

Aspects mécaniques en robotique

par **Michel FAYOLLE**

*Ingénieur du Conservatoire National des Arts et Métiers
Professeur à l'École Nationale Supérieure des Techniques Avancées (ENSTA)
Chef du Département Produit, Direction de la Robotique
et de l'Assemblage Automatisé - Renault Automation*

1. Constitution d'un robot industriel	B 7 190 - 2
1.1 Structure fonctionnelle.....	— 2
1.2 Structure organique	— 2
1.3 Structures mécaniques	— 2
1.3.1 Nombre d'axes.....	— 2
1.3.2 Nature des axes	— 2
2. Description des organes constitutifs d'un robot industriel	— 6
2.1 Motorisation.....	— 6
2.1.1 Critères de performances.....	— 6
2.1.2 Motorisation hydraulique	— 6
2.1.3 Motorisation électrique.....	— 7
2.1.4 Tendances d'évolution	— 9
2.2 Réducteurs	— 9
2.2.1 Critères de performances.....	— 9
2.2.2 Réducteurs utilisés en robotique.....	— 11
2.3 Organes de transmission.....	— 12
2.3.1 Critères de performances.....	— 12
2.3.2 Vis à roulement.....	— 12
2.3.3 Transmission par pignons.....	— 13
2.3.4 Transmission par bielles	— 13
2.3.5 Transmission par courroies	— 14
2.3.6 Transmission par chaînes	— 14
2.3.7 Paliers	— 14
2.4 Capteurs	— 14
2.4.1 Critères de performances.....	— 15
2.4.2 Capteurs de position utilisés en robotique.....	— 15
3. Performances des robots industriels	— 16
3.1 Volume de travail.....	— 16
3.2 Charge	— 16
3.3 Rapidité.....	— 18
3.4 Facteur de service.....	— 18
3.5 Précision	— 18
3.6 Sensibilité à l'environnement.....	— 18
4. Exploitation des robots industriels.....	— 19
4.1 Sécurité.....	— 19
4.1.1 Sécurité des sites robotisés	— 20
4.1.2 Sécurité des robots industriels.....	— 20
4.2 Maintenabilité	— 21
4.3 Maintenances mécanique et électrique.....	— 21
4.3.1 Maintenance mécanique	— 21
4.3.2 Maintenance électrique.....	— 21
4.4 Fiabilité. Durée de vie.....	— 21
4.5 Disponibilité opérationnelle.....	— 22
Pour en savoir plus.....	Doc. B 7 190

Le lecteur pourra également se reporter aux articles de la rubrique **Robotique** dans le traité *Mesures et Contrôle*.

1. Constitution d'un robot industriel

De nombreuses définitions du robot industriel existent depuis que le Tchèque Karel CAPEK a introduit le vocable russe *robota*. On retiendra celle de la norme AFNOR E 61-005 pour laquelle **un robot industriel est un manipulateur multi-application à commande automatique, reprogrammable, qui présente souvent une capacité d'interaction avec le processus extérieur.**

1.1 Structure fonctionnelle

Un robot industriel est constitué d'une structure mécanique animée par des actionneurs (moteurs électriques, pneumatiques ou hydrauliques, vérins linéaires ou rotatifs, etc.) à partir d'ordres élaborés par un calculateur, qui peut, par ailleurs, piloter des outils (de soudage, d'encollage, d'usinage, etc.) ou gérer son environnement (positionneurs, convoyeurs, magasins d'outils ou de pièces, etc.).

Cette constitution, illustrée par la figure 1, sera détaillée dans les paragraphes suivants, particulièrement pour les aspects mécaniques qui touchent :

- aux servo-actionneurs (§ 2.1) ;
- aux structures (§ 1.3) et aux composants mécaniques (§ 2.2 et 2.3) ;
- aux capteurs (§ 2.4).

1.2 Structure organique

La figure 2 schématise plus précisément la structure interne d'un robot industriel en faisant apparaître :

- les différentes sources d'énergie utilisées par les robots (électrique, hydraulique et exceptionnellement pneumatique) ainsi que les types de servo-actionneurs qui y sont associés ;
- pour chaque fonctionnalité et technologie, les principaux composants utilisés.

Seuls les cas des énergies électrique et hydraulique seront développés par la suite.

1.3 Structures mécaniques

Les figures 1 et 2 sont génériques pour un grand nombre de robots ; elles ne font pas apparaître la diversité des structures mécaniques due à :

- des raisons historiques : la robotique est une technique jeune et, comme telle, a expérimenté toutes sortes de solutions ; néanmoins, on observe déjà un resserrement autour de quelques solutions types ;
- la diversité des applications *robotisables*, qui influe sur le nombre et la nature des axes.

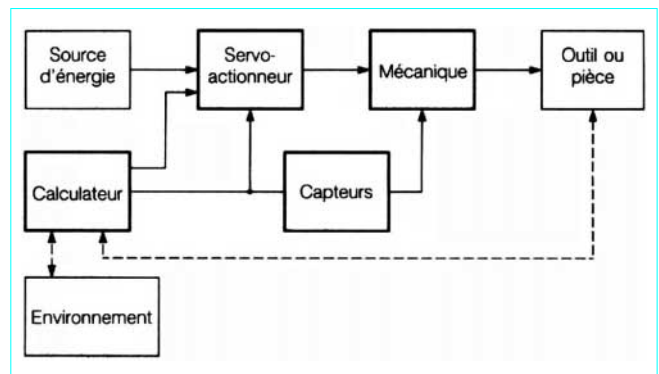


Figure 1 – Structure d'un robot industriel

1.3.1 Nombre d'axes

En règle générale, il faut 6 axes :

- 3 pour amener l'outil en n'importe quel point du volume de travail du robot ;
- 3 pour l'orienter selon un angle quelconque autour de ce point.

Cependant, le nombre d'axes nécessaires peut, selon les applications, être inférieur ou supérieur à 6 :

— *inférieur*, lorsque l'outil ou la pièce manipulé par le robot travaille dans des orientations privilégiées (par exemple, verticale en assemblage) ou présente un axe de symétrie rendant inutile une rotation, ou encore est associé à des axes complémentaires, ceux d'un positionneur par exemple, qui confère à l'ensemble des degrés de liberté supplémentaires ;

— *supérieur*, pour des applications, peu nombreuses, où une contrainte supplémentaire, par exemple la présence d'obstacles, impose un ou plusieurs axes complémentaires aux 6 axes de base.

1.3.2 Nature des axes

D'une manière générale, les robots industriels font de plus en plus appel à des axes de rotation moins coûteux que ceux de translation. Néanmoins, ceux-ci continuent d'être utilisés lorsque des applications mettent en jeu des mouvements naturellement linéaires, tels que :

- translation de grande amplitude d'un robot devant différents postes de travail ;
- opérations d'assemblage qui s'effectuent généralement selon un axe vertical.

Les différentes structures mécaniques peuvent être décrites en distinguant :

- les *axes principaux*, axes de positionnement à grands débattements (généralement au nombre de 3) ;
- les *axes de poignet*, situés en aval des précédents dans la chaîne cinématique du robot (au nombre de 1 à 3).

1.3.2.1 Axes principaux

Ces 3 axes, de rotation ou de translation, peuvent être classés en 8 arrangements de base, dont les principaux sont schématisés sur les figures 3 et 4, d'après la représentation normalisée AFNOR (NF E 04-015). Ce sont les structures suivantes.

■ **3 rotations** : la configuration la plus fréquente est la structure sphérique (figure 3a) avec ses deux variantes classiques :

— *structure sphérique à parallélogramme* (figure 3b), dans laquelle les motorisations des axes 2 et 3 sont solidaires de l'axe 1

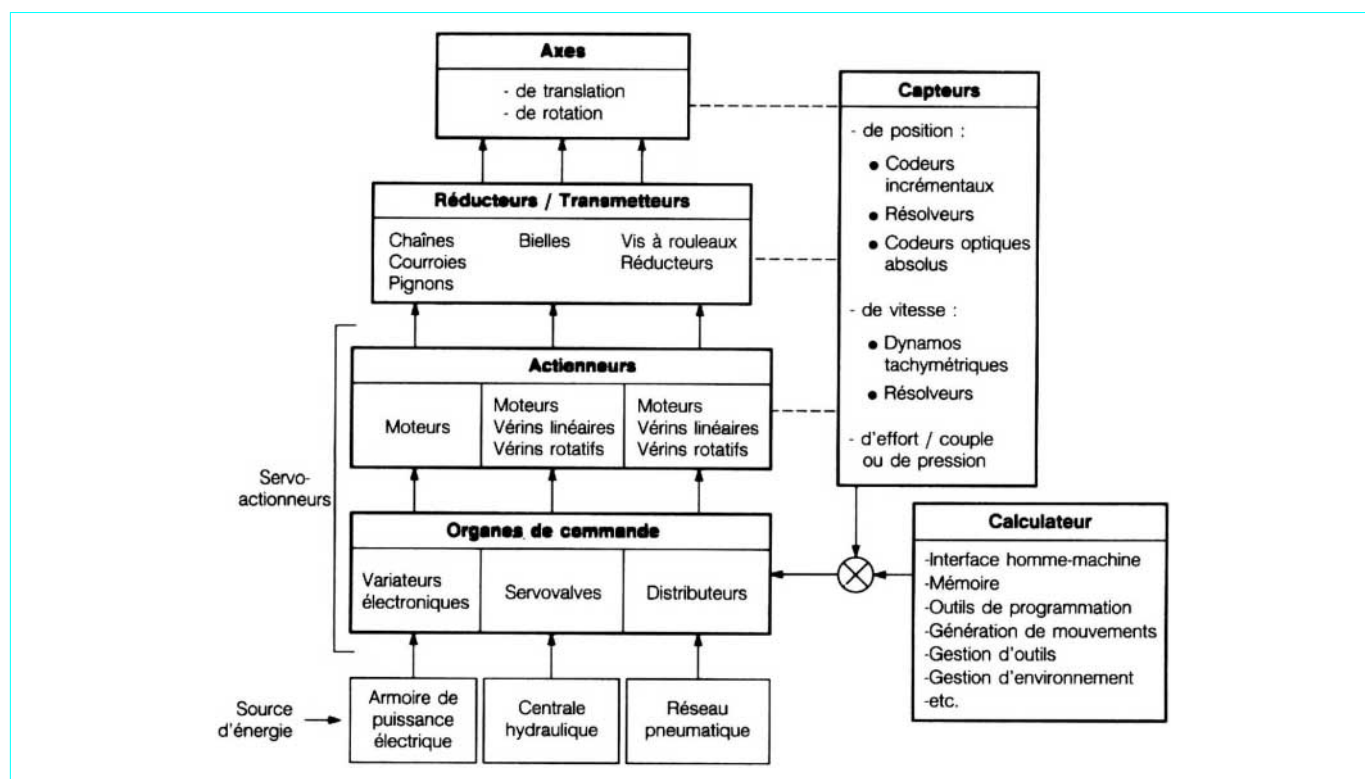


Figure 2 – Principaux composants d'un robot industriel

et la transmission du moteur 3 à l'axe 3 est constituée par une bielle formant avec le bras d'axe 2 et leurs liaisons un parallélogramme. L'intérêt de cette structure réside dans la diminution du couple subi par l'axe 2 : en effet, dans une structure sphérique classique, ce couple vaut le moment $\vec{F} \times \vec{L}$ de la charge \vec{F} par rapport à l'axe 2. Dans une structure à parallélogramme, une partie de ce couple $\vec{F} \times \vec{L}$ est pris en compte par la chaîne cinématique de l'axe 3 : l'axe 2 ne voit donc qu'un moment $\vec{F} (\vec{L} - \vec{L'})$ dans la représentation de la figure 3**b**. On démontre ainsi que la charge vue par la motorisation de l'axe 2 est ramenée sur l'axe 3, d'où l'utilisation fréquente de cette solution ;

— *structure sphérique à parallélogramme et course limitée de la chaîne cinématique* (en général, par une vis à roulement) (figure 3**c**).

Une autre configuration, orientée assemblage et majoritaire pour cette application, est basée sur 3 rotations d'axes verticaux (figure 3**d**) ; d'origine japonaise et dénommée SCARA (*Selective Compliance Assembly Robot Arm*), elle vise à un travail d'assemblage selon une direction verticale : le troisième axe de rotation permet de maintenir une orientation du plateau terminal indépendamment de la position des deux précédents axes ; le robot est généralement complété par un axe de translation vertical situé en aval du troisième axe de rotation et activé pour les opérations d'assemblage/désassemblage proprement dites ; cet axe est parfois avancé dans la chaîne cinématique en position de premier ou deuxième axe (le robot présente alors une structure du type ci-après).

■ **2 rotations - 1 translation** : les structures les plus répandues sont :

— la *structure horizontale* (1 rotation, 1 translation, 1 rotation d'axes verticaux) dans laquelle le bras et l'avant-bras du robot se meuvent dans un plan horizontal (d'où l'appellation) défini par la position de l'axe de translation (figure 4**a**) ;

— la *structure polaire* (1 rotation d'axe vertical, 1 rotation d'axe horizontal et 1 translation selon la direction définie par la seconde rotation) ; la seconde rotation est en général de faible amplitude, de l'ordre de 45° (figure 4**b**) ;

— une *structure dérivée de la structure sphérique* par remplacement du premier axe de rotation par une translation (figure 4**c**).

■ **1 rotation - 2 translations** : la structure la plus courante est la *structure cylindrique* (figure 4**d**) particulièrement utilisée pour des opérations de manutention, palettisation/dépalettisation, etc.

■ **3 translations** : la structure la plus répandue est du type *portique XYZ* (figure 4**e**).

1.3.2.2 Axes de poignet

Les poignets de robots sont à 1, 2 ou 3 axes, qui sont dans la quasi-totalité des cas des axes de rotation. Ils ne se distinguent pas par leur structure mais par la disposition relative des axes et par les positions des moteurs et des réducteurs dans les chaînes cinématiques.

Commençons par examiner la structure d'un poignet 2 axes, qui est à la base de la conception des poignets à 3 axes. La figure 5 schématise une telle structure où la commande du premier axe de poignet (ici axe 4) est directe, alors que celle du second axe (axe 5) passe par l'intermédiaire d'un couple de pignons coniques au travers duquel le changement de direction axe 4 - axe 5 s'opère.

La conception des **poignets à 3 axes concourants** (figure 6) est une extension de la précédente : 3 couples de pignons coniques sont utilisés pour transmettre les couples et mouvements lors des changements de direction entre axes 4 et 5 d'une part, 4 et 5, puis 5 et 6 d'autre part. Les poignets de ce type diffèrent :

— par l'emplacement des moteurs et réducteurs dans la chaîne cinématique :

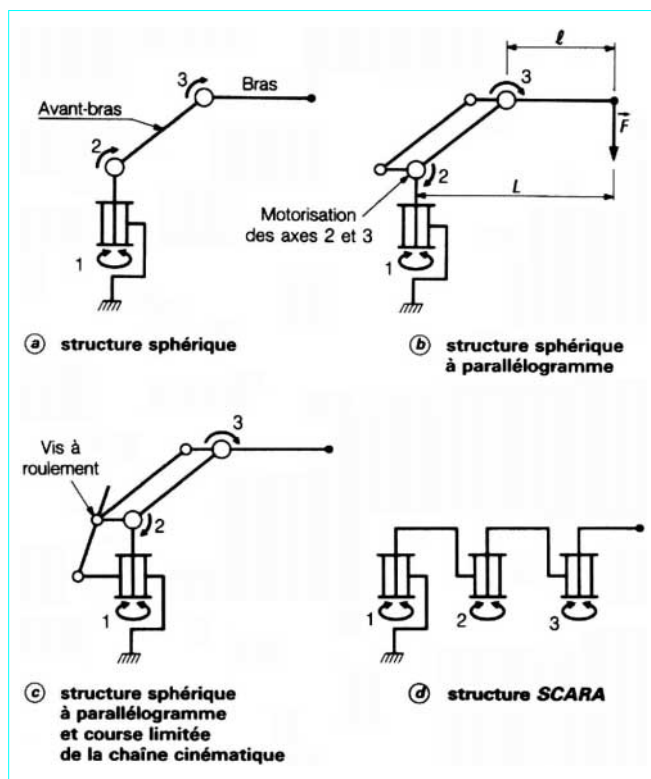


Figure 3 – Structures de robot à 3 axes principaux de rotation

- figure 6a : les moteurs et réducteurs sont situés en amont du poignet,
- figure 6b : les moteurs sont toujours en amont mais les réducteurs sont implantés en aval des couples de pignons coniques,
- figure 6c : construction en cascade où chaque couple moteur-réducteur est porté par l'axe le précédant ; de ce fait, il n'y a plus besoin de pignons coniques de transmission, au prix d'une construction plus lourde à capacité de charge égale ;
- par la perpendicularité (figures 6a, b et c) ou non (figure 6d) des 3 axes de rotation ; dans ce dernier cas, on obtient une construction compacte et sans limitation de course sur les 3 axes du poignet, alors que les constructions précédentes entraînaient une limitation de la rotation du second axe du poignet dans sa chape.

