

Ce premier chapitre a pour objectif de définir la compliance en général. Il en montre l'intérêt pour certaines tâches robotisées, puis la formalise.

Ensuite, sont passées en revue et comparées les différentes techniques compliantes. Nous parcourons ainsi la chaîne que forme le robot en contact avec son environnement et envisageons différentes possibilités pour rendre compliant cette chaîne.

Chapitre 1 : La compliance

1. Introduction : le besoin de compliance en Robotique

Les tâches que l'on souhaite robotiser ont souvent été auparavant réalisées par l'homme. Dans la plupart des cas, celui-ci était en contact manuel avec la tâche qu'il effectuait. Il gérait donc (inconsciemment ou non) les efforts de contact engendrés au cours de l'exécution de la tâche. Certaines de ces opérations tendent à être robotisées [SCH88], soit pour décharger l'homme de tâches fastidieuses, soit parce que les tâches demandent une précision ou une dextérité, impossibles à atteindre humainement.

Pour réaliser correctement ces tâches, le robot doit donc, comme l'homme, tenter de s'adapter en permanence aux efforts qu'il exerce sur son environnement (constitué par la ou les pièces en cours de traitement).

Nous pouvons citer par exemple :

- *les tâches de préhension d'objets fragiles ou fortement déformables* : en effet, l'éventail des pièces à manipuler par robot est de plus en plus vaste. On ne se limite plus à des objets rigides et solides. Il est intéressant de prévoir que le préhenseur puisse s'adapter à différents objets ; sans changer d'outil, on gagnerait ainsi en productivité. Pour manipuler correctement de tels objets, la force de serrage doit être suffisamment importante pour éviter le glissement, mais elle doit cependant être maîtrisée de façon à éviter de briser ou de déformer l'objet saisi [CUT89].

- *l'assemblage de pièces ajustées* : aujourd'hui encore une grande partie des opérations d'assemblage se fait manuellement. En effet, réaliser correctement cette tâche en mode automatique, lorsque les pièces à assembler sont très ajustées (quelques microns par exemple), nécessite une très bonne précision du robot et une répétabilité meilleure que l'ajustement entre les pièces. Ces excellentes performances requises pour le robot sont actuellement techniquement possibles, mais souvent à des coûts prohibitifs. Dans le cas où l'on ne dispose pas d'une précision et d'une répétabilité suffisantes, un mauvais positionnement relatif des deux pièces à assembler peut mener à des situations de blocage susceptibles d'empêcher l'insertion ou même de détériorer les pièces en présence. Pour résoudre ce problème, l'assemblage de précision robotisé doit réaliser l'absorption des écarts de positionnement dus au manque de précision du robot. Une solution consiste à rendre flexible la chaîne mécanique fermée, constituée à l'instant du contact par le robot, les pièces et la table de travail. En effet, la flexibilité permet de réduire les efforts de contact entre les pièces pendant la phase d'insertion. Ceci compense les défauts d'alignement et les défauts angulaires dus aux incertitudes de positionnement et d'orientation de l'organe terminal du robot par rapport à l'alésage [DAU91, NGU95].

• *l'ébarbage ou l'ébavurage* : dans de nombreux secteurs industriels, les opérations d'ébarbage et d'ébavurage, et plus généralement de parachèvement de pièces, restent souvent manuelles, la plupart des robots industriels disponibles sur le marché étant dépourvus de la complaisance nécessaire pour l'exécution de ces tâches.

L'automatisation de ce type de tâches se heurte à un certain nombre de difficultés, dont les principales sont les suivantes (Figure 1a) [KAZ 86]:

- * dispersion dimensionnelle des pièces qui sont en général obtenues par moulage. Cette dispersion interdit la programmation rigoureuse de la trajectoire réelle à suivre, parce que inconnue ;
- * formes et dimensions aléatoires des bavures qui résultent des plans de joint du moule (ou des usinages effectués);
- * matière souple dans le cas de pièces en matière plastique.

La robotisation d'une telle tâche (Figure 1b) nécessite un contact permanent entre la fraise et la pièce, avec un suivi du contour réel inconnu, et avec une réaction R provenant de la coupe due à l'épaisseur (aléatoire) de la bavure.

De nombreux auteurs ont apporté leur contribution dans ce domaine [ROB84a, ROB84b]; on peut, en particulier, citer les travaux de Rodic [ROD 95] concernant la modélisation de la tâche d'ébavurage et sa commande permettant de limiter l'effort de contact tout en maintenant une force de coupe constante.

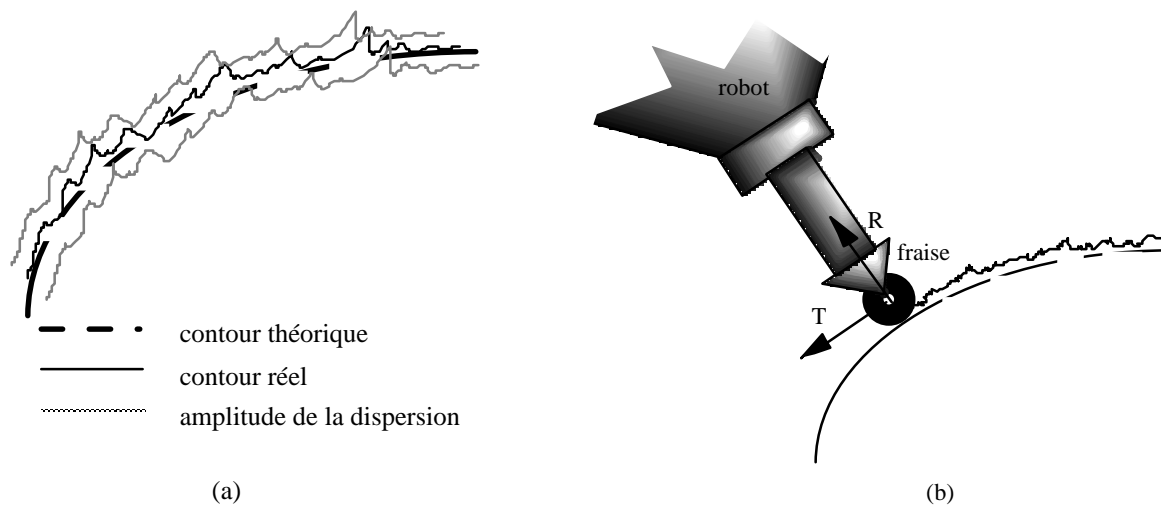


Figure 1 : Exemple de l'ébavurage

Ces exemples montrent que les tâches mettant en contact le robot avec son environnement nécessitent une certaine souplesse pour ne pas détériorer les pièces en contact. La souplesse est même parfois indispensable pour permettre la réalisation proprement dite de la tâche.

2. Définition de la compliance

Ce concept de comportement flexible du robot face à son environnement est désigné sous le terme de compliance (La traduction française exacte de ce terme, complaisance, est rarement utilisée).

La compliance peut être définie comme étant la capacité d'un manipulateur à avoir un comportement souple ; le robot compliant peut subir un déplacement sous l'effet d'un effort dû au contact du manipulateur avec son environnement, cet effort restant cependant dans des limites raisonnables pour la tâche considérée.

La compliance définit donc la capacité du manipulateur à s'adapter à son environnement pour la tâche qu'il a à accomplir. En effet, si le contact se faisait avec une raideur infinie, la moindre erreur de position se traduirait par l'apparition de forces excessives au point de contact.

Le concept de compliance a été étudié par de nombreux auteurs. On en trouve une formalisation mathématique en particulier dans [ROU 83] et [BAD 93].

Un contact en un point du dispositif engendre un couple (effort/déplacement) en un autre point du dispositif. Soit F , le torseur des forces et moments appliqués à ce point et D le torseur des déplacements linéaires et angulaires associés.

On a :

$$F = K(D)D + B(D)\frac{dD}{dt} + I(D)\frac{d^2D}{dt^2} \quad (1)$$

Cette expression décrit le mouvement d'un solide soumis à une force de frottement visqueux et à une force élastique de rappel.

Les matrices d'inertie $I(D)$, de frottement $B(D)$ et de raideur $K(D)$ sont des fonctions du déplacement D . Elle dépendent aussi du point considéré.

Ceci amène donc à établir un classement selon les différentes natures de la compliance :

Quand les forces appliquées au solide sont de nature élastique, nous aurons une compliance *élastique*. Dans le cas où les efforts appliqués sont du type frottement visqueux, la compliance sera *anélastique amortie*. Quand les forces agissant sur le solide sont dues aux masses en mouvement, nous avons une compliance *anélastique inertielle*.

Ces trois types de compliance sont le plus souvent couplés mais, très fréquemment, la compliance élastique est prédominante.

Dans ce cas, nous pouvons donc écrire :

$$F \approx K(D)D \quad (2)$$

Dans le cas où cette expression est bijective et où K peut être ramenée à une expression linéaire autour du point d'application des efforts, nous avons :

$$D = CF \quad (3)$$

Dans cette expression, C est la matrice de compliance du dispositif autour du point considéré. Elle représente l'inverse de la matrice de raideur K . D'une manière générale, la matrice C n'est pas diagonale, mais il existe une configuration particulière pour laquelle la matrice de compliance peut être rendue diagonale.

On appellera centre de compliance, le point pour lequel la matrice C est diagonale. Une force latérale exercée en ce point le déplace uniquement dans la direction de la force exercée. De même, un couple appliqué en ce point ne provoque qu'un déplacement angulaire. Le centre de compliance présente donc un découplage des mouvements résultants des efforts appliqués.

