

Capteurs d'environnement en robotique

La perception des efforts

par **Guy ANDRÉ**

*Ingénieur diplômé des Arts et Métiers (ECAM) et de l'École Supérieure d'Électricité (ESE)
Docteur-Ingénieur
Chargé de Recherche à l'Institut National de Recherche en Informatique
et Automatique (INRIA)*

1. Principes de base : compliance et perception des efforts.....	R 7 753 - 2
1.1 Capacité d'application d'efforts d'un robot manipulateur	— 2
1.2 Localisation de la compliance	— 3
1.3 Compliance passive.....	— 4
1.4 Compliance active	— 4
1.5 Principe de mesure des efforts d'interaction	— 4
2. Poignets compliants	— 5
2.1 Système à centre de compliance déporté	— 5
2.2 Dispositif à compliance passive	— 6
2.3 Poignet sensible compliant	— 7
3. Capteurs de force et couple en robotique	— 7
3.1 Tables dynamométriques.....	— 7
3.2 Information d'effort au niveau articulaire.....	— 8
3.3 Poignets instrumentés	— 8
3.4 Poignets actifs.....	— 9
3.5 Doigts instrumentés	— 9
4. Traitement des mesures d'effort	— 10
4.1 Identification à partir d'une table dynamométrique.....	— 10
4.2 Identification des efforts à partir d'un poignet instrumenté	— 10
5. Prise en compte des informations d'effort dans la commande .	— 11
5.1 Compliance passive.....	— 11
5.2 Compliance active et contrôle d'effort.....	— 11
5.2.1 Asservissement en force.....	— 11
5.2.2 Contrôle d'impédance	— 11
5.2.3 Contrôle hybride position-force	— 12
5.3 Système de commande	— 12
6. Synthèse et applications	— 13
6.1 Synthèse.....	— 13
6.2 Applications	— 13
6.3 Conclusion.....	— 15
Pour en savoir plus.....	Doc. R 7 753

Le présent article étudie les capteurs d'effort du point de vue des applications en robotique. Pour les principes généraux concernant ces capteurs, le lecteur se reportera aux articles de la rubrique Grandeurs mécaniques du traité Mesures et Contrôle :

— **Force. Couple** [R 1 820] ;

— **Capteurs à jauges extensométriques** [R 1 860].

1. Principes de base : compliance et perception des efforts

En robotique, la maîtrise des **efforts** (forces et couples) est essentielle pour réaliser avec précision des tâches typiques telles que :

- application d'efforts (en statique ou en suivi de contours) ;
- opérations d'assemblage.

La capacité opérationnelle d'un robot manipulateur dépend non seulement de performances intrinsèques dans le domaine des charges applicables (capacité d'application d'efforts), mais surtout de l'aptitude à réaliser une commande adaptative (commande dans laquelle les efforts exercés par le robot sont ajustés en fonction des mesures issues de capteurs).

Le rôle fondamental des capteurs d'effort est donc de détecter et mesurer les efforts de contact entre le robot (ou la charge transportée) d'une part, et l'environnement sur lequel il intervient d'autre part.

Alors que le contrôle en position est parfaitement approprié lorsque le robot manipulateur décrit une trajectoire dans l'espace libre, une reconfiguration du contrôle, incluant généralement un **asservissement en force**, est nécessaire dès lors que l'effecteur (ou la pièce transportée) entre en contact avec l'environnement.

Nota : l'effecteur est l'organe terminal du robot : préhenseur ou outil spécialisé de perçage, de meulage, d'ébavurage, etc.

Une interaction robot-environnement caractérisant une tâche robotique se traduit par une **relation entre position et force**. Cette relation fait intervenir la **raideur** du robot [de façon générale, on peut définir la raideur comme la force qu'il est nécessaire d'appliquer à un système élastique pour obtenir une elongation unité (§ 3)]. Or la raideur globale du robot a deux origines :

- la raideur mécanique naturelle de la chaîne cinématique du manipulateur ;
- la raideur issue des asservissements de commande.

Par ailleurs, toute erreur de positionnement relatif entre une pièce liée à l'effecteur et l'environnement se traduit par des efforts de contact. En robotique, le principe de base consiste en une méthode de correction de cette erreur de positionnement à l'aide d'un **système compliant**.

On définit la compliance comme la propriété d'engendrer un décalage correcteur de position sous l'effet des efforts d'interaction. On distingue deux cas, selon la technique utilisée :

- **compliance passive**, résultant de la déformabilité d'un dispositif mécanique sous l'effet d'une force extérieure (§ 1.3) ;
- **compliance active**, mettant en jeu une chaîne de mesure d'effort et une loi de commande qui génère des manœuvres de correction et de guidage pour ajuster l'effort d'interaction (§ 1.4).

1.1 Capacité d'application d'efforts d'un robot manipulateur

La première condition pour utiliser un robot manipulateur en application d'efforts est la vérification du domaine des charges applicables.

Les performances d'un manipulateur composé d'une chaîne polyarticulée comprennent (norme ISO 8373) :

— l'**effort maximal applicable** : la figure 1 illustre la capacité d'application d'efforts au niveau de l'organe terminal du robot, pour un manipulateur dont les couples moteurs (maximaux) au niveau articulaire sont connus ; on montre que l'on obtient un ellipsoïde de force ;

— la **compliance statique** : elle est définie par le déplacement maximal dX que subit l'organe terminal du manipulateur par unité de force appliquée dF ; dans l'espace opérationnel, on a :

$$dX = C_x dF_x$$

avec C_x compliance,

X coordonnées opérationnelles.

Nota : l'espace opérationnel est défini dans l'article *Modélisation et commande des robots manipulateurs* [S 7 730] dans le présent traité.

Pour une chaîne polyarticulée, on montre qu'un ellipsoïde de compliance définit le fléchissement maximal dans une direction donnée et en un point donné de l'espace de travail (figure 2).

La raideur K est l'inverse de la compliance.

Il existe une relation fondamentale entre la raideur des articulations et la raideur obtenue au niveau de l'effecteur dans l'espace opérationnel :

$$C_x = J[K_q]^{-1} J^T$$

où K_q est la matrice diagonale des raideurs articulaires,

J est la matrice jacobienne.

Cette relation peut être utilisée dans certaines lois de commande.

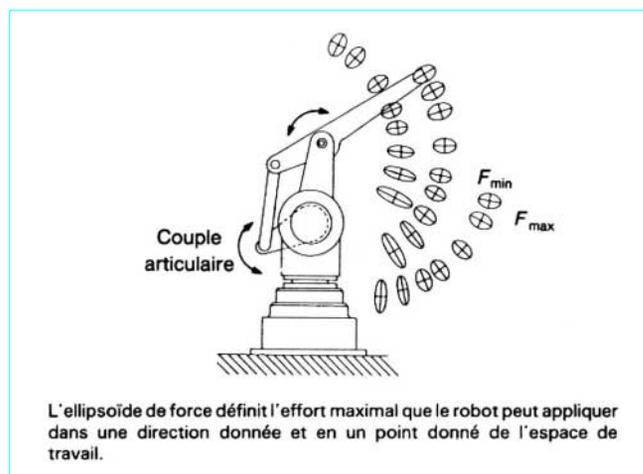


Figure 1 – Capacité d'application d'effort d'un manipulateur

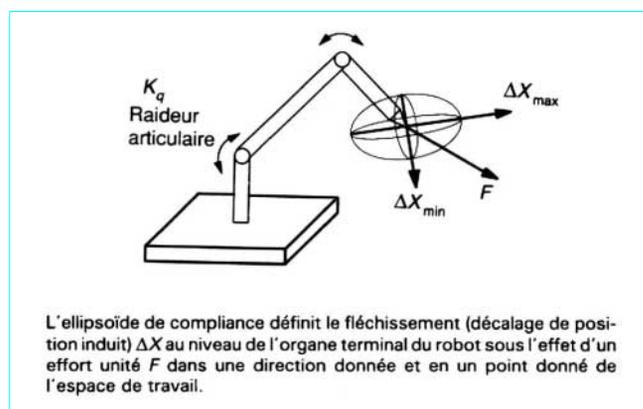


Figure 2 – Ellipsoïde de compliance

1.2 Localisation de la compliance

Si l'on considère la chaîne cinématique fermée d'un robot manipulateur appliquant un effort sur l'environnement, le tableau 1 présente la localisation et le type des raideurs et compliances (ou flexibilités) mises en jeu. On distingue :

- des compliances parasites (par exemple, compliance du support ou compliance au contact), que l'on cherche à minimiser ;
- des raideurs d'origine mécanique (raideurs des segments et articulations du robot) ; certaines de ces raideurs, localisées et identifiées, peuvent être réglées par conception.