Les **poignets à axes non concourants** sont principalement de deux types :

- le premier (figure 7a) comprend le poignet à 2 axes de la figure 5 sur le plateau terminal duquel est fixé, perpendiculairement au second axe du poignet, un ensemble *moteur + réducteur* constituant le troisième axe. Généralement, cette structure découle de la structure de base à 2 axes et présente une capacité de charge réduite par rapport à cette dernière (masse du motoréducteur à supporter par les deux premiers axes du poignet) ;

- la structure précédente conserve l'inconvénient inhérent aux constructions à *chape* des figures 5, 6a, b et c d'une course réduite de l'axe 5, de l'ordre de 210 à 240°. La construction en porte à faux de la figure 7b permet d'atteindre des débattements plus élevés, supérieurs à 300°.

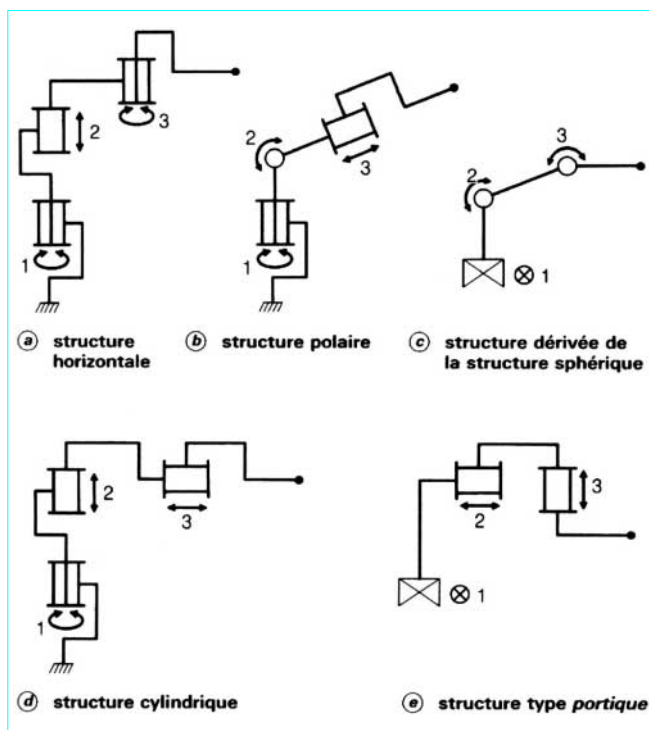


Figure 4 – Structures de robot à au moins un axe principal de translation

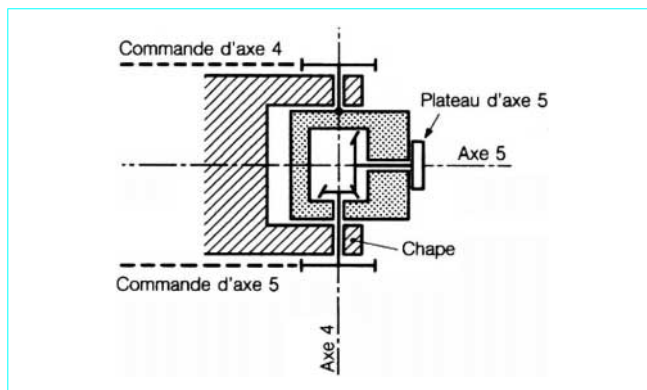
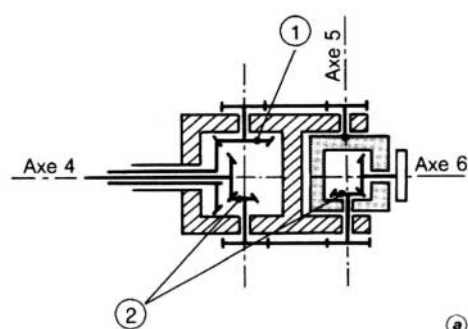
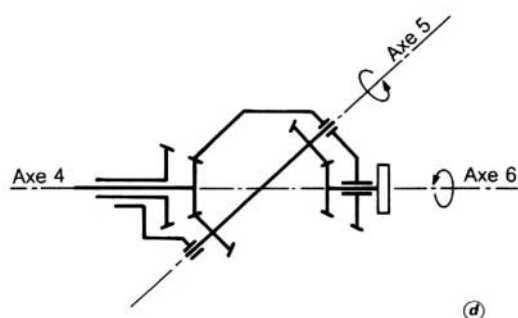
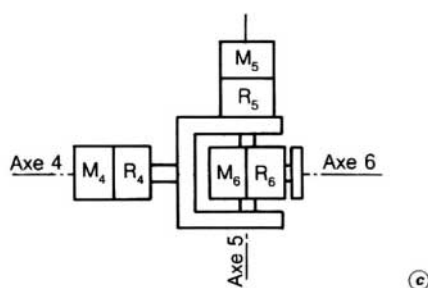
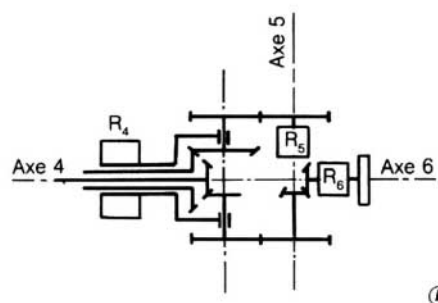


Figure 5 – Représentation schématique d'un poignet à deux axes (robot 5 axes)

Associés à une structure sphérique, les poignets précédents ne garantissent pas en eux-mêmes le maintien d'une orientation constante de l'outil terminal lorsque les axes principaux évoluent. C'est le calculateur du robot qui élabore les ordres assurant ce maintien. La structure à pantographe de la figure 8a rend mécaniquement l'orientation du poignet indépendante de la position des axes 2 et 3. Elle est parfois adoptée pour réduire le nombre d'axes



- ① changement de direction axe 4-axe 5
② changement de direction entre axe 4-axe 5 et axe 5-axe 6



M_i moteur d'axe i
 R_i réducteur d'axe i

Figure 6 – Représentation schématique de quelques poignets à 3 axes concourants

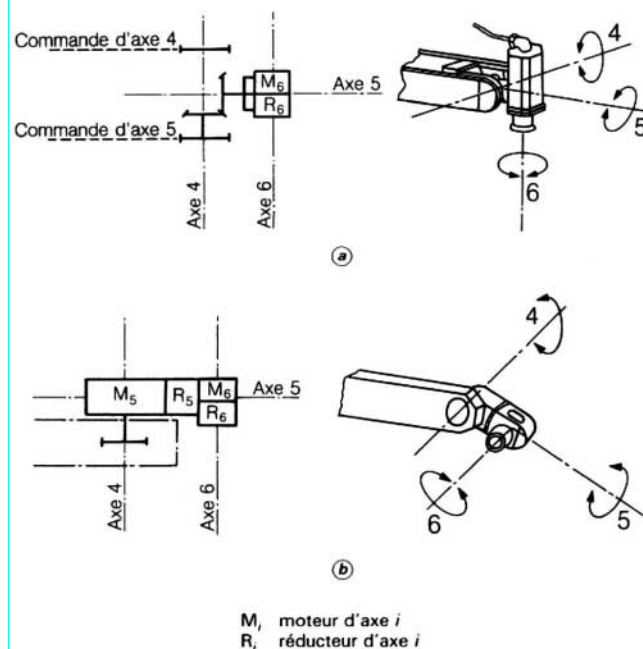


Figure 7 – Représentation schématique de poignets à 3 axes non concourants

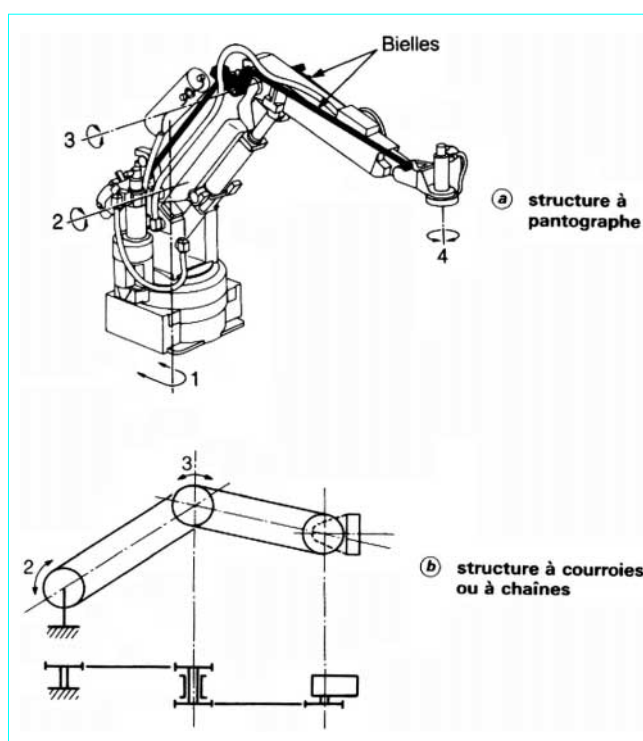


Figure 8 – Maintien de l'orientation du poignet indépendante des positions des axes 2 et 3 d'un robot à structure sphérique

à commande numérique et, plus généralement, pour découpler les mouvements entre axes principaux et de poignet. Le même résultat peut être obtenu à l'aide de courroies ou de chaînes. La figure 8b schématise cette construction, qui est aussi fréquemment réalisée pour des robots d'assemblage de type SCARA.

2. Description des organes constitutifs d'un robot industriel

2.1 Motorisation

Après avoir défini les critères de performances pour des actionneurs d'axes de robots industriels, nous étudierons les caractéristiques des technologies hydraulique et électrique avant de dégager les tendances d'évolution.

2.1.1 Critères de performances

Les performances des actionneurs de robots sont jugées d'après des critères dont la liste ci-après présente les plus déterminants :

- le **couple massique** : rapport du couple que le moteur peut exercer à sa masse (exprimé en $N \cdot m/kg$) ; plus il est élevé, plus les moteurs pourront aisément être implantés en aval des chaînes cinématiques et, notamment, pourront motoriser les outils manutentionnés par le robot ;

- la **capacité d'accélération** : rapport du couple maximal que peut délivrer l'actionneur à son inertie, qui atteint couramment 5 000 à 20 000 rad/s^2 pour les moteurs électriques et plusieurs dizaines de milliers de rad/s^2 pour les moteurs hydrauliques ; ce rapport répond généralement aux exigences de la robotique ;

- le **facteur de service** : rapport du temps pendant lequel le moteur peut fonctionner en accélération/décélération au temps de cycle ; un rapport égal à 1 est évidemment souhaitable mais, suivant les axes de robots et les applications, des rapports de 1/5 à 1 peuvent être acceptables ;

- la **régularité du couple moteur**, qui est surtout importante dans le cas, aujourd'hui restreint, de la motorisation directe (§ 2.1.4) ; lorsque les axes de robots sont animés par l'intermédiaire de réducteurs, les causes d'irrégularité de ces derniers masquent celles dues aux moteurs ;

- la **commandabilité des axes de robots**, qui sera d'autant plus aisée que la relation liant la commande (en général, le courant issu de l'armoire de commande du robot) au couple exercé sur les axes du robot sera simple et constante dans le temps ;

- la **consommation énergétique** ;

- la **sensibilité à l'environnement**, vis-à-vis de laquelle les actionneurs se démarquent surtout par les risques qu'ils génèrent potentiellement en atmosphère à risque d'explosion ;

- la **fiabilité**, la **maintenabilité** et leur résultante la **disponibilité**.

Nota : le lecteur pourra se reporter à l'article *Asservissements hydrauliques et électro-hydrauliques* [B 6 071] dans ce traité et à l'article *Régulation hydraulique* [R 7 530] dans le traité Mesures et Contrôle.

2.1.2 Motorisation hydraulique

La technologie hydraulique se caractérise par une puissance massique élevée qui en a fait la source de puissance la plus utilisée aux débuts de la robotique industrielle. Cette forte puissance massique est due au haut niveau de contraintes mécaniques auquel travaillent les composants hydrauliques et, plus particulièrement, les actionneurs qui sont :

- des moteurs hydrauliques rapides M (dont la vitesse maximale est généralement comprise entre 1 000 et 3 000 tr/min selon la taille) actionnant les axes des robots au travers de réducteurs mécaniques ;
- des vérins linéaires VL ou rotatifs VR entraînant directement ces axes et animés de vitesses maximales de l'ordre de 1 m/s (ou de quelques rad/s).

Les mouvements de ces actionneurs sont contrôlés par des organes d'*interfaçage* électrohydrauliques, les servovalves SV. Pour limiter les effets néfastes de la compressibilité du fluide hydraulique, celles-ci sont situées à proximité immédiate des actionneurs. L'ensemble *servovalves-actionneur*, souvent complété de composants de sécurité contre les risques de surpression et de cavitation (LP, CAR), constitue un servo-actionneur électrohydraulique (figure 9).

L'énergie nécessaire aux actionneurs est fournie par une centrale hydraulique (figure 10) qui assure les fonctions suivantes.

- Elle délivre le débit nécessaire aux mouvements des axes du robot en minimisant la consommation énergétique, à l'aide :

- d'une pompe à débit variable PV, fournissant le débit moyen réclamé par le robot, et d'un accumulateur oléopneumatique ACC₁ répondant aux appels instantanés de débit (figure 10a) ;

- ou d'une pompe à débit fixe PF qui, associée à un conjoncteur disjoncteur hydraulique CD, charge un accumulateur ACC₁ lorsque la pression utile p_u chute en deçà d'une valeur p_{min} et se met automatiquement en by-pass lorsque cette pression atteint une valeur maximale p_{max} (figure 10b).

- Elle distribue le fluide et règle les niveaux de pression nécessaires : électrovalve de vidange EV₁ ou d'isolement du robot par rapport à sa source d'énergie EV₂, limiteur de pression LP, réducteur de pression RP générant la basse pression de gavage des moteurs, etc.

- Elle conditionne le fluide en température (canne chauffante CC, échangeur thermique ET) et en propreté (filtres F₁, F₂). Ce dernier point est particulièrement important du fait de la forte sensibilité (dérive, résolution, usure, etc.) des servovalves à la pollution du fluide ; classiquement, une filtration de 3 μm est assurée sur le circuit pression juste en amont des servovalves (F₁).

- Elle permet le contrôle des différentes grandeurs (pression, température, taux d'encrassement des filtres, etc.) qui influent sur le fonctionnement de l'installation.

La technologie hydraulique s'est imposée initialement en robotique du fait de la **puissance** et du **couple massiques élevés** de ses actionneurs. À cet avantage, pour le concepteur, il convient d'ajouter deux points positifs pour l'utilisateur :

- le **facteur de service des actionneurs est égal à 1**, c'est-à-dire que les axes d'un robot hydraulique pourront travailler continûment en accélération/décélération ; en effet, les actionneurs hydrauliques bénéficient du transfert, *via* le fluide hydraulique, des calories générées à leur niveau vers la centrale, d'où elles sont évacuées par convection naturelle ou par l'intermédiaire d'un échangeur thermique ;

- un robot à actionneurs hydrauliques peut être rendu aisément à **sécurité intrinsèque**, car les liaisons entre l'armoire de commande du robot et ses actionneurs ne mettent en jeu que de faibles courants (quelques dizaines de milliampères), les servovalves étant des amplificateurs électrohydrauliques qui ne requièrent que quelques dizaines de milliwatts pour leur commande.