Les diverses natures de la compliance étant ainsi définies, nous pouvons encore distinguer deux méthodologies de mise en oeuvre de la compliance :

- *la compliance passive*, provenant exclusivement de la souplesse des structures et de leur capacité à absorber les erreurs de positionnement entre le robot et la tâche en se déformant naturellement sous l'effet des efforts de contact,
- *la compliance active*, nécessitant une détection des efforts de contact et étant pilotée par des actionneurs asservis.

3. Comment obtenir un comportement compliant de la part d'un robot ?

Une fois la notion de compliance définie, il convient de se poser la question de l'obtention d'un tel comportement pour une tâche de contact.

Considérons un robot effectuant une tâche, en contact avec son environnement (Figure 2).

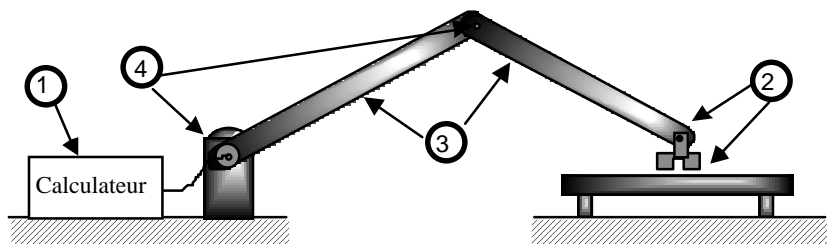


Figure 2 : Localisation de la compliance dans la chaîne cinématique

Nous pouvons schématiser cette chaîne de la façon suivante :

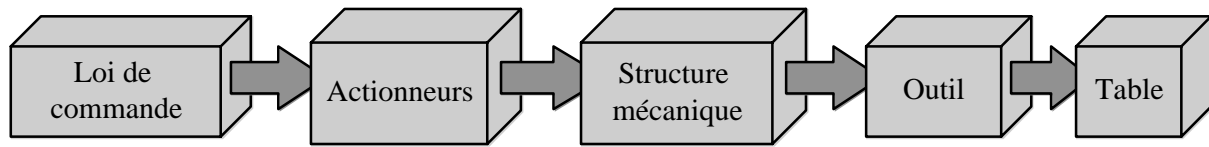


Figure 3 : Schéma de la chaîne robot-environnement

Un comportement globalement compliant sera obtenu en introduisant de la flexibilité dans cette chaîne.

Dans un premier temps, on peut tenter d'obtenir cette flexibilité de façon logicielle uniquement (1). En effet, cela semble être une solution relativement simple et "propre" à mettre en oeuvre, car elle n'implique pas de modification mécanique de l'ensemble robot-environnement.

Une deuxième solution (2), ne modifiant pas non plus la structure même du robot, consiste à ajouter un organe flexible au point de contact. Cet organe sera soit fixé en bout de robot, en tant que poignet compliant, soit sur l'environnement (table compliant).

La troisième solution consiste à concevoir un robot possédant une structure mécanique volontairement souple (solution 3), par l'utilisation de bras flexibles.

La dernière solution envisagée déporte la compliance dans les actionneurs (solution 4). La souplesse de l'actionneur se répercutera ainsi au point de contact, par l'intermédiaire de la matrice jacobienne.

Nous analysons maintenant ces différents mode d'obtention de la compliance, afin de comparer leurs performances respectives.

3.1. La compliance logicielle : les commandes compliantes

Le concept de compliance active nécessite de doter le robot de capteurs. Il utilise ces informations pour contrôler la trajectoire. Ceci conférera au robot un comportement compliant dans le sens où il minimise, ou tout au moins, limite les efforts de contact. Les techniques de commande compliantes peuvent être classées en deux catégories. La solution à adopter dépendra de la tâche que l'on doit accomplir.

Dans une première catégorie, on classera les tâches qui demandent une commande en position, mais qui en cas de contact ne doivent pas engendrer de force de contact infinie (ex : assemblage). Dans ce cas, on donnera uniquement une consigne en position (ou en vitesse selon la nature de la tâche et les performances recherchées).

Dans la seconde catégorie seront classées les tâches dont la force de contact doit être commandée selon une trajectoire de consigne (suivi de contour, ébavurage). Dans ce cas, on aura en général plusieurs consignes, dont au moins une en effort.

Plusieurs types de commande induisant un comportement compliant au robot sont décrits [DOM 88] et comparés [GOL92] dans la littérature.

3.1.1. Commande par retour d'effort explicite

Cette loi de commande est née des travaux de Nevins et Whitney ([NEV80] et [WHI87]).

Avec cette méthode, le robot est commandé en position (ou en vitesse) et la mesure de l'effort est utilisée pour corriger le signal d'entrée. En fait, d'une manière générale, le robot est piloté en position ; il suit sa trajectoire de consigne. Dès qu'un effort extérieur apparaît, c'est-à-dire dès que l'outil du robot rencontre son environnement, l'effort de contact apparaissant est alors détecté. Cette information en effort est ensuite utilisée pour modifier la commande en position. La commande s'adapte donc à l'environnement. La force mesurée intervient sur la commande par l'intermédiaire d'une matrice C_F ayant pour dimension l'inverse d'une raideur. Le déplacement ΔX , duquel la consigne sera diminuée, sera alors proportionnel à la force mesurée :

$$\Delta X = C_F F \quad (4)$$

où C_F est la matrice diagonale de retour d'effort.

La valeur de l'élément C_{fi} sera faible si le degré de liberté correspondant est commandé en position et importante s'il est commandé en effort, de manière à pouvoir augmenter la compliance.

On représente le principe de fonctionnement de cette méthode par le diagramme de la Figure 4.

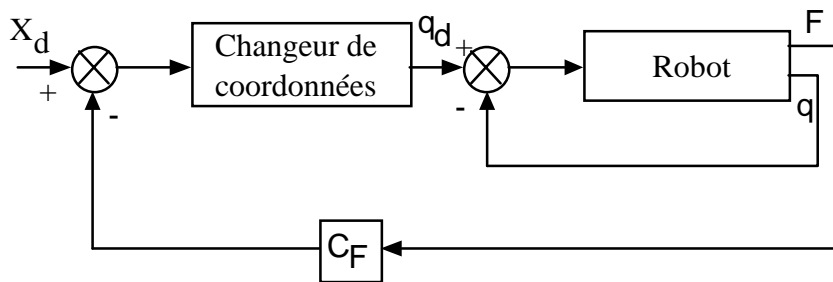


Figure 4 : Principe de la commande par retour d'effort explicite

On peut utiliser le même principe quand le robot est commandé en vitesse. Dans ce cas, la matrice de retour est une matrice d'amortissement.

3.1.2. Commande en impédance

Ce type de commande a été introduit par Hogan en 1985 [HOG 85] et a également été étudiée au LAI [OMB 96].

Quand le robot est en contact avec l'environnement, il y a interaction entre eux. Il doit donc y avoir compatibilité physique entre eux. L'idée de base de la commande en impédance repose sur le fait que si le robot se comporte comme une impédance mécanique, l'environnement se comportera comme une admittance mécanique ; de sorte que le robot puisse faire face aux contraintes en position imposées par l'environnement.

Le vecteur de commande choisi pour piloter le robot à la fois en position et en vitesse, tout en maintenant un couple de consigne Γ_d est le suivant :

$$\Gamma - \Gamma_d = J^T [K_P (X_d - X) + K_V (\dot{X}_d - \dot{X})] \quad (5)$$

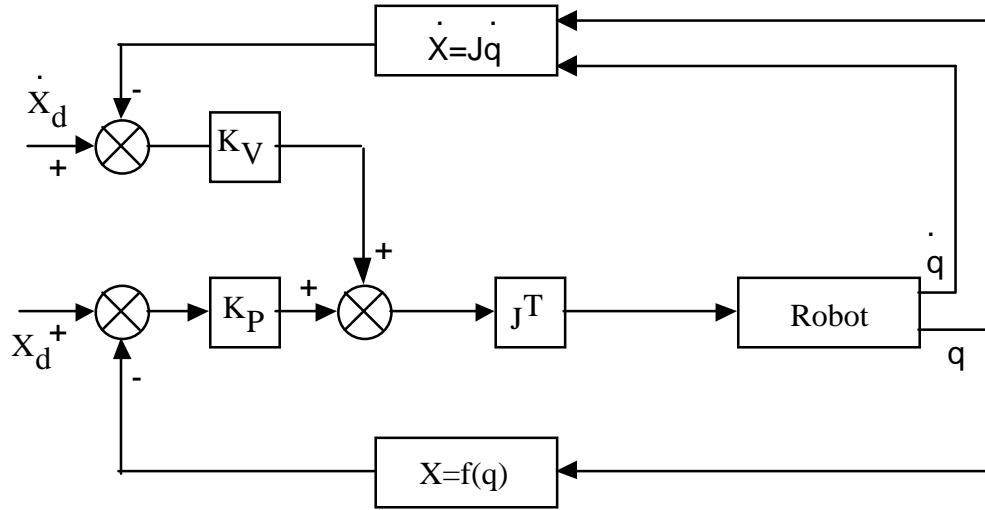


Figure 5 : Principe de la commande en impédance

La matrice K_P est choisie en fonction de la tâche compliant à réaliser. C'est une matrice diagonale dont les termes seront faibles lorsqu'ils correspondent à un degré de liberté commandé en effort et importants quand le degré de liberté est commandé en position. Les éléments de K_V déterminent l'amortissement dans chaque direction. La commande en impédance consiste donc à réguler l'interaction dynamique entre un robot et son environnement directement dans l'espace de la tâche en engendrant la commande précédente dans l'espace articulaire.