D'une part, le concepteur cherche à obtenir une raideur élevée pour la chaîne cinématique du manipulateur, afin de garantir des performances de positionnement ; d'autre part, il sélectionnera un principe de compliance (active ou passive) en localisant et en dimensionnant un dispositif particulier, qui permet de régler le processus d'interaction en force mis en jeu durant la tâche.

La figure 3 illustre les deux principes fondamentaux de compliance : compliance passive et compliance active, utilisés en robotique.

Tableau 1 – Localisations et types des flexibilités et des raideurs en robotique

Sur l'environnement			
Type de raideur ou de flexibilité	Raideur du support	Raideur de contact	Montage mécanique du support porte-pièce
Origine : mécanique Considérée comme perturbation	-	--	-
Origine : mécanique Réglage possible par conception	+	-	++
Origine : contrôle Ajustement possible par contrôle-commande	-	--	(+)
Localisation possible Dispositif à compliance passive	non	non	oui : table de montage
Localisation possible Capteurs d'effort	non	non	oui : plate-forme active de montage
Sur le robot			
Type de raideur ou de flexibilité	Flexibilité de structure des segments du robot	Flexibilité ou raideur des articulations	Flexibilité ou raideur du dispositif compliant au niveau du poignet
Origine : mécanique Considérée comme perturbation	--	-	Raideur nécessaire par principe
Origine : mécanique Réglage possible par conception	+	++	++
Origine : contrôle Ajustement possible par contrôle-commande	--	++	++
Localisation possible Dispositif à compliance passive	non	non	oui : dispositif à compliance passive (très utilisé)
Localisation possible Capteurs d'effort	non	oui (peu utilisé)	oui : capteurs d'effort sur le poignet (très utilisé)
<p>La flexibilité (ou compliance) est l'inverse de la raideur. - : la flexibilité, ou la raideur, considérée est défavorable ou très défavorable (- -) au fonctionnement du robot. + : la flexibilité, ou la raideur, considérée est favorable ou très favorable (+ +) au fonctionnement du robot.</p>			

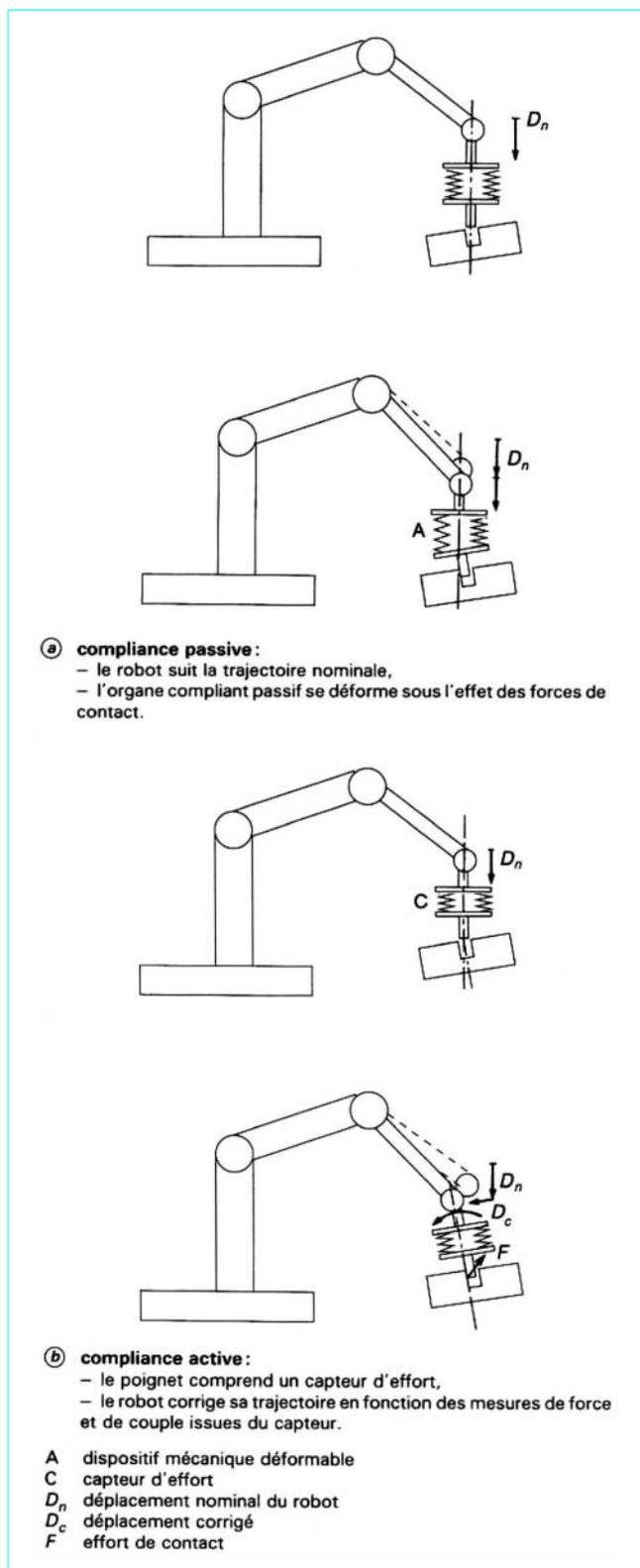


Figure 3 – Principe de la compliance passive et de la compliance active en robotique (d'après [2])

1.3 Compliance passive

La compliance passive caractérise la propriété de **déformabilité locale** d'un dispositif mécanique. Elle est située généralement au niveau du poignet du robot. Elle est réalisée par un montage mécanique spécialisé, doté d'une fonction de transfert adéquate qui permet de corriger l'erreur de position finale sous l'effet des efforts rencontrés.

On distingue :

- la *compliance élastique* : la structure de l'organe terminal peut se déformer, tout en restant au-dessous du seuil de limite élastique ; le comportement est défini par une matrice de souplesse ; toute correction entraîne l'apparition d'efforts de rappel vers une position stable ;

- la *compliance anélastique* : il s'agit d'un système « flottant », sans effort de rappel, caractérisé par une matrice d'inertie et une matrice d'amortissement.

Le robot peut ainsi suivre la trajectoire initiale programmée, la correction locale de position étant assurée par la déformation du **poignet compliant** (figure 3a).

Les systèmes compliants passifs ne possèdent pas de capteur d'effort. Cependant, il nous a semblé intéressant de les mentionner dans cet article, car ils répondent à certaines applications proches de celles qui nécessitent un contrôle actif ; l'exemple type est l'**assemblage de pièces**.

1.4 Compliance active

On parle de compliance active lorsque des **capteurs d'effort** sont utilisés et que les mouvements fins de correction sont générés par un dispositif motorisé :

- le robot, lui-même ;
- ou un organe spécifique motorisé (organe terminal ou table de travail).

Le manipulateur possède la capacité de corriger sa trajectoire après traitement des informations délivrées par des capteurs de force. La perception des efforts est ainsi utilisée dans une commande en boucle fermée réalisant un processus adaptatif de stratégie d'assemblage, de correction de trajectoire et de contrôle de la force appliquée (figure 3b).

Une autre méthode consiste à utiliser un **poignet actif motorisé**, doté de plusieurs degrés de liberté et constituant l'équivalent d'un micro-manipulateur à l'extrémité du robot. Un tel dispositif, à la fois rapide et précis, permet de compenser localement l'erreur de positionnement du robot porteur.

1.5 Principe de mesure des efforts d'interaction

La perception des efforts d'interaction est fondée sur l'analyse des forces de contact entre le robot et son environnement. Plusieurs types d'informations peuvent être fournies au système de commande pour élaborer ou appliquer une stratégie :

- détection des contacts physiques ;
- répartition géométrique des points de contacts ;
- valeur des efforts exercés.

Deux problèmes classiques sont en effet posés :

- **détermination de la position d'un point d'interaction**, connaissant les forces et moments résultants dans le repère de mesure ;
- **régulation d'un effort au point d'application**, connaissant la position de l'interaction et la mesure des forces dans un repère de référence.

D'une manière générale, une force exercée au contact, supposé ponctuel, se caractérise par un vecteur de dimension 3, de direction et amplitude associées à un point d'application. Lorsque plusieurs efforts sont exercés sur un corps solide, le résultat est appelé torseur des efforts extérieurs ; il est caractérisé par une résultante des forces \vec{F} et un moment résultant \vec{M} . Les lois de la mécanique montrent que ce torseur se résume à la connaissance de \vec{F} et de \vec{M} en un point donné ; la dimension maximale possible est donc 6.

Un capteur d'effort complet, permettant d'effectuer une mesure représentative des efforts d'interaction, doit donc fournir 6 composantes dans un repère de référence :

- 3 mesures de **force** (projections suivant 3 axes perpendiculaires) ;
- 3 mesures de **couple** (moments par rapport à ces 3 axes).