Les avantages de cette technologie sont contrecarrés par les **inconvénients** que sont une consommation énergétique nettement plus élevée qu'avec une motorisation électrique et, surtout, des conditions d'exploitation plus délicates, en raison :

- d'une moindre fiabilité (usure des composants de régulation, telles les servovalves) ;

- d'une plus grande exigence de maintenance (propreté du fluide hydraulique, notamment) ;

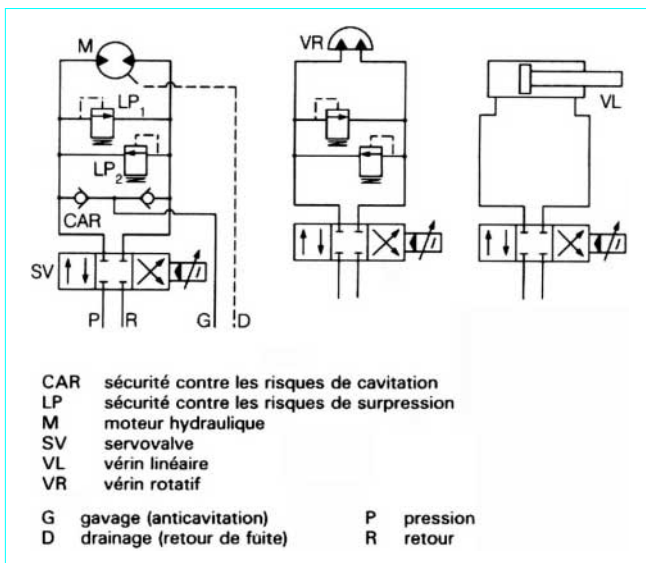


Figure 9 – Servo-actionneurs électrohydrauliques

— d'un manque de maîtrise de l'étanchéité des circuits ;
 — d'un manque de formation des équipes de maintenance, de base électromécaniciens.

De ce fait, l'utilisation de la motorisation hydraulique en robotique a été progressivement restreinte aux robots :

— travaillant en atmosphère explosive ;
 — à très forte capacité de charge (plusieurs centaines de kilogrammes).

2.1.3 Motorisation électrique

La motorisation électrique des robots repose sur l'emploi de moteurs électriques rapides qui entraînent les axes au travers de réducteurs mécaniques. Ces moteurs sont :

- soit des *moteurs à courant continu* constitués principalement :
 - d'un stator dont sont solidaires des aimants permanents qui créent un champ magnétique radial (moteurs à rotor bobiné) ou axial (moteurs discoïdaux),
 - d'un rotor qui comprend un bobinage parcouru par le courant généré par un variateur électronique,
 - d'un collecteur électromécanique distribuant le courant dans le bobinage tournant.

De l'action du champ magnétique sur ce courant résulte le couple moteur (loi de Laplace) :

- soit des *moteurs synchrones triphasés* qui présentent une construction inverse avec :
 - un stator bobiné,
 - un rotor muni d'aimants permanents.

Ils ne comprennent pas de collecteur physique, les courants dans le bobinage fixe étant asservis électroniquement à la position du rotor détectée par un capteur de position interne au moteur.

Les schémas des figures 11a et b font apparaître de nombreuses similarités dans la structure de ces deux types de servomoteurs.

Outre les **fonctions communes** d'alimentation en puissance et de gestion des sécurités, les deux schémas mettent en évidence une double boucle d'asservissement :

- de vitesse ;
- d'intensité du courant ;

qui s'ajoute à la boucle externe de position.

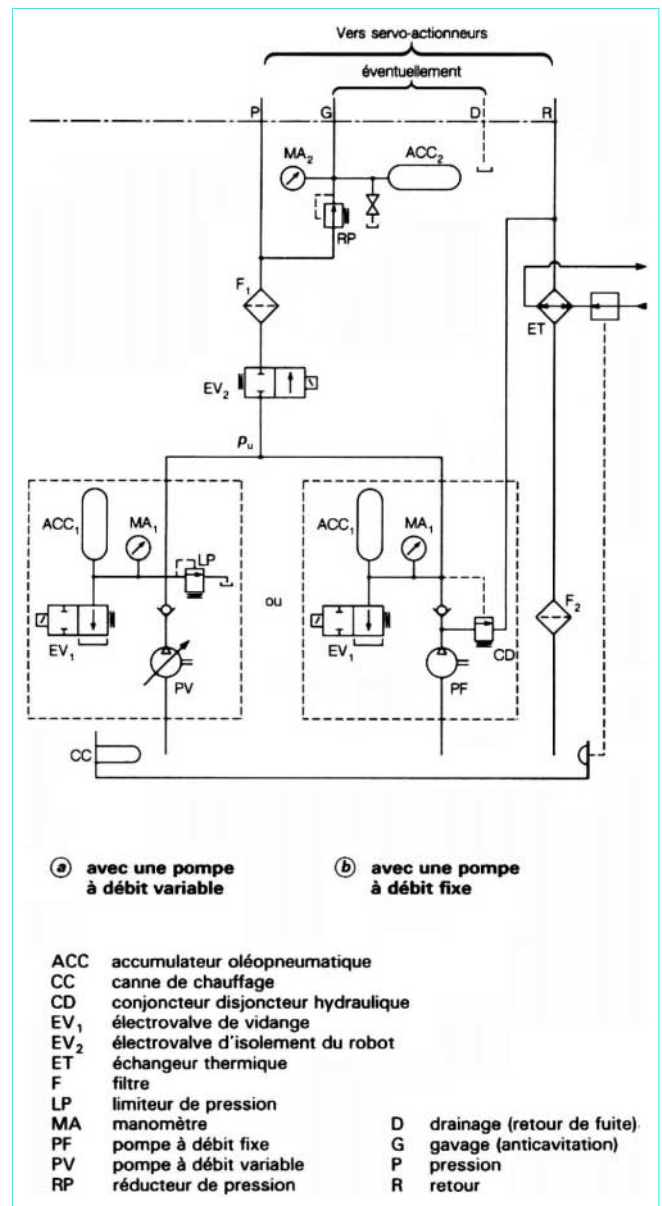


Figure 10 – Exemples de schéma d'une centrale hydraulique de robot

Les **différences** viennent :

- du nombre de phases du moteur, et donc de transistors pour les commander : de respectivement 2 et 4 pour les moteurs à courant continu, ils passent à 3 et 6 pour les moteurs synchrones triphasés ;
- de la nécessité pour les moteurs synchrones triphasés d'un capteur de position interne au moteur permettant d'asservir le courant dans les bobinages à la position du rotor, afin de générer à tout moment le couple optimal.

Vue de l'utilisateur, la différence essentielle provient de l'absence de collecteur et de balais pour les moteurs synchrones triphasés, d'où :

- la suppression des opérations, cependant peu fréquentes, de maintenance ;

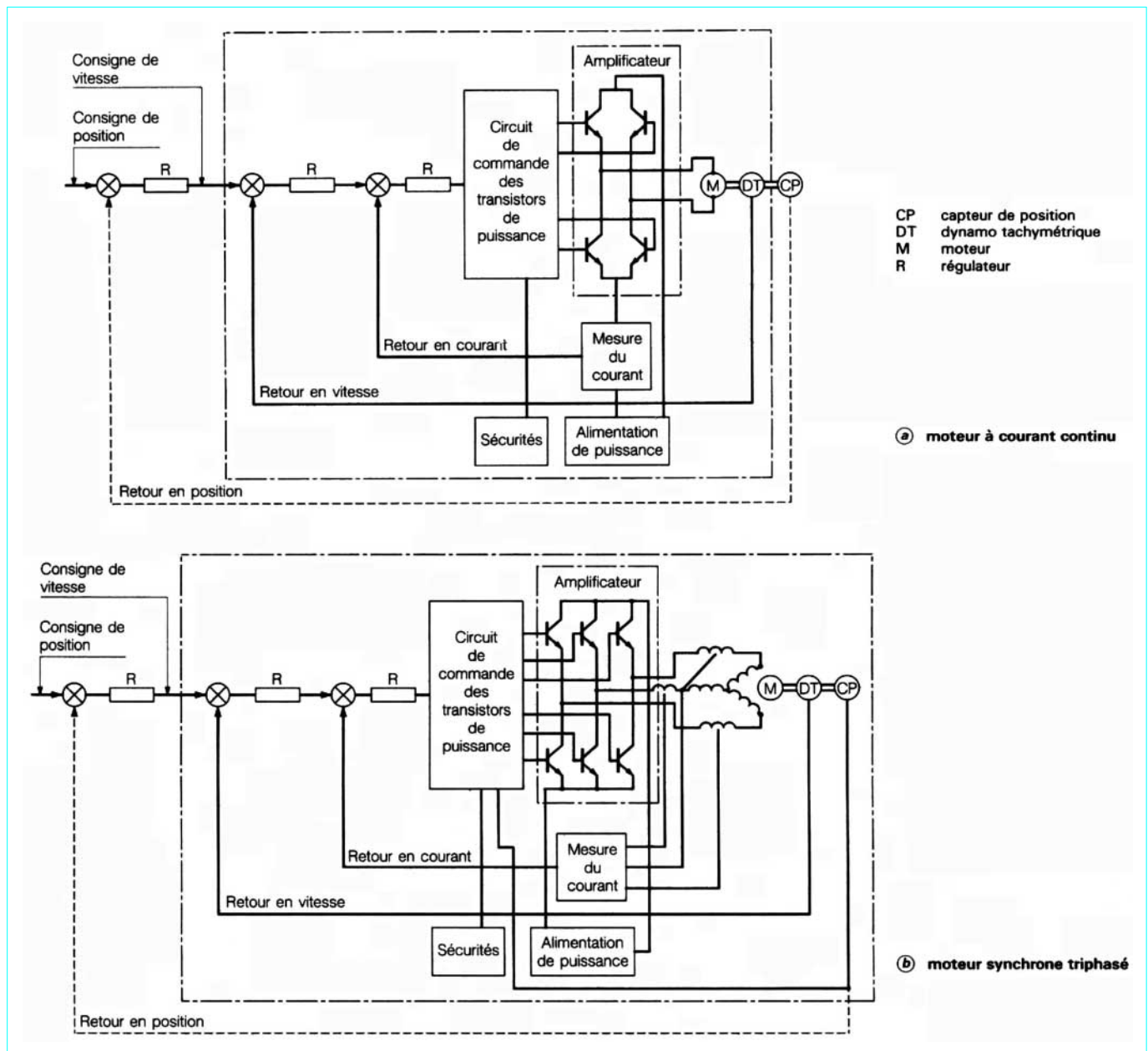


Figure 11 – Servomoteurs électriques

— l'absence des limites dues à la commutation des moteurs à courant continu à collecteur et, ainsi, la possibilité de faire travailler ces moteurs à couples et vitesses élevées simultanément.

Ces avantages se paient par un coût aujourd'hui supérieur d'environ 30 % à celui de la motorisation à courant continu.

Par rapport à la motorisation hydraulique, les actionneurs électriques présentent des avantages et inconvénients complémentaires à ceux énoncés au paragraphe 2.1.2.

■ Avantages

Le rendement énergétique global est très supérieur à celui rencontré en hydraulique, l'énergie consommée pour une tâche

donnée étant souvent plus de deux fois moindre. De plus, la fiabilité et la maintenabilité des servomoteurs électriques est excellente et ils bénéficient d'une formation généralement adaptée du personnel de maintenance.

■ Inconvénients

Le premier inconvénient des moteurs électriques tient à leur faible couple massique, inférieur en moyenne de deux à cinq fois à celui des servomoteurs hydrauliques. Cette différence, en partie masquée par les réducteurs dont la masse est indépendante de la technologie de motorisation, a conduit les constructeurs à adapter la conception de leur robot en recourant :

- à des renvois de la motorisation vers l'axe central du robot pour réduire les couples gravitaires et inertiels ;

- à équilibrer au moins partiellement les efforts gravitaires par répartition des masses ou, plus souvent, par des ressorts ou des vérins.

Par ailleurs, les calories générées au niveau des moteurs ne s'évacuant que localement, les moteurs doivent être dimensionnés en fonction non seulement des couples maximaux mais aussi des cycles de travail auxquels ils sont soumis ; ce dimensionnement effectué, l'utilisateur ne s'aperçoit pas de cette relative fragilité, d'autant plus qu'une surveillance, logicielle ou matérielle, du courant ou de la température du moteur est généralement effectuée.

Le seul inconvénient de la motorisation électrique qui ne puisse être résolu par un dimensionnement adéquat tient à la présence de courants élevés dans les câbles de liaison et surtout les collecteurs des moteurs à courant continu ; cet inconvénient a longtemps exclu la motorisation électrique des tâches robotisées en atmosphère explosive, avant que n'apparaissent récemment des robots électriques à motorisation synchrone triphasée qui respectent les règles de sécurité en atmosphère explosive.

2.1.4 Tendances d'évolution

Nous avons vu que, sauf exception, la motorisation électrique s'était progressivement imposée comme le seul mode de motorisation des axes de robots industriels. Cette prééminence provient :

- d'un pression des utilisateurs, argumentée autour des critères de fiabilité et de maintenabilité ;
- d'un effort des constructeurs qui ont adopté des structures mécaniques et des systèmes d'équilibrage s'accommodant de la moindre puissance massique des actionneurs électriques.

■ Motorisation synchrone triphasée

L'évolution d'aujourd'hui en robotique tend à une utilisation de plus en plus fréquente de moteurs synchrones triphasés. Ces derniers possèdent un ensemble de caractéristiques :

- fiabilité et maintenabilité très élevées, du fait de l'absence de collecteur ;
- suppression des contraintes de commutation propres aux moteurs à collecteur, comme l'illustre la figure 12, qui montre les allures des caractéristiques couple/vitesse des deux types de moteurs ;
- faible moment d'inertie et faible constante de temps mécanique qui les rendent attrayants vis-à-vis des moteurs à courant continu, comme l'illustre le tableau comparatif 1, sur lequel figurent aussi quelques données relatives aux moteurs hydrauliques.

La seule restriction à leur utilisation tient actuellement à leur coût plus élevé, mais qui s'atténue avec leur généralisation progressive. Dès à présent, leurs caractéristiques les imposent dans des applications exigeantes, comme la robotique à très fortes cadences.

■ Motorisation directe

La motorisation classique des axes de robots, à partir de moteurs rapides et de réducteurs mécaniques, fait plus ou moins apparaître, selon les qualités de conception et de réalisation, des jeux et frottements qui, acceptables pour la plupart des applications, peuvent devenir critiques pour des applications qui, comme certaines opérations d'assemblage ou de suivi de trajectoire, requièrent à la fois des temps de cycle très courts et une grande précision.

C'est ce domaine que visent les robots à entraînement direct des axes par des moteurs fort couple/faible vitesse qui sont :

- sans collecteur ;

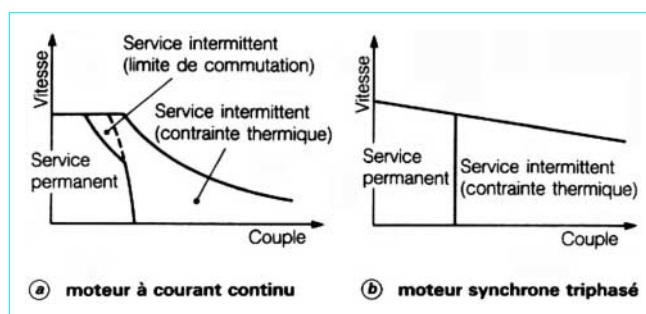


Figure 12 – Caractéristique couple/vitesse des deux types de moteurs

- à reluctance variable ou synchrones triphasés ;
- à nombre élevé de pôles, qui leur confère le couple élevé requis ;
- à couple massique élevé pouvant atteindre $5 \text{ N} \cdot \text{m/kg}$ en version *cartésienne*, $15 \text{ N} \cdot \text{m/kg}$ en version *pancake*.

À ces caractéristiques avantageuses correspondent néanmoins des problèmes spécifiques qui concernent :

- la détection de position, qui doit présenter une très grande résolution du fait de l'absence de réducteur entre moteur et axe ;
- les fortes variations de la charge inertielle vue par le moteur, variations qui ne sont plus réduites et amorties par le réducteur et qui nécessitent une commande plus sophistiquée les prenant en compte ;
- l'ondulation du couple moteur qui, elle aussi, n'est plus filtrée par le réducteur ;
- la masse et le volume élevés, leur couple massique élevé ne compensant pas l'absence de réducteur ;
- le freinage mécanique des axes, qui ne bénéficie plus du réducteur.