L'avantage de cette méthode est qu'elle ne nécessite pas l'inversion de la matrice jacobienne.

En 1995, Volpe et Khosla [VOL 95] ont montré qu'un contrôle d'impédance du second ordre donnait des résultats équivalents à une commande par retour d'effort explicite.

3.1.3. Commande par raideur active

En 1980, Salisbury [SAL80] propose de contrôler activement la raideur apparente d'un manipulateur. La raideur est changée de façon logicielle pour pouvoir s'adapter aux évolutions de la tâche. L'idée de cette commande consiste à contrôler simultanément le robot en force et en position.

Cette méthode définit, en statique, une fonction linéaire qui lie les forces d'interaction à la position finale du manipulateur, via une matrice de raideur en coordonnées cartésiennes.

$$F_C = K_C \Delta D_C \quad (6)$$

avec :

F_C : effort de contact

K_C : matrice de raideur souhaitée

ΔD_C : déplacement différentiel

Le vecteur-couple différentiel des actionneurs est donné par la relation suivante :

$$\Delta \Gamma = J^T F_C \quad (7)$$

où J est la matrice jacobienne du manipulateur.

Donc : $\Delta D_C = J \Delta q$

où dq représente le vecteur des variables articulaires.

On obtient alors la relation suivante dans l'espace des variables articulaires :

$$\Delta \Gamma = \underbrace{J^T K_C J}_{K_q} \Delta q \quad (8)$$

où K_q représente la matrice de raideur dans l'espace articulaire.

La commande a pour principe de superposer des forces de biais sur le comportement raide précédemment décrit. Cela permet d'appliquer des forces indépendantes de la position. Le réglage de la raideur (donc de la compliance) se fera par l'intermédiaire du gain K_F .

$$\Gamma = K_q (q^d - q) + K_v (\dot{q}^d - \dot{q}) + J^T (F^d + K_F (F^d - F)) \quad (9)$$

Cette loi de commande est représentée par le diagramme fonctionnel de la Figure 6.

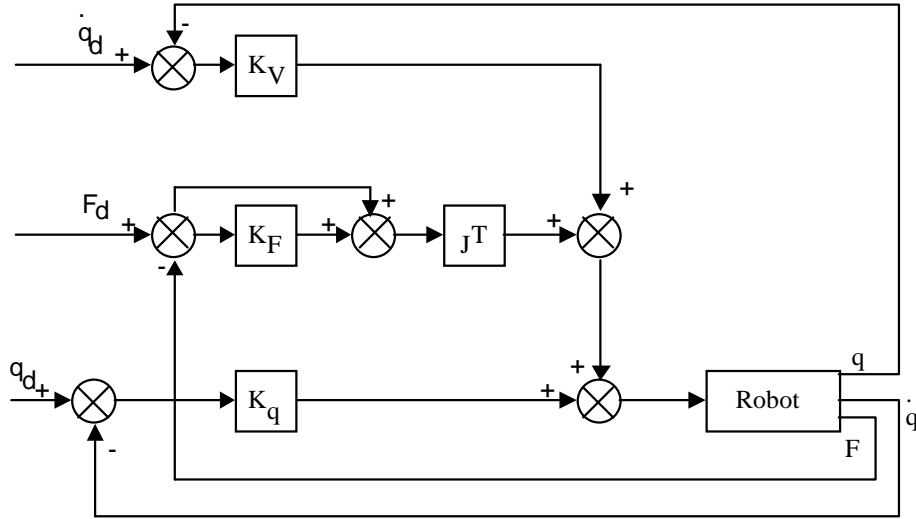


Figure 6 : Principe de la commande par raideur active

3.1.4. Commande hybride

Ce type de commande a été proposé par Raibert et Craig [RAI 81]. Elle a ensuite été reprise par de nombreux auteurs, dont [ZAN 85].

L'idée originale de cette méthode est déduite de la constatation suivante : un même degré de liberté ne peut être commandé à la fois en force et en position. En effet, ces deux types de contrôle sont antagonistes. D'où l'idée de partitionner l'espace en deux sous-espaces : l'un contenant les degrés de liberté commandés en position et l'autre les degrés de liberté pilotés en force. Puisqu'un même actionneur peut intervenir sur plusieurs degrés de liberté, le principe de la commande hybride consiste à envoyer simultanément aux actionneurs des contributions en position et en effort.

On note S , la matrice de sélection qui désigne le type de commande nécessaire pour chaque degré de liberté. En général S est diagonale. L'élément s_i sera égal à 1 si le degré de liberté est commandé en position et 0 s'il est commandé en effort.

Le système subissant une série de contraintes physiques, la commande hybride impose à l'organe terminal une série duale de contraintes artificielles choisies de façon à obtenir la trajectoire désirée et à appliquer à l'environnement les forces souhaitées.

La structure de commande peut être représentée par le schéma fonctionnel de la Figure 7.

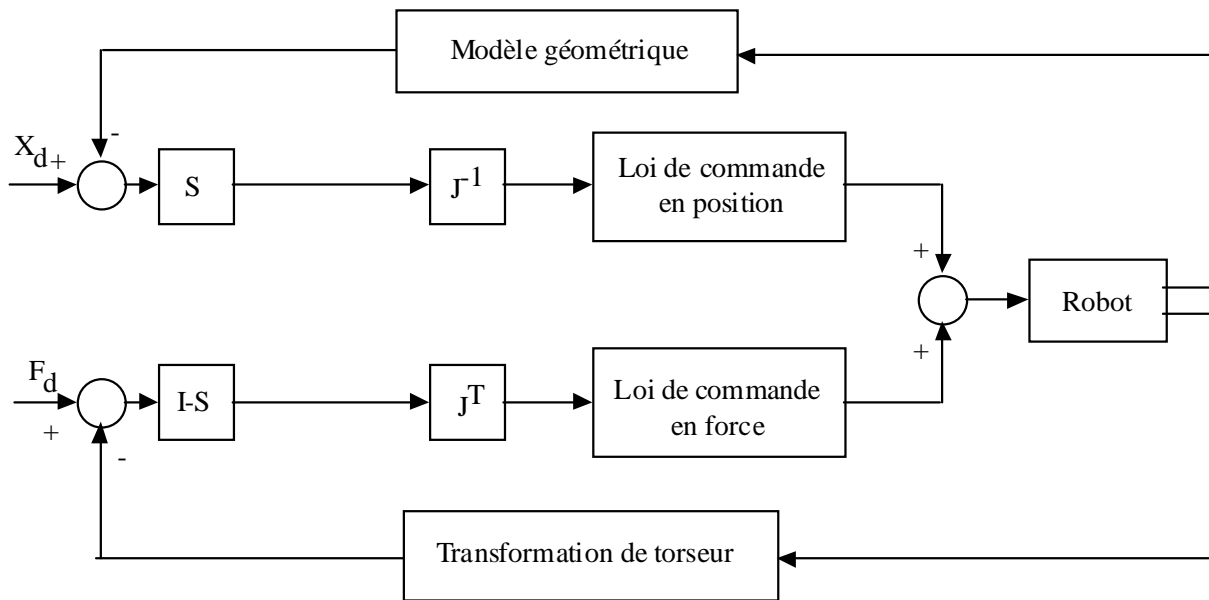


Figure 7 : Principe de la commande hybride

Cette technique de commande est bien adaptée aux applications nécessitant des commandes différentes dans différentes directions. Par exemple, l'ébavurage nécessite une commande en position dans l'axe radial et une commande en effort dans l'axe transversal à la surface à ébavurer. Un inconvénient de cette stratégie de commande est qu'elle requiert l'inversion de la matrice jacobienne. De plus, Berthe [BER 95], dans sa thèse, met en avant un problème d'instabilité cinématique de la commande hybride. En effet, la condition suffisante de stabilité dépend de la matrice jacobienne, donc de la configuration du robot.

L'approche hybride permet de commander en force et en position, mais elle nécessite un modèle géométrique détaillé de l'environnement. D'autre part, les données provenant des capteurs passent par une

sélection liée à la tâche à exécuter. Par contre, une commande en impédance est capable de s'adapter à une classe d'environnement, mais sans contrôler à la fois la force et la position.

Le contrôle simultané en force et en position peut également être obtenu par commande parallèle [CHI 93]. La commande parallèle combine les avantages des deux méthodes décrites précédemment. Ici, la commande en force est calculée de façon à prévaloir sur la commande en position en cas de conflit ; les déviations de la tâche planifiée donnent priorité à la commande en effort, en augmentant les gains de cette dernière. Par exemple, on peut utiliser une commande Proportionnelle-Intégrale en effort et une commande Proportionnelle-Dérivée en position.

Cette technique de commande a été rendue adaptative par Siciliano et Villani [SIC 96] en agissant sur les dynamiques du modèle ; elle améliore la poursuite de trajectoire, quand les paramètres sont mal estimés.

Nous pouvons aussi citer la commande compliant partagée décrite dans [KIM92]. Elle est utilisée dans le domaine de la téléopération ; les commandes classiques précédemment décrites fonctionnent bien quand le transfert prend moins d'une seconde entre l'opérateur et le manipulateur. Par contre, des retards de transmission importants (applications spatiales) causent des problèmes d'instabilité. La commande compliant partagée traite localement les forces de contact sans attendre la réaction de l'opérateur à ces efforts. La commande est partagée en ce sens que l'opérateur garde son contrôle manuel classique d'un côté et de l'autre, le robot à une fonction compliant autonome.