La mesure des efforts d'interaction peut s'effectuer selon deux méthodes :

- au niveau de l'environnement sur lequel le robot exerce un effort ;
- sur le robot lui-même, en l'équipant de capteurs d'effort.

Lorsque le capteur d'effort est monté sur le robot, on a intérêt à le disposer le plus près possible du point d'application de la force, de façon à minimiser les perturbations parasites des jeux, frottements, flexibilités diverses. Plusieurs configurations potentielles existent :

- au niveau articulaire : mesure de force et de couple des actionneurs ;
- au niveau du poignet ;
- au niveau du préhenseur, directement sur les doigts du robot ;
- sur l'outil spécialisé manipulé par le robot.

Pour des raisons de commodité, la configuration classique consiste à insérer un senseur d'effort au poignet, entre le dernier segment et le préhenseur.

2. Poignets compliants

Le principe de compliance élastique est relativement aisé à mettre en œuvre. De nombreux dispositifs de correction purement mécanique, pourvus de degrés de liberté en nombre suffisant, ont été proposés. Les paramètres d'élasticité sont optimisés en fonction de l'opération à réaliser. Différentes configurations de corps déformables sont possibles. Parmi les plus utilisées, citons :

- les lames métalliques ;
- les plots en élastomère,

travaillant en compression, en flexion ou en cisaillement.

2.1 Système à centre de compliance déporté

Le premier dispositif proposé pour l'insertion d'une pîge est connu sous le nom de **RCC (Remote Centre Compliance)**, étudié par le Draper Laboratory [13] [1]. Le principe géométrique est représenté sur la figure 4. Les efforts de contact, entre le goujon et le chanfrein ou l'alésage, entraînent la déformation de la structure RCC. La structure peut corriger d'elle-même un défaut d'alignement (erreur axiale, figure 4a) ou une erreur angulaire (figure 4b).

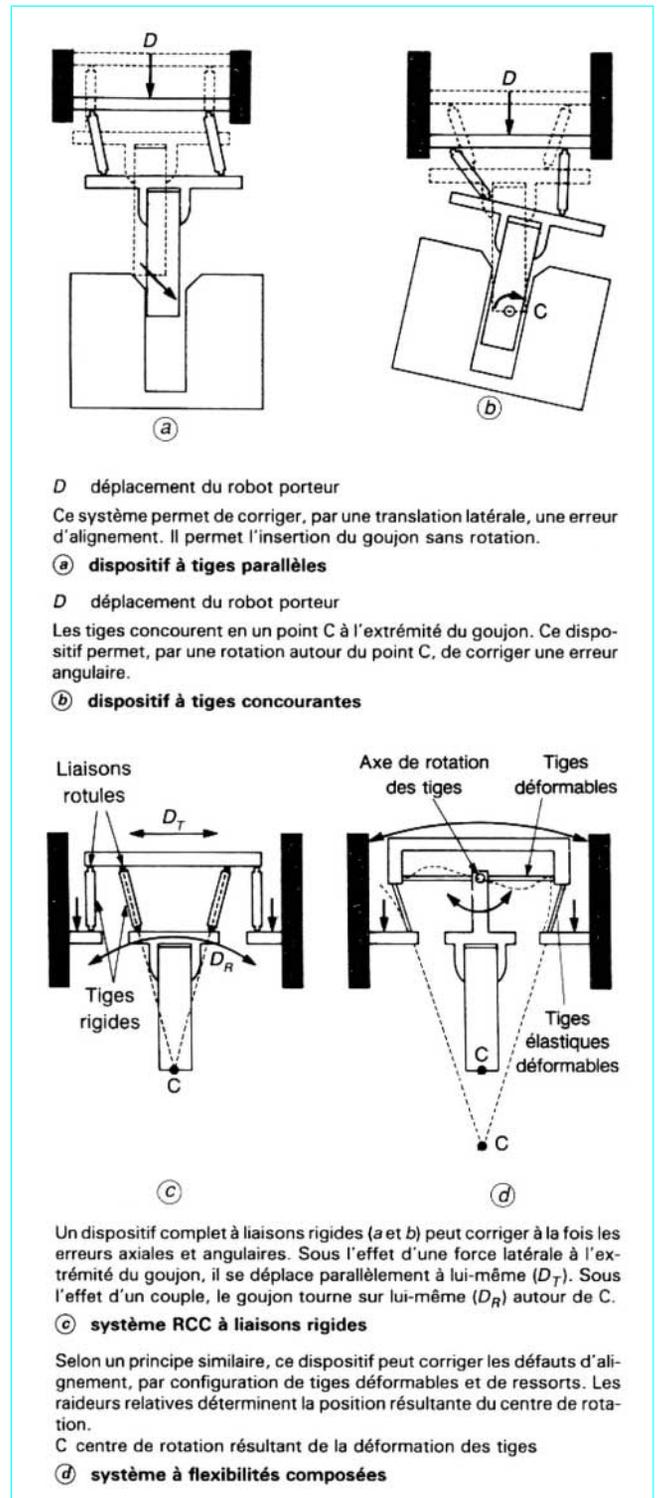


Figure 4 – Principe du système compliant à centre déporté (Remote Centre Compliance RCC) (d'après [13])

Une architecture classique (figure 4c) consiste à utiliser des tiges rigides. Le système comporte :

- un ensemble de 3 tiges parallèles tel que toute force horizontale provoque un déplacement du goujon parallèlement à lui-même ;
- un ensemble de 3 tiges dont les axes concourent en C tel que tout couple de basculement provoque une rotation autour de ce point.

La disposition des liaisons permet, au point C appelé *centre de compliance*, un découplage des mouvements de translation et de rotation.

Selon le même principe, il existe des dispositifs à flexibilités composées, par tiges déformables (figure 4d) et ressorts dont les raideurs relatives déterminent la position résultante du centre de rotation.

La figure 5 montre un schéma d'ensemble d'effecteur compliant développé sur ce principe (société Astek). Un tel poignet permet d'insérer une pîge de 1 mm de diamètre dans un alésage avec une tolérance de 1/100 mm.

Toutefois, il convient de remarquer que la présence des chanfreins est indispensable dans ce principe de fonctionnement.

2.2 Dispositif à compliance passive

Les dispositifs à compliance passive utilisent différents principes cinématiques (figure 6).

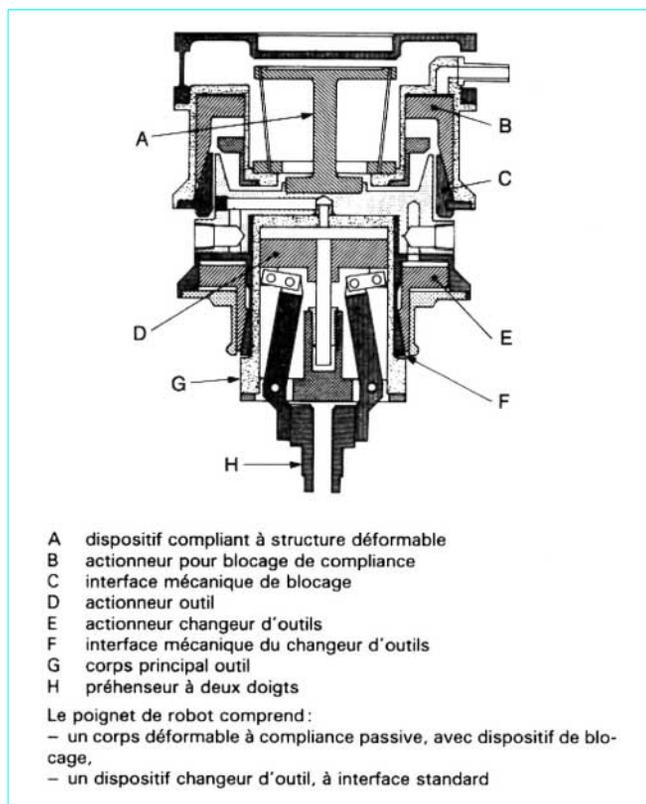


Figure 5 – Architecture mécanique d'un poignet de robot complet (Astek)

Un premier exemple (figure 6a) comporte six pistons à ressort à double effet, montés sur rotule, procurant un comportement élastique symétrique autour de l'axe vertical.

Une autre réalisation (figure 6b) comporte des tiges rigides et une membrane déformable.

Nous pouvons également citer un dispositif fondé sur des sphères creuses en caoutchouc et déformables selon plusieurs directions ; ce principe permet d'éviter le phénomène de flambage [7].

Il existe d'autres variantes, utilisant notamment des plots élastiques en matériaux élastomères [11] (figure 6c).