Ces spécificités limitent actuellement l'emploi de la motorisation directe, mais ils ne constituent pas des obstacles insurmontables à cette technologie qui présente, par ailleurs, l'attrait d'une grande fiabilité potentielle du fait de l'absence d'organes mécaniques.

2.2 Réducteurs

Si certains actionneurs hydrauliques (vérins linéaires ou rotatifs) peuvent entraîner directement des axes de robots, les actionneurs électriques, qui ne délivrent qu'un faible couple pour un encombrement acceptable, les entraînent presque toujours au travers de réducteurs mécaniques.

Ce sont ces éléments des chaînes cinématiques de robots que nous allons décrire après avoir défini les critères de performances prépondérants pour leur application en robotique.

2.2.1 Critères de performances

2.2.1.1 Jeu

Le jeu du réducteur est un critère essentiel, bien que nombre d'applications robotiques fassent appel à la *répétabilité du robot* et ne sont donc pas très sensibles à la présence de jeu. En effet, celui-ci est souvent rattrapé par l'effet des forces de gravité, et, par ailleurs, les axes se stabilisent sensiblement de la même façon à l'intérieur du jeu lorsque le robot restitue les mêmes points d'arrêt selon les mêmes trajectoires.

Tableau 1 – Caractéristiques typiques de différents types de moteurs

Moteurs		Caractéristiques						
		Couple nominal	Pourcentage maximal de fonctionnement avec couple double du nominal	Vitesse nominale	Moment d'inertie de la partie mobile	Constante de temps mécanique (1)	Constante de temps thermique	Masse
		(N · m)		(tr/min)	(kg · m ²)	(ms)	(min)	(kg)
Moteurs à courant continu	discoïdaux	≈ 10	25	3 000	≈ 5 × 10 ⁻³	3 à 10	1 à 10	≈ 20
	à rotor bobiné	≈ 10	25	2 000 à 2 500	≈ 8 × 10 ⁻³	5 à 10	50 à 100	15 à 20
Moteurs synchrones triphasés		≈ 10	25	2 000 à 5 000	1 à 3 × 10 ⁻³	1 à 3	50 à 100	≈ 15
Moteurs hydrauliques		≈ 10	100	2 000 à 3 000	1 × 10 ⁻⁴	1	sans conséquence	6

(1) Constante de temps en vitesse.

Néanmoins, la présence de jeux mécaniques se fait sentir pour d'autres formes de restitutions des trajectoires :

— lorsque la trajectoire est restituée géométriquement, certains axes peuvent changer de sens de déplacement à l'intérieur de cette trajectoire ; le jeu de ces axes se traduit alors par une discontinuité sur le trajet restitué ;

— lorsque les mouvements du robot résultent d'informations émanant de capteurs extérieurs, le fonctionnement du robot est aléatoire à l'intérieur du jeu et à ses frontières.

Le jeu du réducteur devra être d'autant plus faible que les axes sont à coefficient d'amplification élevé ; pour un robot à structure sphérique, ce sont les axes 1 et 2, puis 3 et, enfin, ceux du poignet qui sont dans cet ordre les plus exigeants. Ainsi, un jeu d'une minute d'angle en sortie de réducteur se traduit par une incertitude de positionnement d'environ 0,6 mm au bout d'un bras de 2 m d'élongation.

2.2.1.2 Inertie

Le couple que doit exercer un moteur pendant les phases d'accélération est fonction de sa propre inertie et de celles, ramenées à l'arbre moteur donc en général à l'arbre primaire, du réducteur et de la charge. Cette dernière est, ramenée au niveau du moteur, divisée par le carré du rapport de réduction ; de ce fait, la plus forte inertie vue par le moteur n'est pas toujours celle de la charge mais peut être celle du réducteur. Un réducteur de faible inertie ramenée à l'arbre primaire sera donc favorable.

2.2.1.3 Raideur

Une caractéristique importante pour le comportement dynamique d'un robot est la fréquence propre de ses différents axes. Ces fréquences f s'expriment sous la forme :

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{I}}$$

avec k raideur (dans notre cas celle du réducteur, ramenée à l'arbre primaire),

I moment d'inertie totale ramenée à l'arbre primaire du réducteur.

Plus la raideur du réducteur sera forte, plus élevée sera la fréquence propre de l'axe considéré et, par conséquent, la fréquence de coupure de son asservissement.

2.2.1.4 Courbe d'hystérésis

C'est la caractéristique couple/déplacement ramenée à l'arbre primaire du réducteur ; elle représente le déplacement angulaire θ de l'arbre primaire, l'arbre secondaire étant bloqué, en fonction du couple C exercé sur cet axe (figure 13).

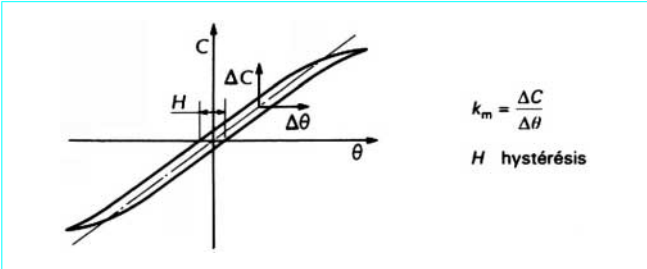


Figure 13 – Courbe d'hystérésis d'un réducteur mécanique

Sur cette caractéristique, on distingue :

— une pente moyenne, image de la raideur moyenne k_m du réducteur vue de son arbre d'entrée ;

— une hystérésis H , fonction de la raideur et des frottements du réducteur ; cette hystérésis représente l'incertitude sur le positionnement relatif des arbres primaire et secondaire en fonction de l'évolution antérieure du couple transmis ; pour un réducteur de rapport R , l'hystérésis H se manifeste à une distance L de l'axe que le réducteur entraîne par une incertitude de positionnement égale à :

$$\Delta x = \frac{HL}{R}$$

2.2.1.5 Longévité

La fiabilité et la durée de vie des engrenages qui constituent les réducteurs mécaniques sont fonction des contraintes mécaniques qu'ils subissent. Plus précisément, le dimensionnement des engrenages doit respecter des conditions limites de charge (article Engrenages. Éléments pratiques de définition, de dessin et de calcul [B 636] dans ce traité), représentées par l'effort tangentiel transmissible F_{tt} , vis-à-vis :

— de la résistance à la rupture, qui impose une condition du type :

$$F_{tt} \leq k_1 \sigma_{Flim} b m$$

avec b largeur de la denture,

m module,

k_1 coefficient résultant de nombreux paramètres qui tiennent compte de la durée de vie souhaitée, de la précision des engrenages, de leur vitesse, du facteur de conduite, des conditions de guidage, etc.,

σ_{Hlim} résistance à la rupture admissible dans le matériau utilisé pour une durée de vie infinie ;

— de la résistance aux contraintes superficielles qui définit une seconde condition :

$$F_{tt} \leq k_2 \sigma_{Hlim}^2 b d_1 \frac{u+1}{u}$$

avec b largeur de la denture,
 d_1 diamètre du pignon,
 k_2 coefficient tenant compte de la géométrie de l'engrenage et d'autres facteurs, dont ceux énumérés pour la résistance à la rupture,
 u rapport d'engrenage,
 σ_{Hlim} contrainte de Hertz admissible dans le matériau utilisé pour une durée de vie infinie.

2.2.2 Réducteurs utilisés en robotique

De nombreux types de réducteurs sont utilisés en robotique ; ils se distinguent principalement par :

- la position relative des axes des pignons et roues : réducteurs à axes parallèles, à axes perpendiculaires (réducteurs à roue et vis sans fin), etc. ;
- la fixité ou non des axes : réducteurs à axes fixes, réducteurs planétaires ou épicycloïdaux ;
- le recours ou non à des dentures déformables.

Les figures 14 et 15 représentent schématiquement ces différents types de réducteurs.

■ Les **réducteurs à trains parallèles, axes fixes** (figure 14a) sont les plus simples et les plus classiques. Ceux utilisés en robotique sont réalisés dans des classes de précision élevées et présentent des jeux réduits, de l'ordre de 1 à 5 min d'angle. Ils comprennent parfois un système de rattrapage de jeu permanent, sur le ou les dernier(s) étage(s), le jeu d'engrènement étant d'autant plus pénalisant que l'étage de réduction se situe en aval de la chaîne cinématique. En l'absence de rattrapage de jeu permanent, un rattrapage de jeu est parfois rendu possible lors d'une opération de maintenance, par exemple par rapprochement des axes des pignons et roues.

De construction rigide, ces réducteurs présentent une raideur élevée ; de plus, leur inertie ramenée à l'arbre primaire est faible du fait que le pignon d'entrée est de petit diamètre. Ils sont donc particulièrement bien adaptés aux exigences de la robotique.

■ Les **réducteurs épicycloïdaux** (figure 14b) sont également utilisés comme réducteurs sur des robots industriels ; ils présentent des caractéristiques voisines des réducteurs à trains fixes, et, plus encore que ces derniers, exigent une très grande qualité de réalisation pour obtenir des jeux réduits sans frottements anormaux (*points durs*).

Le réducteur Cyclo (figure 14c) constitue un cas particulier de réducteur épicycloïdal, sans pignon planétaire : l'arbre primaire anime un excentrique E qui amène un disque-came D à rouler à l'intérieur de la couronne C dont les *dents* sont constituées de bagues cylindriques B. Le nombre de ces *dents* étant supérieur de 1 à celui des courbures cycloïdales de la came, il en résulte un effet réducteur entre la vitesse de l'arbre primaire et celle de la came dont le mouvement est transmis à l'arbre de sortie 2 par l'intermédiaire des bagues B'.

■ Les **réducteurs à roue et vis sans fin** (figure 14d) sont parfois utilisés en robotique, pour des rapports de réduction relativement faibles, de l'ordre de 10, garantissant leur réversibilité.

■ Un quatrième type de réducteurs courants en robotique utilise des **dentures déformables** : Harmonic Drive propose deux types de réducteurs de cette conception, dont le plus commun est schématisé sur la figure 15 ; son principe de fonctionnement est basé sur une différence du nombre de dents entre une couronne à denture intérieure et indéformable et une denture extérieure solidaire d'un anneau déformable AD. L'anneau AD est déformé par une came C

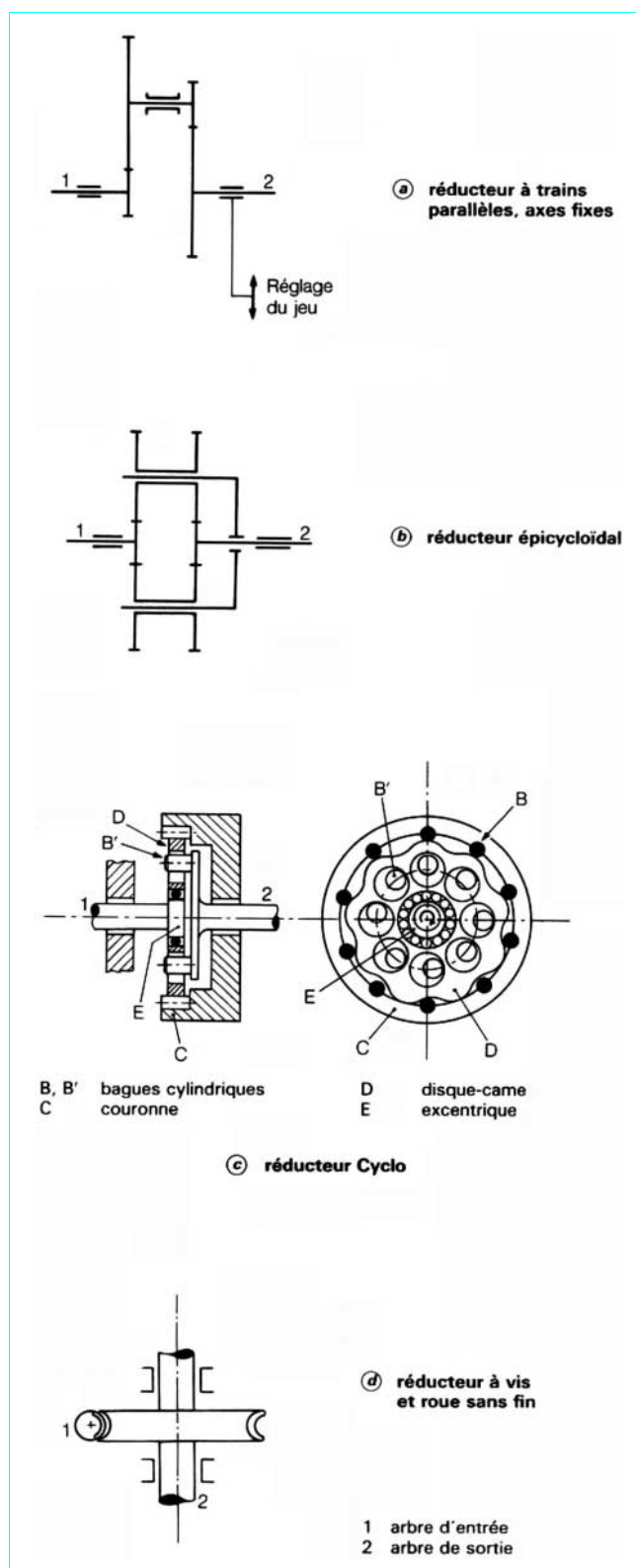


Figure 14 – Réducteurs mécaniques utilisés sur les robots industriels

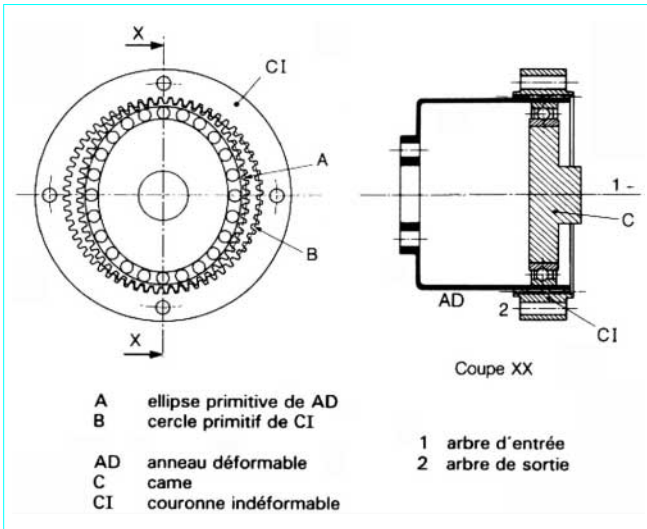


Figure 15 – Réducteur à dentures déformables

solidaire de l'arbre primaire, tandis que l'arbre de sortie est lié à la couronne CI ou à l'anneau AD.

On notera que ces réducteurs présentent des caractéristiques de raideur et d'inertie plutôt défavorables vis-à-vis d'autres types de réducteurs :

- la déformation de l'anneau se traduit par une moindre raideur et une hystérésis relativement élevée ;
- la came qui déforme l'anneau AD est de diamètre et d'inertie beaucoup plus élevés qu'un pignon d'entrée de réducteur à trains fixes ou épicycloïdal.

Néanmoins, ils permettent d'obtenir, en un seul étage de réduction et sous un encombrement réduit, des rapports de réduction élevés, de 80 à plusieurs centaines. Cette caractéristique a conduit de nombreux constructeurs à les utiliser, d'autant plus qu'ils peuvent être obtenus avec de faibles jeux, de l'ordre de 1 min d'angle.

2.3 Organes de transmission

On entend par organes de transmission des composants mécaniques dont le but principal est de transmettre un mouvement. Cette transmission peut s'accompagner d'une réduction de vitesse et, en ce sens, ils participent au rapport de réduction global entre les moteurs et les axes du robot ; néanmoins, il s'agit pour eux d'une fonction annexe.

Au titre d'organes de transmission sont présentés ci-après les transmissions par pignons, par bielles, par courroie et par chaînes. Avant de les examiner, nous commencerons, après avoir rappelé les critères de performances de ces organes, par décrire un composant essentiel de la robotique, qui réalise à la fois les fonctions de réduction de vitesse et de transmission : la **vis à roulement**.