Les lois de commande conférant un comportement compliant au robot ne sont pas toujours adaptées ; parfois complexes à mettre en oeuvre expérimentalement et industriellement, elles ne donnent pas toujours un résultat satisfaisant. En effet, afin de garantir de bonnes précisions statique et dynamique, les concepteurs de robots industriels confèrent à sa structure une grande raideur mécanique, que l'on peut la plupart du temps considérer comme infinie. Dans ce cas, l'obtention d'un comportement compliant par logiciel ne confère pas toujours assez de souplesse au système, ou bien est parfois trop peu rapide. Les techniques de compliance décrites par la suite ont pour but d'introduire de la flexibilité dans la chaîne mécanique formée par les actionneurs, les bras du robot, l'outil, les pièces et la table de travail.

3.2. Les organes compliants

Cette technique consiste à interposer dans la chaîne mécanique un organe compliant, soit au niveau du poignet du robot, soit dans la table de travail.

L'avantage de cette solution est qu'elle peut s'adapter à n'importe quel robot existant. En effet, aucune aptitude particulière du robot n'est requise en ce qui concerne sa compliance naturelle, puisqu'on insère dans le premier cas entre le robot et son organe terminal un dispositif qui rendra le système complet compliant ; la

seconde solution n'intervient pas directement sur le robot. L'organe se déformera donc sous l'effet des efforts de contact pour permettre la correction des erreurs de positionnement et/ou d'orientation.

Depuis plus de trente ans, de nombreux *organes compliant passifs* ont été étudiés et développés, tant dans les laboratoires de recherche universitaires que dans les bureaux d'étude industriels. L'intérêt de cette technique est qu'elle est simple à mettre en oeuvre, car elle ne nécessite ni capteur ni loi de commande sophistiquée : elle utilise seulement l'élasticité appropriée des composants de l'organe compliant. Un intérêt supplémentaire de cette technique est que l'on obtient en général des réponses rapides. De plus, les systèmes compliant passifs sont peu chers et relativement fiables en exploitation en milieu industriel.

Le plus connu et le plus utilisé industriellement est sans doute le RCC (Remote Center Compliance) [WAT78]. Ce dispositif élastique constitué de liens flexibles est à l'origine de nombreux autres organes. On peut trouver un grand nombre de références traitant de ces dispositifs ([CAL80], [FAK85], [JUT89], [ASA90], [NGU95], [ROU83]).

Ces organes passifs sont en grande partie destinés au domaine de l'assemblage. Ceci peut s'expliquer par le fait que, dans ce domaine, les critères à satisfaire sont les suivants : réussite de l'insertion le plus rapidement possible et sans blocage. Il y a d'autre part, une forte demande industrielle, car on admet qu'environ un tiers des tâches sont des tâches d'assemblage, les organes passifs étant simples et sans commande sophistiquée, ils sont souvent à même de remplir ces objectifs.

Par contre, l'inconvénient majeur de telles méthodes réside dans le fait que la compliance est fixée a priori pour une tâche donnée et cela nécessite de changer l'élément compliant pour toute nouvelle application.

Pour certaines applications, de suivi de contour par exemple, il est nécessaire de limiter l'effort de contact, ou même de l'asservir. Dans ce cas, on fait appel à la *compliance active*.

Contrairement aux dispositifs précédemment décrits, les *organes compliant actifs* sont pilotés par des actionneurs asservis. Leurs déplacements en réponse à une mesure de l'effort de contact peuvent être contrôlés. On aura donc un bouclage entre les efforts ressentis par les différents capteurs et l'action correctrice. Dans ce cas, les déplacements sont engendrés par des actionneurs qui répondent à une loi de commande cherchant à annuler ou à minimiser les efforts de contact.

La compliance active utilise un (ou des) capteur(s) comme moyen de détection de l'effort et/ou de la position entre le robot et la tâche. Une loi de commande minimisera alors un critère qui, suivant les cas, peut être une erreur de position, ou un effort (effort dans le sens de l'insertion en cas d'assemblage par exemple).

Un système de compliance active nécessite trois types d'éléments :

- des capteurs pour détecter la position relative du robot par rapport à son environnement,
- une loi de commande pilotant la compliance,
- un ou plusieurs actionneurs exécutant la correction.

Pour détecter les erreurs de positionnement on peut utiliser des capteurs de déplacement, mais compte-tenu de la très faible amplitude des ces déplacements, il est souvent préférable de mettre en oeuvre des capteurs d'effort montés en association avec des éléments déformables pré-étalonnés. La sensibilité s'en trouve ainsi fortement améliorée. D'autres technologies (capteurs de proximétrie, capteurs tactiles ou vision) peuvent être envisagées, mais la sensibilité et la qualité de la mesure sont moins bonnes.

Là encore, comme en compliance passive, on trouve de nombreuses réalisations d'organes compliant dans la littérature. ([BRU81], [CUT84], [HIG87], [BER89], [HOL91], [SAL 94]).

Les organes compliant fixés à l'extrémité du robot ont donc largement été étudiés. Ils offrent l'avantage d'être adaptables à n'importe quel robot industriel. Par contre, leur inconvénient majeur vient de la masse non négligeable qu'ils ajoutent en bout de bras. Les inerties, ainsi présentes quand le robot est en mouvement, engendrent des problèmes d'imprécision et d'oscillation qui rendent complexe la commande de position du robot. De plus, ils limitent la charge utile du robot.

Pour pallier ces inconvénients, tout en insérant toujours un organe compliant au point de contact, il suffit de doter l'environnement de souplesse sous la forme d'une *table compliant* passive ou active. L'utilisation d'une telle table permet ainsi de conserver une charge transportable maximale pour le robot.

Notons que plusieurs réalisations de poignets compliant peuvent se transformer sans problème majeur en table compliant.

3.3. Compliance intrinsèque à la structure mécanique

Une autre solution compliant prend en compte la souplesse de la structure mécanique. Pour cela, des équipes de recherche se sont penchées sur l'étude des segments flexibles.

La souplesse de la structure mécanique d'un robot provient généralement de la souplesse des bras.

Cette souplesse résulte en général d'un mauvais choix des éléments technologiques : sections trop faibles, bras trop longs...

Cependant cette souplesse peut être volontairement recherchée dans le but de doter le robot d'un comportement compliant, ce qui semble constituer un avantage puisqu'il n'est pas alors nécessaire de rajouter un organe compliant à son extrémité. Par ailleurs, cette souplesse se traduisant technologiquement par des bras de sections et de masses moindres, il est toujours intéressant d'alléger le plus possible le robot afin de diminuer les masses en mouvement et les inerties : il peut en résulter alors une augmentation de la rapidité et une diminution de la taille (donc du coût) des actionneurs.

Malheureusement, cette structure allégée rend le robot assez fortement oscillatoire en mode transitoire et sa commande en devient alors très délicate.

De nombreuses équipes de recherche ont travaillé sur la modélisation [BAU96] et la commande de bras flexibles [PHA93]. Nous pouvons par exemple citer les travaux de Matsuno [MAT94] concernant la commande

hybride force/position d'un manipulateur à deux degrés de liberté, formé de deux bras flexibles en séries. Ce manipulateur est capable de se déplacer le long d'une surface à une vitesse de 2.1 cm/s tout en maintenant un effort de 19.6 N. Des expérimentations menées à une vitesse supérieure ont conduit à des problèmes de vibration causant l'instabilité. Les résultats obtenus sont donc souvent décevants : en effet, si les solutions théoriques, ou de laboratoire, peuvent exister pour éliminer ces phénomènes oscillatoires néfastes, leur mise en oeuvre au plan matériel et logiciel est lourde, onéreuse et en général non-compatible avec les impératifs industriels de coût, de fiabilité, d'encombrement...

La modélisation et la commande de tels segments étant par ailleurs largement étudiée, nous nous sommes naturellement intéressées à la solution proposant l'emploi d'actionneurs compliants.

3.4. Les actionneurs compliants

Une autre stratégie pour rendre un robot industriel compliant consiste non plus à ajouter un organe compliant, poignet ou table, pour permettre une adaptation entre le robot et son environnement mais à déporter la compliance dans les actionneurs. A priori, cette technique est intéressante, car elle n'ajoute pas de masse supplémentaire en bout de robot. Cela minimise les problèmes dynamiques dus à une inertie trop importante et permet d'augmenter la charge portée par le robot. De plus, le même actionneur ayant pour mission de déplacer le robot en l'absence de contact, puis de contrôler sa compliance lors du contact, nous conférons au manipulateur une compliance active, car cette dernière pourra être pilotée selon la tâche à accomplir. La loi de commande appliquée à l'actionneur devra, selon la configuration du robot, asservir le robot en position ou contrôler sa compliance.

Nous allons considérer les trois énergies généralement utilisées pour piloter un robot : électrique, hydraulique et pneumatique.

3.4.1. Les actionneurs électriques

3.4.1.1. Cas idéal

Nous considérons dans un premier temps le cas idéal d'un axe électrique asservi classique. Il est, par exemple, piloté par un moteur à courant continu commandé en courant, avec les hypothèses suivantes :

- frottements négligeables,
- réducteur parfait (rendement égal à 1, donc complètement réversible quel que soit le rapport de réduction),
- transmission de raideur infinie,
- asservissement effectué par contrôle tachymétrique.