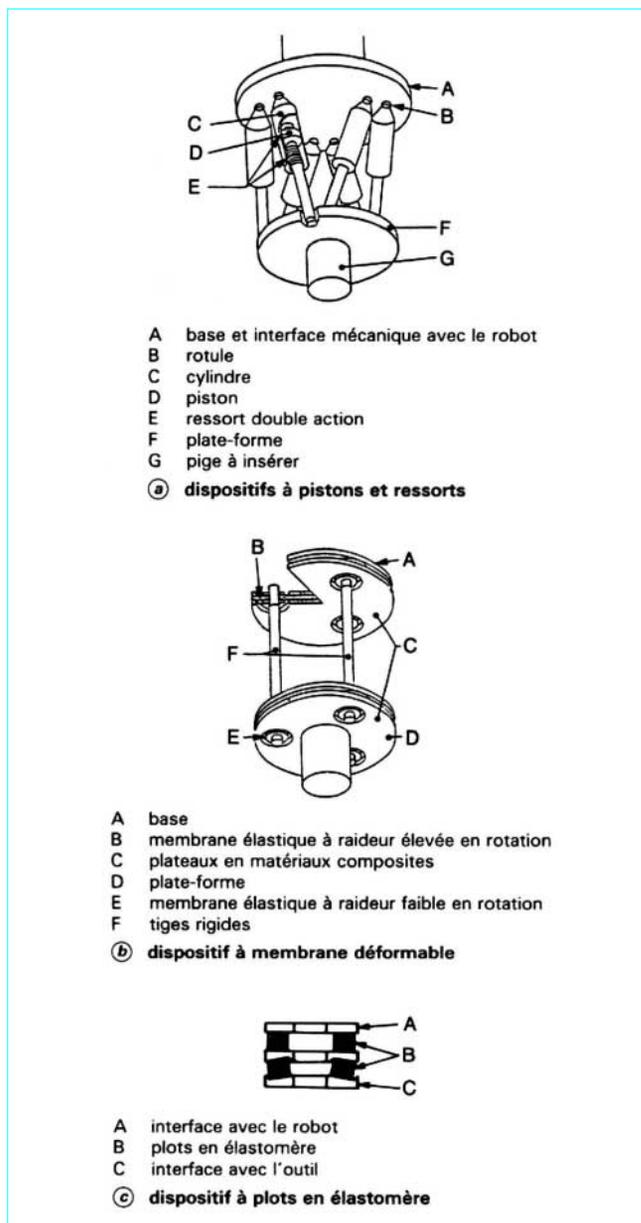


Figure 6 – Exemples de dispositifs à compliance passive de type élastique (d'après [11])

2.3 Poignet sensitif compliant

On appelle poignet sensitif compliant un poignet instrumenté dans lequel la déformation d'un élément élastique (élastomère par exemple) est mesurée. Cela permet un certain contrôle de l'opération, par mesure du décalage entre position obtenue et position souhaitée. Cette information de position est employée dans la commande, qui utilise des techniques d'apprentissage par auto-correction (figure 7) [8].

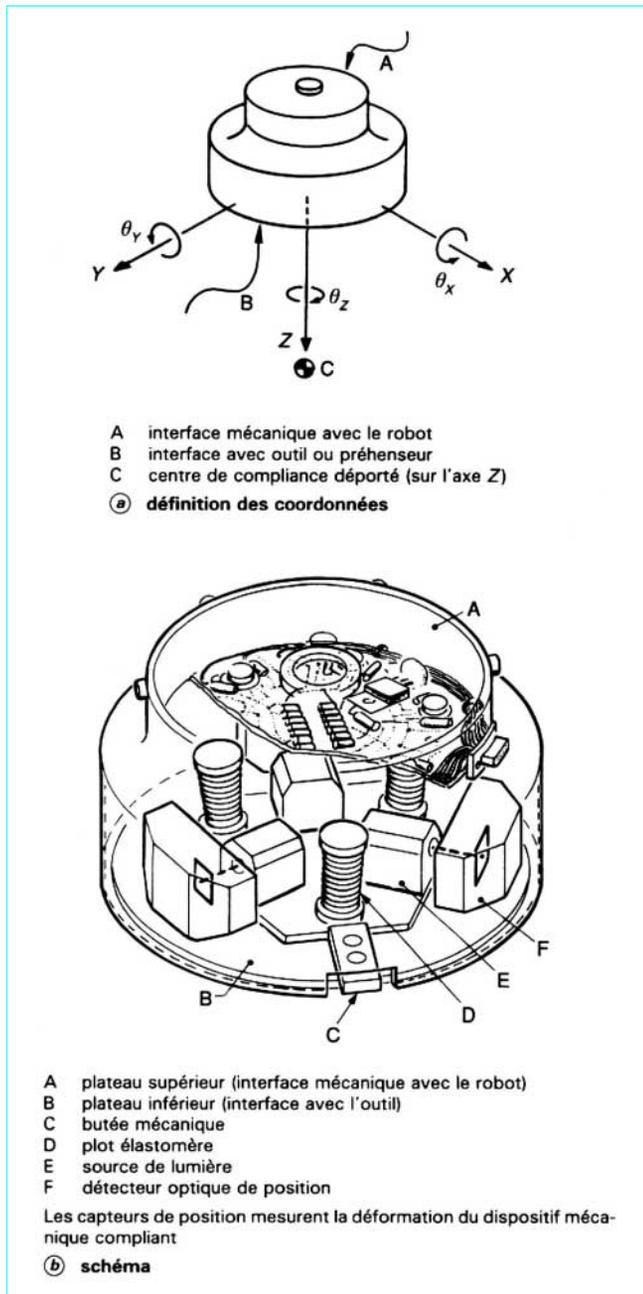


Figure 7 – Poignet sensitif compliant (instrumenté) (d'après [8])

3. Capteurs de force et couple en robotique

Les capteurs développés pour la robotique utilisent les principes classiques des capteurs de force et de couple (on pourra consulter à ce sujet les articles *Force. Couple* [R 1 820], *Capteurs* [R 410] et *Capteurs à jauges extensométriques* [R 1 860] dans le présent traité). Le capteur est un corps déformable, dont les déformations élémentaires sont liées aux efforts internes par la loi de Hooke. Toute mesure d'effort dF est associée à une déformation du qui est mesurée. Il s'agit donc d'une mesure indirecte, par le biais d'une matrice de raideur K :

$$dF = K du$$

où K est une matrice (figure 10, pour la matrice correspondant à un capteur 6 axes).

Le capteur d'effort doit permettre de mesurer les 3 composantes de force, soit F_x , F_y , F_z et les 3 composantes de couple, soit M_x , M_y , M_z .

Le capteur d'effort se caractérise par :

- un corps d'épreuve déformable (en général pièce métallique élastique) ;

- un ensemble de capteurs élémentaires (points de mesures).

Trois techniques sont généralement utilisées :

- capteurs extensométriques (à jauges de contraintes), très répandus : jauges résistives métalliques et jauges à semi-conducteur ;

- capteurs de force piézoélectriques ;

- capteurs de microdéformation (inductif ou optique).

Le tableau 2 présente les caractéristiques de ces capteurs et leurs avantages du point de vue des applications en robotique.

3.1 Tables dynamométriques

Lorsque le robot n'est équipé ni d'organe compliant ni de capteurs d'effort, on peut mesurer ou contrôler l'effort d'interaction en utilisant une plate-forme spécialisée. On peut considérer trois cas.

■ **Table compliant** : pour éviter de placer l'organe compliant à l'extrémité du robot et de le soumettre à des mouvements importants, on peut placer la compliance dans la liaison entre un porte-pièce et un socle fixe, et constituer ainsi une table à compliance passive.

■ **Plate-forme dynamométrique** : le principe de cette plate-forme consiste en une plaque supportée par des capteurs d'efforts mesurant les forces verticales et les forces horizontales aux quatre points d'appui. Pour toute force appliquée, la plate-forme délivre une information complète : coordonnées du point d'application et amplitude de l'effort.

Une telle plate-forme est utile pour la localisation du centre de gravité d'une pièce ou pour l'évaluation des performances de robots manipulateurs (figure 14).

Citons, à titre d'exemple, les caractéristiques d'une telle plate-forme :

- surface : 400 × 400 mm ;
- force d'appui : 0,5 à 200 N (précision 0,1 N) ;
- moment maximal : 15 N · m (précision 0,005 N · m) ;
- précision (mesure de position) : 0,2 mm.

Pour les opérations d'assemblage, on utilise un réceptacle dont le socle permet la mesure des 6 composantes de force et de couple qui s'exercent au cours des tâches d'assemblage. Ces informations sont transmises au robot.

