Variateur)

Lors d'une décélération suffisamment rapide eu égard au couple résistant, l'énergie cinétique est transformée en énergie électrique. La technologie du pont redresseur du variateur ne permet pas en général de restituer cette énergie à la source d'alimentation alternative. La résistance de freinage permet d'évacuer cette énergie sous forme de chaleur. Cette résistance est aussi appelée résistance régénératrice.

Resolveur *Resolver* (Codeur)

Dispositif inductif utilisé pour déterminer des angles de rotation produisant deux tensions sinusoïdales Sinus et Cosinus dont la combinaison permet de déterminer avec précision (ordre de grandeur 3 minutes d'angle) la position du rotor.

Résolution *Resolution* (Codeur)

Plus petite valeur délivrée par un capteur.

Résonance *Resonance* (Mécanique)

Fréquences propres d'origine mécaniques qui peuvent entraîner des instabilités de la régulation.

Retour (Rétro action) *Feedback* (Variateur)

En boucle fermée, signal de mesure de la grandeur à réguler réinjecté à l'entrée de la boucle d'asservissement.

Rigidité *Stiffness* (Moteur)

Caractérise la résistance au changement d'un système quand il est soumis à une variation de la charge.

RS232C, RS422 *RS232C, RS422* (Communication)

Standards de liaison-série normalisés par l'EIA (Electronic Industries Association) et le CCITT.

RS485 RS485 (Communication)

Bus de communication-série à deux fils, semi-duplex, multipoint. La norme indique une forme différentielle de signalisation. La norme RS485 indique seulement des caractéristiques électriques du conducteur et du récepteur; elle n'indique ou ne recommande aucun protocole.

Sercos *Sercos* (Bus motion)

Acronyme de **S**ERial **R**eal-time **C**OMmunications **S**ystem. Définit un standard d'interface numérique utilisé en particulier pour des applications avec axes synchronisés. Le bus SERCOS est conçu pour assurer des communications-série très rapides sur fibre optique (Sercos II) ou sur fils électriques (Sercos III). Il est reconnu pour sa rapidité et son comportement déterministe.

Serrage *Clamping* (Fonctions de base du variateur)

Fonction de mouvement d'un axe qui se décompose en une phase d'approche en vitesse rapide, une phase de contrôle du couple à vitesse constante (serrage) et une phase de retour en vitesse rapide (desserrage).

Opération de régulation du couple appliqué à un moteur entraînant une pince de saisie afin de protéger l'objet manipulé..

Servomoteur *Servomotor* (Moteur)

Moteur de construction particulière pour pouvoir fonctionner à basse vitesse et délivrer des couples impulsions importants. Les servomoteurs sont dotés de capteur de position pour être associés à des variateurs spécifiques.

Servomoteur sans balai (Brushless) *Brushless servo motor* (Moteur)

Famille de servomoteurs qui fonctionne grâce à la commutation électronique des courants des phases. La commutation dépend de la position du rotor. Ces moteurs ont typiquement un rotor avec aimants permanents et un stator bobiné. Ce type de technologie supprime les problèmes liés à la maintenance des balais.

Simple tour *Single turn* (Codeur)

Codeur qui restitue une position relative sur un tour, mais il est incapable de reconnaître le nombre de tours effectués sans l'aide d'un système externe. Voir aussi multi tours.

Sin/Cos *Sin/Cos* (Codeur)

cf. Incrémental

Sonde PTC *PTC probe* (Moteur)

Acronyme de «Positive Temperature Coefficient». Une sonde PTC est utilisée pour protéger le moteur contre les échauffements. Sa résistance augmente brutalement lorsque sa température dépasse la valeur de déclenchement qu'elle est chargée de surveiller.

SSI *SSI* (Codeur)

Acronyme de «Synchronous Serial Interface».

Interface-série pour transmettre sous forme numérique la position absolue d'un codeur angulaire (capteur de position d'un arbre tournant). SSI assure une transmission unidirectionnelle à 1,5 MHz et utilise un câble à 6 fils, 4 pour les informations et 2 pour l'alimentation. Le débit des données dépend à la fois de la résolution et de la longueur du câble.

Lorsqu'il est interrogé par le contrôleur (un API, un variateur de vitesse, etc.), le codeur envoie le code Gray ou binaire de la position du codeur, en commençant par le bit de poids le plus élevé (MSB). Lorsque tous les bits ont été transmis, il est prêt pour commencer un nouvel envoi à la demande du contrôleur. Les impulsions d'horloge sont fournies par le contrôleur. Le protocole SSI ne possède pas un contrôle évolué de l'intégrité de la transmission des informations. Si une donnée transmise est corrompue lors d'un cycle de transmission, elle le restera jusqu'à ce qu'un nouvel envoi soit effectué. Les capteurs avec interface-série SSI disposent souvent d'une sortie analogique sin/cos que l'électronique du contrôleur interpole pour en déduire les données de position et réaliser un contrôle temps réel.