Dans ces conditions, ce type d'axe asservi peut être représenté par le schéma fonctionnel de la Figure 8.

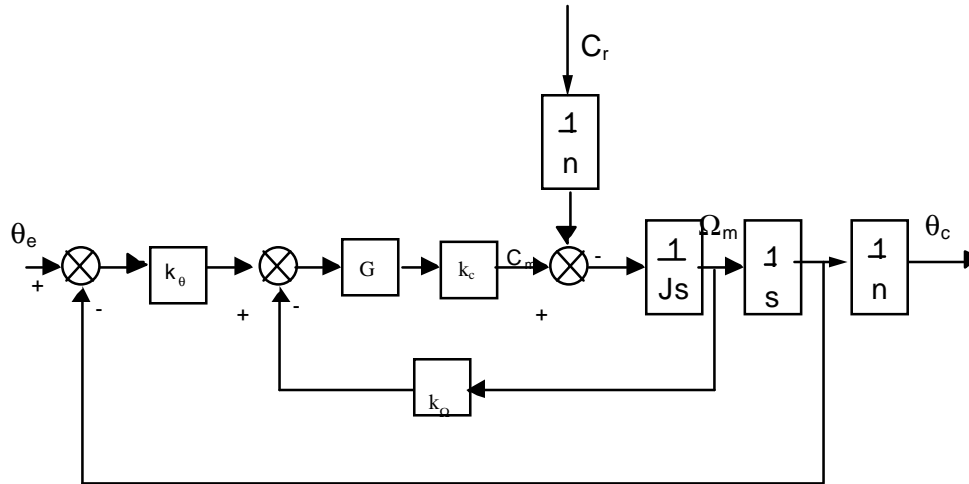


Figure 8 : Schéma fonctionnel d'un moteur asservi

avec :

G : gain de l'amplificateur tension-courant

J : inertie du moteur et de la charge

C_r : couple extérieur

n : rapport de réduction du réducteur

k_c : constante de couple du moteur

k_θ : gain de retour en position

k_Ω : gain de retour en vitesse

θ_c : position angulaire de l'arbre de sortie

θ_e : consigne en position

Ω_m : vitesse angulaire du moteur

La compliance statique de cet axe est définie par le rapport $\left. \frac{\theta_c(s)}{C_r(s)} \right|_{s=0}$.

Dans ces conditions, un calcul simple conduit à :

$$\left. \frac{\theta_c(s)}{C_r(s)} \right|_{s=0} = \frac{1}{n^2 k_c k_\theta G} \quad (10)$$

Ce résultat suggère plusieurs remarques :

- la stabilité de cet axe asservi dépend, entre autres, des réglages de k_Ω et k_θ , la compliance statique ne dépendant que de k_θ : il est donc possible de fixer la compliance à la valeur souhaitée, par k_θ ou G (le système étant modélisé par un second ordre), puis de régler sa stabilité ; par exemple, telle que le dépassement soit nul, avec un temps de réponse le plus faible possible. Ce réglage est courant pour les

opérations effectuant un transfert (donc sans contrainte) jusqu'à la table de travail, car il évite les chocs trop importants contre la table,

- la compliance est fonction de l'inverse du carré du rapport de réduction.

En réalité, dans cette chaîne, l'élément réducteur présente un certain nombre d'imperfections qui peuvent modifier très fortement les résultats théoriques établis ci-dessus :

- Un jeu présent dans le réducteur peut nuire à la stabilité de l'ensemble en introduisant de l'hystérésis. Cependant, il est maintenant courant de trouver des réducteurs avec très faible jeu, voire à jeu nul, donc ce problème peut être considéré comme résolu.

- La flexibilité présente dans le réducteur (notamment dans le cas de réducteurs de type Harmonic drive [BRI95] ou de transmissions par courroies) devra être prise en compte dès la modélisation, car elle introduit un comportement oscillatoire.

- L'hypothèse du réducteur parfait (rendement égal à un), c'est-à-dire réversible, est d'autant moins vérifiée en pratique que le rapport de réduction est important. En fonction de ce rapport, de la qualité de l'usinage du réducteur et de la technologie utilisée, une réversibilité partielle, puis l'irréversibilité apparaissent très rapidement. La compliance peut alors être nulle quels que soient les réglages de l'asservissement.

La Figure 9 représente qualitativement la relation entre la compliance et le rapport de réduction, ainsi que l'influence de l'irréversibilité.

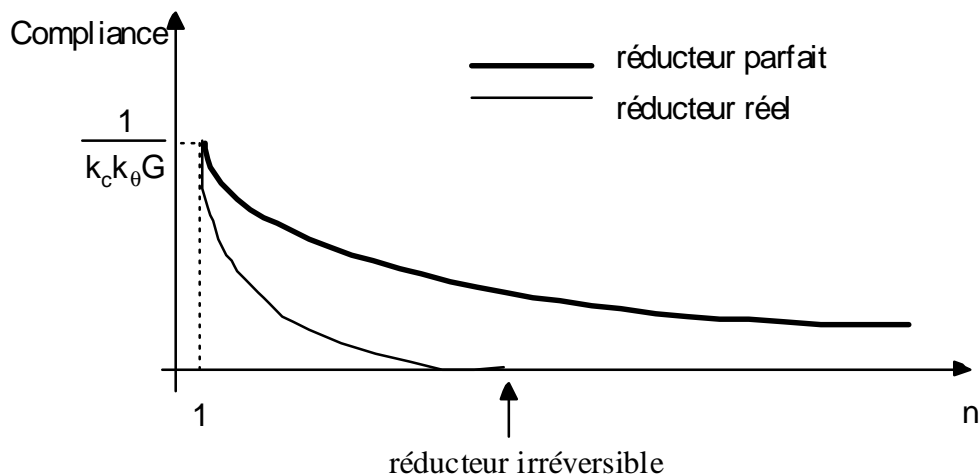


Figure 9 : Compliance en fonction du rapport de réduction

Une solution à ce problème consiste à utiliser un entraînement direct ($n=1$) avec un moteur possédant un couple important à faible vitesse, du type brushless, par exemple.

Dans le cas où ceci n'est pas réalisable, on s'attachera à choisir un rapport de réduction assez faible pour conférer à l'axe asservi une certaine compliance.

Nous allons maintenant analyser un axe asservi en prenant en compte la flexibilité présente dans la transmission. Cette flexibilité peut provenir à la fois du réducteur, des accouplements, des arbres et pièces de transmission.

3.4.1.2. Prise en compte de la flexibilité dans la transmission

Afin de faire apparaître à la fois la compliance liée à la flexibilité de la transmission et les difficultés qui en résultent pour le contrôle correct des oscillations, nous nous proposons d'étudier le comportement d'un axe de robot à actionnement électrique et dont la transmission est assurée par un réducteur de raideur non-infinie.

En fait, la souplesse de la transmission peut être considérée de deux points de vue différents :

- Elle peut être subie comme un défaut de la structure - c'est la cas le plus fréquent ; dans ce cas, on essaiera de minimiser ses effets.
- Elle peut être volontaire et utilisée à des fins de compliance.

Dans cet exemple, l'élasticité est localisée essentiellement au niveau du réducteur (de type Harmonic-Drive), mais l'étude reste valide pour toutes les raideurs de transmission comprises entre le réducteur et la charge (accouplement, axes de liaison...)

La partie mécanique de l'axe asservi est représentée par le schéma de la Figure 10.

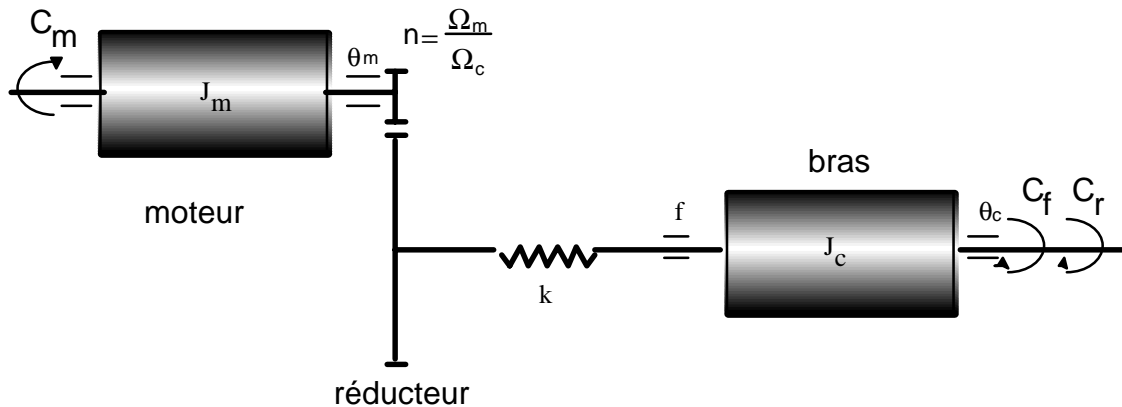


Figure 10 : Schéma de l'axe élastique

où:

J_m, J_c : inerties du moteur et du bras

θ_m, θ_c : positions du moteur et du bras

Ω_m, Ω_c : vitesses du moteur et du bras

C_m : couple moteur

C_r : couple extérieur

C_f : couple de frottement visqueux ($C_f = f \dot{\theta}_c$)

n : rapport de réduction

k : raideur en torsion de la transmission

f : coefficient de frottement visqueux

Cet axe est piloté par un moteur à courant continu commandé en courant.