Tableau 2 – Caractéristiques des capteurs de mesure d'effort et applications en robotique

Type de capteur	Application d'un effort continu	Précision en fraction de l'étendue de mesure	Raideur mécanique	Collage	Simplicité électronique	Miniaturisation	Simplicité du câblage	Sensibilité à l'environnement	Application en robotique
Jauges de contraintes métalliques	oui	10 ⁻³	+	oui	+	++	+	++	++
Jauges de contraintes à semi-conducteur	oui	10 ⁻³	+	oui	++	++	+	+	+
Capteurs piézo-électriques	non	10 ⁻⁵	++	non	-	+	-	+	-
Capteurs inductifs	oui	10 ⁻⁴	+	non	+	-	++	++	++

++ : grand ; + : moyen ; - : faible.

■ **Table active d'assemblage** : la figure 8 représente une plate-forme motorisée (Hitachi [10]), conçue comme un sous-système d'assistance au robot. Elle se compose de :

- un capteur de force et de couple 6 axes :
 - sensibilité : 2×10^{-2} N en force, 2×10^{-3} N · m en couple,
 - étendue de mesure : 20 N ; 0,1 N · m ;
- un système cartésien piloté par 8 servomoteurs linéaires :
 - résolution : 0,02 mm,
 - débattement : ± 3 mm, $\pm 2^\circ$.

La figure 11 présente une autre conception sous forme d'un mécanisme parallèle. Ce système permet d'assembler des piges de 10 à 50 mm de diamètre avec des jeux de 0,02 mm, en partant d'un défaut d'alignement initial de quelques millimètres et quelques degrés.

3.2 Information d'effort au niveau articulaire

Une première méthode consiste à utiliser les capteurs proprioceptifs du robot lui-même lorsque celui-ci est réversible.

Capteurs proprioceptifs : capteurs renseignant sur l'état interne du robot.

Un robot est réversible si les propriétés de la chaîne cinématique autorisent un fonctionnement en sens inverse.

Par exemple, la mesure des courants moteurs fournit une image du couple articulaire Γ . L'effort F est déduit par la relation à l'équilibre (article *Modélisation et commande des robots manipulateurs* [S 7 730]) :

$$F = (JT)^{-1} (\Gamma - g)$$

où J est la matrice jacobienne du robot (JT matrice transposée), g le couple induit par la gravité.

L'implantation de cette méthode est rendue difficile par la complexité de la chaîne cinématique (élasticité, jeux). Des capteurs de couple au niveau articulaire peuvent être également utilisés pour améliorer le temps de réponse du contrôle et réduire les effets du frottement.

3.3 Poignets instrumentés

La configuration la plus utilisée en mesure des efforts dans le repère de l'effecteur consiste en un corps d'épreuve monté au niveau du poignet. La structure compliant doit pouvoir se déformer dans toutes les directions requises par la mesure. On cherche à ce que les déformations restent faibles, sans hystérésis, de façon à conserver les performances et les caractéristiques du robot.

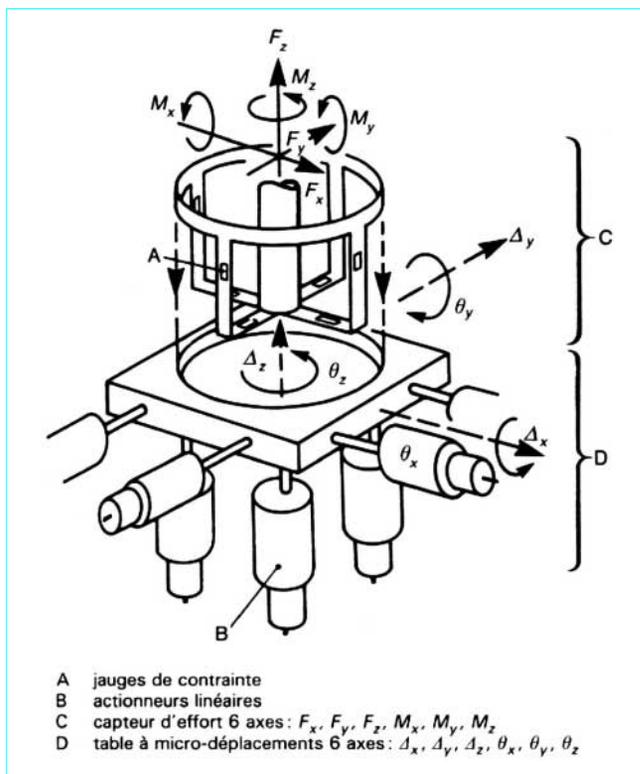


Figure 8 – Exemple de table active d'assemblage (d'après [10])

La figure 9 présente un exemple classique de réalisation de capteur d'effort 6 axes : la structure est une croix à branches de section carrée. Les barreaux supportent des jauges de contrainte à semiconducteur qui délivrent 8 signaux.

De nombreux capteurs d'effort sont industrialisés pour les applications en robotique. La difficulté de réalisation porte sur l'intégration d'un système léger, précis et fidèle, insensible à la température et protégé contre les surcharges (limiteur de couple). En général, les performances peuvent être ajustées aux spécifications particulières demandées pour l'application.

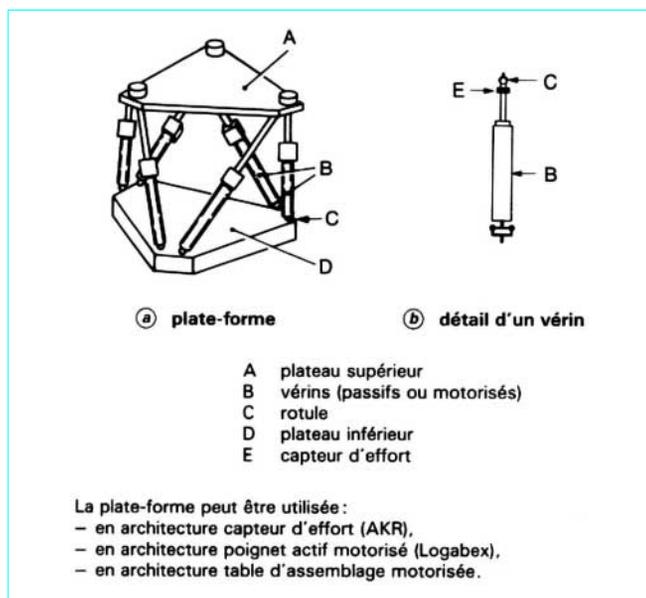


Figure 11 – Structure isostatique (plate-forme 6 vérins) [3]

4. Traitement des mesures d'effort

Le traitement consiste, à partir d'hypothèses de connaissance initiale et des mesures issues des capteurs d'effort, à identifier :

- le point d'application du ou des efforts d'interaction ;
- l'orientation de ces efforts ;
- leur intensité.

4.1 Identification à partir d'une table dynamométrique

La détermination d'une force et de son point d'application, à partir d'une table dynamométrique, est simple (figure 12). Soit une force \vec{F} en un point P de coordonnées X_p, Y_p de la plate-forme ; les composantes de force F_x, F_y, F_z et de moment M_x, M_y, M_z à partir des mesures élémentaires de force $f_1, \dots, f_4, g_1, \dots, g_4$, aux quatre appuis, sont :

$$\begin{aligned} F_x &= f_3 - f_1 \\ F_y &= f_4 - f_2 \\ F_z &= (g_2 + g_4) - (g_1 + g_3) \\ M_x &= [(g_1 + g_4) - (g_2 + g_3)] \ell \\ M_y &= [(g_3 + g_4) - (g_1 + g_2)] \ell \\ M_z &= (f_1 + f_2 + f_3 + f_4) \ell \end{aligned}$$