2.3.1 Critères de performances

Les critères de performances pour des organes de transmission sont les mêmes que ceux énumérés pour les réducteurs mécaniques (§ 2.2.1). Cependant, ces critères seront plus ou moins sensibles en fonction de la position des organes de transmission dans la chaîne cinématique. En effet, leurs valeurs à l'entrée e et à la sortie s d'un réducteur de rapport de réduction R ($R = \text{vitesse d'entrée } \omega_e / \text{vitesse de sortie } \omega_s$) sont liées par des relations du type :

- pour une inertie :

$$I_s = R^2 I_e$$

- pour une raideur :

$$k_s = R^2 k_e$$

- pour un jeu :

$$J_s = J_e / R$$

Ainsi, le jeu et la raideur prendront relativement peu d'importance en amont d'un réducteur, et cela d'autant plus que le rapport de réduction sera élevé, alors que l'inertie de la transmission deviendra un critère important. Inversement, dans le cas le plus fréquent où la transmission se situe en aval du réducteur dans la chaîne cinématique, les jeux et raideurs deviendront prépondérants, plus encore que pour le réducteur si la transmission est aussi réductrice de vitesse, alors que l'inertie sera négligeable.

2.3.2 Vis à roulement

Les vis à roulement constituent un système vis-écrou dans lequel des corps roulants, billes ou rouleaux, sont interposés entre la vis et l'écrou pour réduire le frottement.

Elles sont caractérisées par un rapport de transmission :

$$T = \frac{1}{R} = \frac{v_s}{\omega_e} = \frac{p}{2\pi}$$

où v_s et p représentent respectivement la vitesse linéaire de l'écrou et le pas de filetage.

Selon leur construction, on distingue quatre types de vis à roulement :

- les **vis à billes à recirculation interne des billes**, pour lesquelles les billes sautent un pas à l'issue de chaque révolution complète par l'intermédiaire d'une rainure ménagée dans l'écrou. Le changement brutal de direction imposé aux billes limite le produit de la vitesse de rotation N (tr/min) par le diamètre D (mm) de la vis à une valeur :

$$\begin{aligned} ND &\approx 40\,000 && \text{pour les vis à filets roulés,} \\ ND &= 60\,000 \text{ à } 90\,000 && \text{pour les vis à filets rectifiés, selon la} \\ &&& \text{nature de la lubrification ;} \end{aligned}$$

- les **vis à billes à recirculation externe des billes**, qui utilisent le même principe, mais les billes sont remises en circulation par l'intermédiaire de tubes externes à l'écrou, ce qui ne génère pas de changement de direction aussi brutal que dans le cas précédent. Toutefois, la moindre rigidité du circuit de recirculation limite le produit ND à des valeurs sensiblement identiques à celles des vis à recirculation interne ;

- les **vis à rouleaux à recirculation interne**, pour lesquelles les rouleaux effectuent un mouvement axial qui limite le produit ND entre 10 000 et 40 000 selon le type de lubrification. Ces vis sont peu utilisées en robotique du fait de cette limitation de vitesse et de leur faible rapport de transmission, dû à un pas qui n'excède pas 5 mm ;

- les **vis à rouleaux filetés**, qui offrent les meilleures performances avec un produit ND qui atteint 90 000 à 140 000 et une capacité de charge très élevée. La vis et l'écrou (figure 16) sont filetés à n filets de même angle d'hélice et de profil que les rouleaux dont le diamètre est dans un rapport $1/n$ avec celui de l'écrou ; ainsi, au cours de la rotation de la vis, les rouleaux conservent la même position axiale.

L'utilisation de vis à roulement doit prendre en compte certaines limitations et contraintes dont les principales sont les suivantes.

- La vitesse de rotation de la vis doit être inférieure à une vitesse critique au-delà de laquelle elle entre en résonance. Cette vitesse critique ω_c est fonction des conditions de montage au niveau du palier de vis et de l'écrou (encastrement, appuis, etc.), du diamètre à fond de filet D_o de la vis et de la distance ℓ entre palier de vis et écrou ; elle varie comme le rapport D_o/ℓ .

- La longueur ℓ est également limitée par l'effort critique vis-à-vis du flambage qui, comme la vitesse critique, varie inverse-

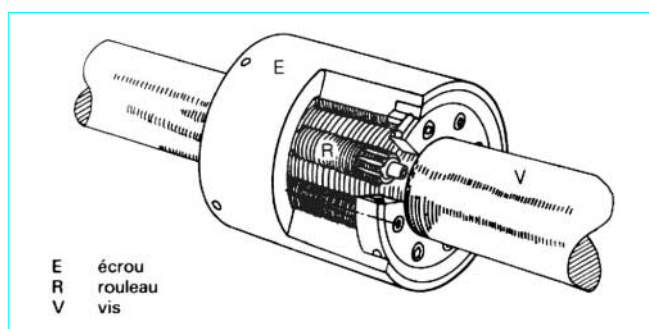


Figure 16 – Vis à rouleaux filetés

ment à ℓ^2 , mais qui bénéficie très fortement d'une augmentation du diamètre de vis D , puisqu'il est proportionnel à D^4 .

— Pour supprimer le jeu axial et augmenter la raideur de transmission, l'écrou est souvent constitué de deux parties assemblées pour créer une précontrainte ; la raideur est alors multipliée par un facteur de l'ordre de 2,5.

Afin de ne pas provoquer de points durs inacceptables dus à des variations du pas de vis, de l'ordre de 0,05 mm/m pour les vis à filets rectifiés et de 0,5 mm/m pour celles à filets roulés, la mise en précontrainte s'effectue parfois, surtout pour les vis à filets roulés, par l'intermédiaire d'un dispositif élastique faisant office de limiteur d'efforts.

2.3.3 Transmission par pignons

Les problèmes posés par la transmission par pignons sont les mêmes que ceux examinés pour les réducteurs (§ 2.2).

La transmission par pignons en aval des réducteurs nécessite un jeu de fonctionnement pratiquement nul qui est obtenu par mise en contrainte des pignons ; l'engrènement doit donc être excellent afin de ne pas générer de frottements ou de *points durs* rédhibitoires. Pour ce faire, les pignons sont réalisés selon une classe de précision élevée, de l'ordre de la classe 6, avec des tolérances de fond-rond très sensiblement réduites par rapport à cette classe (environ la moitié).

Du fait de la similitude avec les réducteurs, nous nous contenterons dans ce paragraphe de citer deux types de transmission que l'on rencontre fréquemment en robotique.

— Les **couronnes à galets croisés** (figure 17a) sont constituées d'un roulement à galets croisés dont la bague extérieure est taillée à sa périphérie. Les bagues intérieure et extérieure intègrent des éléments de fixation par lesquels s'effectuent les liaisons aux axes amont et aval. Les couronnes à galets croisés combinent la fonction guidage, avec de très grandes rigidité et capacité de charge en torsion, avec celle d'étage final de la transmission.

La figure 17b représente une cinématique classique d'axe 1 de robot qui fait appel à une telle couronne, sur laquelle engrène un pignon fixé directement en sortie du réducteur.

— Les **couples de pignons coniques** sont utilisés pour transmettre des mouvements et couples entre deux axes non parallèles, particulièrement dans les poignets de robot, comme le schématisent les figures 5, 6a, b et d.

Les pignons sont droits ou spiroconiques ; dans ce dernier cas, un angle d'hélice moyen nul permet d'éviter que les poussées axiales et radiales ne s'inversent avec le sens de rotation, qui évolue sans cesse sous l'effet de la recherche de position permanente des asservissements (micromouvements).

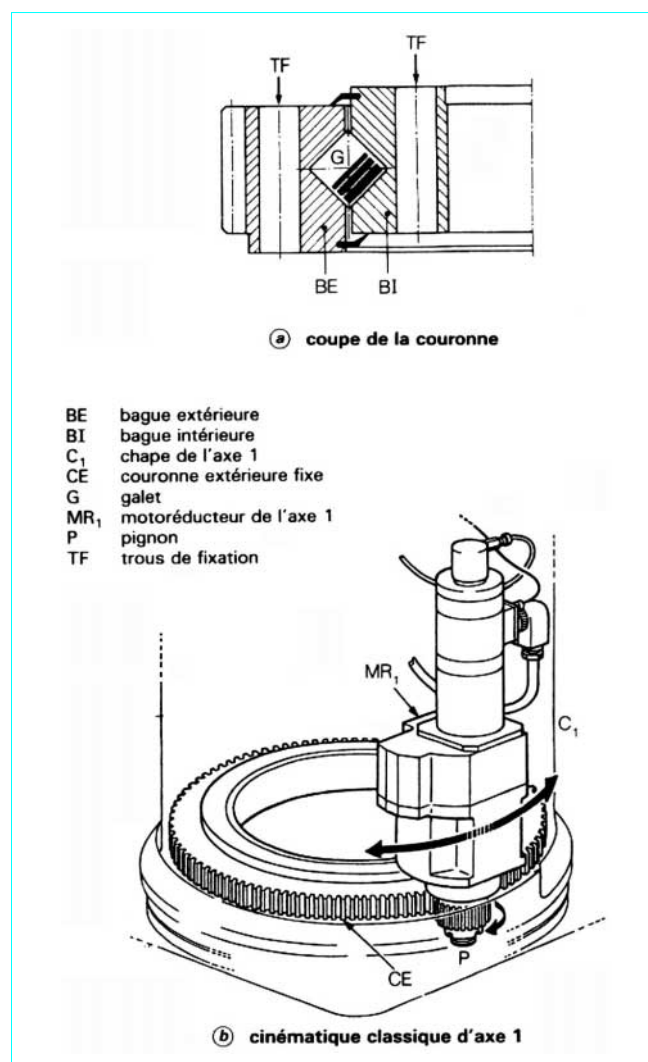


Figure 17 – Transmission par pignons : cas de la couronne à galets croisés

2.3.4 Transmission par bielles

La transmission par bielle(s) (figure 18a) s'effectue entre deux arbres parallèles O et O' par l'intermédiaire d'une bielle dont les extrémités sont liées à deux plateaux solidaires en rotation des arbres O et O'. Avec une seule bielle, la transmission présente deux *points morts* et une plage utile ne dépassant pas 90° ($45^\circ < \theta < 135^\circ$ sur la figure 18a), car au-delà les efforts de transmission dans la bielle croissent fortement, alors que la raideur devient très faible du fait du bras de levier réduit h . Aussi, ce type de transmission comprend généralement deux bielles (figure 18b) dont les points d'attache sur les plateaux O et O' sont décalés de 90° de sorte qu'une bielle puisse transmettre un couple maximal lorsque la seconde est à l'un de ses *points morts*.

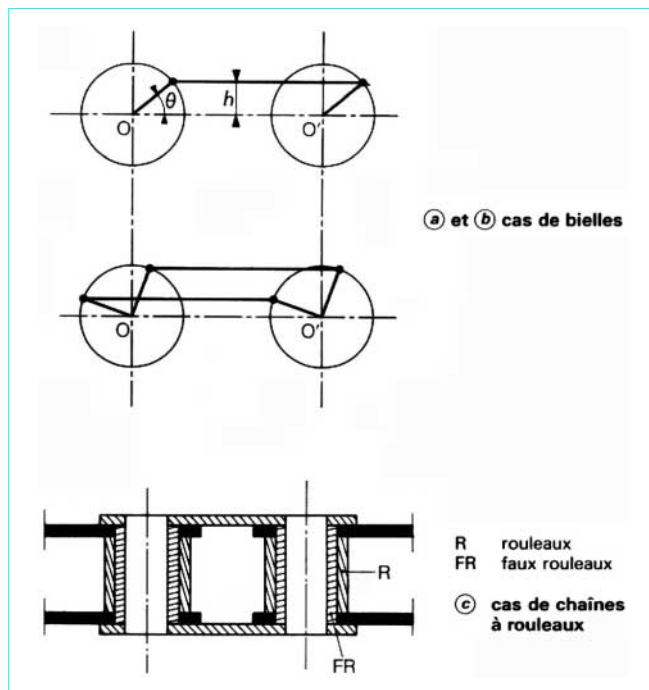


Figure 18 – Transmissions par bielles ou chaînes

2.3.5 Transmission par courroies

Le glissement qui résulterait du fonctionnement d'une transmission par friction exclut les courroies plates ; seules les **courroies crantées** (article *Poulies et courroies de transmission. Entraînement par adhérence* [B 5 680] dans ce traité) sont utilisées en robotique.

Ces courroies sont constituées d'une âme à haut module d'élasticité, qui transmet la puissance, enrobée dans le corps de la courroie en élastomère. Les dents en font partie ou y sont rapportées ; elles sont recouvertes par un tissu, généralement de *Nylon*, qui offre une bonne résistance à l'usure tout en présentant un bas coefficient de frottement. Elles transmettent des déplacements et efforts entre deux poulies, dont le rapport des diamètres est l'inverse du rapport ω_s/ω_e de transmission.

Les courroies sont caractérisées par un effort nominal (exprimé en newtons), qui vaut de l'ordre de 40 fois le pas (exprimé en millimètres) par 25 mm de largeur ; l'effort transmissible acceptable lui est inférieur et vaut, pour des applications en robotique, environ :

- $10 \times \text{pas (mm)}/25 \text{ mm}$ de largeur pour de faibles largeurs de courroie (6,25 mm) ;
- $20 \times \text{pas (mm)}/25 \text{ mm}$ de largeur pour des largeurs de l'ordre de 25 mm ou supérieures.

Afin que les brins de la courroie soient toujours tendus, la courroie est préalablement mise en tension, à une valeur voisine de la moitié de la tension maximale qu'elle subira en cours de fonctionnement ; c'est cette tension préalable qui procure une raideur acceptable à la transmission par courroie.

Néanmoins, cette raideur reste relativement faible par rapport à des transmissions par matériaux métalliques ; aussi les courroies sont-elles toujours utilisées, sauf pour de très faibles charges, en amont d'un réducteur, où les couples à transmettre sont encore faibles (dans ces conditions, la raideur de la courroie, ramenée en sortie d'un réducteur de rapport de réduction R , sera multipliée par R^2 par rapport à sa valeur sur l'arbre d'entrée du réducteur).

2.3.6 Transmission par chaînes

Les chaînes utilisées en robotique sont des **chaînes à rouleaux** (figure 18c) constituées de rouleaux R libres autour d'axes ou de faux rouleaux FR et reliés par des maillons intérieurs et extérieurs. Ces rouleaux engrènent avec des roues dentées pour constituer une transmission dont le rapport moyen (ω_s/ω_e) est l'inverse de celui du nombre de dents N des deux roues. Le qualificatif moyen met en évidence la non-homocinéticité de la transmission par chaînes ; celle-ci n'est néanmoins pas rédhibitoire puisque la variation de vitesse tangentielle qu'elle provoque, à vitesse de rotation de poulie constante, n'est que de 1,7 % pour le nombre minimal de dents recommandé (17) et décroît comme $1/N^2$.

La capacité de charge des chaînes est très nettement supérieure à celle des courroies ; elle vaut (exprimée en newtons) 500 à 1 500 fois le pas (exprimé en millimètres) pour une chaîne simple, et 2 ou 3 fois plus pour des chaînes doubles ou triples. La vitesse linéaire de déplacement de la chaîne est limitée par les chocs qui se produisent lors de l'engrènement du fait des discontinuités de la vitesse radiale qui l'accompagnent ; la vitesse maximale est en général comprise entre 10 et 25 m/s lorsque le pas évolue entre 38,1 et 12,7 mm, elle varie en fonction du nombre de dents des roues, de la précision de la chaîne et des roues et des conditions de lubrification.

Des chaînes à rouleaux sont utilisées sur les robots pour :

- transmettre le mouvement d'un motoréducteur à un axe ;
- maintenir constante la position des axes d'un poignet lorsque les axes 2 et 3 d'un robot à structure sphérique évoluent (figure 8) ;
- transmettre les efforts provenant d'un système d'équilibrage, le mouvement étant alors commandé par un motoréducteur.

2.3.7 Paliers

Les axes de robot industriels sont essentiellement des axes de rotation dont le guidage est assuré par des paliers et butées à corps roulants. Très souvent, dans le but d'éliminer les jeux, le guidage est réalisé par une paire de roulements à rouleaux coniques, ou à billes à contacts obliques, précontraints. Le dimensionnement des paliers répond à une double contrainte de durée de vie (§ 4.4) et de raideur.