Nous partons de l'hypothèse suivante : l'élasticité de l'articulation est modélisée par un ressort en torsion localisé sur l'axe de la charge juste à la sortie du réducteur.

D'après le formalisme de Lagrange, nous pouvons écrire les équations dynamiques du mouvement.

Soit $q = \begin{bmatrix} \theta_m \\ \theta_c \end{bmatrix}$, le vecteur des coordonnées donnant la position du moteur θ_m et la position de la charge θ_c .

Q est le vecteur de forces généralisées.

Nous avons :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = Q \quad (11)$$

avec $L(q, \dot{q}) = T(q, \dot{q}) - U(q)$, fonction de Lagrange.

Dans notre cas, l'énergie cinétique $T(q, \dot{q})$ est donnée par :

$$T(q, \dot{q}) = \frac{J_m \dot{\theta}_m^2}{2} + \frac{J_c \dot{\theta}_c^2}{2} \quad (12)$$

L'énergie potentielle se réduit ici au terme introduit par l'élasticité de la transmission, car nous avons considéré que les mouvements s'effectuaient dans le plan horizontal.

Aussi,

$$U(q) = \frac{k \left(\frac{\theta_m}{n} - \theta_c \right)^2}{2} \quad (13)$$

La fonction de Lagrange est donc définie par :

$$L = \frac{J_m \dot{\theta}_m^2}{2} + \frac{J_c \dot{\theta}_c^2}{2} - \frac{k \left(\frac{\theta_m}{n} - \theta_c \right)^2}{2} \quad (14)$$

Alors nous déduisons de (11) les équations mécaniques suivantes :

$$\begin{cases} J_m \ddot{\theta}_m - \frac{k}{n} \left(\frac{\theta_m}{n} - \theta_c \right) = C_m \\ J_c \ddot{\theta}_c + k \left(\frac{\theta_m}{n} - \theta_c \right) = -Cr - Cr_c \end{cases} \quad (15)$$

D'autre part,

$$C_m = k_c i \quad (16)$$

où

k_c : constante de couple du moteur

i : courant de commande

Nous pouvons maintenant présenter ce modèle sous forme de représentation d'état.

Le vecteur d'état choisi contient les positions et vitesses de l'arbre-moteur et de l'arbre de sortie.

$$X = [\theta_m \quad \Omega_m \quad \theta_c \quad \Omega_c]^T \quad (17)$$

Le modèle d'état s'écrit donc sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k}{J_m n^2} & 0 & \frac{k}{J_m n} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k}{J_c n} & 0 & -\frac{k}{J_c} & -\frac{f}{J_c} \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k_c}{J_m} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} I + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{J_c} \end{bmatrix} C_r \\ Y = [1 \quad 1 \quad 0 \quad 0] X \end{cases} \quad (18)$$

3.4.1.3. Commande de l'axe

Pour la commande d'un tel axe de robot, nous adoptons le schéma classique de commande par retour d'état. Nous supposons, comme c'est généralement le cas, que le moteur est muni d'un codeur et d'une génératrice tachymétrique. Nous avons ainsi accès à la mesure de la position et de la vitesse du moteur.

Nous effectuons donc un retour d'état partiel sur les variables d'état θ_m et Ω_m .

L'expression suivante donne la loi de commande proposée :

$$u = [k_\theta (\theta_{mc} - \theta_m) - k_\Omega \Omega_m] \quad (19)$$

où k_θ et k_Ω sont respectivement les gains en position et en vitesse,

θ_{mc} est la consigne en position du moteur,

u est la grandeur de commande.

Cette grandeur de commande que nous prenons en tension sera convertie en courant pour la commande du moteur grâce à un convertisseur tension-courant.

Le système en boucle fermée est donc décrit par les équations d'état suivantes :

$$\frac{dX}{dt} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k}{J_m n^2} - \frac{k_c k_\theta G}{J_m} & -\frac{k_c k_\Omega G}{J_m} & \frac{k}{J_m n} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k}{J_c n} & 0 & -\frac{k}{J_c} & -\frac{f}{J_c} \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k_c k_\theta G}{J_m} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \theta_{mc} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{J_c} \end{bmatrix} C_r \quad (20)$$

Le schéma fonctionnel de la Figure 11 décrit ce système en boucle fermée.

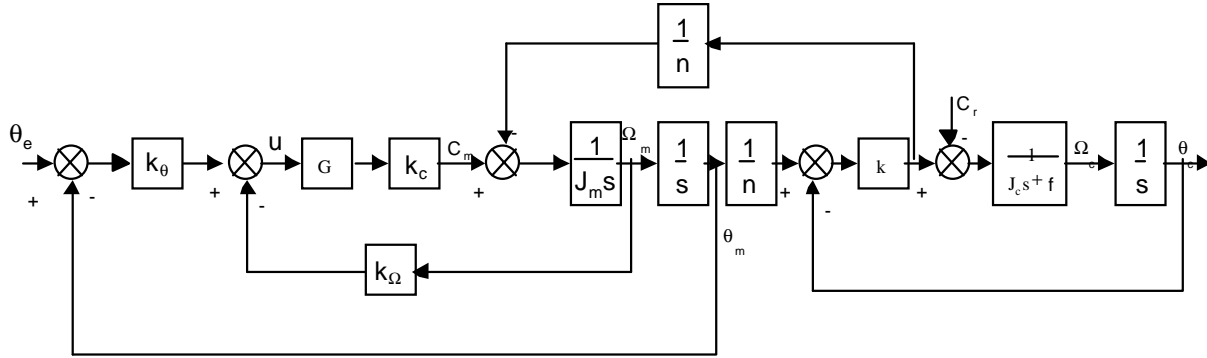


Figure 11 : Diagramme fonctionnel du système asservi

3.4.1.4. Compliance de l'axe asservi

La compliance dynamique est définie par la fonction de transfert entre la position θ_c et le couple extérieur C_r

:

$$\frac{\theta_c}{C_r} = \left(-\frac{1}{J_c} \right) \frac{s^2 + b_1 s + b_2}{s^4 + a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + a_4} \quad (21)$$

avec

$$\begin{cases} a_1 = \frac{f}{J_c} + \frac{k_c k_\Omega G}{J_m}, a_2 = \frac{k J_\Omega}{J_c J_m} + \frac{k_c k_\Omega G f}{J_c J_m} + \frac{k_c k_\theta G}{J_m} \\ a_3 = \frac{k f}{J_c J_m n^2} + \frac{k_c k_\Omega G k}{J_c J_m} + \frac{k_c k_\theta G f}{J_m J_c}, a_4 = \frac{k_c k_\theta G k}{J_m J_c} \\ b_1 = \frac{k_c k_\Omega G}{J_m}, b_2 = \frac{k}{J_m n^2} + \frac{k_c k_\theta G}{J_m} \end{cases}$$

De ces relations, nous pouvons déduire la compliance statique :

$$\left. \frac{\theta_c}{C_r} \right|_{s=0} = \left(\frac{1}{k} + \frac{1}{k_c k_\theta G n^2} \right) \quad (22)$$

La compliance statique de cet axe asservi est la somme de deux termes : le premier correspond à l'inverse de la raideur équivalente k introduite par la transmission, tandis que le second est, entre autres, fonction du gain de retour en position et du rapport de réduction n . Ceci paraît naturel. En effet, si l'on considère l'axe en boucle ouverte ($k_\theta = 0$), la compliance sera bien l'inverse de la raideur de l'axe. Le fait d'asservir le système revient à ajouter en série avec la raideur de l'axe une seconde raideur fonction de k_θ et n .

Il est à noter que si nous considérons un rapport de réduction très grand, la part de compliance due au second terme tend vers zéro. Si, de plus, on considère un axe de grande raideur (k infini), alors la compliance sera nulle. C'est bien ce qui est constaté dans la réalité.

3.4.1.5. Simulations et résultats réels

Dans le but d'observer le rôle de cette élasticité de l'axe dans la réponse du système, nous avons simulé ce système avec des paramètres réels. Nous avons pris pour exemple un axe asservi du robot ORCA (Hewlett Packard).

Les gains de retour d'état sont choisis de façon à obtenir une réponse à un échelon sans dépassement pour la position du moteur et avec un temps de réponse le plus faible possible.

La Figure 12 montre la position de l'arbre du moteur répondant à une consigne en échelon. Nous obtenons bien une réponse sans dépassement car les gains k_θ et k_Ω ont été choisis à cet effet.

La Figure 13 représente la position de la charge avec le même réglage. Nous obtenons en sortie des oscillations entretenues. Ces oscillations sont donc dues à la souplesse présentée par la transmission. On peut d'ailleurs également noter sur la réponse indicielle de la Figure 12, en régime permanent, de très faibles oscillations de même fréquence que celles obtenues sur la charge. Ceci est dû au couplage introduit entre les deux arbres par le réducteur. En effet, les oscillations sur l'arbre de sortie introduisent un couple sur l'arbre-moteur par l'intermédiaire du terme de couplage $\frac{1}{n}$ (Figure 11).