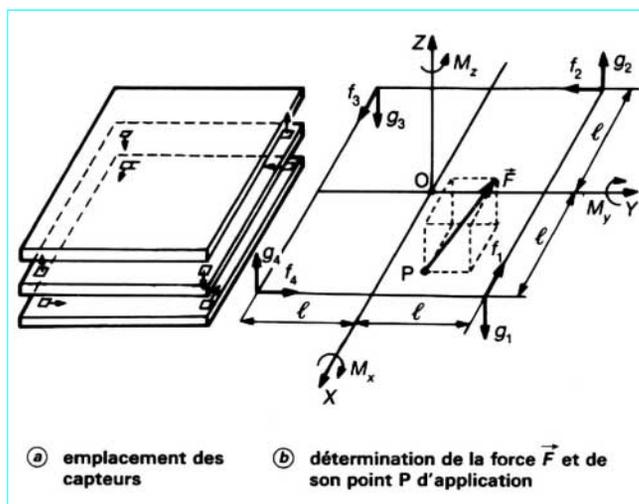


Figure 12 – Identification d'efforts sur table dynamométrique

Ces six équations permettent de trouver les coordonnées X_p, Y_p du point d'application P par :

$$\vec{M} = \vec{OP} \wedge \vec{F}$$

d'où :

$$\begin{aligned} X_p &= M_y / F_z \\ Y_p &= -M_x / F_z \end{aligned}$$

4.2 Identification des efforts à partir d'un poignet instrumenté

— Notons tout d'abord que, lorsque plusieurs efforts sont exercés sur un corps rigide, le torseur résultant, caractérisé par une résultante \vec{F} et un moment \vec{M} , mesuré au niveau du poignet, peut être transposé d'un point A en tout point B par la relation :

$$\vec{M}(B) = \vec{M}(A) + \vec{BA} \wedge \vec{F}$$

— Il convient de remarquer que, dans le cas général, la détermination du point P d'application d'un effort d'interaction avec l'environnement, à partir d'un poignet instrumenté, risque d'être incomplète. En effet, un tel poignet fournit 6 projections de force et de moment dans le repère effecteur (figure 13). On remarque qu'avec ces 6 grandeurs ($F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$) on ne peut pas connaître les 3 coordonnées du point P. On a seulement :

$$\begin{aligned} X_p &= (F_x, Z_p - M_y) / F_z \\ Y_p &= (F_y, Z_p - M_x) / F_z \end{aligned}$$

Il faut donc connaître par hypothèse l'une des variables : par exemple, en supposant Z_p connu, ce qui est le cas pour un plan horizontal. Généralement, l'identification de points de contact particuliers permet de déduire le ou les efforts locaux.

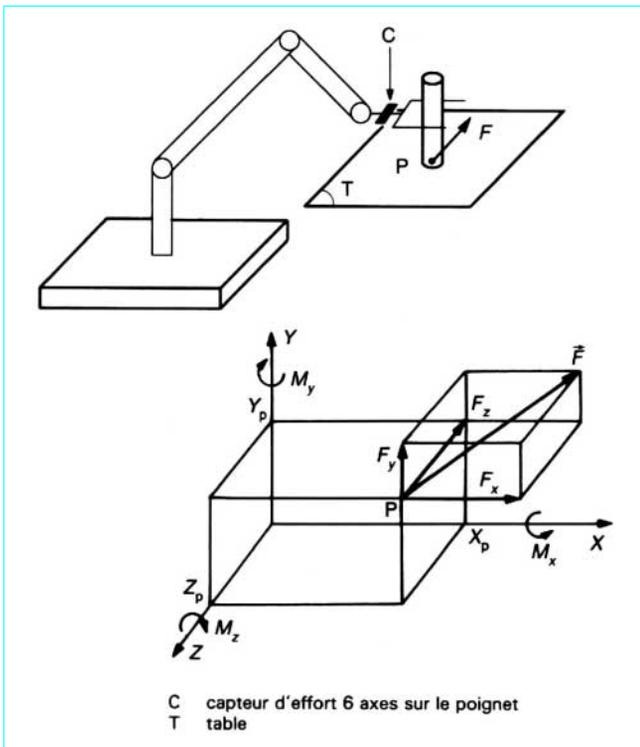


Figure 13 – Identification d'effort par poignet instrumenté

5. Prise en compte des informations d'effort dans la commande

5.1 Compliance passive

Dans le cas où un dispositif à compliance passive est inséré en interface entre le robot et son environnement, la description de tâche est indépendante du processus auto-adaptatif mis en œuvre mécaniquement. La commande du robot génère une trajectoire nominale. Elle est découplée de la déformation autonome de l'organe compliant sous l'effet des efforts externes. Par exemple, lors d'une insertion et pour un enfoncement programmé, le dispositif compliant intervient pour maintenir un vecteur erreur de positionnement dans un domaine admissible fonction de la tâche d'assemblage.

5.2 Compliance active et contrôle d'effort

Dans le cas de la compliance active, le robot manipulateur, rigide par construction, est commandé de manière à restituer, au niveau d'un point d'application, un comportement élastique et/ou amorti, généré par des lois de contrôle programmées.

Le problème de contrôle d'effort en robotique est résolu par une modification fine de trajectoire prenant en compte les mesures de position et de force, de manière à garantir des performances d'interaction en terme d'impédance mécanique (raideur, amortissement) avec l'environnement [2] [3] [4].

Différents schémas de commande peuvent être utilisés : l'asservissement en force, le contrôle d'impédance, le contrôle hybride position-force.

5.2.1 Asservissement en force

Le premier schéma possible consiste en une commande explicite en force, où la consigne est un effort désiré F_c , plutôt qu'une vitesse ou une position (figure 14).

Nota : pour la description qui suit, se reporter à l'article *Modélisation et commande des robots manipulateurs* (S 7 730), déjà cité, où sont définies les relations du modèle géométrique et du modèle cinématique du robot.

Partant du modèle géométrique du manipulateur :

$$X = G(q)$$

où X désigne le vecteur des coordonnées opérationnelles, et q le vecteur des coordonnées articulaires, le modèle cinématique est :

$$\dot{X} = J\dot{q}$$

ou $dX = Jdq$

avec J matrice jacobienne de la fonction G .

Le principe des travaux virtuels permet d'établir la relation fondamentale entre le vecteur des forces opérationnelles F et le vecteur des forces ou couples articulaires Γ :

$$\Gamma = J^T F$$

Par comparaison de la consigne à l'effort mesuré, une commande en couple des actionneurs peut être basée sur cette formule.

5.2.2 Contrôle d'impédance

La deuxième méthode vise à corriger la position ou la vitesse du robot à partir d'une mesure d'effort (figure 15). La boucle fermée s'effectue à partir d'une matrice d'admittance, typiquement l'inverse de la matrice de raideur K , par :

$$dX = K^{-1} dF$$

L'asservissement permet de restituer le comportement élastique désiré. Par exemple, la matrice K peut être diagonale dans l'espace de la tâche.

Si l'on combine avec les équations :

$$dX = Jdq$$

et $\Gamma = J^T F$

on obtient la relation :

$$\Gamma = [J^T KJ] dq$$

$[J^T KJ]$ peut être interprétée comme une matrice de *raideur articulaire*.

La figure 15 présente un schéma dans lequel la mesure d'effort donne lieu à une correction de position.

Dans une autre méthode, on peut programmer un amortissement en introduisant une relation entre le vecteur vitesse V et le vecteur force F du type :

$$V = [H]^{-1} F$$

Le contrôle d'impédance se définit comme une généralisation de ces lois de contrôle. La commande en position et la commande en force deviennent des cas particuliers. En effet, la commande en position peut être obtenue en attribuant des coefficients très grands à la matrice de raideur K ; inversement, la commande en force est obtenue par des coefficients arbitrairement faibles. Ces lois d'asservissement sont alors sous le contrôle d'une stratégie de sélection ou d'un algorithme d'adaptation.

5.2.3 Contrôle hybride position-force

La dualité entre contrôle en position et contrôle en effort peut s'exprimer, lors de l'analyse de tâche, en terme de contraintes naturelles et contraintes artificielles. Les contraintes naturelles correspondent aux contraintes géométriques et mécaniques de position et d'effort à respecter. Des contraintes artificielles sont introduites, en accord avec les précédentes, pour spécifier les degrés de liberté commandés : déplacements et applications d'effort désirés. La somme de ces deux groupes doit correspondre à la dimension de l'espace de la tâche, soit 6.

On appelle commande hybride une structure de contrôle basée sur une partition des degrés de liberté. Cette allocation est exclusive, c'est-à-dire telle que certains soient contrôlés en force, alors que d'autres sont contrôlés en position.

La figure 16 présente une structure de commande typique, comprenant deux branches parallèles. La matrice S , appelée matrice de sélection, est binaire (composée de 0 et 1) et diagonale, telle que S et $I-S$ définissent deux sous-espaces complémentaires (I étant la matrice unité).

La commande résultante inclut les contributions de :

- l'asservissement de position ;
- l'asservissement en effort,

calculées dans leurs sous-espaces respectifs.

5.3 Système de commande

Le système de commande d'un manipulateur, prenant en compte les efforts d'interaction, comporte les fonctions principales suivantes :

- détection des efforts ;
 - protection (limitation des surcharges) ;
 - identification des points de contact ;
 - contrôle asservi des efforts locaux dans l'espace de la tâche,
- sous la supervision d'une stratégie d'interaction comportant plusieurs phases : accostage, recherche des contacts, régulation, décrochage.