Stabilité *Stability* (Variateur)

Est dit stable tout organe qui, écarté de sa position d'équilibre, y revient spontanément sans oscillation ou avec des oscillations rapidement amorties.

Suivi de trajectoire *Track following* (Fonctions de base du variateur)

Asservissement des axes d'une machine pour suivre une trajectoire définie.

Système Servo, Système asservi *Servo System* (Variateur)

Le terme servo désigne un ensemble d'appareils qui, de manière cyclique, mesurent des valeurs réelles (position, vitesse), comparent ces valeurs à des valeurs de référence telles les commandes ou consignes, et effectuent les corrections nécessaires pour minimiser l'écart. Un système servo est un système de contrôle en boucle fermée.

Temps de cycle des boucles *Loop update time* (Variateur)

Période à laquelle les valeurs de courant, de vitesse, et de position sont remises à jour. Dans la pratique le temps de cycle (courant) < temps de cycle (vitesse) < temps de cycle (position)

Temps réel *Real time control* (PC industriel)

La notion de temps réel est intimement liée à la grandeur ou au processus auquel elle est associée. Temps réel ne doit pas être confondu avec "rapidité" ou synchronisation. Par exemple, l'automatisme d'une machine de report de composants sur une carte électronique est considéré comme «temps réel» si son temps de cycle est de l'ordre de quelques dizaines de microsecondes, mais le «temps réel» sur une chaîne de production peut être de l'ordre quelques minutes.

Top zéro *Zero pulse* (Codeur)

Voir compte-tour.

Trancanage *Traversing* (Fonctions de base du contrôleur)

Application permettant de disposer de manière régulière un fil sur une bobine (exemple: industrie textile). Le déplacement du guide-fil se caractérise par une inversion rapide aux extrémités de bobine.

Validation *Enable* (Variateur)

Fonction du servovariateur qui autorise le fonctionnement de ce dernier.

Variateur 1 axe et demi (1,5 axe) *Stand alone drive* (Variateur)

Se dit d'un variateur doté de Fonctions applicatives avancées (coupe à la volée, enrouleur/dérouleur) et d'entrées-sorties qui lui permettent d'effectuer des mouvements complexes de manière autonome (sans API ou contrôleur d'axes).

Variateur intelligent *Smart drive* (Variateur)

Caractérise un variateur qui intègre des fonctions complémentaires à la simple régulation de vitesse ou de position comme un indexeur et/ou de profils de mouvement.

Variateur multifonctions *Multi function drive* (Variateur)

Variateur intelligent qui possède une ou plusieurs Fonctions applicatives propres au contrôle de mouvement : coupe à la volée, arbre électrique, came électrique, groupage,... Le variateur 1,5 axe est un variateur multifonction.

Variateur Servo *Servo Amplifier/Servo Drive* (Variateur)

Appareil électrique qui fournit le courant nécessaire au servomoteur . On utilise communément les termes variateur, variateur servo ou servovariateur.

Variateur simple *Dump drive* (Variateur)

Servovariateur composé au minimum d'une boucle de position, d'une boucle de vitesse et d'une boucle de courant.

Vis à bille *Ball screw* (mécanique)

Vis sur laquelle glisse un écrou à recirculation de billes. Les vis à billes offrent une excellente précision, une longue durée de vie, une grande capacité de charge et un bon rendement (90%).

Vis Trapèze ou vis ACME *Leadscrew / ACME* (Mécanique)

Système de vis écrou à profil trapézoïdal. Cette vis est non réversible et permet, habituellement, de se dispenser de frein mécanique.

Vitesse nominale *Base speed* (Moteur)

Vitesse à laquelle le moteur peut développer son couple nominal.

Zone (de fonctionnement) continue *Continuous area*
(Moteur)

Zone délimitée par la vitesse nominale et par le couple nominal du moteur. Dans cette zone, le moteur peut fonctionner en continu.

Zone (de fonctionnement) instantanée *Instantaneous area*
(Moteur)

Zone excluant la zone continue, limitée par la vitesse maximale du moteur et par le couple crête du moteur. Le moteur peut y fonctionner de manière intermittente pour les phases d'accélération et de décélération, sous réserve que le courant thermique équivalent du moteur ne dépasse pas le courant nominal.