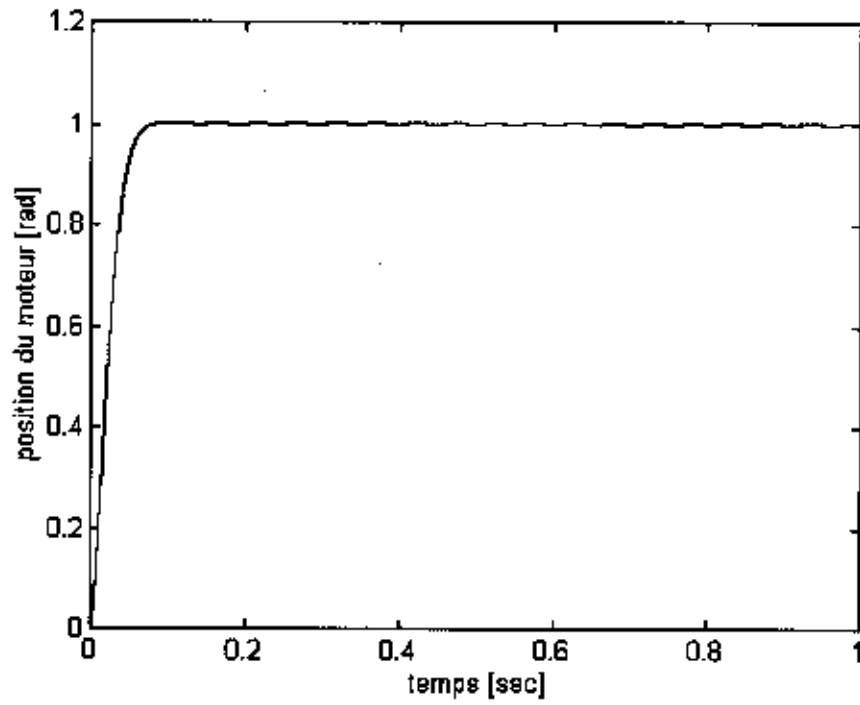


Figure 12 : Réponse indicielle simulée de l'arbre moteur

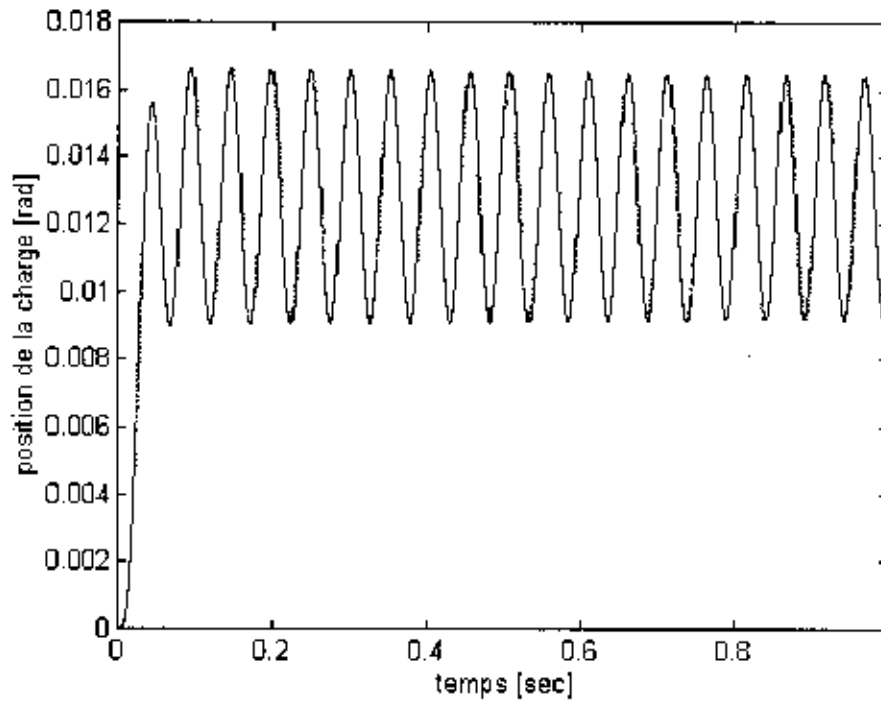


Figure 13 : Réponse indicielle simulée de la charge

Des mesures effectuées sur le robot ORCA donnent les résultats portés sur la Figure 14 [MIL93]. Nous observons les réponses indicielles réalisées expérimentalement. Les mesures sont effectuées en bout de bras par un capteur sans contact. Nous observons expérimentalement, les mêmes oscillations apparues dans la simulation. Cependant, on constate dans ces essais que ces oscillations sont amorties. Ceci est dû à l'amortissement interne de la couronne flexible et aux frottements négligés lors de la modélisation.

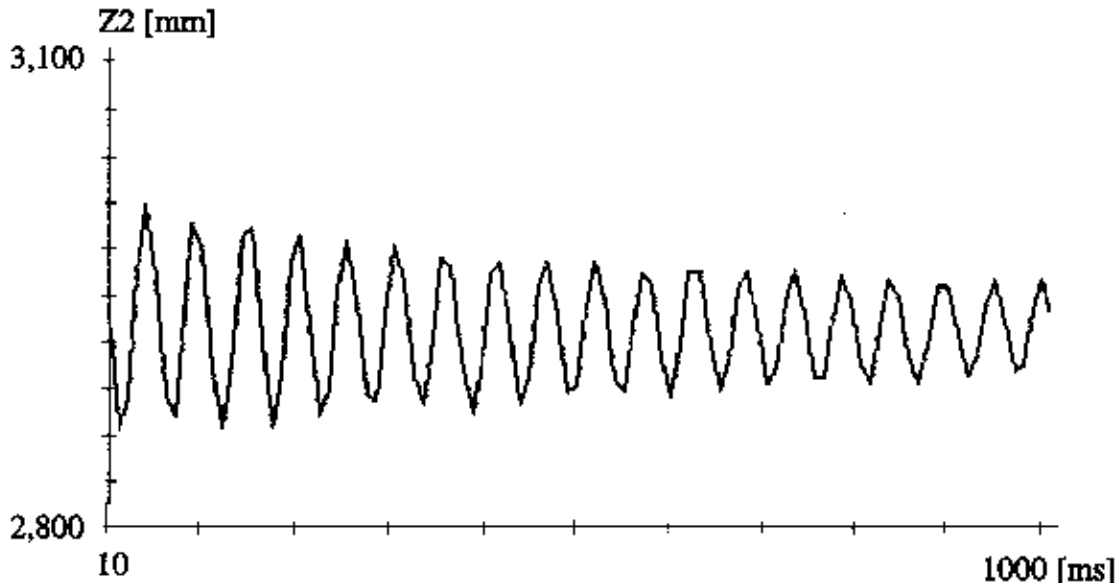


Figure 14 : Réponse indicielle expérimentale pour l'axe Z2

Le comportement oscillatoire mis en évidence théoriquement est donc vérifié expérimentalement.

Le fait d'ajouter de la flexibilité dans la transmission pour contourner le problème de l'irréversibilité du réducteur est difficilement exploitable si l'on garde uniquement des retours d'état sur les variables du moteur et non de la charge (problème aussi soulevé dans [MAE94]), car cela introduit des oscillations de l'arbre de sortie. Nous rencontrons ici le même problème qu'avec les bras flexibles.

L'utilisation d'une loi de commande par retour d'état, pour l'obtention d'un comportement compliant, implique une excellente réversibilité du réducteur ; ceci ne sera valable que pour de faibles rapports de réduction où dans le cas d'entraînement direct. C'est donc une solution qui a priori paraissait simple, mais qui se complique car elle nécessite soit la gestion de capteurs supplémentaires, soit l'étude d'une commande plus complexe pour minimiser les oscillations. Si l'on revient à notre but principal qui était de contrôler la compliance de l'ensemble, cela ajoute encore une difficulté dans la commande.

3.4.2. Les actionneurs fluidiques

Les actionneurs à fluide sous pression paraissent, d'un premier abord, intéressants car ils utilisent la pression (d'où la notion d'effort) pour créer des déplacements.

Nous pouvons, pour ce type d'actionneur, adopter le terme de "compliance inhérente". Cette appellation est en particulier développée par Kawamura et Hayakawa ([KAW94], [HAY95],) et se définit pour un vérin non-asservi, fonctionnant en chambre fermée conformément au schéma de la Figure 15.

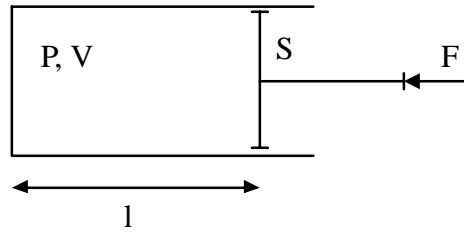


Figure 15 : Actionneur fluide en chambre fermée

où P : pression dans la chambre

V : volume de la chambre

S : section du vérin

F : force extérieure

En ce qui concerne *l'actionnement hydraulique*, l'expression du coefficient de compressibilité de l'huile, homogène à une pression, est définie par :

$$B = - \frac{dP}{\left(\frac{dV}{V}\right)} \quad (23)$$

De plus,

$$\begin{cases} F = SP \\ V = Sl \end{cases} \quad (24)$$

A partir de ces relations, la raideur d'un tel dispositif est donnée par :

$$\text{raideur} = \frac{1}{\text{compliance}} = \left| \frac{\partial F}{\partial l} \right| = \frac{BS^2}{V} \quad (25)$$

Nous constatons que la compliance ne dépend pas dans ce cas de la pression de l'huile. En effet, dans le cas d'une huile de bonne qualité, en particulier ne contenant pas ou très peu d'air dissous, B peut être considéré comme indépendant de la pression.

De la même manière, nous pouvons définir la compliance inhérente d'un *actionneur pneumatique*. Intuitivement, nous pouvons penser que, du fait de la compressibilité de l'air, ils ont naturellement une flexibilité inhérente [SCA89].