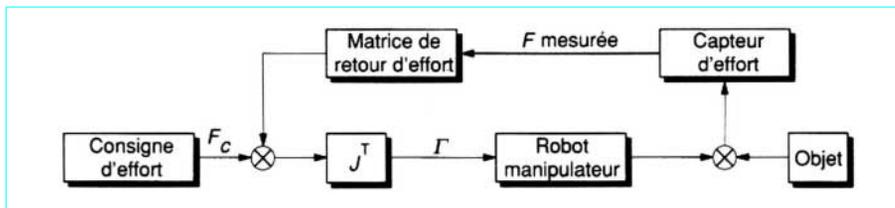


Figure 14 - Asservissement en force

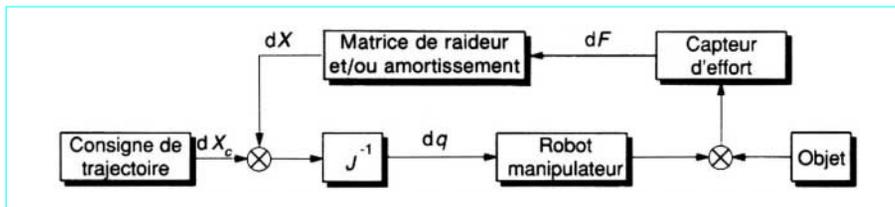


Figure 15 - Contrôle d'impédance

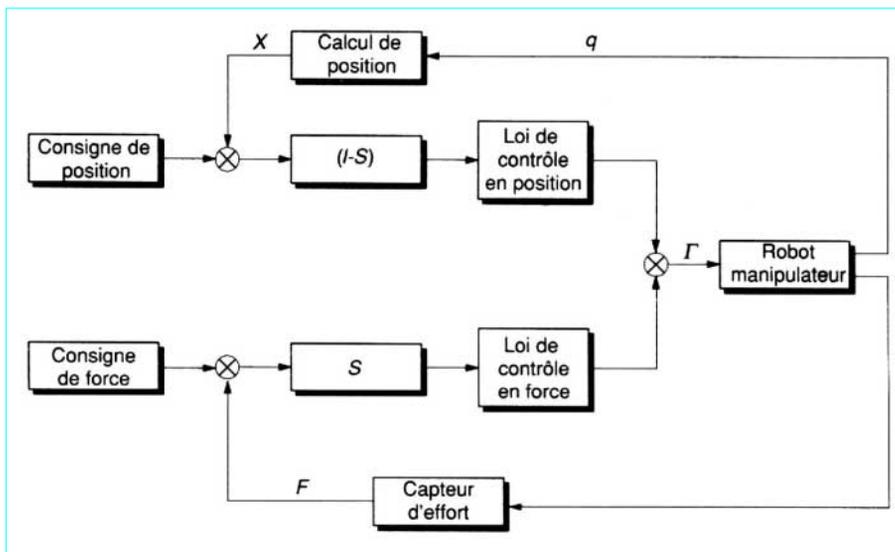


Figure 16 - Contrôle hybride position-force

6. Synthèse et applications

6.1 Synthèse

La définition du principe approprié s'effectue à partir d'un bilan global de précision, où interviennent à la fois la connaissance de l'environnement (précision) et la qualité du robot (précision du modèle, résolution de commande...).

Le tableau 3, extrait de [2], fournit une synthèse facilitant la sélection du type de compliance et de commande.

La figure 17 illustre différentes solutions au problème d'insertion :

— **correction locale** (c'est-à-dire au niveau du poignet, sans contribution du manipulateur tout entier) :

- soit **passive** (par poignet à compliance passive),
- soit **active** (dans le cas d'un poignet de mesure d'effort motorisé),

on notera cependant que cette solution complexifie à la fois le mécanisme et la commande ;

— **correction globale active** (par l'ensemble du robot manipulateur) selon les lois de commande du paragraphe 5, prenant en compte les mesures issues du capteur d'effort.

6.2 Applications

■ Pour ce qui concerne les erreurs de positionnement, dans le cas de tâches répétitives et pour une plage de fonctionnement bien définie, les performances des dispositifs à **compliance passive** sont largement suffisantes pour compenser le manque de précision des robots manipulateurs industriels. Les principaux avantages sont : la facilité de mise en œuvre, la robustesse, le faible coût, la vitesse de fonctionnement. Cependant, leurs applications sont évidemment limitées à des tâches très spécifiques : ils couvrent typiquement le domaine de l'**assemblage automatisé**.

Cinq critères permettent de juger des performances de l'insertion : erreur latérale maximale admissible, erreur angulaire maximale, rapport jeu sur diamètre d'alésage, temps d'insertion, moyens de mesure et contrôle nécessaires.

L'inconvénient majeur (limitation de principe) réside dans le fait que le robot n'est pas maître du processus : car ce processus est non programmable et sans contrôle continu de l'effort appliqué.

À titre d'**exemple**, des performances typiques de systèmes à compliance passive sont :

- erreur latérale maximale : ± 8 mm ;
- erreur angulaire maximale : $\pm 10^\circ$;
- rapport jeu/diamètre d'alésage : 0,01/10.

■ Le principe de **compliance active** réalise un asservissement en boucle fermée sur l'environnement. Il procure toute la flexibilité opérationnelle nécessaire pour l'accomplissement de tâches variées, nécessitant le contrôle de la raideur du bras, du poignet ou de l'outil du robot. Les performances sont évaluées en terme de flexibilité opérationnelle, de plage de fonctionnement, de résolution, de temps de réponse.

À titre d'**exemple**, citons les performances suivantes (moyennes) :

- plage de fonctionnement en force : ± 50 N ;
- résolution : 0,1 N ;
- fréquence d'échantillonnage : 100 Hz.

Dans la pratique, l'intégration de capteurs d'effort est relativement facile. On distingue deux grandes classes d'applications : le contrôle d'effort et l'assemblage.

● **Contrôle d'effort** : contrôler une force appliquée selon un axe ou contre une surface alors que l'effecteur décrit une trajectoire. L'exemple type est le polissage de surface gauche (par exemple, pale de turbine). Toute variation d'effort mesuré permet une correction de position allant jusqu'à la correction de trajectoire en poursuite.

Outre les fonctions simples telles que :

- contrôle du serrage ;
- contrôle de l'effort de perçage,

l'intérêt principal se situe au niveau du suivi de contour ou du suivi de surface (figure 18), la tâche consistant alors à réguler l'effort normal à la surface. Nous pouvons citer comme exemples bon nombre d'applications industrielles :

- ponçage, meulage ;
- ébavurage, ébarbage de pièces mécaniques ;
- cardage ;
- suivi avec nettoyage de coques, etc.

Tableau 3 – Choix du principe de compliance et de contrôle à partir du bilan de précision (d'après [2])

Résolution de la commande	Infinie									Bonne									Médiocre								
	parfaite			bonne			moyenne			parfaite			bonne			moyenne			parfaite			bonne			moyenne		
Qualité du modèle du robot	p	b	m	p	b	m	p	b	m	p	b	m	p	b	m	p	b	m	p	b	m	p	b	m	p	b	m
Mode de commande pour des tâches d'assemblage ou d'usinage	P	P	CA	P	CA	CA	CA	CA	CP	P	CA	CP	CA	CA	CP	CP	CP	CP	CP	CP	CP	CP	CP	CP	CP	CP	CP

p : parfaite ; b : bonne ; m : moyenne.
P : commande en position possible.
CA : utilisation de la compliance active possible.
CP : utilisation de la compliance passive possible.
P implique naturellement que CA et CP sont aussi possibles.
CA implique que CP est aussi possible.