2.4 Capteurs

Différents types de capteurs sont utilisés sur les robots :

- **capteurs de position** (codeurs incrémentaux, codeurs optiques absolus, résolveurs, etc.), qui détectent la position des actionneurs et, plus rarement, celle des axes ;
- **capteurs de vitesse** (dynamos tachymétriques, résolveurs, etc., traitement numérique de la position), dont l'information est utilisée pour stabiliser les boucles d'asservissement de position ;
- **capteurs d'effort ou de pression**, utilisés principalement au niveau des outils (préhenseurs, par exemple).

Nous ne traiterons ici que des capteurs de position, les seuls qui soient implantés sur tous les robots industriels, en notant qu'ils seront probablement à terme les seuls capteurs nécessaires pour la commande en position des robots, l'image de la vitesse étant délivrée soit par des capteurs *position-vitesse* comme les résolveurs, soit par traitement de l'information émise par le capteur de position.

Nous commencerons par établir les principaux critères de performances avant de décrire brièvement les caractéristiques de ces capteurs.

2.4.1 Critères de performances

■ Le premier critère est évidemment la **résolution du capteur**, qui représente la plus petite variation de position qu'il est capable de discerner. Elle est exprimée par un nombre N en points par tour de l'arbre du capteur ou en minutes d'angle.

Une résolution de 0,1 mm au niveau d'un outil situé à 2 m de l'axe de rotation nécessite une résolution du capteur de :

$$\frac{2\pi \times 2\,000 \text{ (mm)}}{0,1 \text{ (mm)}} \approx 125\,000 \text{ points/tour de l'axe}$$

Le coût d'un tel capteur à haute résolution fait qu'il lui est préféré un capteur de la position du moteur et non de l'axe ; un rapport de réduction de 100 ramène alors la résolution nécessaire à 1 250 points par tour.

■ La **vitesse de rotation maximale** (contrainte mécanique) et la **fréquence de comptage maximale** (contrainte électronique) définissent les limitations en vitesse et en produit *vitesse* \times *nombre de points par tour* ; elles sont rarement pénalisantes en robotique.

■ La **tenue à l'environnement** des capteurs est de grande importance du fait des sollicitations thermiques, mécaniques (vibrations), atmosphériques (protection vis-à-vis des poussières et liquides) et électriques (§ 3.6) qu'ils subissent.

■ Enfin, une caractéristique essentielle est la **nature de l'information** que les capteurs délivrent ; elle est **incrémentale** ou **absolue** (article *Capteurs* [R 410] dans le traité Mesures et Contrôle) :

— *incrémentale* : l'information est perdue lors des coupures de l'alimentation, à moins que l'information de position ne soit conservée par le biais d'une alimentation secourue, intégrée ou non à l'armoire de commande. Avec un capteur incrémental, il est

nécessaire, lors des remises sous tension, de réinitialiser le comptage des impulsions qu'ils émettent à l'aide d'un détecteur d'initialisation implanté sur l'axe ou dans les étages intermédiaires des chaînes cinématiques ;

— *absolue* : il y a lieu de distinguer entre capteur situé sur l'axe du robot proprement dit (situation très peu fréquente du fait du coût d'un capteur à haute résolution) et capteur situé sur l'axe du moteur. Dans ce dernier cas, le capteur est absolu sur un tour du moteur mais pas de l'axe ; une procédure d'initialisation est donc également nécessaire après une perte d'alimentation pour relocaliser le *tour moteur* dans la *course axe*, à moins qu'un ou deux autres capteurs soient utilisés pour effectuer automatiquement cette relocalisation.

2.4.2 Capteurs de position utilisés en robotique

Le tableau 2 compile les principales caractéristiques des deux types de capteurs de position les plus utilisés en robotique.

■ Les **codeurs incrémentaux** émettent des impulsions résultant du passage d'un disque, qui comporte à sa périphérie une succession de traits opaques sur fond transparent, entre deux sources lumineuses et deux cellules réceptrices, les deux ensembles *émetteur-récepteur* étant décalés d'un quart de pas pour permettre la détection du sens de rotation.

■ Les **résolveurs** sont des machines électriques tournantes qui comportent au moins deux bobinages, l'un alimenté en courant alternatif constituant l'inducteur, et l'autre dans lequel s'établit une tension induite qui est l'image analogique de la position du rotor par rapport au stator. Un module de conversion transforme cette image en grandeur numérique et fournit une information analogique de vitesse.

Tableau 2 – Performances des codeurs incrémentaux et des résolveurs

Critères de performances	Codeurs incrémentaux	Résolveurs
Résolution	classiquement, $N = 100$ à $2\,000$ points/tour (+ multiplication électronique par 4 possible)	classiquement, 2^8 (256) ou 2^{10} (1 024) points/tour
Précision.....	$\approx 20^\circ/N$ (soit $3'$ pour $N = 400$ points/tour)	7 à $15'$
Vitesse de rotation maximale..... (tr/min)	$6\,000$ à $12\,000$	$8\,000$ à $20\,000$
Fréquence de comptage maximale ... (kHz)	150 à 300	≈ 500
Tenue à l'environnement : — température maximale de fonctionnement (°C) — vibrations	60 à 70 $\leq 100 \text{ m/s}^2$ jusqu'à $2\,000 \text{ Hz}$	≥ 70 100 à 200 m/s^2 jusqu'à $2\,000 \text{ Hz}$
Tolérance sur tension d'alimentation	$\pm 5 \%$	très élevée
Nature de l'information émise	incrémentale	absolue sur un tour

3. Performances des robots industriels

Comme tout produit, les robots industriels présentent des performances limites que l'utilisateur doit connaître. Cependant, la complexité des robots industriels, due principalement à leur nombre d'axes élevé, fait qu'une définition exhaustive de leurs performances nécessiterait un grand nombre de critères dont l'exploitation serait délicate. Aussi trouvera-t-on ci-après les critères de performances simplifiés les plus fréquemment utilisés pour caractériser les possibilités des robots.

Nota : pour plus de détails, le lecteur pourra se reporter utilement à l'article *Évaluation des performances des robots industriels* [R 7 800] dans le traité Mesures et Contrôle.

3.1 Volume de travail

Il est constitué de l'ensemble des points que peut atteindre un élément particulier du robot :

- en général, le centre du poignet ;
- parfois, le centre du plateau terminal du robot ou d'un outil fictif.

Ce volume de travail est caractéristique de la structure des premiers axes du robot, en général les 3 premiers. Aussi la figure 19 représente-t-elle, sur deux plans, les allures des volumes de travail des principales structures de robots présentées au paragraphe 1.3.2.1 (figures 3 et 4) :

- figure 19a : structure sphérique, à chaîne cinématique à course non limitée sur les axes 2 et 3 (figure 3a) ;
- figure 19b : structure sphérique à parallélogramme sur les axes 2 et 3 (figure 3b) ;
- figure 19c : structure sphérique à parallélogramme et vis à roulement sur les axes 2 et 3 (figure 3c) ;
- figure 19d : structure polaire (figure 4b) ;
- figure 19e : structure cylindrique (figure 4d) ;
- figure 19f : structure type portique (figure 4e).

Ces données qualitatives doivent être complétées de données quantifiées telles que, pour les robots à structure sphérique, polaire ou cylindrique :

- l'élongation maximale E ;
- les plus grands rectangles R inscrits dans la section radiale de travail ;
- la plus grande horizontale H radiale inscrite dans le volume de travail.

Le tableau 3 indique les ordres de grandeur les plus fréquents de ces caractéristiques pour quelques applications types. Ce tableau met en évidence une relation étroite entre les dimensions des bras d'un robot et de son aire de travail, et les applications auxquelles il est destiné.

3.2 Charge

Les couples et forces subis par les différents éléments des chaînes cinématiques des robots résultent de l'effet combiné de différents efforts :

- **efforts statiques**, dus :
 - aux forces de gravité qui s'exercent sur la charge maintenue et sur la structure,
 - aux dispositifs d'équilibrages qui compensent, au moins partiellement, les forces précédentes,
 - aux forces et couples exercés par un outil ;

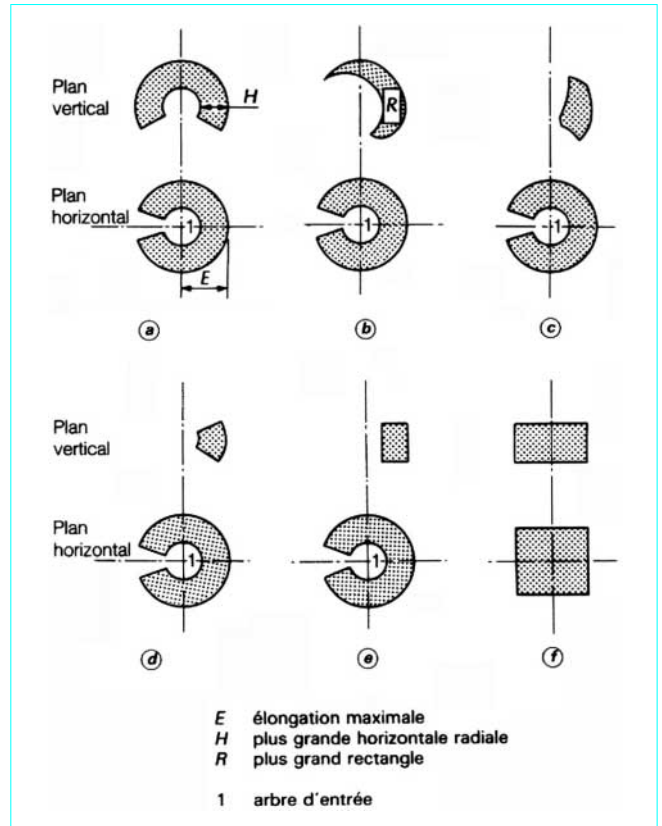


Figure 19 – Volumes de travail associés à différentes structures mécaniques

— **efforts dynamiques**, dus aux effets des vitesses et accélérations des différents axes i .

Chaque élément e d'un axe i du robot est ainsi soumis à une accélération totale :

$$\vec{\gamma}_t = \vec{\gamma}_{ei} + \vec{\gamma}_{ri} + \vec{\gamma}_{ci}$$

$$\vec{\gamma}_{ei} = \sum_h \left[\frac{d\omega_h}{dt} \wedge \vec{d}_{eh} - \omega_h^2 \vec{d}_{eh} \right]$$

$\vec{\gamma}_{ei}$ représente l'accélération d'entraînement de la part des axes amonts h si ces axes sont de rotation, avec ω_h vitesse de l'axe amont h et d_{eh} distance de l'élément e aux axes amont h .

$$\vec{\gamma}_{ri} = \frac{d\omega_i}{dt} \wedge \vec{d}_{ei} - \omega_i^2 \vec{d}_{ei}$$

$\vec{\gamma}_{ri}$ représente l'accélération relative de l'élément e dans un repère lié à l'axe i , supposé de rotation.

$$\vec{\gamma}_{ci} = 2 \vec{\omega}_i \wedge \vec{v}_{ei}$$

$\vec{\gamma}_{ci}$ représente l'accélération de Coriolis, avec v_{ei} vitesse relative de l'élément e dans un repère lié à l'axe i .

Tableau 3 – Caractéristiques typiques de robots industriels en fonction de différentes applications

Critères de performances	Applications			
	Soudage par résistance Manutention lourde	Manutention moyenne Usinage	Soudage à l'arc Manutention légère Usinage léger finition	Petit assemblage
Volume de travail :				
— élancement maximale E (m)	$\approx 2,4$	≈ 2	$\approx 1,4$	0,5 à 1
— surface du plus grand rectangle R inscrit dans la section radiale de travail (m ²)	1,5	1	0,4	0,08
— plus grande horizontale radiale H (m)	1,6	1,1	0,8	0,4
Charge :				
— masse véhiculée m (kg)	60 à 150	15 à 50	6 à 15	1 à 6
Rapidité :				
— vitesse axe 1 (rad/s)	1 à 2	1 à 2	1,5 à 3	1,5 à 3
axes 2 et 3 (rad/s)	1	1	1	3 à 4
axes 4, 5 et 6 (rad/s)	2 à 3	2 à 4	6	4 à 8
Facteur de service :	0,2 à 0,5 pour l'axe 1 0,5 à 1 pour les axes 2 et 3 1 pour les axes de poignet 4, 5 et 6			1
Précision :				
— répétabilité de pose monodirectionnelle (mm)	$\pm 0,3$ à $\pm 0,5$	$\pm 0,3$	$\pm 0,2$	$\pm 0,05$

Les effets résultant de ces actions statiques et dynamiques sont fonction à tout moment des positions, vitesses et accélérations des différents axes. D'une façon stricte, la caractérisation de la charge que peut manipuler un robot devrait tenir compte de ces paramètres. Il en résulterait une grande complexité que les données techniques des constructeurs évitent en ne caractérisant la capacité de charge d'un robot qu'à partir d'un nombre restreint de paramètres, qui sont généralement :

- la masse véhiculée m (tableau 3 pour différentes applications) ;
- ou la masse m et les distances du centre de gravité de cette masse aux axes du poignet ;
- ou la masse m et les inerties totales maximales par rapport aux axes du poignet.

Néanmoins, la capacité de charge d'un robot est mieux caractérisée par la donnée de trois paramètres, par exemple :

- la masse m de la charge ;
- les distances d_i de son centre de gravité aux axes du poignet ;
- les inerties propres I_{oi} de la charge par rapport à des axes i passant par son centre de gravité et parallèles aux axes du poignet.

Ce sont ces paramètres qui figurent sur l'abaque de la figure 20, lequel met en évidence l'interrelation entre la capacité de charge et les performances d'un robot. La zone supérieure de l'abaque correspondant aux fortes masses n'est, en effet, accessible que pour des performances de vitesses et d'accéléérations réduites.

À une charge donnée, et en fonction de performances de rapidité (§ 3.3) et de précision (§ 3.5) données, correspond un dimensionnement des chaînes cinématiques et de la structure d'un robot :

- le dimensionnement des chaînes cinématiques est abordé sous l'angle fiabilité-durée de vie, développé au paragraphe 4.4 ;
- le dimensionnement de la structure résulte de considérations plus variées telles que :

- la résistance des matériaux la constituant et, plus encore, la raideur des bras, quoique, en général, les défauts de raideur soient plutôt localisés au niveau des articulations,

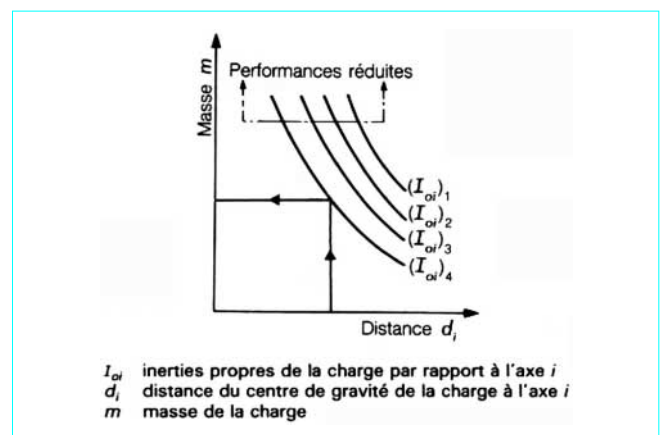


Figure 20 – Capacité de charge d'un robot industriel pour différentes valeurs d'inerties propres données

- la réduction de la masse embarquée dans des limites telles que la charge vue par les actionneurs et chaînes cinématiques excède, dans des limites raisonnables, celle due à la charge utile,
- les contraintes d'encombrement liées aux applications, qui tendent à réduire les dimensions des bras, ou inversement dues à la nécessité d'insérer les organes mécaniques, électriques et pneumatiques de liaison au poignet.

3.3 Rapidité

La rapidité d'un robot dépend :

- des vitesses de ses axes $\dot{\theta}_i$, θ_i étant l'angle qui repère la position de l'axe i ;
- de leurs accélérations $\ddot{\theta}_i$ et, éventuellement, de leur suraccélération $\dddot{\theta}_i$ si l'accélération n'est pas constante ;
- du temps de stabilisation aux points d'arrêt, temps s'écoulant entre le moment où la consigne de position est arrivée à ces points et celui où le robot l'est effectivement à n incréments ou dixièmes de millimètre près.