Dans une configuration identique à celle décrite précédemment et dans l'hypothèse d'une transformation adiabatique, on peut écrire :

$$PV^\gamma = \text{constante} \quad (26)$$

avec γ : rapport des chaleurs spécifiques

Un calcul, similaire à celui mené dans le cas hydraulique, conduit à

$$\text{raideur} = \frac{1}{\text{compliance}} = \left| \frac{\partial F}{\partial l} \right| = \frac{\gamma P S^2}{V} \quad (27)$$

Nous notons que, dans ce cas, la compliance est inversement proportionnelle à la pression dans la chambre du vérin. Elle sera donc fonction du point de fonctionnement, autour duquel elle évolue.

Nous constatons également que les ordres de grandeur des compliances inhérentes que l'on peut obtenir sont très différents : en effet, le coefficient de compressibilité B dans le cas hydraulique est sensiblement égal à $1.2 \cdot 10^9$ Pa alors que dans les conditions normales d'utilisation de l'énergie pneumatique la quantité γP ne dépasse pas 10^6 Pa. Il en résulte un rapport de l'ordre de 1000 dans les valeurs de compliance inhérente d'une énergie à l'autre.

Ainsi, si les comportements, au niveau de la compliance sont comparables, les domaines d'application sont très différents.

Cet usage de l'actionneur fluide en chambre fermée est en fait plutôt à répertorier dans la classe des dispositifs compliants passifs, dont on peut ajuster au préalable la compliance en changeant la pression interne.

La littérature montre que l'énergie pneumatique a plus été utilisée dans un but compliant que l'énergie hydraulique, car plus propre et plus aisée à mettre en oeuvre

En 1995, Ben-Dov et Salcudean [BEN 95] ont étudié un actionneur composé de deux vérins asservis montés en opposition.

Les deux vérins sont équipés de capteurs de pression et sont pilotés indépendamment par deux servovalves (Figure 16).

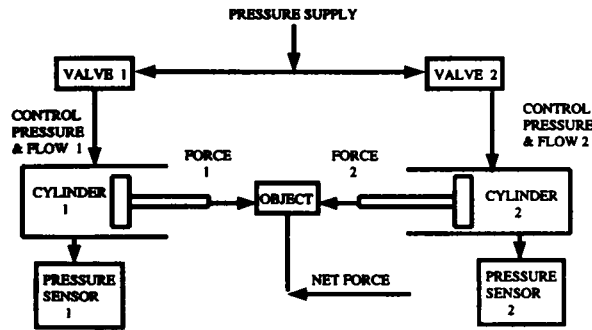


Figure 16 : Actionneur pneumatique à deux vérins

Les tiges des vérins sont reliées à une même masse. La force exercée par l'actionneur sur la masse est proportionnelle à la différence de pression entre les deux chambres. Pour piloter l'actionneur, une seule servovalve 5 voies est nécessaire, mais pour une commande plus flexible deux servovalves sont utilisées. En effet, dans ce cas, le point d'équilibre peut être modifié facilement par logiciel en agissant sur les pressions d'équilibre. On modifie ainsi les performances dynamiques et on améliore la répétabilité en force. Le système est commandé à travers un correcteur par avance-retard de phase en série avec un filtre passe-bas atténuant le bruit de mesure.

La même année, Tondu ([TON 94]) présente un autre type d'actionneur pneumatique souple, composé de muscles artificiels en caoutchouc (inventés dans les années 50 par Mc Kibben).

Durant ses travaux, Tondu a modélisé un actionneur à deux muscles montés en opposition (Figure 17).

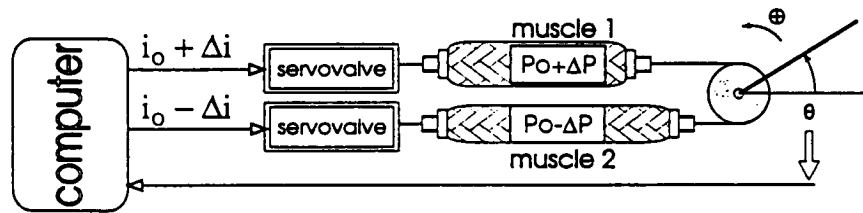


Figure 17 : Actionneur à muscles artificiels

Un muscle artificiel est constitué d'un tube intérieur fin en caoutchouc recouvert d'une corde tressée en double hélice. Une force de contraction est produite quand le muscle gonfle réduisant sa longueur et augmentant son diamètre. Le modèle donné décrit la façon dont le muscle convertit les forces radiales engendrées par la pression en force de contraction grâce au réseau de pantographes formé par la tresse. La force développée est importante par rapport à la masse de l'actionneur. Dans [VIA96] est montré l'intérêt d'une commande floue de cet actionneur fortement non linéaire; ce type d'approche, ne contenant pas d'action intégrale ayant, de plus, l'avantage de préserver la compliance naturelle de l'actionneur. Parallèlement, Prior [PRI97], étudiant la même

structure à muscles montés en opposition, observe la modification possible de la compliance par changement de pression.

4. Conclusions : comparaison des différentes méthodes

L'étude précédente nous permet de dresser le tableau comparatif suivant, énonçant les avantages et inconvénients des techniques passives et actives.

	AVANTAGES	INCONVENIENTS
COMPLIANCE PASSIVE	<ul style="list-style-type: none"> • peu chère • fiable • simple à mettre en oeuvre • réponses rapides 	<ul style="list-style-type: none"> • dédiée à une seule application • ne contrôle pas l'effort de contact
COMPLIANCE ACTIVE	<ul style="list-style-type: none"> • adaptable suivant la tâche • commande fine des efforts de contact 	<ul style="list-style-type: none"> • nécessite une loi de commande • nécessite des actionneurs et capteurs supplémentaires • complexe • onéreuse • fiabilité moyenne en milieu industriel

De plus, l'éventail des solutions envisagées dans ce chapitre fait ressortir des points forts et des points faibles pour chacune des méthodes. Nous les résumons dans le tableau 1.

Nous pouvons ainsi définir une méthodologie pour concevoir un système compliant.

Dans un premier temps, nous nous intéressons à la tâche compliant que nous souhaitons effectuer. Il nous faut savoir quel type de tâche nous aurons à effectuer. Si la tâche est susceptible de changer dans le temps ou si l'environnement est mal connu ou de raideur variable, la stratégie sera plutôt de choisir une compliance active. Par contre, si c'est une tâche unique et répétitive, nous opterons pour une solution passive dont la compliance est définie au départ. En effet, il n'est pas nécessaire de développer une compliance active qui peut s'avérer coûteuse et exagérément complexe si la tâche est très simple et répétitive.

Une fois ce choix fait, il faut définir la tâche proprement dite et la situer dans son contexte (par exemple dans une chaîne de production) et savoir si l'on dispose déjà d'éléments imposés (par exemple un robot). Ceci éliminera certaines solutions non adaptées à la situation. Par exemple l'utilisation de tables compliantes dans certaines chaînes d'assemblage est impensable car trop complexe à mettre en oeuvre. De même que l'on se dirigera plutôt vers la fixation d'un organe compliant à l'extrémité du robot déjà présent sur le site pour pouvoir

s'adapter facilement à l'environnement. Le cadre de la manipulation nous indiquera aussi l'énergie à adopter (pneumatique, électrique...).

TECHNOLOGIE UTILISEE	AVANTAGES	INCONVENIENTS
Organe compliant passif	<ul style="list-style-type: none"> • rapide, simple, fiable • adaptable à un robot industriel 	<ul style="list-style-type: none"> • peu adaptatif • masse additionnelle
Organe compliant actif	<ul style="list-style-type: none"> • adaptable à plusieurs tâches • adaptable à un robot industriel 	<ul style="list-style-type: none"> • masse additionnelle • coût élevé • fiabilité moyenne
Table compliant	<ul style="list-style-type: none"> • pas de masse additionnelle • adaptable à un robot industriel 	<ul style="list-style-type: none"> • difficilement applicable sur une chaîne de production
Actionneur électrique	<ul style="list-style-type: none"> • pas de modification du robot 	<ul style="list-style-type: none"> • irréversibilité du réducteur
Actionneur fluide	<ul style="list-style-type: none"> • pas de modification du robot 	<ul style="list-style-type: none"> • mouvement de translation • mise en oeuvre onéreuse • frottements importants
Bras flexible	<ul style="list-style-type: none"> • robot souple, léger 	<ul style="list-style-type: none"> • conception d'un robot particulier • oscillatoire • contrôle complexe • peu adaptatif
Transmission flexible	<ul style="list-style-type: none"> • simple 	<ul style="list-style-type: none"> • oscillations • contrôle très complexe • peu adaptatif
Commande compliant	<ul style="list-style-type: none"> • pas de modification du robot • adaptable à plusieurs tâches 	<ul style="list-style-type: none"> • parfois lent • trop complexe

Tableau 1 : Comparaison des solutions compliantes

Pour notre part, nous avons opté pour un actionneur pneumatique à soufflet métallique, combinant flexibilité pneumatique et mécanique. Nous bénéficions ainsi au départ d'un "potentiel compliant" important que l'on cherchera à ajuster selon le besoin par la loi de commande.

Le chapitre suivant est consacré aux actionneurs que nous avons choisis. Après une synthèse bibliographique sur ce thème, nous présentons le modèle utilisé ainsi que les propriétés particulières de ce type d'actionneur.