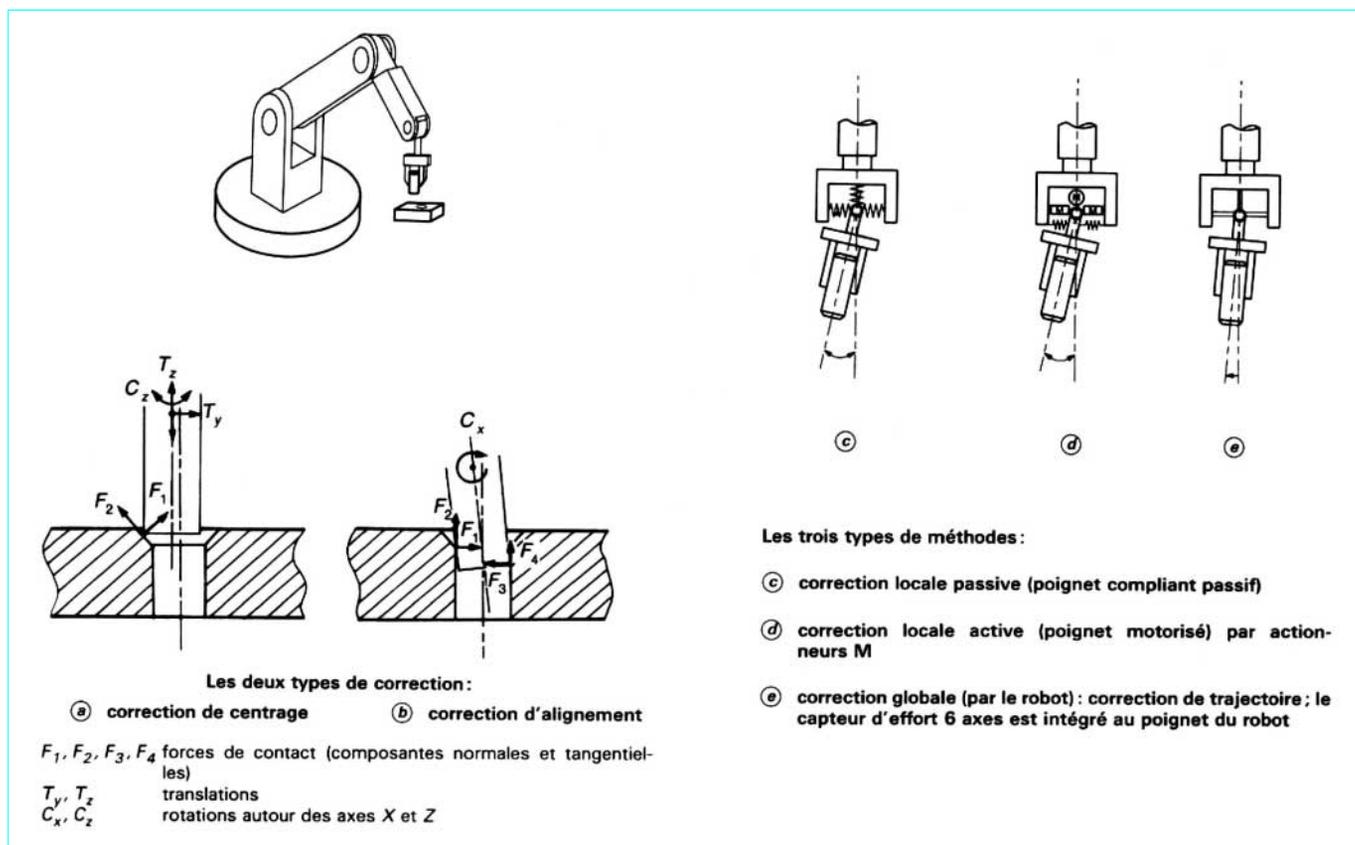


Figure 17 – Techniques d'insertion

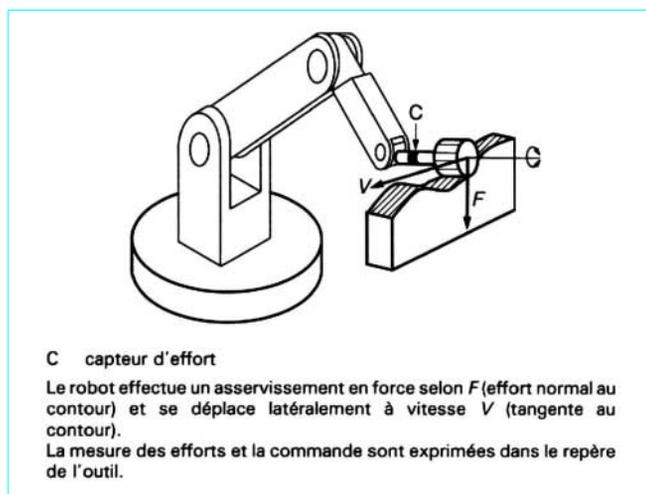


Figure 18 – Suivi de contour ou suivi de surface

● **Assemblage** : il s'agit d'atteindre une position donnée en minimisant les efforts de réactions. L'exemple type est l'insertion pour l'assemblage de pièces (figure 17).

La précision spécifique du robot et l'incertitude de positionnement des pièces sur le site de travail font apparaître un bilan d'erreur trop important pour réaliser un assemblage précis (selon les tolérances données) par un seul contrôle en position. C'est pourquoi la prise en compte des forces de contact est nécessaire pour le guidage du robot opérant l'insertion.

Différents types d'assemblage sont concernés : assemblage cylindrique, assemblage prismatique.

- Les applications industrielles sont fort nombreuses. Citons :
- l'assemblage de pièces mécaniques (arbres, roulements, engrenages, etc.) ;
 - l'insertion de composants électroniques.

Signalons enfin une fonction additionnelle qui concerne l'amélioration de la sécurité :

- détection de collision et limitation des effets induits ;
- amortissement des chocs (par exemple dans les applications de forgeage).

Les performances atteintes sont, en moyenne :

- répétabilité du robot : quelques dixièmes de millimètre ;
- erreur de positionnement de pièces : quelques millimètres.

Les techniques de compliance et de contrôle d'effort permettent des insertions à quelques centièmes de millimètre.

6.3 Conclusion

Le contrôle de l'interaction du robot avec l'environnement est indispensable, compte tenu de la variété des tâches industrielles. La mesure et l'asservissement des efforts exercés sont considérés comme des problèmes fondamentaux en robotique. Classiquement, l'ensemble poignet-préhenseur est conçu en intégrant un dispositif

compliant avec ou sans mesure d'effort. Les principes présentés donnent lieu à des dispositifs opérationnels et des produits fiables. La commande adaptative de l'effecteur contribue grandement à l'amélioration de la dextérité, de l'efficacité et de la sûreté de fonctionnement des robots manipulateurs.

La technique la plus générale de commande est la commande hybride position-force, qui permet de répondre à la quasi-totalité des problèmes rencontrés.

Capteurs d'environnement en robotique

La perception des efforts

par **Guy ANDRÉ**

Ingénieur diplômé des Arts et Métiers (ECAM) et de l'École Supérieure d'Électricité (ESE)
Docteur-Ingénieur
Chargé de Recherche à l'Institut National de Recherche en Informatique
et Automatique (INRIA)

Références bibliographiques

- [1] PUGH (A.). – *Robot sensors*. Volume 2 : *Tactile and non-vision*. 326 p., bibl. (150 réf.), IFS publications (UK) and Springer-Verlag (1986).
- [2] COIFFET (P.). – *Les robots*. Tome 2 : *Interactions avec l'environnement*. 284 p., bibl. (175 réf.), Éditions Hermès (Paris) (1981).
- [3] BOISSONNAT (J.D.), FAVERJON (B.) et MERLET (J.P.). – *Techniques de la robotique*. Tome 2 : *Perception et planification*. 496 p., Éditions Hermès (1988).
- [4] CRAIG (J.). – *Introduction to robotics mechanics and control*. 300 p., Addison-Wesley (1986).
- [5] GOMERSALL (A.). – *Machine intelligence : international bibliography with abstracts on sensors in automated manufacturing*. 232 p., bibl. (1 400 réf.), IFS Publications (UK) (1984).
- [6] BEJCZY (A.K.). – *A force torque sensing and display system for large robot arms*. International Conference IEEE Robotics (1985).
- [7] CUTKOSKY (M.R.) et WRIGHT (P.K.). – *Active control of a compliant wrist in manufacturing tasks* (dans [1]).
- [8] DE FAZIO (T.L.). – *The IRCC Instrumented remote centre compliance* (dans [1]).
- [9] HIRZINGER (G.). – *Sensor programming : a new way for teaching a robot paths and forces-torques simultaneously*. International Conference, ROVISEC (1983).
- [10] KASAI (M.). – *Trainable assembly system with an active sensory table possessing six axes*. 11th International Conference on Industrial Robots, (et dans [1]) (1981).
- [11] REBMAN (J.). – *Compliance for robotic assembly using elastometric technology*. 9th International Conference on Industrial Robots (1979).
- [12] VAN BRUSSEL (H.) et SIMONS (J.). – *Automatic assembly by active force feedback accomodation*. 9th International Symposium on Industrial Robots (et dans [1]) (1979).
- [13] WHITNEY (D.) et NEVINS (J.L.). – *What is the Remote Centre Compliance (RCC) and what can it do*. 9th International Symposium on Industrial Robots, (et dans [1]) (1979).
- [14] DOMBRE, KHALIL. – *Modélisation et commande de robots*. Éditions Hermès (1988).

Normalisation

Norme internationale

International Organization for Standardization ISO

ISO/TR 8 373 1988 Robots manipulateurs industriels.
Vocabulaire.
(Additif 1, 1990).

Constructeurs

Dispositifs compliants et capteurs d'effort pour la robotique

AKR Robotique (F).

Barry Wright Products for Automation (USA).

Cyberg (F).

Logabex (F).

Barras-Provence (F).

ISRA (RFA).

Lord Industrial, Automation Division (USA).

RTI Robot Technology (USA).

Dr R. Seitner Mess und Regel Technik GmbH (RFA).

SORMEL (F).