Elle peut être caractérisée par la donnée des quatre paramètres ci-dessus ; on remarquera néanmoins :

- que le temps de stabilisation est en général une fonction de la géométrie du robot et de sa charge, et que sa définition, en dehors d'une valeur maximale, reste délicate ;
- que l'adéquation de ces quatre données au temps de cycle souhaité par l'utilisateur n'est pas immédiate (passage des coordonnées articulaires à un référentiel utilisateur, gestion du profil des vitesses sur les différents axes, etc.).

Aussi l'utilisateur sera-t-il particulièrement intéressé par la donnée d'un **temps de cycle** :

- soit d'un cycle reconnu comme standard ;
- soit d'un cycle correspondant à un de ses cas d'application, au travers d'une simulation ou d'une faisabilité.

La vitesse des axes du robots reste néanmoins une information d'importance pour juger de la rapidité d'un robot ; c'est de plus la seule donnée relative à la rapidité que l'on trouve sur les catalogues de tous les constructeurs.

Le tableau 3 donne des valeurs usuelles des vitesses articulaires, en fonction des applications robotisées les plus courantes, pour des robots à structure sphérique.

Remarque : la vitesse admissible le long d'une trajectoire quelconque ne peut être déduite aisément de la connaissance des vitesses articulaires ; en effet, de faibles déplacements, en position ou en orientation, peuvent générer des déplacements articulaires importants sur un ou plusieurs axes et nécessiter un temps d'exécution élevé. Il est donc impossible de définir une vitesse sur trajectoire imposée valable quelle que soit la configuration géométrique du robot. Néanmoins, les constructeurs annoncent généralement des vitesses comprises entre 0,5 et 1 m/s, qui correspondent à des trajectoires linéaires ou à un rayon de courbure relativement élevé et ne couvrent pas l'ensemble du volume de travail du robot. Aussi, pour des applications réclamant un suivi de trajectoire précis, l'utilisateur devra consulter le constructeur du robot.

3.4 Facteur de service

Comme définit au paragraphe 2.1.1, le facteur de service caractérise la capacité des axes de robot, en fait la capacité de leur motorisation, à travailler en régime d'accélération/décélération. Le facteur de service doit être voisin de 1 :

- pour les applications à très forte cadence (assemblage, lignes de presse) où les temps de cycle sont de quelques secondes ;
- très souvent pour les axes de poignet qui sont plus sollicités que ceux de positionnement.

Le tableau 3 donne quelques ordres de grandeur en fonction des applications.

3.5 Précision

La répétabilité et la précision des robots industriels sont caractérisées par des critères qui font l'objet de définitions normalisées (article *Évaluation des performances des robots industriels* [R 7 800], dans le traité Mesures et Contrôle). Ainsi, la norme AFNOR E 61-103 distingue les critères suivants.

- L'**exactitude de pose locale** est définie par les distances, en translation et en orientation, entre le point appris et le barycentre des points restitués. La valeur de ce critère dépend fortement des trajectoires respectives d'apprentissage et de restitution ; elle n'est donc qu'indicative et peu utilisée.

- La **répétabilité de pose monodirectionnelle** est caractérisée par le rayon de la sphère englobant l'ensemble des points restitués à l'issue de trajectoires identiques (figure 21). C'est aujourd'hui le critère le plus utilisé et représentatif du fait que les points de trajectoire sont acquis au travers d'un apprentissage, puis restitués en fonctionnement automatique selon une trajectoire immuable. Le tableau 3 donne des valeurs usuelles pour différentes applications.

- La **répétabilité de pose multidirectionnelle** est exprimée par la distance entre les barycentres des nuages de points restitués pour différentes trajectoires (figure 21). Un cas particulier est obtenu lorsqu'un même point est atteint selon deux trajectoires opposées ; on appelle alors **réversibilité** la distance entre les barycentres des points restitués selon ces deux trajectoires.

- L'**exactitude de pose** est un critère qui caractérise la précision du robot lorsque la trajectoire est apprise hors ligne, par exemple à partir d'un poste CAO (Conception Assistée par Ordinateur), elle compare les distances entre deux poses programmées et les barycentres des points restitués. Outre les inexactitudes de pose locale et de répétabilité, elle intègre les écarts entre le modèle géométrique du robot et sa réalité physique ; des procédures d'étalonnage sont parfois utilisées pour minimiser cet écart.

- La **dérive de la pose atteinte** introduit, par rapport aux définitions précédentes, le facteur temps. En effet, les critères d'exactitude de pose et de répétabilité s'appliquent à un nombre de restitutions restreint qui ne prend pas en compte les évolutions lentes dans le temps. Parmi celles-ci figure la dérive thermique due à l'échauffement des moteurs et à la dilatation des composants des chaînes cinématiques, notamment des vis à roulements. Elle se caractérise par une constante de temps qui est en général de l'ordre de 1 à 3 h.

- L'**exactitude et la répétabilité de trajectoire** définissent des performances similaires à celles de pose ; elles représentent respectivement la distance de la trajectoire apprise à la ligne joignant les barycentres des points restitués et le rayon du cylindre enveloppe de ces points.

3.6 Sensibilité à l'environnement

Les robots industriels doivent accepter les sollicitations de l'environnement dans lequel ils évoluent.

L'**environnement climatique** est caractérisé par :

- une température ambiante, en général limitée par la tenue des moteurs électriques (dont le couple nominal, défini pour 40° C, décroît au-dessus de cette valeur) et par celle des composants électroniques de l'armoire de commande ;

- un degré d'humidité ;

- un niveau d'étanchéité par rapport aux polluants solides et liquides : en général, un indice de protection IP 54 (NF C 20-010), qui garantit une protection contre l'introduction de poussières et contre les projections d'eau, est suffisant pour la plupart des environnements, voire surabondant.

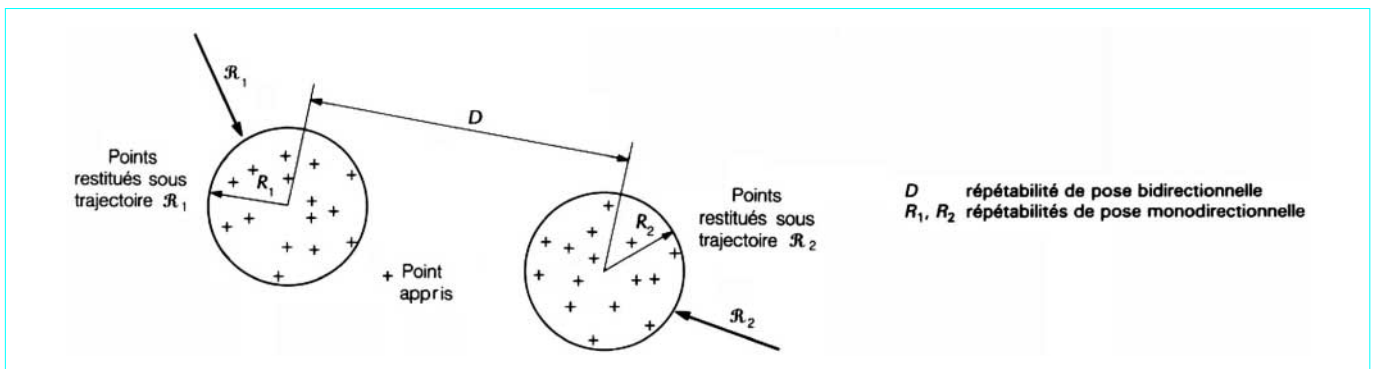


Figure 21 – Répétabilité de pose mono- et bidirectionnelle

Tableau 4 – Niveaux de perturbations minimaux pour les robots industriels (d'après la norme NF E 61-115)

Types de perturbations	Indice de sécurité		Comportement du robot
	Norme	Niveau	
Perturbations de la tension d'alimentation, des entrées/sorties, des circuits électriques : — salves d'impulsions	CEI 801-4	2 3	Conservation intégrale des fonctions de sécurité. Idem, ou arrêt du robot.
— parasites à forte énergie	CEI 801-5	1 - mode série 2 - mode parallèle	Conservation intégrale des fonctions de sécurité.
Variations de l'alimentation générale : — variations lentes (essai à 1 V/s) de - 15 à + 10 % de la valeur nominale	Le comportement doit être strictement défini (mais les performances peuvent être dégradées).
— variations rapides (coupures de durée 10 ms à fréquence 1 Hz)	Conservation intégrale des fonctions de sécurité.
Décharges électrostatiques	CEI 801-2 NF C 46-021	2 3	Conservation intégrale des fonctions de sécurité. Idem ou arrêt du robot.
Champs électromagnétiques rayonnés	CEI 801-3 NF C 46-022		En cours d'étude pour leur application aux robots industriels.

La norme NF C 79-130 préconise des niveaux de tenue aux conditions atmosphériques pendant le transport, le stockage et l'utilisation.

L'environnement mécanique nécessite une résistance adéquate aux vibrations et chocs lors du transport et de l'exploitation.

Quant à l'environnement électrique, les susceptibilités de l'armoire de commande et du robot doivent être testées ; ces tests concernent particulièrement (tableau 4) :

- les perturbations de la tension d'alimentation et des entrées-sorties, notamment sous l'effet de salves d'impulsions (norme CEI 801-4) et de parasites à forte énergie (norme CEI 801-5) ;
- les variations de l'alimentation générale, lentes (entre - 15 et + 10 % de la tension nominale) et rapides (coupures de 10 ms à une fréquence de 1 Hz) ;
- la susceptibilité aux décharges électrostatiques (normes CEI 801-2 et NF C 46-021) et aux champs électromagnétiques rayonnés (normes CEI 801-3 et NF C 46-022).

4. Exploitation des robots industriels

L'utilisateur de robots industriels en attend un fonctionnement fiable et de sécurité. Ce sont ces aspects que nous allons examiner en nous plaçant du point de vue de la *sécurité* et de la *disponibilité opérationnelle*, cette dernière étant fonction de la fiabilité et de la maintenabilité de l'équipement.

4.1 Sécurité

Les exigences de sécurité pour les robots et les sites robotisés font l'objet de trois normes, qui définissent le vocabulaire (norme AFNOR E 61-110), les précautions à prendre lors de la conception et la construction de robots industriels (NF E 61-115) et les règles à respecter pour la conception de sites robotisés (NF E 61-120).

Nous commencerons par traiter de ce dernier point avant d'entreprendre une étude plus approfondie de la sécurité des robots industriels.

4.1.1 Sécurité des sites robotisés

Comme toute autre machine, les robots industriels présentent des risques, qui peuvent être aggravés par certaines de leurs caractéristiques :

- grand nombre d'axes, donc de possibilités de mouvements ;
- vitesses très élevées, de plusieurs mètres par seconde, et accélérations de plusieurs mètres par seconde au carré, voire de plusieurs g .

Aussi, la première précaution consiste à **interdire**, dans la mesure du possible, l'**accès à la zone de travail du robot**, particulièrement en fonctionnement automatique. L'isolement du robot pendant cette phase peut être réalisé par des panneaux rigides (grillages, matériaux transparents, etc.) ou par des filets ; la norme NF E 09-010 définit certaines caractéristiques de ces protecteurs et des contraintes d'implantation autour des machines qu'ils isolent.

Les **portillons d'accès** doivent être munis de **dispositifs de verrouillage** (norme AFNOR E 09-051) qui provoquent la coupure de puissance sur le robot lorsqu'un opérateur pénètre dans la zone interdite ; ces portillons doivent rester naturellement en position d'ouverture, afin d'éviter qu'une fermeture intempestive n'autorise la remise sous puissance du robot. Les dispositifs de verrouillage sont raccordés au dispositif d'arrêt de sécurité du robot (§ 4.1.2).

4.1.2 Sécurité des robots industriels

Dans ce paragraphe, nous aborderons les problèmes de sécurité liés à la conception et la construction des robots, indépendamment de leur application et de leur environnement. En grande partie, la sécurité est régie pour les robots industriels par les mêmes règles que pour les machines automatiques. Pour la plupart, ces règles s'adressent au système de commande, matériel et logiciel, et ne sont pas du ressort de cet article ; nous les évoquerons néanmoins rapidement avant d'examiner les implications de certains aspects de la sécurité sur la conception mécanique des robots industriels.

4.1.2.1 Règles concernant le système de commande

Les dangers que représente un robot dépendent de son mode de fonctionnement ; ils sont évidemment moindres en phase de production automatique qu'en phase de mise au point où des opérateurs se trouvent à proximité immédiate du robot sous asservissement.

■ Un **premier impératif consiste donc à distinguer sans ambiguïté les modes de marche et à imposer des règles strictes pour leur gestion** :

- organes de changements de modes verrouillables ;
- prise en compte des verrouillages et interverrouillages des protecteurs ;
- sélection des modes de marche par circuits à logique câblée ;
- arrêt de sécurité en cas de perte de mode ;
- imposition d'une vitesse réduite dans toutes les phases faisant intervenir un opérateur à proximité du robot, par des moyens garantissant que cette vitesse ne sera pas dépassée, même en présence d'une défaillance ; on peut exceptionnellement déroger à cette dernière règle pour permettre aux opérateurs de surveiller précisément le comportement du robot et de ses équipements à vitesse normale d'exécution :

- en fonctionnement de point d'arrêt à point d'arrêt, après validation de chaque mouvement,
- par un mode de fonctionnement spécifique, réalisé par un circuit à logique câblée.

■ Un **second point à mettre en valeur est celui de la gestion des arrêts de sécurité** qui sont :

- l'**arrêt d'urgence**, prioritaire sur tout autre ordre de commande et qui provoque l'arrêt du robot dans le temps et sur la distance les

plus brefs compatibles avec le dimensionnement des organes mécaniques et électriques du robot. L'arrêt d'urgence provoque :

- la mise à zéro de la consigne d'asservissement de vitesse et le blocage des amplificateurs de puissance,
- un freinage rhéostatique des moteurs,
- un déclenchement des freins mécaniques.

Il s'effectue par l'intermédiaire d'un circuit à logique câblée et assure un état arrêté stable. Par contre, le temps et la distance d'arrêt étant les critères prépondérants, le robot s'écarte de sa trajectoire pendant la phase d'arrêt d'urgence et doit donc être ramené sur trajectoire lors de la remise en cycle ;

— l'**arrêt contrôlé**, ordre le plus prioritaire après l'arrêt d'urgence ; il consiste en un arrêt sous asservissement du robot, suivi d'une coupure de puissance. Moins brutal que l'arrêt d'urgence, il sollicite moins les organes mécaniques du robot et assure le respect de la trajectoire programmée jusqu'à la coupure de la puissance, au détriment du temps d'arrêt.

4.1.2.2 Impératifs de conception et construction liés aux contraintes de sécurité

Ces impératifs conduisent à équiper les robots de composants de sécurité et visent à assurer un fonctionnement de sécurité, notamment des circuits à fluides sous pression et en présence de perturbations électriques ou électromagnétiques.

■ Composants de sécurité

En cas de perte du contrôle sous asservissement, un système de blocage, tel que des freins à manque de pression ou de courant, doit maintenir immobile les axes du robot, tout au moins les axes principaux. Cette imposition vise généralement les 3 premiers axes des robots qui sont des axes à grands débattement et élancement, excepté les axes dont les positions sont naturellement stables, comme les axes verticaux de rotation. Des considérations de sécurité imposent aussi la présence de butées mécaniques sur tous les axes dont la course doit être inférieure à 360° . Ces butées peuvent être doublées de détecteurs électromécaniques de fin de course et/ou d'une surveillance logique. Cette dernière peut être plus sophistiquée et prendre la forme :

- d'une limitation de débattement dans un repère *axes robot* ou géométrique ;
- d'une limitation de débattement modulable en fonction de la vitesse afin de provoquer un arrêt dès que l'on détecte que, compte tenu de la position et de la vitesse à un moment donné, on va dépasser la valeur des butées logicielles.

■ Sécurité pour les circuits fluides

Qu'ils soient hydrauliques ou pneumatiques, source d'énergie pour les actionneurs ou pour les dispositifs d'équilibrage, ces circuits doivent assurer qu'un mouvement brutal du robot ne résultera pas d'un manque de puissance, partiel ou total, ni de son rétablissement après déficience. Cette condition est, en général, remplie par des clapets maintenant un niveau de pression convenable en cas de perte de puissance, associés à des freins mécaniques sur les axes concernés.

De plus, des circuits doivent être munis de limiteurs de pression les garantissant contre les risques de surpression (par exemple, les limiteurs de pression LP_1 de la figure 9).

■ Fonctionnement de sécurité vis-à-vis des perturbations électriques et électromagnétiques

Le comportement des robots face à ces perturbations a été examiné en tant que critères de performances au paragraphe 3.6. La norme NF E 61-115 fixe vis-à-vis de ces critères des niveaux de perturbations qui doivent :

- soit ne pas réduire le potentiel des fonctions de sécurité du robot ;
- soit provoquer l'arrêt du robot.

Le tableau 4 indique ces niveaux de perturbations qui font référence à des normes CEI ou AFNOR.

4.2 Maintenabilité

La disponibilité opérationnelle caractérise l'aptitude d'un système à remplir, ou à être en état de remplir, une fonction à un instant donné ou dans un intervalle de temps donné (norme AFNOR X 60-503). Elle est fonction de la fiabilité du système (§ 4.4) et de sa maintenabilité, c'est-à-dire de son aptitude à être maintenu ou rétabli dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise. C'est cette aptitude, appliquée aux robots industriels, que nous allons maintenant examiner. Néanmoins, il convient auparavant de préciser la définition précédente en relevant que la maintenabilité d'un système est relative à des conditions données :

- d'utilisation ;
- de procédures d'intervention ;
- de moyens humains (formation) et matériels (outillages, pièces de rechange, etc.).

La maintenabilité est caractérisée par un temps moyen pour réparer après une panne, dénommé *MTTR* (*Mean Time To Repair*).

Un niveau de maintenabilité élevé s'obtient en limitant le temps d'immobilisation que les opérations de maintenance curative nécessitent. Outre la conception du robot qui doit faciliter les interventions, les constructeurs proposent à cet effet :

- des sous-ensembles de maintenance qui permettent de remplacer un sous-ensemble défectueux par un sous-ensemble préréglé, limitant ainsi la perte de temps occasionnée par ce remplacement ;
- des procédures et outillages, optimisant les opérations de réparation, ainsi que les temps d'échange associés ;
- des aides logicielles pour faciliter certains réglages, comme le calage des détecteurs de position.

Néanmoins, il ne suffit pas de rendre les moins pénalisantes possible les réparations, il faut aussi les réduire au strict minimum ; pour ce faire, les utilisateurs de robots industriels devront effectuer des opérations de maintenance mécanique et électrique telles que décrites au paragraphe 4.3.

4.3 Maintenances mécanique et électrique

4.3.1 Maintenance mécanique

Les travaux de maintenance préventive à effectuer sur un robot industriel sont en général peu importants ; ils visent les opérations suivantes.

■ **Garantir un fonctionnement correct des organes mécaniques en assurant les conditions de lubrification adéquates.**

Destinées à renouveler l'huile ou la graisse, ces opérations s'effectuent souvent à des périodicités supérieures ou égales à 1 an ou 3 000 h d'exploitation. Elles s'appliquent :

- aux réducteurs mécaniques et à toute la *pignonnerie* présente sur un robot ;
- à certains roulements ;
- aux vis à roulement ;
- à tous les organes de transmission ou d'équilibrage (chaînes, rotules de vérins d'équilibrage, etc.).

Ces renouvellements de produits lubrifiants doivent respecter strictement les instructions du constructeur et, plus précisément, la référence du ou des produits de lubrification préconisés. En effet, les conditions de fonctionnement sur les robots présentent des aspects qui, sans être totalement spécifiques, sont peu présents dans d'autres technologies, et qui ont conduit les constructeurs à homologuer un ou plusieurs produits à l'issue d'une campagne d'essais, souvent longue, sur leurs propres robots.

Cette remarque, particulièrement sensible pour les graisses, s'applique par exemple au comportement de ces lubrifiants lors de transmission d'efforts élevés avec inversion continue du sens de déplacement ; ces conditions se rencontrent constamment en robotique où la recherche d'une précision à un incrément près de position conduit à des microdéplacements sous charge qui tendent à dégrader les surfaces en regard par *fretting*-corrosion. L'expérience a montré que les comportements sous ce type de sollicitations de produits lubrifiants réputés semblables et compatibles pouvaient être considérablement différents dans des conditions précises d'utilisation en robotique.

■ **Effectuer les réglages préconisés par le constructeur ;** par exemple :

- régler les tensions des chaînes et courroies de transmission ;
- régler le jeu de certains réducteurs.

Les périodicités de ces opérations sont en général supérieures, parfois largement comme pour les réducteurs, à 3 000 h de fonctionnement.

■ **Contrôler l'état de certains paramètres de fonctionnement du robot :**

- valeurs des pressions d'équilibrage ;
- aspect des soufflets de protection, des câbles, etc.

4.3.2 Maintenance électrique

Les opérations de maintenance liées à la motorisation électrique sont très réduites sur les robots industriels. C'est d'ailleurs l'un des points forts de la technique électrique qui l'a amené à supplanter l'hydraulique dans ce secteur.

La principale opération de maintenance est préventive et consiste à surveiller l'usure des balais des moteurs à collecteur, et à les remplacer au-delà d'un seuil d'usure. Cette surveillance s'effectue selon une périodicité qui est fixée par l'expérience – l'usure des balais étant fonction des conditions d'exploitation, et notamment des points de fonctionnement des moteurs dans le plan couple/vitesse (§ 2.1.4) – mais toujours supérieure à 3 000 h.

Les moteurs synchrones triphasés n'exigent quant à eux aucune maintenance préventive.

4.4 Fiabilité. Durée de vie

La fiabilité d'une installation définit son aptitude à remplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant une durée déterminée (norme AFNOR X 06-501). Elle est caractérisée par un temps moyen de bon fonctionnement entre pannes *MTTF* (*Mean Time Through Failure*).

La fiabilité d'un robot, comme de toute autre machine, est fonction de ses conditions d'utilisation. Elle l'est même plus encore du fait de la diversité de ces conditions ; ainsi un même type de robot peut être utilisé dans une application de soudage à l'arc, avec des faibles vitesses, accélérations et charges et, inversement, dans une application de manutention interpresse, à très faible temps de cycle, pour laquelle les sollicitations seront très élevées.

Il y a donc lieu de déterminer les facteurs dont l'influence sera primordiale sur les principaux composants d'un robot. Ces facteurs sont principalement les suivants.

■ **Les débattements**, angulaires ou linéaires, des axes influent sur les sollicitations des liaisons flexibles : câbles et faisceaux électriques, flexibles, pneumatiques ou hydrauliques, etc., dont la durée de vie (exprimée en nombre de cycles) dépend fortement des contraintes de flexion et de torsion qu'ils subissent, donc de l'amplitude de leurs débattements.

■ Les **vitesse de déplacement** n'influent qu'indirectement et faiblement sur la fiabilité des composants mécaniques, dans la mesure où ceux-ci sont utilisés par le constructeur dans les limites de leurs possibilités. L'influence de la vitesse sera évidemment d'autant plus élevée que le fonctionnement du robot rapprochera les composants de leurs limites d'utilisation, limite exprimée :

— soit par une *vitesse maximale*, par exemple pour les vis à roulement :

- vitesse limite de rotation au-delà de laquelle une résonance risque de se produire,
 - vitesse maximale de déplacement linéaire au niveau des contacts, caractérisée par le produit ND [vitesse (en tr/min) \times diamètre de vis (en mm)] limite et fonction du type d'écrou utilisé ;
- soit par une *caractéristique limite effort/vitesse ou couple/vitesse*, comme pour les courroies de transmission.

En ce qui concerne la motorisation, c'est une relation de ce dernier type qui est à prendre en compte, tout au moins pour les moteurs à collecteur qui supportent difficilement la conjonction de vitesse et courants (donc couples) élevés, comme l'illustre la figure 12 qui montre la caractéristique limite de commutation dans le plan couple/vitesse de ces moteurs.

À l'opposé, il y a lieu de noter, toujours pour les moteurs à collecteur, les risques spécifiques qu'entraîne un fonctionnement sous couple élevé à vitesse nulle. Une telle utilisation, qui correspond au maintien sous asservissement à l'arrêt d'un robot pendant plusieurs heures, nécessite le recours à des balais adaptés à cette contrainte, mais de moindre longévité à vitesse élevée.

■ La **charge véhiculée ou subie par le robot**, ou plus précisément les efforts et couples exercés sur les différents éléments des chaînes cinématiques de robots, est souvent un facteur prédominant pour les organes mécaniques, du fait de leur sensibilité à la charge ; ainsi :

- la durée de vie des roulements, ainsi que des vis et douilles de guidage à roulement (exprimée en nombre de révolutions), varie avec la puissance 3 ou 3,3 de la charge selon que les corps roulants sont sphériques ou cylindriques ; doubler la charge qu'ils supportent réduit dans un rapport 8 ou 10 leur durée de vie ;
- la durée de vie des dentures de roues et pignons est, plus encore, fortement influencée par la charge, puisque variant en deçà de 10^9 cycles avec la puissance 6 de la charge pour la tenue de la couche superficielle et avec la puissance 10 pour la rupture ;
- plus généralement, la durée de vie de tous les composants mécaniques est sensible à la charge, selon une loi qui n'est pas toujours aussi clairement connue que pour les composants précédents.

Les efforts et couples transmis revêtent moins d'importance pour la fiabilité et la durée de vie de la motorisation. En effet, les moteurs électriques sont construits pour supporter des couples de pointe de 5 à 10 fois supérieurs à leur couple nominal, ce qui est exclu en robotique, du fait que les facteurs de service élevés qui sont désirés conduisent à des couples nominaux relativement élevés par rapport aux couples de pointe.

Le facteur de plus grande sensibilité au couple des moteurs reste donc le problème thermique qui nécessite que le couple nominal du moteur soit supérieur au couple moyen efficace qu'il doit développer lorsque ce couple est moyenné sur un temps de l'ordre de grandeur de la constante de temps thermique du moteur. Le dimensionnement des moteurs de robots prend en compte cette contrainte, dont le respect est en outre contrôlé en permanence par des moyens logiciels ou matériels qui garantissent que la température des moteurs reste inférieure à la limite autorisée.

4.5 Disponibilité opérationnelle

La disponibilité opérationnelle d'une installation, et donc des éléments tels que les robots industriels qui la composent, est un critère prépondérant pour les utilisateurs. Nous avons vu au paragraphe 4.2 qu'elle résultait de la maintenabilité et de la fiabilité opérationnelles. Ces dernières doivent être prises en compte dès la phase d'étude par le constructeur selon une méthode systématique ; l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance Et de leur Criticité, norme AFNOR X 06-500) est l'outil employé à cet effet qui, associé à des données quantifiées issues de calculs ou de résultats d'exploitation, permet :

- de détecter dès l'étude les faiblesses qui pénaliseraient fortement la disponibilité opérationnelle et, pour le produit industrialisé, de dégager les points de relative faiblesse ;
- d'estimer les valeurs de la fiabilité, de la maintenabilité et de la disponibilité prévisionnelle.

Munis des résultats de cette étude, les services de maintenance peuvent optimiser leur action en définissant les outillages, pièces de rechange, formation, etc., les mieux appropriés.

La disponibilité opérationnelle pourra atteindre, hors opérations de maintenance préventive, des valeurs très élevées, statistiquement de l'ordre de 99,8 % pour un parc important et des applications dont la robotisation est devenue classique et bien maîtrisée.

Aspects mécaniques en robotique

par **Michel FAYOLLE**

*Ingénieur du Conservatoire National des Arts et Métiers
Professeur à l'École Nationale Supérieure des Techniques Avancées (ENSTA)
Chef du Département Produit, Direction de la Robotique
et de l'Assemblage Automatisé - Renault Automation*

Références bibliographiques

[1] COIFFET (P.). – *Les robots*. Hermes (1981).

[2] FAYOLLE (M.). – *Mécanique des robots*. Cours de l'École Nationale Supérieure des Techniques Avancées (ENSTA) (1986).

Motorisations électrique et hydraulique

[3] LACROUX (G.). – *Les actionneurs électriques pour la robotique et les asservissements*. Tec. Doc. Lavoisier (1985).

[4] GUILLON (M.). – *L'asservissement hydraulique et électrohydraulique*. Dunod (1972).

Réducteurs et organes de transmission

[5] BOUDET (R.). – *Mécanismes et Machines*. Cours de l'École Nationale Supérieure des Techniques Avancées (ENSTA)

[6] HENRIOT (G.). – *Traité théorique et pratique des engrenages*. Tome 1, Dunod (1979).

Normalisation

Association Française de Normalisation AFNOR

NF C 20-010 10-86 Règles communes aux matériels électriques. Classification des degrés de protection procurés par les enveloppes.

NF C 46-021 1-86 Compatibilité électromagnétique principalement pour les matériels de mesure et de commande dans les processus industriels. Prescriptions relatives aux décharges électrostatiques.

NF C 46-022 1-86 Compatibilité électromagnétique principalement pour les matériels de mesure et de commande dans les processus industriels. Prescriptions relatives aux champs de rayonnements électromagnétiques.

NF C 79-130 9-85 Équipement électrique de machines industrielles. Première partie : règles générales.

NF E 04-015 10-84 Dessins techniques. Schémas cinématiques. Symboles graphiques.

NF E 90-010 7-84 Prévention technique des accidents pouvant survenir du fait des risques mécaniques et thermiques engendrés par les machines et appareils. Protection par éloignement des membres supérieurs.

EXP E 09-051 11-83 Prévention technique des accidents pouvant survenir du fait des risques engendrés par les machines et les appareils. Dispositifs de verrouillage et d'interverrouillage associés à des protecteurs.

EXP E 61-005 1-86 Manipulateurs. Classification.

NF E 61-100 8-83 Robot industriel. Définitions. Vocabulaire de base : technologie mécanique et géométrique, commande et programmation.

EXP E 61-103 9-86 Robots manipulateurs industriels. Performances. Première partie : définitions.

EXP E 61-110 9-86 Robots manipulateurs industriels. Prévention des accidents d'origine mécanique. Première partie : introduction.

Pr E 61-115 3-87 Robots manipulateurs industriels. Exigences minimales de sécurité applicables à la conception et à la construction.

Pr E 61-120 1987 Robots manipulateurs industriels. Prévention des accidents d'origine mécanique. Règles pour la mise en œuvre des techniques de protection par obstacles dans la conception des sites de protection.

Pr X 06-500 10-87 Terminologie relative à la fiabilité, maintenabilité, disponibilité.

FD X 06-501 9-84 Applications de la statistique. Introduction à la fiabilité.

FD X 60-503 11-85 Maintenance. Introduction à la disponibilité.

Commission Électrotechnique Internationale CEI

CEI 801-2 1986 Compatibilité électromagnétique pour les matériels de mesure et de commande dans les processus industriels. 2^e partie : Prescriptions relatives aux décharges électrostatiques (NF C 46-021).

CEI 801-3 1984 Compatibilité électromagnétique pour les matériels de mesure et de commande dans les processus industriels. 3^e partie : Prescriptions relatives aux champs de rayonnements électromagnétiques.

CEI 801-4 1985 Compatibilité électromagnétique pour les matériels de mesure et de commande dans les processus industriels. 4^e partie : Exigences en matière de transitoires électriques rapides.

CEI 801-5 1985 Compatibilité électromagnétique pour les matériels de mesure et de commande dans les processus industriels. 5^e partie : Exigences relatives à l'immunité aux tensions de choc.

Constructeurs. Fournisseurs

Moteurs électriques

Infranor SA.

Inland SA.

MASAP (Machines autosynchrones à aimants permanents). Groupe Télématique. Électronique de Puissance.

Mavilor Motors (représenté par Infranor).

Alsthom Parvex.

Ragonot SA.

Réducteurs mécaniques

Cyclo [représenté par Godard (Daniel) SA].

Harmonic Drive (représenté par Gammatic Sarl).

SETAM (Sté des Éts Tamagnaud).

Organes de transmission

Goodyear (représenté par Fogex Sté) - courroies.

Rollix Defontaine SA - couronnes à galets croisés.

RKS-SKF - couronnes à galets croisés.

Transrol (groupe SKF) - vis à rouleaux.

Capteurs

Heidenhain Sarl.

Höhner Automation Sarl.

Litton Precision Products International Inc.

Thomson CSF.

Organismes

Association Française de Normalisation (AFNOR).

Association Française de Robotique Industrielle (AFRI).

Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS).

Laboratoire National d'Essais (LNE).

Union de Normalisation de la Mécanique (UNM).
